

16^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 25 AU 27/09/19

L'intelligence artificielle
et la topographie



Sommaire

Mot du directeur	-----	p. 4
Programme	-----	p. 5
Salon des exposants	-----	p. 6
Conférence: « L'intelligence artificielle et la topographie »	-----	p. 7
Équipe des Journées de la topographie 2019	-----	p. 8
Ordre de passage des PFE	-----	p. 9
Résumés des PFE	-----	p. 15

≡ Mot du directeur

Les collègues impliqués dans la formation et les élèves ingénieurs ont su au cours des années transformer les soutenances des projets de fin d'études (PFE) de la spécialité topographie en un événement majeur qui rayonne bien au-delà de l'INSA Strasbourg. Ainsi si les 16^e Journées de la topographie (JDT) 2019 sont évidemment marquées par ces soutenances de PFE, dernière étape vers le diplôme et démonstration de professionnalisme, elles sont aussi l'occasion d'accueillir des entreprises de plus en plus nombreuses (le record historique est largement dépassé), venues de toutes les régions de France pour exposer leur matériel ou leurs solutions logicielles et échanger avec les élèves. L'Association française de topographie (AFT), dans laquelle sont investis de nombreux collègues, a choisi de tenir son conseil lors des JDT. L'Ordre des géomètres-experts, soutien fidèle et très impliqué depuis les débuts, sera à nouveau au rendez-vous.

L'organisation des JDT se fait toujours avec l'aide des élèves topographes, qui ont judicieusement mixé les promotions dans le comité, afin de faciliter la transition. Ils contribuent à faire de cette manifestation un moment convivial où se rencontrent étudiants, professionnels, directeurs de PFE, enseignants, directeurs des écoles formant des ingénieurs topographes et alumni de l'école.

Le thème retenu cette année, l'intelligence artificielle et la topographie, est représentatif d'une des évolutions scientifiques et techniques majeures de notre temps. Dans un domaine qui a depuis longtemps basculé dans le numérique, comme en témoignent les sujets de PFE, le déploiement de l'intelligence artificielle est annoncé et induit des changements profonds dès le recueil des données, en passant par les traitements, jusqu'aux nouvelles applications et donc jusqu'à de nouveaux usages.

Je tiens à remercier tous les acteurs, à savoir les étudiantes et étudiants, l'équipe pédagogique, technique et administrative qui les encadre, ainsi que les professionnels qui leur font confiance, pour leur engagement au service d'une profession dynamique irriguée par les diplômés de notre établissement. Un remerciement spécial à Tania Landes, qui transmet cette année le relais de la responsabilité de l'organisation tout en restant impliquée, pour garantir la longévité des JDT. Alors longue vie aux JDT!

– Romuald Boné, directeur de l'INSA Strasbourg

≡ Programme

	MERCREDI 25 SEPTEMBRE	JEUDI 26 SEPTEMBRE	VENDREDI 27 SEPTEMBRE
8 h	Accueil - hall d'entrée		
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE) JURY 1 - JURY 2 salle topographie bâtiment C	Soutenances de PFE JURY 1 - salle C1.11 JURY 2 - C1.15 JURY 3 - C1.16 bâtiment C	Soutenances de PFE JURY 1 - JURY 2 salle topographie bâtiment C
10 h			
11 h			
12 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C	Délibération et annonce des résultats salle C1.16 bâtiment C	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C
13 h	Soutenances de PFE JURY 1 - JURY 2 salle topographie bâtiment C	Salon des exposants et animations salle topographie, bâtiment C	Conférence: « L'intelligence artificielle et la topographie » amphi de Dietrich
14 h			
15 h			
16 h			
17 h			
18 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie bâtiment C	Conseil de l'Association française de topographie (AFT) salle C1.16, bâtiment C	Présentation du métier de géomètre-expert amphi de Dietrich
19 h			

Salon des exposants

JEUDI 26 SEPTEMBRE DE 13 H À 17 H 30
SALLE TOPOGRAPHIE

Après un salon des exposants réussi l'an dernier, celui-ci est reconduit. Il consistera en une pause technologique au milieu des soutenances des Projets de fin d'études.

Cette année le salon compte une trentaine d'entreprises désireuses de présenter leurs matériels aux professionnels et aux futurs ingénieurs présents, le tout dans une ambiance conviviale. De plus, nouveauté de cette année: un passage de micro sur les stands permettra à chaque exposant de présenter son entreprise et ses activités pendant 5 minutes. Au cours de l'après-midi, un jeu sera organisé et les gagnants seront récompensés!

Entreprises du salon des exposants (liste non exhaustive)

- | | | | |
|--|-------------------------|---|------------------------|
|  e-cassini | 1. E-cassini |  positics | 11. Positics |
|  teria | 2. Teria |  REZO
PROCESS | 12. Rezoprocess |
|  BORNES
FENO | 3. Faynot Industrie |  SITECH | 13. Sitech France |
|  GEOFIT
GROUP | 4. Geofit Group |  Sites | 14. Sites |
|  GeoProcess | 5. Geoprocess |  sixense
Soldata | 15. Sixense
Soldata |
|  GEOSAT | 6. Geosat |  Sogelink ^{So easy} | 16. Sogelink |
|  Geotopo | 7. Geotopo |  Tcract | 17. Tcract |
|  igo
SMART TERRITORIES | 8. Igo |  TOPCON | 18. Topcon |
|  jsinfo
LOGICIELS | 9. Jsinfo |  VERTICAL | 19. Vertical 3D |
|  Leica
Geosystems | 10. Leica
Geosystems |  GÉOMETRE-EXPERT | OGE |
| | |  aft | AFT |

Invités
d'honneur

≡ Conférence : « L'intelligence artificielle et la topographie »

VENDREDI 27 SEPTEMBRE DE 14 H À 16 H
AMPHITHÉÂTRE DE DIETRICH

L'intelligence artificielle englobe les théories et techniques mises en œuvre en vue de réaliser des machines ou des programmes capables de simuler l'intelligence humaine. Nous nous intéressons plus exactement au *machine learning*. Cette approche statistique de l'intelligence artificielle permet, sous certaines conditions, à la machine d'apprendre, de critiquer puis de déduire. Les applications en sont très nombreuses et peuvent être intégrées dans diverses études [détection des spams, régulation du trafic automobile, assistant vocal, prévisions...].

L'essor de cette technologie la rend de plus en plus accessible et médiatisée. Dans le domaine de la topographie certaines opérations sont directement impactées et profitent alors d'un nouveau degré d'automatisation. La reconnaissance de forme, la segmentation et la classification sont des sujets en plein essor dans la recherche et les nouvelles possibilités offertes par l'intelligence artificielle ne font qu'accroître leur potentiel.

Jusqu'où l'intelligence artificielle peut nous amener? Comment cette technologie va-t-elle changer les habitudes du topographe? L'objectif de cette édition des Journées de la topographie 2019 sera d'aborder les capacités d'analyse de l'intelligence artificielle au niveau géométrique et sémantique de l'environnement. Les experts présents discuteront de cette évolution majeure, en s'interrogeant sur ses limites et son avenir dans le travail du géomètre-topographe.

- Romuald Boné, professeur en informatique spécialisé en intelligence artificielle, directeur de l'INSA Strasbourg;
 - Guillaume Terrasse, ingénieur de recherche, EDF;
 - Anthony Loué, ingénieur solution, ESRI France.
- Un quatrième intervenant complètera l'équipe d'experts.

Rendez-vous à la conférence pour en savoir plus!

/// Équipe des Journées de la topographie 2019



DR

De gauche à droite: Étienne Barçon (G5), Élixa Normier (G5), Julian Rebetez (G5), François Potentini (G4), Sabine Amzil (G5), Édouard Jund (G4) et Aneesha Cunthen (G5).

L'équipe organisatrice tient tout particulièrement à remercier M^{me} Landes qui transmet cette année la responsabilité de l'organisation des Journées de la topographie. Merci pour toute l'énergie investie depuis ces seize années, et qui a permis de rendre cet événement aussi important et incontournable pour notre spécialité.

≡ Ordre de passage des PFE

MERCREDI 25 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

Président de jury: MOREL Laurent

8 h 30 • Mise en place d'un système de mesures de convergences par photogrammétrie • p. 17

- Étudiant: LAMIER Alexandre
- Structure d'accueil: Sixense Soldata, Nanterre
- Correcteurs: GRUSSENMEYER Pierre, LEDIG Jacques

9 h 30 • Numérisation 3D du pavillon de Geiger et du casino des faïenceries à Sarreguemines • p. 21

- Étudiant: MIGUET Georges
- Structure d'accueil: Ville de Sarreguemines
- Correcteurs: LANDES Tania, GRUSSENMEYER Pierre

10 h 30 • Développement d'une solution de positionnement GNSS centimétrique sous Android • p. 25

- Étudiant: SEMLER Quentin
- Structure d'accueil: Syslor, Metz
- Correcteurs: FERHAT Gilbert, GRUSSENMEYER Pierre

Président de jury: NATCHITZ Emmanuel

13 h 30 • Numérisation 3D des carrières et des œuvres de Montigny à Machemont (Oise - 60) • p. 29

- Étudiante: MOTTIN Manon
- Structure d'accueil: Somme patrimoine, Ribemont-sur-Ancre
- Correcteurs: ALBY Emmanuel, GRUSSENMEYER Pierre

14 h 30 • Refuge 44: imagerie 3D et réalité virtuelle de la Carrière Saingt de Fleury-sur-Orne • p. 33

- Étudiant: THORLET Quentin
- Structure d'accueil: Inrap Normandie, Bourguébus
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, GRUSSENMEYER Pierre

15 h 30 • Recherche et développement d'outils automatiques/semi-automatiques pour la digitalisation du nuage de points • p. 37

- Étudiant: VERGNOL Sébastien
- Structure d'accueil: Parera, L'Isle-Jourdain
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, LANDES Tania

16 h 30 • Contrôle de nuages de points relevés par lasergrammétrie et photogrammétrie et mise en place d'une méthode de traitement • p. 41

- Étudiante: PROVOST-BLANCHARD Mélissa
- Structure d'accueil: Groupe Elabor, Messigny-et-Vantoux
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, GRUSSENMEYER Pierre

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)
Président de jury: FLACELIÈRE Bernard

8h30 • Évaluation des nuages de points photogrammétriques pour l'estimation de caractéristiques des forêts de montagne • p. 45

- Étudiant: TEISSÈDRE Étienne
- Structure d'accueil: Irstea, Saint-Martin-d'Hère
- Correcteur: FERHAT Gilbert

9h30 • Classification automatique des traces altimétriques pour la détection des surfaces aquifères et l'estimation des volumes d'eau • p. 49

- Étudiant: ZEIGER Pierre
- Structure d'accueil: GET OMP, Toulouse
- Correcteur: FERHAT Gilbert

10h30 • Analyse et amélioration des procédures de calcul de nuages de points issus d'un système de scan cinématique Robin Precision • p. 53

- Étudiant: MOREAU Maël
- Structure d'accueil: Kadran, Nantes
- Correctrice: LANDES Tania

13h30 • Inspection visuelle de grandes structures sous SIG 3D à l'aide de modèles 3D texturés en pleine résolution • p. 57

- Étudiant: VERLIN Gauthier
- Structure d'accueil: Sites SAS, Dardilly
- Correcteur: KOEHL Mathieu

14h30 • Détection de fenêtres dans un nuage de points de façade et positionnement semi-automatique dans un logiciel BIM • p. 61

- Étudiante: THIERRY Julie
- Structure d'accueil: Groupe Page/Trio INSA Strasbourg
- Correcteur: MURTIYOSO Arnadi

15h30 • Modélisation de platines pré-scellées depuis le nuage de points • p. 65

- Étudiante: SANSON Laura
- Structure d'accueil: Sites SAS, Aix-en-Provence
- Correcteur: ALBY Emmanuel

16h30 • Création d'une plateforme en ligne de visualisation et de production de données issues de nuages de points • p. 69

- Étudiant: NUGUE Thibaut
- Structure d'accueil: Adage, Roanne
- Correcteur: ALBY Emmanuel

JEUDI 26 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle C1.11, bâtiment C)

Président de jury: **FLACELIÈRE Bernard**

8 h 30 • Développement d'un système d'information archéologique partagé à l'échelle de la région pour une exploitation scientifique de la donnée archéologique • p. 73

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

9 h 30 • Modélisation 3D du château disparu des Wurtemberg à Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine • p. 77

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

10 h 30 • Rendu 3D et topographie des sites archéologiques d'Eridu et Ur, Irak • p. 81

- Étudiante: MORONI Laurene
- Structure d'accueil: Misha, Université de Strasbourg, Strasbourg
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, ALBY Emmanuel

JURY 2 (salle C1.15, bâtiment C)

Présidente de jury: **DUQUENNE Françoise**

8 h 30 • Une approche vectorielle pour classier des données images et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg • p. 85

- Étudiant: MONTAUBAN Olivier
- Structure d'accueil: Groupe Page/Trio INSA Strasbourg
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

9 h 30 • Optimisation et industrialisation d'un processus d'acquisition dans le cadre de relevés MMS (*Mobile Mapping Systems*) en environnements souterrains • p. 89

- Étudiant: FOUCHER Arnaud
- Structure d'accueil: Groupe ATGT, Lyon
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

10 h 30 • Auscultation automatique à l'aide de nuages de points: élaboration d'un processus de traitement automatisé • p. 93

- Étudiant: BROQUET Étienne
- Structure d'accueil: Mire SAS, Nanterre
- Correcteur: FERHAT Gilbert

JURY 3 (salle C1.16 , bâtiment C)

Président de jury: NATCHITZ Emmanuel

8h30 • Étude et optimisation des mesures de convergences en tunnel au sein du chantier ligne 15 T3C du Grand Paris Express: substitution de la tachéométrie et automatisation du traitement des données • p. 97

- Étudiante: SPOFFORD Alexandra
- Structure d'accueil: Vinci construction, Cachan
- Correcteur: LEDIG Jacques

9h30 • Suivi du bilan hydro-sédimentaire du bassin du lac Tonle Sap par télédétection satellitaire multi-capteur • p. 101

- Étudiant: GREUSARD Jules
- Structure d'accueil: Legos, Villenave-d'Ornon
- Correctrice: LANDES Tania

10h30 • Création d'un moteur de détection automatique d'éléments ponctuels dans une base de données de scanner dynamique • p. 105

- Étudiant: PICARD Arthur
- Structure d'accueil: TT Géomètres Experts, Paris
- Correctrice: LANDES Tania

VENDREDI 27 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle topographie, bâtiment C)

Président de jury: SCHALLER Claude

8h30 • Étude de solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Kœnigsbourg • p. 109

- Étudiant: ROBERT Jules
- Structure d'accueil: Château du Haut-Kœnigsbourg - Département du Bas-Rhin
- Correcteurs: KOEHL Mathieu, LANDES Tania

9h30 • Optimisation des modes et méthodes d'acquisition et de traitement de levés de bâtiments par scanner 3D, et valorisation de la donnée par maquette numérique • p. 113

- Étudiant: MOREL Victor
- Structure d'accueil: Hamel associés, Acigné
- Correcteurs: LANDES Tania, ALBY Emmanuel

10h30 • Développement des processus de production et d'évaluation de maquettes numériques tel-que-construit à partir de nuages de points d'acquisitions mixtes, pour le BIM et l'export de plans de bâtiment • p. 117

- Étudiante: BILLIARD Manon
- Structure d'accueil: Parera, L'Isle-Jourdain
- Correcteurs: LANDES Tania, ALBY Emmanuel

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

Président de jury: Ortlieb Hubert

8 h 30 • Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition rapides au scanner pour les plans d'architecture - Impacts sur la qualité et la précision • p. 121

- Étudiante: SCHOENMAEKERS Marie
- Structure d'accueil: Groupe ATGT, Bobigny
- Correcteur: ALBY Emmanuel

9 h 30 • *Webmapping* 3D: un outil pour l'aménagement du territoire • p. 125

- Étudiante: BERNHARD Clara
- Structure d'accueil: Eurométropole de Strasbourg, Strasbourg
- Correcteur: KOEHL Mathieu

10 h 30 • Étude d'un moyen de visualisation et d'exploitation des données 3D couvrant les parois d'une grotte ornée • p. 129

- Étudiant: LAVERGNE Brice
- Structure d'accueil: Fugro-Geoid, Castries
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

Projet de fin d'études soutenu au mois de juin 2019

Apports de l'imagerie satellitaire pour caractériser les évolutions morphologiques de l'embouchure du Tage • p. 133

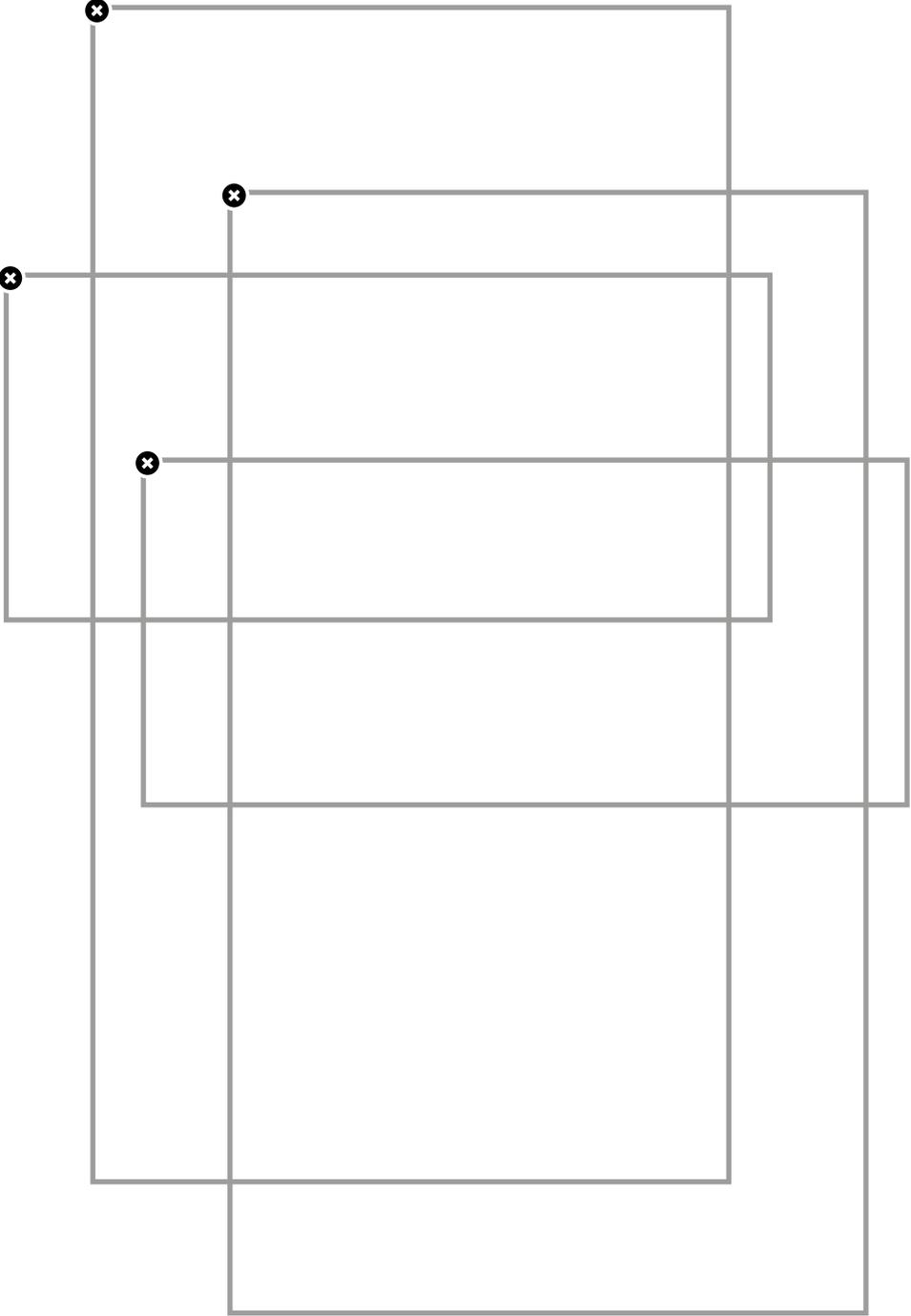
- Étudiante: JAOUEN Anne
- Structure d'accueil: laboratoire LIENSs UMR 7266, La Rochelle
- Correcteur: FERHAT Gilbert

Estimation des déplacements relatifs de la surface du sol sur un réservoir de gaz sur la base d'une approche modifiée du traitement interférométrique des données Sentinel-1 • p. 137

- Étudiante: SIMON Verena
- Structure d'accueil: KIT, Karlsruhe
- Correcteurs [KIT]: SCHENK Andreas, WESTERHAUS Malte

***Development and application of an inversion method for water vapour tomography with a novel infrared measuring device* • p. 141**

- Étudiante: RAIBLE Bettina
- Structure d'accueil: KIT, Karlsruhe
- Correcteurs [KIT]: RIETBROCK Andreas, HOPFNER Michael



/// **Résumés des PFE**

Mise en place d'un système de mesures de convergences par Photogrammétrie

PFE présenté par : **Alexandre LAMIER**
Société d'accueil : *Sixense Soldata*
Directeur de PFE : *M. Rémi FEJOZ*
Correcteurs : *M. Pierre GRUSSENMEYER*
M. Jacques LEDIG



1. Introduction

Dans le cadre des grands projets engagés en Île-de-France, Sixense Soldata intervient sur différents chantiers, notamment celui visant à l'extension vers l'Ouest de la ligne E du RER et plus exactement sur le lot nommé GCDEF. Ce projet comprend entre autres, la construction d'une gare sous les parkings du CNIT, bâtiment historique du quartier de la Défense où circulent plusieurs milliers de personnes par jour. La construction de cette gare implique notamment le creusement d'une centaine de puits qui hébergeront les futures nouvelles fondations du bâtiment. C'est autour de ces dernières que la gare sera creusée, ainsi qu'une multitude de tunnels qui serviront de connexions avec les différentes interfaces déjà existantes (lignes de métro, RERA, trains, rues, bâtiments, ...).

Parmi les différentes missions d'auscultation de ce chantier, Sixense Soldata s'occupe désormais des mesures de convergences sur les puits. Cette tâche, auparavant réalisée par les topographes du chantier, nécessitait l'arrêt du creusement, afin de laisser un topographe descendre dans chaque puits à ausculter pour y effectuer les mesures à l'aide d'un tachéomètre. Il a été demandé à Sixense Soldata de trouver une méthode différente qui permettrait aux ouvriers de chantier de continuer à creuser les puits sans interruption pendant les mesures. Suite à cette demande, Sixense Soldata a développé une méthode permettant la mesure de cibles depuis le haut des puits. Le système de mesures, élaboré de façon à être aisément transportable, est composé d'une potence qui peut être déplacée d'un puits à l'autre, ainsi que d'un Télémètre motorisé LEICA 3D Disto qui est retourné afin de mesurer des cibles fixées dans chaque puits. Cette méthode, rapidement mise en place et qui a le mérite de répondre aux besoins exprimés par le client, demeure peu productive et limitée en termes de précision. En effet, le pointé sur cible, qui reste manuel, s'effectue avec une tablette ; l'opération est longue, manque de précision et de répétabilité. Il m'a donc été demandé de mettre en place une procédure qui permettrait de réaliser des mesures de convergences à l'aide de la photogrammétrie. Dans cette optique et dans un premier temps, en raison de la limitation des accès, les tests seront effectués sur des couloirs et tunnels avant d'essayer d'appliquer cette méthode aux puits.

La première partie de cette étude traitera donc du processus suivi et des tests réalisés pour la mise en place d'une procédure d'acquisition. La seconde partie quant à elle, exposera les tests et comparaisons aux méthodes traditionnelles actuellement utilisées au sein de Sixense Soldata, afin de valider son intérêt.

2. Les choix réalisés pour la réalisation du projet

Pour réaliser l'acquisition des données photogrammétriques nous avons choisi d'utiliser les moyens déjà existants. Cela a permis de ne pas investir dans du matériel sans connaître la viabilité de la méthode pour l'entreprise. Nous avons donc réalisé nos tests avec un appareil Canon Eos 550d et les traitements ont été réalisés à l'aide de MetaShape.

Afin d'optimiser au maximum le traitement, nous avons choisi d'utiliser des cibles codées. Ces cibles détectées automatiquement permettront d'éviter les erreurs de pointé de l'opérateur et

matérialiseront également les points à suivre. Néanmoins, une contrainte de dimensionnement sur ces cibles demeure présente car elles doivent être installées sur des équerres métalliques de 4.9 centimètres de largeur. Nous avons donc adapté nos paramètres de prises de vue pour que ces cibles puissent être détectées par le logiciel en réalisant différents tests.

Le traitement dans MetaShape s'effectue par la méthode du « Bundle Adjustment ». Cette méthode détermine les paramètres d'orientation interne et réalise l'orientation externe du projet. Pour déterminer les paramètres d'orientation interne, le logiciel effectue une auto-calibration en se basant sur la recherche de points homologues à l'aide d'un opérateur. Néanmoins, nous avons dû penser aux cas où la géométrie de la scène ne permettait pas d'obtenir assez de points de corrélation pour la détermination des paramètres d'orientation interne. Nous avons donc créé une scène de calibration permettant la calibration dans les conditions de prises de vue du projet. Si le projet ne fournissait pas les paramètres de calibration de qualité satisfaisante, nous pourrions appliquer le fichier de calibration réalisé en amont à l'aide d'un jeu de photos.

Pour la mise à l'échelle des projets, nous avons dû imaginer un système qui serait transportable et qui nous permettrait de réaliser la mise à l'échelle des projets ne disposant pas de points d'appui connus. Les mesures de convergences peuvent être réalisées dans un système local et ne nécessitent donc pas de coordonnées absolues. Nous avons donc créé un système de mire transportable permettant la mise à l'échelle de n'importe quel projet. Cette mire en aluminium dispose de deux plans possédant tous deux, trois cibles codées. Ces cibles codées seront connues en coordonnées et serviront de points d'appui. Notre scène de calibration possédait au départ deux fonctions : l'étalonnage des coordonnées de notre mire de mise à l'échelle et la création d'un fichier de calibration. Néanmoins, par la suite, nous avons trouvé une méthode plus précise pour l'étalonnage de notre mire. Le fichier de calibration sera utilisé dans les cas où l'auto-calibration des projets ne fournirait pas de bons résultats. Enfin, à l'issue des premiers tests photogrammétriques réalisés, nous comparerons nos résultats à des mesures réalisées à l'aide d'un tachéomètre.

3. Tests et installation

3.1 Test de détection des cibles

Les cibles utilisées sont les cibles codées du logiciel Métashape. Il est possible de définir le diamètre de ces cibles. En effet pour détecter automatiquement les cibles codées, le logiciel nécessite que celles-ci occupent un certain nombre de pixels sur l'image. Le nombre de pixels d'une cible présent sur l'image est dépendant de la distance de prise de vue, de la focale utilisée, de la taille de la cible et de la résolution du capteur. Pour cette raison, nous avons réalisé les tests suivants :

Paramètres test n°1 :

- Focale : 18 millimètres
- Rayon des cibles : 5 centimètres
- Capteur : Canon EOS 550D 18 MPix

Sur un intervalle de 5 mètres, de 10 mètres à 15 mètres de l'objet, toutes les cibles sont détectées. Ce diamètre de cible ne peut pas convenir pour la réalisation des projets puisque les cibles doivent être collées sur des équerres métalliques d'une largeur déjà définie. Néanmoins, nous avons utilisé ce diamètre pour réaliser notre scène de calibration. Les équerres sur lesquelles doivent être collées les cibles mesurent 4.9 centimètres de largeur. Par conséquent, nous avons dû adapter les paramètres de prises de vue et la taille des cibles pour pouvoir détecter et installer ces dernières.

Paramètres test n°2 :

Focale : 40 millimètres
Rayon des cibles : 2 centimètres et 2.45 centimètres
Capteur : Canon EOS 550D 18 MPix
Toujours sur un intervalle de 5 mètres entre 10 et 15 mètres :

- Entre 10 et 14 mètres toutes les cibles sont détectées.
- À 15 mètres les cibles d'un rayon de 2.45 centimètres sont toutes détectées tandis que les cibles d'un rayon de 2 centimètres ne le sont pas.

Ces tests, nous ont donc permis de réaliser certains choix quant au paramétrage. Nous avons choisi d'imprimer des cibles de 4.8 centimètres de diamètre pour la réalisation des projets (afin qu'elles puissent être collées sur les équerres métalliques) et d'effectuer l'acquisition des clichés par bandes avec des vues droites et obliques entre 10 et 15 mètres. Nous avons aussi fait le choix d'utiliser une distance focale d'environ 40 millimètres et de réaliser au moins 50 clichés en essayant de respecter un taux de recouvrement élevé entre les photos.

3.2 L'établissement de la scène de calibration et calcul des coordonnées de la mire

L'établissement de la scène de calibration a été réalisé en deux étapes. La première a été l'installation des cibles photogrammétriques et des prismes en hauteur. La seconde, fut le lever et le calcul des cibles. Le choix de la scène a été pensé de manière à avoir des différences de textures et des différences de profondeurs sur nos photos pour permettre l'auto-calibration. Les cibles ont été levées à partir de trois stations libres, puis calculées par intersection à partir des trois stations. Nous avons choisi de recalculer les coordonnées des cibles par intersection, car les calculs d'intersection ne font pas intervenir les mesures de distances qui pourraient manquer de précision en mode sans réflecteur. Ce réseau contient une vingtaine de cibles connues en coordonnées. A l'origine ces cibles servaient à déterminer les coordonnées de notre mire. Néanmoins, pour calculer les coordonnées de la mire, nous avons choisi une méthode plus précise. Nous avons fixé des règles métalliques sur la mire puis réalisé un jeu de photos autour de notre mire. Une fois les photos acquises, nous avons pointé précisément les distances dans Metashape et avons recalculé les coordonnées à partir des distances connues. Ainsi, cette scène de calibration ne sert qu'à déterminer les paramètres d'orientation interne dans les cas où les projets ne fourniraient pas de bons résultats.



Figure 1 : Photos de la scène de calibration et de la mire de mise à l'échelle

3.3 L'installation de notre scène de test

L'environnement dans lequel les mesures de test sont réalisées, est un couloir dans un premier temps, car l'accès à des tunnels n'est pas facile et l'installation sur ce type d'ouvrage nécessite du temps.

Nous avons donc choisi de modéliser deux sections. Chaque section possède quatre équerres. Ces équerres ont été relevées à l'aide d'une méthode topographique traditionnelle et de notre méthode photogrammétrique. Pour cela, nous avons utilisé des équerres de fine épaisseur sur lesquelles nous avons collé d'un côté des cibles réfléchissantes, mesurées à l'aide d'un TM50, et sur l'autre face, des cibles photogrammétriques. Afin de comparer la répétabilité des deux méthodes, nous avons fait plusieurs campagnes de mesures et avons donc étudié les différences de mesures obtenues dans le temps. De plus, afin d'avoir une comparaison sur la précision de mesure d'un déplacement, nous avons

simulé un déplacement fixe connu sur deux campagnes de mesure. Pour cela, nous avons utilisé un support sur lequel un prisme et une cible peuvent être interchangeés.

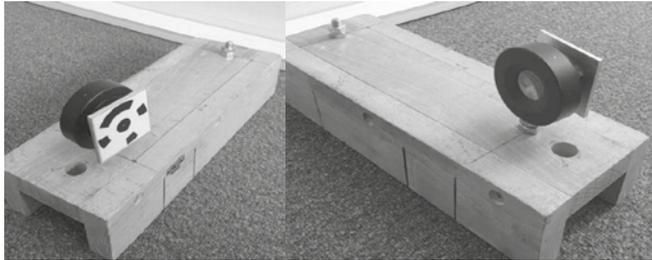


Figure 2 : Photos du support qui permet de simuler un déplacement connu

4. Acquisitions et premiers résultats

Les premiers tests et acquisitions nous ont permis de nous rendre compte que l'auto-calibration sur la scène de test s'effectuait correctement. Ainsi, la scène de calibration située à Nanterre n'est plus nécessaire pour connaître nos paramètres d'orientation interne pour ce cas de test. Néanmoins, nous nous sommes rendu compte que nous avions des problèmes dans la détection automatique des cibles. Enfin, la comparaison des distances mesurées sur le test de déplacement connu est satisfaisante. Les premières campagnes de mesures nous fournissent les résultats suivants :

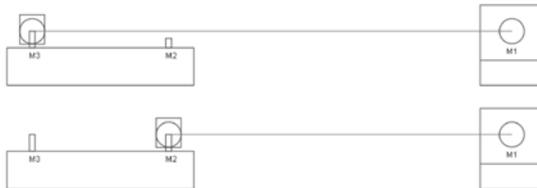


Figure 3 : Schéma du support qui permet de simuler un déplacement connu

Tableau 1: Tableau de comparaison des premiers résultats

Support Bois	18.06.2019		
Distance	Photo (m)	Tachéomètre (m)	Écart (m)
M2_M3	0,2102	0,2105	-0,0003
Support Bois	24.06.2019		
Distance	Photo (m)	Tachéomètre (m)	Écart (m)
M2_M3	0,2097	0,2096	0,0001

Numérisation 3D du pavillon de Geiger et du casino des faïenceries à Sarreguemines

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



1. Contexte et objectifs du projet

La collaboration entre le musée de la faïence de la ville de Sarreguemines et l'INSA de Strasbourg a vu le jour fin 2017 avec les travaux de recherche technologique et de fin d'études réalisés par Valentin Girardet, résultant sur la production d'un modèle texturé du remarquable « jardin d'hiver » de l'ancien directeur des faïenceries Paul de Geiger. Dans la continuité de cette fructueuse coopération, deux autres bâtiments remarquables ont été choisis pour être au cœur d'un nouveau projet de numérisation : le Pavillon de Geiger et l'ancien Casino des Faïenceries. Situés en plein centre-ville et datant tous deux de la fin du XIX^{ème} siècle, ils témoignent de la riche histoire industrielle sarregueminoise et méritent à ce titre d'être mis en valeur.



Figure 1 : Pavillon de Geiger (gauche) et Casino des Faïenceries (droite)

Comme l'actualité le démontre tous les jours, un patrimoine millénaire peut être amené à disparaître du jour au lendemain sans laisser de traces. La présente étude démontre, en décrivant et mettant en œuvre les techniques modernes de restitution virtuelle du patrimoine bâti comment il est désormais possible d'assurer une pérennité du souvenir. Ce projet de fin d'études détaille tout d'abord les deux grandes approches existantes pour acquérir des données en trois dimensions, la photogrammétrie (aérienne et terrestre) et la lasergrammétrie. La fusion de ces différents jeux de données permet ensuite de pallier à chacune des forces et faiblesses de ces dernières. Enfin, des solutions de mise en valeur des modèles créés ont été proposées notamment par l'intermédiaire de la réalité virtuelle.

Les principaux éléments produits à l'issue de ces 6 mois de travaux sont donc :

- Un nuage de points complet des environnements extérieurs et de l'intérieur du pavillon ainsi que des extérieurs du casino, géoréférencé dans les systèmes nationaux RGF93-CC49 et NGF-IGN69.
- Des modèles maillés et texturés de la façade classée du Casino ainsi que du Pavillon intérieur et extérieur.
- Une mise en valeur des modèles créés par la réalité virtuelle, l'impression 3D et la réalisation d'une vidéo.

2. Réalisation des travaux de terrain

Etant donnée la taille des environnements à relever ainsi que les différents types d'acquisition, quatre jours mobilisant trois personnes ont été nécessaires auxquels s'est adjoint un télépilote lors des relevés par drone. Voici un tableau récapitulatif des ressources matérielles et humaines mises en place :

Opérateur	Matériel	Date du relevé
Georges Miguet	Antenne GNSS Trimble, Station totale Trimble M3	1 ^{er} Mars, 20 Mars, 4 Avril, 2 Mai
Samuel Guillemin	Scanner laser Faro Focus 3D X330	1 ^{er} Mars, 20 Mars, 4 Avril, 2 Mai
Pierre Grussenmeyer	Canon E0S 5DSR	1 ^{er} Mars, 4 Avril, 2 Mai
Julien Vandermeerschen	Drone Phantom 4	20 Mars

Tableau 1 : Ressources mobilisées pour les relevés de terrain

Les premiers relevés effectués ont consisté à établir un canevas de points d'appui par GNSS et tachéométrie permettant le géoréférencement des levés au scanner et des photographies aériennes à une précision centimétrique. Ce canevas s'est aussi appuyé sur des points mis en place par Girardet (2018). Un lever par photogrammétrie et lasergrammétrie terrestre exhaustif a ensuite été mené afin de générer le nuage de points complet.

La préparation du lever par drone s'est quant à elle déroulée en concertation avec la société DRONE Alsace en respectant les modes opératoires prescrits par Murtiyoso et al. (2017) consistant en la répétition de vols nadiriaux entrecroisés mais aussi obliques. Ce mode opératoire a permis une bonne jonction avec les photos terrestres d'une part et un fort recouvrement d'autre part.

3. Traitements informatiques

Création d'un nuage de points complet

Un cheminement au scanner Faro Focus 3D X330 a été conduit tout autour du Casino afin d'acquérir l'ensemble des environnements extérieurs (arbres, bâtiments, chemins) et ainsi obtenir un rendu le plus fidèle possible à la réalité. De ce fait, une grande quantité de données a dû être traitée et assemblée. Pour ce faire, le géoréférencement par sphères a tout d'abord été calculé sur le logiciel Scene de Faro. Ces dernières, dont les coordonnées avaient été préalablement calculées grâce aux mesures tachéométriques, ont permis de faire le lien entre les scans issus des différentes stations. Un long travail de nettoyage des nuages a ensuite été mené sur le logiciel 3D Reshaper de Technodigit afin de ne garder que les points d'intérêt en éliminant les personnes, les voitures ou le bruit éventuels.

Ce nuage a ensuite été rééchantillonné à divers degrés selon les zones : on a gardé un point tous les cm pour les parties extérieures et une plus grande densité d'un point tous les 5mm sur les bâtiments devant être modélisés.

Différents projets ont en outre été calculés sur le logiciel Metashape d'Agisoft afin de densifier les sculptures, céramiques ou autres ornements riches en détails. Les nuages issus de photos terrestres ont été adjoints par pointés homologues sur le nuage lasergrammétrique tandis que celui issu des photos aériennes l'a été grâce à des cibles disposées et mesurées au sol.



Figure 2 : Vue d'ensemble du nuage de points complet

Enfin, les quelques trous restants dans le nuage ont pu être comblés soit en générant artificiellement des points à partir d'éléments de géométrie (plans, cylindres) soit en copiant astucieusement des points dans les zones voisines. Le nuage ainsi complété comporte environ 200 millions de points et a servi de base aux travaux de modélisation.

Création de modèles maillés du Pavillon et de la façade remarquable du Casino

Le processus de création des modèles mis en place sur 3D Reshaper a été le suivant :



Figure 3 : Processus de génération des modèles maillés

Cette façon de procéder a permis de limiter les corrections manuelles à apporter au maillage généré. En effet, plus le premier maillage généré est sophistiqué et de grande taille, plus il est compliqué pour le logiciel d'éviter les trous et les doubles peaux. La copie d'éléments répétitifs comme les piliers ou l'utilisation adéquate de symétries de révolution a aussi été utilisée dans la construction des modèles lorsque la densité de points ne permettait pas la création d'un maillage suffisamment précis.

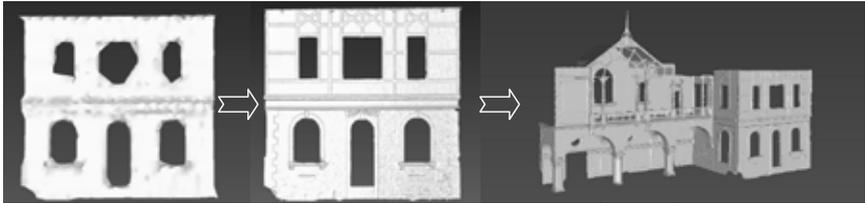


Figure 4 : Etapes successives dans la création du modèle de la façade du Casino

Une fois ces modèles terminés, il convient de les réduire afin d'optimiser leur taille en mémoire et ainsi faciliter leur future manipulation. Il existe pour cela différents logiciels et fonctions comme l'outil « Réduire » de 3D Reshaper ou encore Meshlab [Caron, 2017]. S'ensuit l'étape de texturage visant à appliquer une texture photo-réaliste aux modèles obtenus.

Texturage des modèles

L'étape de texturage a consisté à appliquer les photos prises avec l'appareil photo numérique ou les photos aériennes sur les modèles. Pour atteindre cet objectif, ces derniers ont été importés sur le logiciel Metashape au format .obj puis la texture a été générée grâce aux images géoréférencées rigoureusement sélectionnées et après l'application de masques. La qualité de la texture dépendant de celle de la géométrie, cette étape permet donc aussi d'ajuster certains défauts de la modélisation.

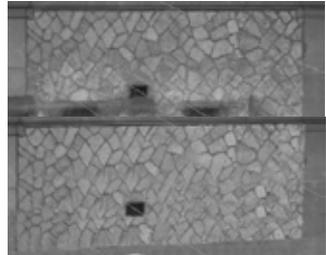


Figure 5 : Texture du mur avant et après retouches

De plus, on découvre parfois des occlusions dans les photographies ne permettant pas la création d'une texture de qualité. Nous avons alors recouru à la retouche d'image sur le logiciel gratuit et libre Gimp qui a permis par exemple d'éliminer le mobilier situé devant les murs ou encore d'optimiser les textures en jouant sur les couleurs. Enfin, certaines textures ont été corrigées ponctuellement sur le logiciel 3D Reshaper en découpant une partie du modèle et en appliquant une image en cliquant des points homologues. Tous ces procédés ont permis d'aboutir à une haute qualité de détails.



Figure 6 : Détails de textures dans les modèles

Mise en valeur des modèles

L'état de l'art effectué pour ce mémoire a permis de démontrer l'étendue des possibilités de valorisation de tels produits pour l'accessibilité à la culture ainsi que leur constante diversification [D'Agnano et al, 2015]. Il est donc nécessaire de bien cerner les besoins et moyens du client pour faire des choix pertinents. Tout d'abord, la réalisation d'une vidéo simulant une visite virtuelle des lieux s'est avérée intéressante pour le musée car ne nécessitant pas de matériel spécifique et pouvant être facilement mise à disposition sur un site internet.

Des modèles en trois dimensions de taille réduite ont aussi été créés pour être mis en ligne sur le compte Sketchfab du musée. Cette plateforme permet gratuitement la manipulation de modèles allant jusqu'à 50 Mo sans aucune connaissance en modélisation requise. Cela se prête donc davantage à des détails tels que les céramiques et sculptures qu'à des modèles de bâtiments entiers.

En ce qui concerne la réalité virtuelle, il a été choisi pour ce projet d'utiliser une approche mixte combinant à la fois les modèles texturés et le nuage. Cela a été rendu possible grâce à la nouvelle version de Scene (2019.0.1.1653) permettant d'importer des fichiers .obj dans le projet de réalité virtuelle. Cette approche permet une immersion maximale en combinant le rendu visuel supérieur des modèles évitant l'effet de scintillement et de transparence des nuages, tout en incluant les détails peu propices au maillage (rideaux, fer forgé des balustrades, végétation). Une station de réalité virtuelle équipée d'un casque HTC Vive a permis d'expérimenter avec succès cette méthode.

Enfin, des impressions 3D ont été produites à partir des modèles sur le logiciel Cura. Les premiers tests ont été réalisés sur des visages sculptés de petite taille puis à l'échelle d'un bâtiment entier avec le Pavillon de Geiger.



Figure 7 : Pavillon texturé importé dans le projet de réalité virtuelle

5. Conclusions et perspectives

La conception de modèles de haute qualité brasse un large panel de compétences et de problématiques techniques actuelles et nécessite une veille technologique permanente. Des méthodes de lever en passant par la modélisation, la gestion du volume de données et l'exploitation par la réalité virtuelle ou augmentée, ce type de projet permet de fixer des références dans l'orientation et le développement de ces nouvelles disciplines et a donc de ce point de vue un grand intérêt technique et pédagogique. Certains aspects tels que l'automatisation des processus de modélisation ou la simplification des modèles par primitives géométriques mériteraient d'être approfondis.

Pour les musées de Sarreguemines, les modèles créés procurent tout d'abord la certitude de sauvegarder un patrimoine centenaire en cas de destruction et la possibilité de le restaurer à l'identique. D'autre part, associés aux travaux de Valentin Girardet au jardin d'hiver, ils constitueront une base solide à la création de l'espace numérique imaginé par le musée de la faïence de Sarreguemines.

Enfin, un nouveau projet de recherche technologique prévu pour la fin 2019 est en outre en train de voir le jour au niveau du site des anciennes usines de faïences. Cela permettrait aux visiteurs de découvrir le site industriel tel qu'il était avant les destructions causées par la guerre.

Références

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

D'Agnano, F., Balletti, C., Guerra, F., Vernier, P. (2015) 'Tooteko: A case study of augmented reality for an accessible cultural heritage. Digitization, 3D printing and sensors for an audio-tactile experience', International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 40(5W4), pp. 207–213. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W4-207-2015

Girardet, V., (2018), 'Numérisation 3D du Jardin d'Hiver du Musée de la Faïence à Sarreguemines.' Projet de Fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg, pp. 1-70.

Murtiyoso A., Koehl M., Grussenmeyer P., Freville T., (2017) 'Acquisition and processing protocols for UAV images : 3D modeling of historical buildings using photogrammetry', doi : 10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-163-2017

DÉVELOPPEMENT D'UNE SOLUTION DE POSITIONNEMENT GNSS CENTIMÉTRIQUE SOUS ANDROID

PFE présenté par : **Quentin SEMLER**
Société d'accueil : **SYSLOR**
Directeur de PFE : **M. Edouard SEMIN**
Correcteur : **M. Gilbert FERHAT**
Encadrant : **M. Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte de l'étude

Avec l'arrivée des systèmes GNSS que l'on connaît aujourd'hui, se positionner à la surface de la Terre est maintenant devenu chose courante. Tout individu équipé d'un smartphone peut, à présent, obtenir sa localisation avec une précision étonnante à l'échelle de notre planète. Pour autant, le géopositionnement est une problématique toujours d'actualité qui suscite encore aujourd'hui un intérêt de taille, notamment dans sa composante la plus technique : le positionnement centimétrique. C'est d'ailleurs l'objectif de l'étude que propose la start-up Syslor, une jeune entreprise mettant l'accent sur le développement de solutions innovantes dans le domaine de la V.R.D.

Chaque année en France, on recense plus de 100 000 accidents liés à une localisation imprécise des réseaux enterrés ou une mauvaise lecture des plans. Ces derniers impliquent le plus souvent des dégradations matérielles coûteuses, pouvant aller jusqu'à compromettre la sécurité du personnel sur le chantier. C'est en réponse à ce constat que le fondateur de la start-up, Edouard SEMIN, a développé un des premiers services de visualisation des réseaux enterrés en réalité augmentée. L'avantage pour l'utilisateur est de pouvoir scanner rapidement son environnement avec un smartphone et de superposer au réel l'information du sous-sol. L'entreprise propose également une application de récolement certifiée par photogrammétrie. Ces services apportent ainsi une solution efficace à la réforme anti-endommagement mise en vigueur en 2012. Bien que fonctionnelles, ces applications innovantes peuvent être à présent perfectionnées par l'accès au positionnement centimétrique. Ce sujet de recherche très prometteur pour l'entreprise va grandement améliorer la qualité des services proposés et offrira de nouvelles perspectives de développement.

2. Objectifs

L'entreprise étant ouverte sur les outils permettant l'accès à la solution centimétrique, l'objectif initial de cette étude est de déterminer les technologies actuelles capables d'une telle précision sur le positionnement. Il faut également entrecouper ces dernières avec les contraintes qu'impose le développement d'une solution sur smartphone ou sur tablette. Par conséquent, la solution doit être compatible avec un appareil Android, facilement transportable, simple d'utilisation et permettre un positionnement en dynamique. Plusieurs objectifs ont été mis en place pour mener à bien ce projet :

- ❖ Réaliser une veille technologique sur les technologies de positionnements « *Low-cost* »,
- ❖ Sélectionner et tester une ou plusieurs solutions de manière conséquente. Cette phase permettra alors de valider ou non l'intérêt de ces technologies pour l'étude,
- ❖ Retenir une solution finale et prendre entière connaissance de son fonctionnement,
- ❖ Programmer les interfaces de récupération des données de positionnement pour les injecter dans les applications Syslor existantes.

3. Le géopositionnement et les smartphones

Pour fournir une localisation rapide et précise avec des composants à faible coût, les téléphones d'aujourd'hui embarquent une multitude de technologies. Une première partie de ce projet a été de lister ces fonctionnalités. On retrouve trois techniques de localisation différentes qui sont le positionnement GSM, Wi-Fi et GNSS. L'analyse de ces techniques a montré que chacune d'elles possède ses avantages et inconvénients. Le positionnement GSM a la particularité de s'initialiser rapidement et consomme peu d'énergie. Il est cependant très peu précis (50 m à 250 m). Le Wi-Fi permet d'atteindre des précisions de positionnement de l'ordre de 1 à 5 m, mais possède une faible portée, ce qui rend impossible son utilisation en zone rurale. Malgré son temps d'initialisation et sa consommation importante, le GNSS est ainsi la technique de positionnement la plus utilisée par nos smartphones. Elle permet une localisation robuste de l'appareil avec des degrés de précisions variant de 50 cm à 20 m. Cette dernière semble également la plus viable, puisque c'est la seule technologie qui offre actuellement une localisation centimétrique (avec des antennes professionnelles). Il convient à présent d'étudier si de telles performances peuvent être atteintes avec les antennes « *Low-cost* » qui équipent actuellement nos smartphones.

La recherche bibliographique sur ces antennes GNSS à bas prix a permis de séparer l'étude en deux solutions distinctes. La première possibilité est le positionnement « *full smartphone* », qui consiste à utiliser uniquement les composants internes du téléphone. Les composants matérielles et logicielles sont donc réunies dans un même appareil. La seconde solution peut être qualifiée « d'hybride », dans la mesure où cette dernière utilise des composants externes qui viennent s'ajouter au téléphone. Dans cette configuration, le smartphone devient alors uniquement le terminal de traitement des données GNSS. Bien que moins élégante, cette solution fractionnée semble très prometteuse pour la suite du projet.

Solution 1 : Le Géopositionnement « Full smartphone » et l'API¹ GNSS 24

L'étude de la qualité du positionnement GNSS fournit par nos téléphones est un sujet relativement récent dans la littérature. Le GNSS embarqué sur nos appareils a longtemps été une technologie « boîte noire », où les données brutes et les méthodes de calculs étaient inaccessibles pour les utilisateurs. Sans ces précieuses données qui permettent l'analyse de la qualité des signaux reçus par l'antenne (rapport C/No, signaux et constellations utilisés, méthodes de calculs, etc.), il était difficile d'évaluer précisément la qualité des positions fournies et d'imaginer améliorer ces résultats en aval. En 2016, la sortie de la version 7 d'Android (Nougat) a marqué un tournant. Elle offre à présent aux utilisateurs une possibilité d'accès aux mesures brutes de la puce. Elle a également permis de régler un certain nombre d'obstacles liés à l'obtention de mesures précises (fonctionnement cyclique de la puce par exemple). Ce nouvel accès a grandement simplifié les études sur les antennes. A cette occasion, la GSA (European GNSS Agency) et l'ESA (European Space Agency) ont publié un fascicule détaillé dans [GSA, 2017]. Des explications sur son fonctionnement et des directives de programmation y sont recensées. L'objectif est de favoriser le développement d'algorithmes innovants pour le positionnement, tel que celui développé par le CNES avec l'application « PPPWizlite ».

Grâce à ce nouvel API, on s'aperçoit que tous les appareils ne sont pas équivalents et que la qualité du positionnement dépend en grande partie des choix du constructeur. Si l'on veut connaître les fonctionnalités de son smartphone, il suffit de consulter la liste des appareils supportant les mesures GNSS sur le site développeur d'Android. À partir de cette liste, on peut ainsi trouver les modèles en pointe dans ce domaine. Le Xiaomi Mi 8 semble se démarquer de ses concurrents, car il est le premier smartphone à avoir intégré la puce Broadcom BCM4775. Cette dernière évolution permet notamment :

- ❖ D'observer deux fréquences différentes (L1, L5),
- ❖ De traiter l'ensemble des constellations (GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, QZSS),
- ❖ Une consommation d'énergie réduite.



¹ API (Interface de Programmation Applicative) : Protocole de communication permettant d'accéder à un environnement de programmation simplifié sous la forme d'un service.

Solution 2 : Le Géopositionnement « hybride » avec récepteur low-cost

L'étude des récepteurs « Low-cost » actuellement disponibles sur le marché requiert une attention particulière. Il existe de nombreux modèles avec des prix et des performances très variables. Plus complexes sur le plan matériel que la solution 1, ces récepteurs ont l'avantage d'être globalement peu chers et ne souffrent pas d'une miniaturisation extrême.



Figure 1: Fonctionnement d'un récepteur " Low-cost " traditionnel

- ① Une antenne GNSS traduit les ondes radio en signaux électriques. Pour l'observation satellitaire, il est préférable de choisir une antenne active permettant d'amplifier le signal reçu.
- ② Une puce vient traiter les signaux électriques et les convertit en données brutes exploitables. Généralement, la puce est posée sur une carte mère, permettant de gérer à la fois l'alimentation et l'envoi des messages vers les terminaux de sortie (USB, Bluetooth, liaison radio, UART, etc.).
- ③ Une interface de récupération et d'exploitation des données récoltées par le récepteur (antenne + puce).

La qualité du positionnement en sortie est conditionnée à la fois par la qualité de l'antenne et celle de la puce. Ces deux composants doivent ainsi faire l'objet d'une recherche approfondie. Plusieurs modèles ont été sélectionnés pour leur performance intéressante en termes de précision et pour leur rapidité d'initialisation (TTFF²). En raison du volet confidentiel de cette étude, les références à ces récepteurs seront volontairement non citées.

3. Solutions testées

À la suite de l'état de l'art, deux solutions pertinentes ont été sélectionnées pour cette étude. La première est l'utilisation d'un smartphone bifréquence. Nous avons choisi le Xiaomi Mi 9, le descendant direct du Mi 8 évoqué précédemment. Le test du Mi 9 s'est rapidement révélé décevant, puisqu'un problème d'enregistrement de la phase a immédiatement été décelé. D'après Google, le nouveau processeur du Mi 9 a rendu le téléphone incompatible avec cette mesure. Sans cette donnée essentielle, aucun algorithme de précision ne peut être appliqué, ce qui nous a contraint à abandonner les tests. Par ailleurs, nous avons découvert que, malgré la modernité des modèles, les Xiaomi Mi 8 et Mi 9 ne sont pas compatibles avec ARCore, une plateforme essentielle pour la réalité augmentée chez Syslor.

La solution hybride a, quant à elle, donné plus ample satisfaction au vu des problématiques de l'étude. Le fait que le récepteur soit indépendant de l'interface de traitement donne plus de liberté et rend la solution effective sur n'importe quel appareil Android. La puce que nous avons sélectionné permet de traiter et générer 3 protocoles différents :

- ❖ NMEA0183 (National Marine Electronics Association) pour le partage des informations relatives au positionnement sous la forme de trames (coordonnées, DOPs, nombre de satellites en poursuite, précision, etc.).
- ❖ RTCM3 (Radio Technical Commission for Maritime Services) permettant l'apport de corrections RTK par un réseau de stations permanentes ou par une base GNSS.
- ❖ Un format propriétaire binaire dédié aux paramétrages de la puce et fournissant à l'utilisateur la possibilité d'adapter les mesures en sortie en fonction de ses besoins.

² TTFF (Time To First Fix) : Mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une première solution de positionnement après démarrage du récepteur.

Pour simplifier les traitements des données acquises sur le terrain (fichier texte au format NMEA), un script MATLAB a été mis en place. Ce dernier permet notamment le passage de l'ITRF2014@jour (référentiel des orbites) vers le RGF93. Ces scripts ont été programmés dans l'optique d'être transportés dans un second temps vers les applications Android Syslor.

Plusieurs campagnes de tests ont été réalisées durant le mois d'avril et de mai pour confirmer les performances de la puce. Les résultats des premiers tests à ciel ouvert sont très concluants. Ces derniers ont été réalisés sur les 6 piliers du toit de l'INSA. Les valeurs vraies considérées pour l'étude ont été obtenues avec une antenne GNSS professionnelle (Trimble R10).

Statique RTK	Echantillon : 6 points			
	Précision Planimétrique	Précision Verticale	Exactitude Planimétrique	Exactitude Verticale
	(m)	(m)	(m)	(m)
Min	0,003	0,003	0,008	0,003
Max	0,007	0,007	0,024	0,011
Moyenne	0,005	0,005	0,014	0,006
Ecart-type	± 0,002	± 0,001	± 0,006	± 0,004

Dynamique RTK	Echantillon : 55 points / Vitesse : 2 km/h			
	Précision Planimétrique	Précision Verticale	Exactitude Planimétrique	Exactitude Verticale
	(m)	(m)	(m)	(m)
Min	0,000	0,000	0,000	0,001
Max	0,069	0,070	0,062	0,071
Moyenne	0,019	0,030	0,020	0,030
Ecart-type	± 0,015	± 0,020	± 0,016	± 0,020

Tableau 1 : Récapitulatif des performances à ciel ouvert en scénario statique et dynamique

Les précisions présentées dans le *Tableau 1* sont effectives et ont été recalculées dans un second temps. L'exactitude a été calculée à partir des valeurs vraies. Dans les deux scénarios, les résultats fournis par le récepteur GNSS « Low-cost » sont centimétriques. En positionnement statique, les résultats sont très proches de ceux pouvant être obtenus avec une antenne professionnelle. En dynamique, la précision et l'exactitude moyenne en planimétrie et en altimétrie sont plus élevées. Ces valeurs restent cependant acceptables pour cette étude. Bien entendu, ces tests ont ensuite été poursuivis dans plusieurs environnements (lotissement, zone urbaine, etc.), dans les limites imposées par un positionnement GNSS. Des résultats du même ordre de grandeur, nous ont ainsi permis de valider cette solution pour la suite de l'étude.

4. Développements sous Android

Après ces résultats positifs, la dernière phase de l'étude consiste à programmer les interfaces permettant de récupérer les données de positionnement et de les injecter dans les applications Syslor. Pour ce faire, un service a été développé sous Android. Ce dernier a pour vocation de récolter les données de la puce via Bluetooth, et de les envoyer vers les différentes applications de récolement et de réalité augmentée. Pour illustrer visuellement son fonctionnement, une application tiers connotée topographique a été créée. Elle permet l'enregistrement de points dans les systèmes de coordonnées légaux français et leur visualisation dans un environnement cartographique.

Figure 2 : Application développée pour réaliser des mesures GNSS depuis un appareil Android



5. Conclusion et perspectives

Une solution effective et fonctionnelle a finalement pu être fournie à l'issue de cette étude. Limitée dans son fonctionnement en milieu urbain, cette technologie GNSS fournira, tout de même, ample satisfaction dans les milieux ruraux et urbains semi-denses. Il convient à présent de perfectionner l'ensemble des applications Syslor pour profiter pleinement des nombreuses possibilités qu'offre le positionnement centimétrique sous un appareil Android hautement connecté. Il conviendra également d'étudier la fiabilité dans le temps des modules GNSS qui seront produits à partir des récepteurs « Low-cost ». Une étude qualité sera ainsi menée pour confirmer durablement l'intérêt de cette solution hybride aux performances étonnantes.

Numérisation 3D des carrières et des œuvres de Montigny à Machemont (Oise – 60)

PFE présenté par : **Manon MOTTIN**
Société d'accueil : **Somme Patrimoine**
Laboratoire ICube UMR
7357, équipe TRIO
Directeur de PFE : **Gilles PRILAUX**
Encadrant : **Pierre GRUSSENMEYER & Samuel GUILLEMIN**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Introduction

Le centenaire de la Première Guerre Mondiale a permis à de nombreux projets d'être menés dans l'objectif de préserver et de valoriser le patrimoine souterrain de la Grande Guerre. Les Hauts de France regorgent de souterrains dans lesquels les soldats ont trouvé refuge et y ont laissé de nombreuses gravures. Ces projets permettent d'archiver la mémoire des combattants en leur rendant un ultime hommage au travers de travaux numériques partagés avec le grand public.

2. Contexte et définition de l'étude

Les carrières de Montigny, dans le village de Machemont, sont situées dans le département de l'Oise dans la région Hauts de France. Cette zone a connu le passage de nombreuses armées et les traces laissées sont aujourd'hui le témoignage des soldats ayant combattu pour la France durant la Grande Guerre. À Machemont ce sont des régiments français, mais aussi des régiments de Zouaves (unités françaises d'infanterie légère appartenant à l'Armée d'Afrique) qui ont trouvé refuge dans ces carrières de craie.

La numérisation des carrières de Montigny et de leurs œuvres, vient à la suite de nombreux autres projets tels que la modélisation 3D des souterrains de maison Blanche à Neuville-Saint-Vaast ou encore celle de la cité souterraine de Naours. Comme pour ces projets, l'objectif est de réaliser une visite virtuelle des lieux au moyen de la réalité virtuelle mais aussi grâce à une vidéo de cinq minutes présentant les lieux ainsi que l'histoire des gravures réalisées par les soldats (*figure 1*).

Le second objectif de cette étude est de reconstituer une sculpture à partir d'une seule image d'archives ainsi que d'imprimer en trois dimensions certaines d'entre elles.



Figure 1 : Quelques sculptures présentes dans les carrières de Montigny ayant fait l'objet de modélisation 3D

Pour atteindre ces objectifs, les techniques du géomètre s'avèrent être les plus adéquates. En effet, il dispose de méthodes de numérisation 3D permettant de réaliser des mesures sans contact avec l'objet et son environnement proche. Nous obtenons des informations de type distances 3D, qui nous permettent de représenter les objets dans les trois dimensions. Pour cela, la combinaison des appareils de lasergrammétrie et photogrammétrie terrestre apparaît comme la meilleure solution.

3. Missions réalisées sur le terrain

En février dernier, une mission de trois jours dans les carrières a été réalisée afin de relever le site. La volumétrie des carrières ainsi que l'extérieur du site ont été acquis par lasergrammétrie. Les gravures réalisées par les soldats ont quant à elles fait l'objet d'acquisitions photogrammétriques. Pour cela plusieurs appareils ont été utilisés (figure 2), à savoir les scanners laser FARO Focus 3D et Leica BLK, l'appareil photo CANON EOS 5DSR ainsi que le smartphone iPhone 8S.



Figure 2 : Appareils utilisés : a) Tachéomètre Leica TS02 b) Scanner laser FARO Focus X330 c) Scanner laser Leica BLK d) Appareil photo reflex Canon EOS 5DSR e) iPhone 8S

Des sphères blanches ont été positionnées durant les levés lasergrammétriques afin d'optimiser la consolidation (recalage) des nuages de points entre eux. Le projet a ensuite pu être géoréférencé grâce aux techniques topographiques (tachéomètre Leica TS02) nous permettant de connaître les coordonnées des sphères dans le système national de coordonnées (RGF93-CC49). Cette méthode est aussi utilisée afin de géoréférencer les données photogrammétriques, grâce à la mise en place de cibles codées.

4. Travaux de modélisation

Une fois les données acquises, de nombreuses étapes de traitement sont nécessaires afin d'aboutir aux différents livrables. Chaque jeu de données (lasergrammétrie et photogrammétrique) est traité indépendamment dans un premier temps. Une fois le traitement réalisé, les différents jeux de données peuvent être fusionnés, on parle alors de « modèle hybride ».

Ci-dessous, le déroulement de ces tâches à l'aide de différents logiciels et les livrables réalisés.

Lasergrammétrie

Les données lasergrammétriques ont été traitées avec le logiciel SCENE de FARO pour la consolidation et le géoréférencement des nuages de points. La suite du traitement a été réalisée avec le logiciel 3DReshaper. Le nuage de points global a été échantillonné à 1cm, puis découpé en différentes parties afin de pouvoir adapter le maillage en fonction des détails présents dans chaque zone. Un maillage en deux étapes a ensuite été réalisé. Dans un premier temps le nuage de points (figure 3) est maillé « grossièrement », nous obtenons alors un maillage régulier peu précis (figure 4). Puis dans un second temps le maillage est affiné afin de modéliser tous les détails de l'œuvre (figure 5) comme sur cet exemple.



Figure 3 : Nuage de points de l'œuvre "Athéna"

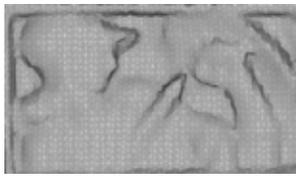


Figure 4 : Maillage "grossier" du nuage de points

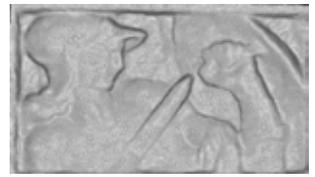


Figure 5 : Maillage affiné, modélisation des détails

Ces maillages sont ensuite texturés avec les outils disponibles sur 3DReshaper : avec des images sphériques issues du système d'acquisition ou des photos du site prises ultérieurement. En fonction de la qualité des images et au vu de la complexité de la géométrie des carrières, les deux méthodes ont été combinées afin d'obtenir un rendu visuel le plus réaliste possible.

Les travaux issus des données lasergrammétriques sont : un nuage de points global qui nous permet de réaliser le projet de réalité virtuelle, des plans des carrières mais aussi servir à la modélisation de la volumétrie de ces dernières.

Cette modélisation (maillage) va ensuite nous servir de base pour les différents modèles hybrides créés notamment pour la visite virtuelle sous forme de vidéo.

Photogrammétrie :

Pour modéliser les gravures réalisées par les soldats, des méthodes photogrammétriques ont été employées. La photogrammétrie nous permet d'obtenir des données de haute précision et des modèles photo-réalistes. Ce projet a permis de restituer 17 œuvres sélectionnées par M. Gilles



Prilaux. Les données ont été traitées à l'aide du logiciel Agisoft Metashape qui traite les données en effectuant les étapes suivantes (figure 6) : orientation des photos, création d'un nuage dense, maillage du nuage dense, texturage du maillage (figure 7).

Figure 6 : Chaîne de traitement des données photogrammétriques avec le logiciel Agisoft Metashape

Les différents modèles obtenus ont été géoréférencés à l'aide de cibles codées dont les coordonnées étaient soit mesurées directement à l'aide de la station totale soit obtenues à partir des nuages de points laser géoréférencés.

De plus, chaque œuvre a fait l'objet de deux relevés photogrammétriques : le premier avec l'appareil photo reflex et le second avec un iPhone 8S, le but étant de comparer ces données. Les données du reflex sont d'une qualité exceptionnelle mais sont volumineuses alors que les données iPhone sont de bonne qualité et plus légères.

Les projets photogrammétriques permettent aussi de texturer des maillages issus de données lasergrammétriques afin de les rendre photo-réalistes. Cela a été très utile notamment lors de la réalisation du modèle destiné à la vidéo, surtout au niveau des zones sculptées, afin d'avoir un rendu homogène.

Les travaux issus des données photogrammétriques sont : les nuages de points denses et les modèles 3D texturés de chaque œuvre. Les nuages de points denses sont utilisés pour la réalité virtuelle, pour la reconstitution d'œuvres et l'impression en trois dimensions. Les textures photogrammétriques permettent de représenter les œuvres dans un niveau de détail très élevé notamment pour la visite virtuelle.



Figure 7 : Scannez-moi pour visualiser la gravure de la déesse Athéna

Livrables réalisés



Le principal livrable attendu dans ce projet est la réalisation d'une vidéo de cinq minutes sous forme de visite virtuelle. La vidéo est réalisée à partir des différents résultats obtenus : nuages de points, maillages texturés ou non. Ces différents éléments sont « fusionnés » afin d'obtenir un rendu visuel le plus réaliste possible pour réaliser la vidéo. La visite virtuelle nous fait voyager d'une gravure à l'autre tout en racontant l'histoire de chacune au travers de courts résumés. Ci-dessous (figure 8) le parcours de la visite suivant la numérotation des œuvres allant de 1 à 18.

Légende :

Extérieur	Carrières	Œuvres
-----------	-----------	--------

1 Déesse Athéna combattant	10 Villa Suzanne
2 Zouave 1	11 Le lion
3 Femme nue 1	12 Déméter/Cérès
4 Zouave 2	13 Zouave 3
5 Officier	14 Athéna Niké
6 "Résignation"	15 Zouave 4
7 Dénomination humoristique	16 Femme nue 2
8 148ème régiment d'infanterie	17 M. Hulot
9 Les gradins	18 Femme nue 3

Figure 8 : Plan du site et position des gravures (sens de la visite)

De plus, afin de partager ce patrimoine au plus grand nombre, l'immersion dans un modèle en réalité virtuelle est aujourd'hui un moyen courant de le valoriser. Ce système permet une immersion dans le modèle en trois dimensions. Le modèle obtenu est particulièrement réaliste et permettra à l'utilisateur de visiter les carrières de Montigny ainsi que ses œuvres.

Enfin, à partir des données photogrammétriques, des maillages très fins ont été créés dans le but d'imprimer les œuvres en 3D. Les œuvres étant des parties intégrantes des murs des carrières, il a été nécessaire de réfléchir à un socle pour que la gravure prenne la forme d'un objet. Au total une dizaine de pièces ont été imprimées.

5. Reconstitution d'une œuvre à partir d'une seule image d'archive

Les gravures laissées par les soldats dans les carrières de Montigny ont aujourd'hui plus de 100 ans et certaines d'entre elles sont partiellement endommagées. Dans l'optique de lui donner une seconde jeunesse, la reconstitution numérique de l'œuvre n°11 (« Lion ») a été réalisée. Le principal inconvénient ici était que nous ne disposions que d'une seule image d'archive (figure 9). Or, en photogrammétrie il est nécessaire de disposer au minimum de deux images afin de reconstruire une forme dans ses trois dimensions.

Afin de reconstruire la queue du lion ainsi que sa crinière et sa tête, plusieurs options s'offraient à nous dont la détection automatique de formes. Malheureusement, cette détection n'est efficace que pour des formes géométriques pour le moment. Les éléments à reconstruire ici étaient trop complexes pour utiliser cette méthode, nous avons donc choisi de réaliser ce travail de façon manuelle. Dans un premier temps en dessinant les formes à la main puis en jouant sur les nuages de points pour leur donner la forme souhaitée.

La première étape est de dessiner la forme disparue en cliquant le contour à la souris, dans le but d'obtenir une forme polygonale en deux dimensions. Nous avons choisi de réaliser cette étape avec le logiciel SketchUp. Une fois cette forme reconstituée, nous l'exportons au format «.stl » ou «.obj » afin de pouvoir travailler sur le logiciel 3DReshaper.

En important les fichiers dans ce logiciel, les éléments 2D sont modélisés sous forme de maillages à partir desquels nous pouvons créer des nuages de points correspondants à la forme. L'outil utilisé nous permet de choisir la densité de points souhaitée, il est donc possible d'obtenir des nuages de points plus ou moins denses (ici 1pt/mm).

Ces nuages de points peuvent ensuite aisément être manipulés, démultipliés ou segmentés afin de reconstituer le nuage de points 3D des différentes formes disparues. Cependant, il convient d'estimer l'épaisseur de chaque partie reconstituée.

Une fois les nuages de points des parties manquantes créés, nous pouvons les ajouter au nuage de points issu du levé photogrammétrique. Nous obtenons alors un nuage de points complet pouvant être maillé puis texturé.



Figure 9 : Seule image d'archive à notre disposition

6. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis de modéliser la quasi-totalité du site des carrières de Montigny et ainsi de contribuer à sauvegarder ce patrimoine. Au travers des différents rendus, il peut maintenant être partagé au grand public. Grâce à la réalité virtuelle, de plus en plus présente dans les projets de numérisation du patrimoine, ce dispositif de visualisation permet de visiter le site quel que soit l'endroit où l'on se trouve à condition d'être équipé d'un système de réalité virtuelle. De plus, il permet aux personnes à mobilité réduite de profiter des carrières et de visualiser les gravures à leur guise. Enfin, dans un avenir plus ou moins proche, lorsque le site sera devenu trop dangereux, il sera toujours possible de le visiter au moyen de la réalité virtuelle.

La visite virtuelle permet quant à elle de présenter, au plus grand nombre, le site de Montigny. Cette valorisation du patrimoine au travers d'une vidéo est aussi un outil pédagogique accessible aux enfants. Elle transmet un message culturel et immortalise les œuvres des soldats.

La reconstitution des œuvres endommagées à partir d'une seule image d'archive donne l'opportunité au public de découvrir ces sculptures dans leur état d'origine. La réalisation de cette tâche étant encore entièrement manuelle, il faudrait pouvoir réaliser des détections de formes complexes automatiquement et pouvoir estimer les reliefs.

Pour les projets à venir, il serait intéressant de pouvoir automatiser certaines tâches. En effet, le traitement des données lasergrammétriques étant très chronophage, l'automatisation de certaines étapes serait un réel gain de temps et de productivité.

Refuge 44 : Imagerie 3D et Réalité Virtuelle de la Carrière Saingt de Fleury-sur-Orne

PFE présenté par : **Quentin THORLET**
Société d'accueil : **INRAP Normandie**
Réalisé au sein du Laboratoire ICube UMR 7357,
Equipe TRIO, INSA Groupe PAGE
Directeur de PFE : **Cyril MARCIGNY**
Encadrant : **Pierre GRUSSENMEYER**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Au matin du 06 juin 1944 et le début du Débarquement, la ville de Caen fut intensément bombardée et s'en trouva détruite à 75%. Les habitants des villes alentours ont alors fui les combats et ont cherché à s'abriter. Certains ont naturellement trouvé refuge dans la carrière souterraine de Fleury-sur-Orne, carrière qui était utilisée comme cave par la brasserie construite au-dessus. Les frères Saingt, propriétaires de l'établissement, mirent alors en place un système de ravitaillement afin de procurer vivres et boissons aux civils réfugiés. Durant les semaines qui suivirent, jusqu'à mille personnes se sont abritées dans cet endroit. À la fin des combats en juillet, les civils furent découverts et sortis de la carrière par des soldats canadiens, laissant derrière eux les lieux en état et de nombreux objets. Leur acte de solidarité n'ayant pas été officiellement reconnu par l'État français, les frères Saingt décidèrent d'interdire tout accès aux souterrains et fermèrent les portes de la carrière à la fin de la guerre.



Figure 1 : Localisation de Fleury-sur-Orne par rapport aux plages du Débarquement.

Retombé dans l'oubli, le lieu a de ce fait été préservé de toute dégradation. À la suite de la redécouverte de la carrière Saingt en 2014, une opération archéologique à caractère expérimental a été mise en œuvre par l'INRAP Normandie. Aujourd'hui fermée au grand public et en excellent état de conservation, elle constitue une opportunité pour les archéologues de mener une étude sociologique et mettre en avant un phénomène souvent sous-estimé : l'impact des conflits mondiaux sur les populations civiles, les conditions de vie des réfugiés et sans-abris suite aux destructions massives.

Le but de ce projet de fin d'études (PFE) est de concevoir un outil de médiation culturelle et scientifique qui soit adossé à cette mission archéologique de la carrière-refuge Saingt de Fleury-sur-Orne. Cet outil s'articule autour de deux parties distinctes :

- **Réalité virtuelle.** Une visite en réalité virtuelle immersive (ou VR pour *Virtual Reality*) est à créer pour faire découvrir la carrière au grand public, partager l'histoire des lieux. Deux scénarios sont à intégrer, à savoir un scénario simple (découverte du site) et un scénario plus complexe (associant une interactivité des visiteurs à une interprétation archéologique des vestiges).
- **Imagerie 3D.** Des lieux de la carrière sont à présenter par le biais de modèles 3D observables sur smartphone. Ces modèles, déposés sur des plateformes en ligne, doivent être visualisables de façon « classique » sur écran, ou bien en réalité augmentée. Des vidéos sont à réaliser en parallèle pour apporter un point de vue différent et complémentaire sur ces secteurs. Le tout doit être appelé via des QR-codes disposés sur un des panneaux de présentation du site.

L'ensemble doit être finalisé pour la fête de la science qui se tiendra en octobre 2019, puis sera par la suite déposé d'une manière pérenne dans un Mémorial du Calvados.

2. Travaux antérieurs

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'un partenariat débuté lors des premières exploitations du site en 2015. Les archéologues de l'INRAP ont fait appel à l'INSA pour procéder à des acquisitions tridimensionnelles non destructives de la carrière Saingt (par photogrammétrie et lasergrammétrie), traiter les données et produire divers rendus numériques. Ces opérations se sont poursuivies jusqu'en 2018 au travers de deux Projets de Recherches Technologiques (PRT) et deux PFE, réalisés par Arnaud BREITWIESER en 2016 et Matthieu VERSTAEN en 2018.

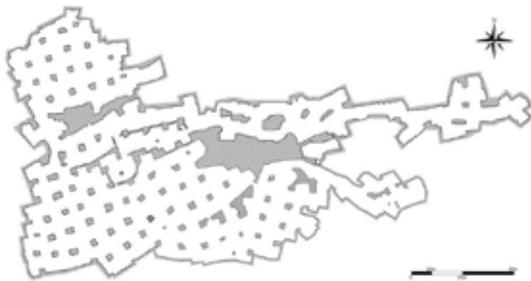


Figure 2 : Plan de la carrière Saingt, réalisé grâce aux diverses acquisitions réalisées au cours des dernières années. [Verstaen, 2018].

Au total, 95 stations de scanner laser ont été réalisées pour numériser en grande partie la carrière (le nuage de points résultant, sans colorimétrie et échantillonné à 1 point/cm, étant constitué de 278 millions de points). Trente zones ont été relevées par photogrammétrie, 7300 photos ont été utilisées lors des différents traitements. Le tout a été complété par des levés topographiques et la mise en place d'un réseau de points connus en coordonnées. Toutes ces acquisitions, en temps cumulé, ont nécessité trois semaines de levés et d'interventions sur site.

Ce PFE étant la suite directe de ces années de travail et du PRT que j'ai réalisé fin 2018, il dispose de ce fait d'une base de données conséquente pour la bonne réalisation des objectifs fixés (plans, coupes, nuages de points, modèles 3D, orthophotos, informations sur les objets archéologiques de la carrière, etc.).

3. Étude Bibliographique

Le principe de la réalité virtuelle est le suivant : simuler un environnement tridimensionnel avec lequel il est possible d'interagir de manière réelle ou virtuelle. Un système VR doit être interactif, multisensoriel, synthétique, mais surtout immersif. Cette dernière caractéristique est primordiale. En tenant compte de ces éléments, plusieurs équipements composent une installation de réalité virtuelle :

- Les **systèmes entrants**, qui permettent l'acquisition des actions de l'utilisateur.
- Les **systèmes sortants**, qui sollicitent les cinq sens de l'utilisateur pour lui donner l'illusion que l'environnement dans lequel il se trouve est réel.

Ces deux types de systèmes sont associés dans les composantes matérielles d'un dispositif VR. Les équipements les plus utilisés sont les visiocasques, communément appelés casques VR. De différents types ces dispositifs couvrent d'écrans le champ de vision de l'utilisateur pour lui permettre de visualiser directement l'environnement virtuel. Il est ainsi isolé de son cadre réel.

La réalité virtuelle est grandement utilisée pour la préservation du patrimoine, tel que c'est le cas pour ce projet. Il est important de noter que le mot préservation est ici à prendre au sens « conservation dans le temps par le biais d'outils technologiques », qu'il ne s'agit pas de la préservation des lieux en eux-mêmes. Les modèles 3D sont en effet le moyen de constituer des bases de données fiables, conséquentes et pérennes sur des sites historiques ; puis de partager les connaissances reliées en proposant de nouveaux dispositifs ludiques et interactifs.

4. Mise en place d'une visite en réalité virtuelle immersive

Le principal aspect de l'outil de médiation développé concerne la création d'une visite en réalité virtuelle immersive de la carrière. Une première ébauche de maquette numérique visitable en VR existait déjà, ayant été réalisée par Matthieu VERSTAEN au cours de son PFE en 2018. Cela a servi de base de travail pour ce projet de fin d'études.

4.1 Développement de la visite

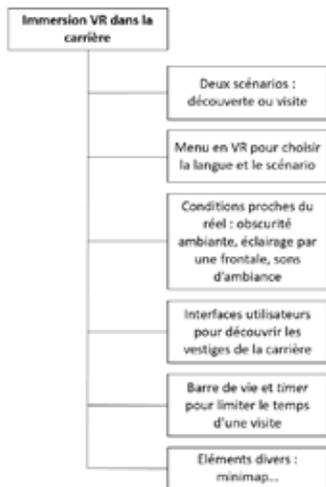


Figure 3 : Éléments à intégrer dans la visite de la carrière en VR.

De nombreux logiciels existent aujourd'hui afin de prendre en charge des applications de réalité virtuelle. Tous ne permettent cependant pas leur création. Le logiciel utilisé est le moteur de jeu Unreal Engine 4 (abrégé par UE4). Développé par la société Epic Games, il est mondialement reconnu pour ses rendus réalistes et est couramment utilisé dans la création de contenu vidéoludique.

Avant de commencer à développer les éléments à intégrer dans la visite, des aspects initiaux de la première maquette VR ont été repris. Celle-ci comprenait les éléments principaux à l'immersion, à savoir les maillages des secteurs relevés par lasergrammétrie et les modèles 3D des secteurs relevés par photogrammétrie. Cependant, des problèmes subsistaient, tels que l'inadaptation des maillages à la surface VR ou encore le fait de pouvoir traverser les murs.

À la suite de cela, les éléments affichés sur la Figure 3 ont été intégrés à la nouvelle version de la maquette. Cela s'est fait par Blueprint, langage de programmation visuel propre à UE4. Le principe consiste à relier des fonctions par des nœuds et des liens. Il n'y a de ce fait pas de lignes de code à écrire. Les résultats liés à cette programmation sont développés dans le paragraphe 4.2.

4.2. Principaux aspects de la visite en réalité virtuelle

De nombreux points sont intégrés dans la visite VR afin de rendre l'expérience la plus complète et enrichissante possible. Tout d'abord, l'immersion peut se faire selon deux scénarios :

- **Découverte** : Il permet une simple exploration de la carrière, il n'y a pas de renseignements sur les objets visibles.
- **Visite** : Ce scénario contient des interprétations archéologiques d'objets d'intérêt. Les visiteurs peuvent alors interroger ces objets par le biais d'interfaces utilisateurs. Sous l'apparence de boutons qui peuvent être cliqués, une interaction avec ces interfaces ouvre un panneau contenant des images et des textes descriptifs.

Il est à noter que la carrière contenant un grand nombre de vestiges, seuls les plus remarquables ont été intégrés dans le scénario de la visite.

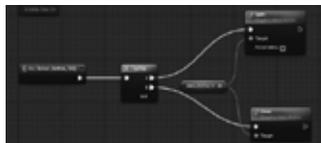


Figure 4 : Illustration d'un morceau de Blueprint pour une interface utilisateur.

Le choix du scénario se fait par le biais d'un menu présent au sein de la maquette VR, s'agissant d'un élément à part entière de l'immersion puisque étant le point de départ de l'immersion. La sélection de la langue (anglais ou français) est proposée au préalable du choix d'un scénario.

Ensuite, il faut tenir compte du fait que la carrière est une immense galerie souterraine, plongée dans l'obscurité la plus totale, uniquement accessible par un puits d'une dizaine de mètres. De ce fait, divers éléments ont été développés pour que l'immersion proposée se rapproche au plus près des conditions réelles de la carrière. L'éclairage dans l'environnement virtuel se fait ainsi au moyen d'une source lumineuse de type lampe frontale, tandis que des sons d'ambiance illustrent le bruit fait par les gouttes d'eau tombant du plafond.

Dans une même optique de fidélité, la durée d'une visite en VR est limitée. En effet, la carrière n'étant pas en contact direct avec la surface, le volume d'oxygène présent est restreint. Le taux de CO₂ conditionne de ce fait le temps de présence sur site. La limitation du temps en réalité virtuelle est alors représentée par un masque à gaz dont le contenu se remplit au fur et à mesure de la visite. Une fois le taux maximal atteint (100%), l'immersion s'arrête et le visiteur se retrouve à nouveau dans l'instance du menu.

Enfin, la réalité virtuelle étant une technique relativement récente, son utilisation peut demander un certain temps d'adaptation pour les non-initiés. De plus, la carrière n'étant pas accessible, il peut être difficile de s'orienter dans sa reproduction numérique. L'association de ces paramètres peut conduire au fait que les visiteurs ne savent pas où aller, perdent du temps de visite et ne profitent pas pleinement de l'immersion. De ce fait, une minimap est affichée en permanence dans le champ de vision périphérique. Les zones non accessibles et les objets d'intérêt sont symbolisés dessus. Toujours pour le confort des utilisateurs du dispositif VR, d'autres éléments sont intégrés dans la visite pour offrir la meilleure expérience possible. Un aperçu de l'immersion dans la carrière en réalité virtuelle est accessible par le biais du QR-code ci-contre.



Figure 5 : QR-code à scanner pour accéder à une vidéo YouTube illustrant l'immersion en VR.

4. Imagerie 3D et réalité augmentée

La partie concernant la partie Imagerie 3D, en comparaison de la visite en VR, concerne un aspect moindre de l'outil de médiation culturelle. L'objectif est de faire découvrir des parties de la carrière avant de les observer en réalité virtuelle. Pour cela, des modèles 3D de secteurs relevés par photogrammétrie, déposés sur Sketchfab, peuvent être appelés par QR-code et observés sur un smartphone.



Figure 6 : QR-code à scanner pour visualiser en réalité augmentée un secteur de la carrière Saingt (secteur relevé par photogrammétrie).

Afin d'offrir une nouvelle forme de visualisation des données, ces modèles sont également déposés sur Github et reliés à un code HTML pour pouvoir être visualisables en réalité augmentée. La réalité augmentée désigne le fait de superposer des éléments virtuels à un environnement réel par le biais d'un écran. L'objectif est d'enrichir en temps réel la perception de cet environnement par des augmentations visuelles, sonores ou haptiques (sensations de toucher via un mode de vibration).

La visualisation en réalité augmentée de modèles 3D peut se faire avec l'application mobile de Sketchfab, mais cela est plus contraignant que le moyen décrit ci-dessus. C'est la raison pour laquelle cette solution a été développée. Un exemple d'une visualisation par réalité augmentée est accessible par le biais du QR-code ci-contre. N.B : Il faut veiller à ce que le marqueur Hiro (au centre du QR-code) soit toujours bien dans l'axe de la caméra du smartphone.

Enfin, des vidéos permettant de présenter un aperçu complet de la carrière ont été enregistrées dans UE4 et Scene LT. La vidéo faite dans Scene LT, au cœur du nuage de points, illustre principalement le cadre d'accès au puits, sa descente pour arriver dans la carrière. Il s'agit d'un moyen pour se rendre compte qu'un lieu historique se situe dans les sous-sols d'un quartier pavillonnaire où rien ne transparait quant à l'histoire des lieux. Les vidéos faites dans Unreal Engine 4 sont pour leur part des aperçus de la visite en réalité virtuelle immersive de la carrière.

5. Conclusion et perspectives

Ce PFE marque la fin de travaux commencés il y a maintenant plus de quatre ans. Le but de ce projet est de valoriser un lieu inconnu et chargé d'histoire, tout en proposant une visualisation par le biais d'une technologie nouvelle : la réalité virtuelle. L'INRAP est maintenant en possession d'un outil de médiation culturelle pour présenter l'histoire de la carrière et mettre en avant les conditions de vie des civils-réfugiés. Des aspects de cet outil ont déjà été utilisés lors des commémorations du 75^{ème} anniversaire du Débarquement, des extraits vidéo ayant été montrés lors de reportages télévisés.

L'intérêt de la topographie envers la réalité augmentée grandit aujourd'hui de plus en plus. Cette dernière permet une visualisation inédite de modèles 3D, aussi bien pour des nuages de points que pour des modèles maillés et texturés. Cependant, la VR sert de « pont » entre les données topographiques et leur visualisation, le développement d'une solution de réalité virtuelle demandant des connaissances d'autres corps de métier. Il serait donc intéressant, dans le cadre du Refuge 44 ou d'autres projets à venir, de travailler en collaboration étroite avec un programmeur de jeux vidéo pour améliorer l'expérience qui peut être proposée aux visiteurs.

Recherche et développement d'outils automatiques / semi-automatiques pour la digitalisation du nuage de points

PFE présenté par : **Sébastien VERGNOL**
Société d'accueil : **Parera**
Directrice de PFE : **Aurélié DE MASSIAS - LABORDE**
Correcteurs : **Mathieu KOEHL & Tania LANDES**



1. Introduction

Dans le cadre de la politique nationale de fiabilisation de la cartographie des réseaux sensibles, les exploitants et gestionnaires de réseaux ont mis en place des procédures afin de créer ou de mettre à jour en masse les plans cartographiques de leurs réseaux. Cette production de plans s'effectuant à grande échelle, une des méthodes utilisée pour réaliser les levés est le levé par système de cartographie mobile

La mise sur le marché de nouveaux logiciels et d'outils spécialisés dans le traitement de nuage de points permet de faciliter l'accessibilité et l'exploitation de ce type de données. Différentes solutions existent à ce jour, mais elles visent un large panel d'applications et donc ne répondent pas aux problématiques de certaines utilisations spécifiques. Il a donc été décidé de développer des outils adaptés pour la digitalisation sur des nuages de points.

Fondée en 1968 à Gimont dans le Gers (32), Parera occupe aujourd'hui une place de leader dans le domaine de la cartographie en France. Elle est présente à ce jour dans un grand nombre de secteurs : la détection de réseaux, la création et la mise à jour de plans de réseaux, la production de maquettes BIM (*Building Information Modeling*) et le développement de solutions technologiques liées aux domaines des réseaux.

Ce projet de fin d'étude s'inscrit dans le souhait de la société d'optimiser la chaîne de production de plans à partir d'acquisitions LIDAR terrestres dynamiques. En automatisant ce processus la société souhaite exploiter au mieux cette donnée. **L'objectif de cette étude est de rechercher et produire des outils permettant d'automatiser la digitalisation des éléments requis pour la production de plans à partir de nuages de points. Les outils développés ont pour but la détection et la restitution en trois dimensions sous forme vectorielle des éléments de fond de plan. L'autonomie, l'efficacité ainsi que la fiabilité de ces outils seront mises à l'épreuve.**

2. Mise en place d'une chaîne de traitement de la donnée

A la suite de l'examen des différents cahiers des charges des affaires traitées par Parera, il est apparu que les mêmes informations doivent figurer sur les livrables fournis aux différents clients. Cela a permis de créer une liste d'objets à extraire des nuages de points et de définir une chaîne de traitement pour leur extraction. Cette chaîne de traitement (*figure 1*) a été mise au point afin que n'importe quelle étape puisse être utilisée indépendamment des autres pour obtenir des outils modulaires. Le logiciel FME est utilisé pour réaliser cette chaîne de traitement. FME est un logiciel de traitement de données initialement conçu pour la création et la gestion de systèmes d'informations géographiques, mais qui s'est étoffé au fil du temps afin de fournir aujourd'hui un logiciel polyvalent.

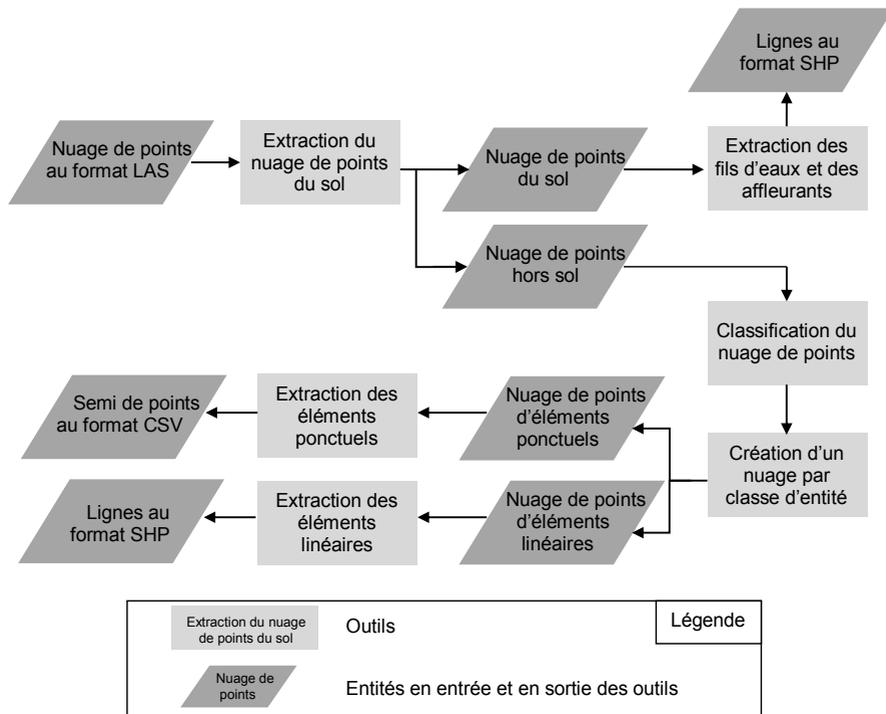


Figure 1 – Chaîne de traitement des nuages de points

Un contrôle visuel par un opérateur est nécessaire afin de vérifier la qualité des résultats obtenus.

3. Développement d'outils de traitements de nuages de points

Les nuages de points utilisés pour cette étude sont les nuages de points géoréférencés, aucun traitement ne leur a été appliqué, bien que ces opérations soient disponibles dans tous les logiciels de traitement de nuages de points.

L'échantillonnage et la suppression de bruit des nuages ont été intégrés aux différents outils développés. Ces opérations de nettoyage du nuage sont les premières à être exécutées dans chaque outil, même si cela alourdit légèrement le traitement. Cela permet d'utiliser chaque routine sur un nuage brut indépendamment des étapes précédentes afin de rendre les outils d'extraction plus flexibles.

Un outil de classification du nuage de points a également été mis au point, car les solutions présentes sur le marché nécessitent une intervention régulière d'un opérateur ou n'offrent pas assez de personnalisation dans le cas d'une classification entièrement automatique.

La méthode de classification développée ici s'appuie sur une classification par objets. Une fois le sol extrait, chaque objet dans le nuage de points peut être différencié et intégré dans une classe en fonction de ses caractéristiques géométriques (densité, orientation moyenne des normales, déviation des normales, etc.). Une table de classification comportant six entrées (bâtiments, végétation, poteaux électriques, mobilier urbain, voitures, objets non classifiés) a été mise au point pour ce projet. La classification doit être contrôlée par un opérateur avant d'effectuer une détection par classe d'entité des éléments dans les nuages de points.

4. Développement d'outils d'extractions d'éléments dans les nuages de points

Une fois le nuage classifié il est possible d'extraire les éléments de chaque classe. Pour cette extraction, une voxelisation du nuage de points (découpage du nuage en cubes de dimensions préalablement établies) est effectuée. Après cette découpe, les éléments les plus proches du sol sont extraits sous forme de polygones. Pour les objets ponctuels, le centre est sélectionné ou la ligne centrale pour les objets linéaires tels que les bâtiments ou les murets (*figure 2*).

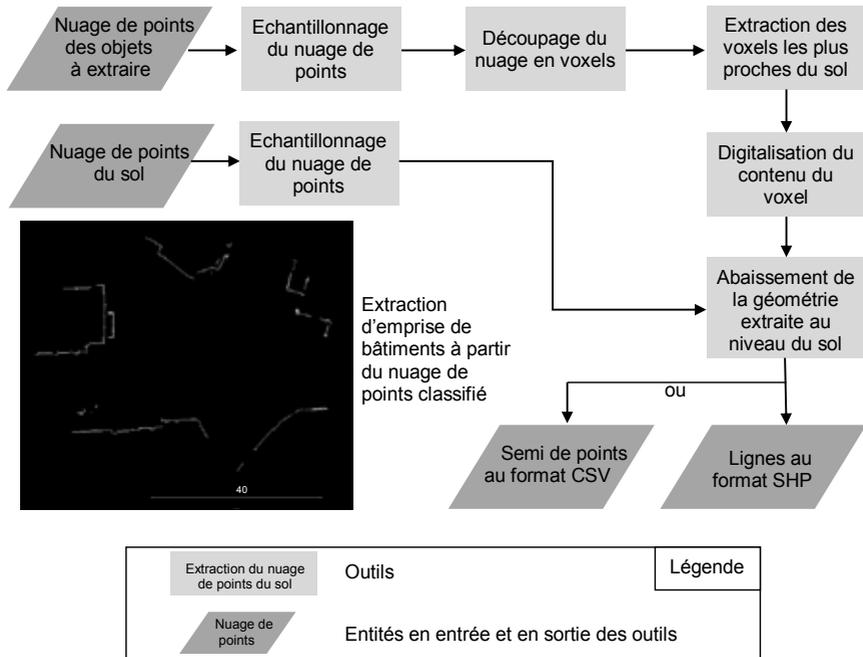


Figure 2 – Chaîne d'opérations pour l'extraction d'éléments ponctuels ou linéaires dans les nuages de points et le résultat obtenu pour une extraction d'emprise de bâtiments

Une autre méthode considérée pour l'extraction d'objets linéaires est la segmentation par orientation de plan associée à une recherche de plan moyen. Cela permet d'extraire entre autres l'emprise au sol des bâtiments à partir d'une intersection entre un modèle numérique de terrain et le plan principal des différentes façades d'un bâtiment.

5. Développement d'outils d'extraction d'éléments dans les ortho-images

Une ortho-image est une projection fidèle et sans déformation du nuage de points sous forme d'image.

La détection sur ortho-images est utilisée pour la détection des affleurants et des fils d'eau des trottoirs. Dans le premier cas, une ortho-image en intensité est produite, dans le second cas c'est une ortho-image en élévation qui est utilisée.

A partir de ces ortho-images, il est possible d'extraire les contours des objets sous forme de lignes en deux dimensions. Elles sont ensuite reprojétées sur le nuage afin d'obtenir des lignes avec une altitude associée, soit une donnée en 2D + 1D (*figure 3*).

La digitalisation à partir d'images nécessite l'utilisation d'outils spécifiques au traitement d'image inclus dans le logiciel FME (principalement des produits de convolutions). Il a été possible de produire une suite d'outils permettant d'extraire les contours de différents objets suivant le type d'ortho-image utilisé. Une image en intensité permettra d'extraire les marquages au sol et les affleurants des réseaux, une image en élévation quant à elle permettra d'extraire les fils d'eau et les trottoirs.

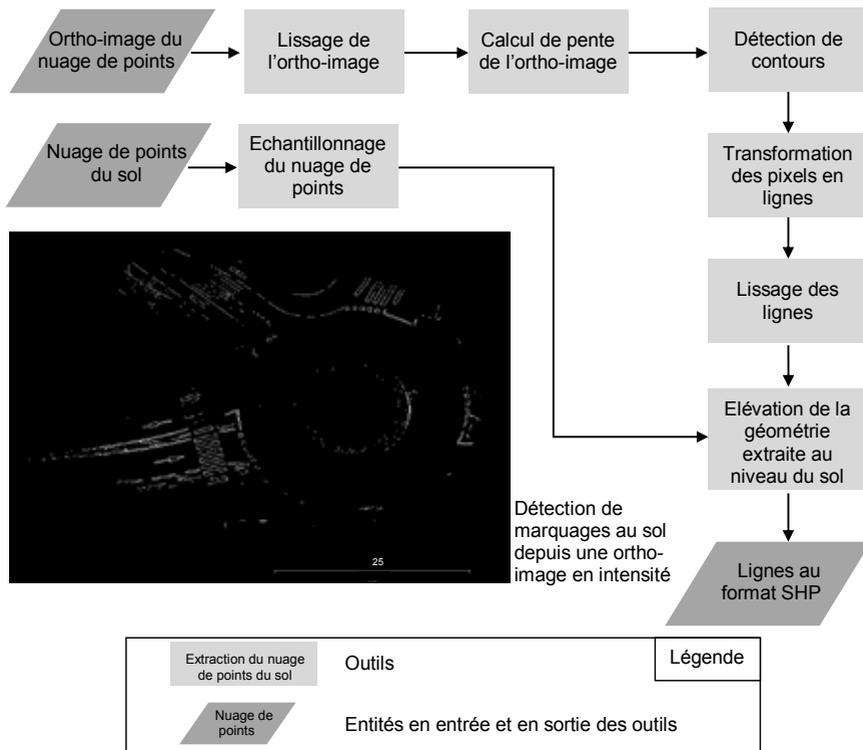


Figure 3 - Chaîne d'opérations pour l'extraction de lignes à partir d'ortho-images et le résultat obtenu sur une détection de marquages au sol

6. Conclusion

Ce projet a pour but d'automatiser la digitalisation de nuages de points pour la production de plans à partir de données LiDAR et de préparer un processus d'industrialisation du traitement de la donnée. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une automatisation complète et que des interventions d'opérateurs soient nécessaires dans les étapes intermédiaires pour la création des livrables finaux, ces outils ont permis de transformer le traitement des données et d'apporter une aide aux opérateurs. La confrontation entre la chaîne de traitement développée et la chaîne de traitement en usage dans la société est l'étape ultime de ce projet et permet de déterminer la pertinence des outils mis au point lors de cette étude.

Contrôle de nuages de points relevés par lasergrammétrie et photogrammétrie et mise en place d'une méthode de traitement

PFE présenté par : **Mélissa PROVOST-BLANCHARD**
Société d'accueil : **Groupe ELABOR**
Directeur de PFE : **M. Christophe COUTOUT**
Correcteurs : **M. Mathieu KOEHL**
M. Pierre GRUSSENMEYER



1. Contexte et objectifs de l'étude

Le Groupe ELABOR est une entreprise spécialisée dans 3 domaines : l'aménagement du territoire, l'ingénierie télécom et la gestion de cimetières. Le domaine de l'aménagement du territoire est étudié au sein du service Topographie Réseaux Bâtiment qui a en charge deux dossiers importants : le PCRS¹ de Dijon dont les données ont été acquises par « Mobile Mapping » et la détection et le relevé d'éclairage public pour atteindre les objectifs de réglementation DT-DICT².

Le but principal aujourd'hui est de connaître le processus intégral, de l'acquisition au livrable, du traitement de données acquises par un système LiDAR³. Le Groupe ELABOR ne dispose pas du système d'acquisition mais souhaite avoir une vue globale de cette phase de travail pour obtenir des données de qualité des entreprises avec lesquelles le Groupe ELABOR travaille. De plus, avoir au sein de l'entreprise une méthode complète de traitement de nuages de points issus d'une acquisition LiDAR doit permettre de pouvoir faire de la digitalisation dans le nuage en minimisant les interventions sur le terrain.

Le second but est d'étudier des méthodes alternatives d'acquisition afin de palier à des problèmes techniques rencontrés sur le dossier de détection (marquages qui s'effacent, marquages qui ne tiennent pas sur sol mouillé, ...)

2. La norme PCRS approfondie au PCRC⁴ et la réglementation DT-DICT

La norme PCRS doit permettre à l'ensemble des communes de France de disposer d'un fond de plan unique sur lequel tous les réseaux, sensibles ou non, doivent être géoréférencés de manière plus ou moins précise selon le niveau de dangerosité de ces dernières. En effet, selon [Mitanchey, 2015]⁵, le PCRS constitue le socle topographique de base décrivant les limites apparentes de la voirie. De même, [Lambois, 2017]⁶ énonce le fait que le PCRS est « un ensemble de données destinées à servir de support ». Toutefois, Dijon Métropole a souhaité disposer d'un corps de rue complet afin d'utiliser ce fond de plan commun pour la gestion de l'espace public de la métropole. Ainsi, dans ce plan, nous retrouvons toutes les caractéristiques dimensionnelles des bâtiments, le mobilier urbain, les réseaux ainsi que les marquages au sol.

La réglementation DT-DICT quant à elle impose aux communes d'avoir géoréférencé avant le 1^{er} janvier 2026 les réseaux dits sensibles. Cette réglementation a permis de mettre en place un « Guichet Unique » qui a pour but de permettre à tout maître d'œuvre ou autre intervenant qui souhaite faire des travaux à proximité de réseaux, d'avoir accès au plan de localisation de ces derniers et ainsi éviter de les endommager.

¹ PCRS : Plan de Corps de Rue Simplifié

² DT-DICT : Déclaration De Travaux – Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux

³ LiDAR : Light Detection And Ranging

⁴ PCRC : Plan de Corps de Rue Complet

⁵ [Mitanchey, 2015] R. Mitanchey, 2015. Spécifications CNIG du thème Plan du Corps de Rue Simplifié version 1.0. CNIG, Pages 1-67 (Seule version validée au 21 juin 2017)

⁶ [Lambois, 2017] M. Lambois, 2017. Spécifications CNIG du thème Plan de Corps de Rue Simplifié à très grande échelle.

3. Méthodes de traitement et de contrôle pour la réalisation du PCRS/PCRC

3.1. Analyse de la méthode de traitement existante

Pour des raisons de confidentialité, les différents partenaires du Groupe ELABOR sont nommés comme suit :

- Partenaire A (PA) : Entreprise ayant réalisé l'acquisition du nuage de points en 2016
- Partenaire B (PB) : Entreprise ayant réalisé l'acquisition du nuage de points en 2018
- Partenaire C (PC) : Entreprise ayant effectué une partie de la digitalisation dans le nuage de points

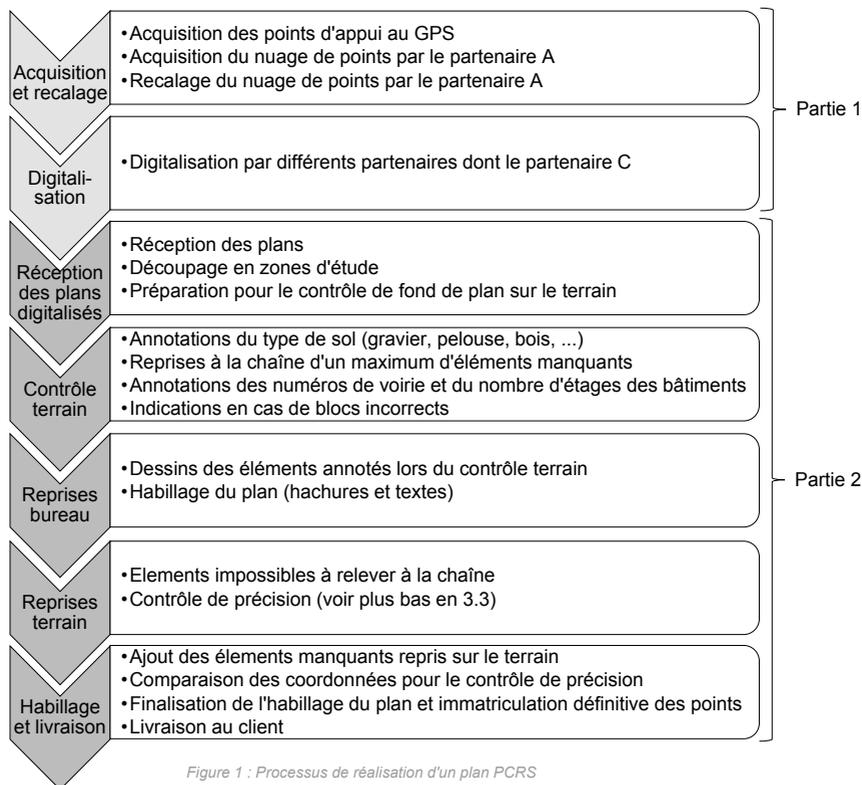


Figure 1 : Processus de réalisation d'un plan PCRS

Depuis le début de ce dossier, la méthode n'a pas connu de changements substantiels. Seul l'ordre de chacun des travaux a été modifié. Toutefois, cette méthode est limitée aux éléments traités par le PC. En effet, dans certains quartiers, des rues n'ont pas fait l'objet d'une digitalisation dans le nuage de points à cause d'un manque de données. Par conséquent, il fallait trouver une méthode pour pouvoir traiter ces zones directement au sein de l'équipe.

3.2. Mise en place de la nouvelle méthode de traitement

La partie 2 de la chaîne de traitement est aujourd'hui optimisée pour un dossier de PCRC. Toutefois, cette dernière évoluera au cours des prochains dossiers de PCRS. Chaque client a des demandes particulières au niveau du rendu ou encore de la charte graphique adoptée. Par conséquent, la méthode de traitement changera en fonction de ces dernières.

La partie 1 de la chaîne de traitement, quant à elle, est modifiée. Toutefois, cette partie se fera toujours par l'intermédiaire des différents partenaires car le Groupe ELABOR n'a pas vocation de s'équiper d'un LiDAR dans l'immédiat.

Les différents contrôles effectués ont permis de mettre en évidence certains points qu'il faut respecter tels que la qualité du système d'acquisition ou encore la qualité des points d'appui. Ces deux exemples sont ceux qu'il faut privilégier si l'on souhaite obtenir un nuage de points précis et exact.

Cependant, une nouvelle méthode interne de digitalisation est mise en place afin de pallier aux différents manques. En effet, l'entreprise Geopixel propose de coupler leur logiciel de levé topographique au logiciel CloudCompare afin d'effectuer de la numérisation dans un nuage de points et d'obtenir un plan au format DWG.

3.3. Analyse de la méthode de contrôle des nuages de points existante

La méthode de contrôle existante est nommée « Contrôle de précision » et s'effectue sur le terrain. Le principe est de prendre des éléments qui ont été digitalisés dans le nuage de points afin de disposer d'un point double. Cela permet donc de faire une comparaison et d'estimer la précision de la zone en planimétrie et en altimétrie.

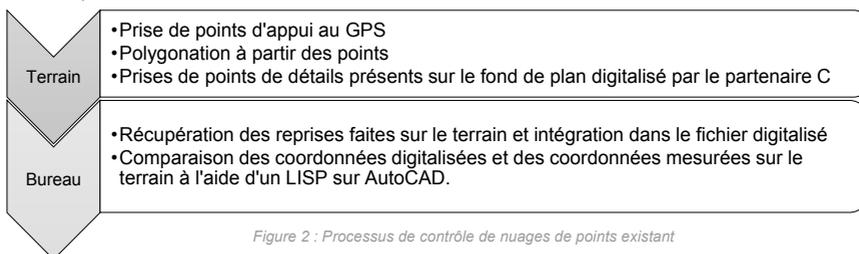


Figure 2 : Processus de contrôle de nuages de points existant

Cette méthode a mis en évidence que le nuage de points réalisé par le partenaire A a une précision altimétrique de 8.0cm et une précision planimétrique de 6.5cm par rapport aux données extraites du Contrôle de précision.

3.4. Mise en place de la nouvelle méthode de contrôle de nuages de points

Pour contrôler les données existantes et mettre en place une nouvelle méthode de contrôle de nuages de points, je disposais de 4 données ordonnées chronologiquement :

- Donnée 1 (D1) : Les points d'appui utilisés pour le recalage du nuage de points du partenaire A
- Donnée 2 (D2) : 1 nuage de points de l'ensemble des voies de Dijon réalisé par le partenaire A
- Donnée 3 (D3) : 1 nuage de points d'un axe important de Dijon réalisé par le partenaire B
- Donnée 4 (D4) : 1 levé topographique effectué au cours du PFE en utilisant des points d'appui nivelés et déterminés par moyennage de mesures GNSS

Différentes comparaisons ont été produites afin de mettre en évidence la méthode à employer : des comparaisons Points/Points et Points/Maillage.

Comparaison Point/Point	Écart moyen planimétrique [cm]	Écart moyen altimétrique [cm]
D4/D1	3.4	7.1
D4/D2	2.6	-8.3
D4/D3	11.8	3.1
D1/D2	2.4	-1.2

Tableau 1 : Récapitulatif des comparaisons Points/Points

Le contrôle Points/Points a permis de mettre en évidence les deux points suivants : le nuage de points du partenaire A est homogène ; le nuage de points est correctement recalé sur les GCP.

Toutefois, le contrôle Points/Maillage montre que le nuage de points a une exactitude altimétrique de 9cm due aux GCP.

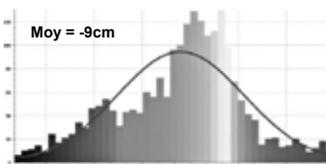


Figure 3 : Courbe des écarts entre le nuage de points du partenaire A et le levé topographique

7 GCP : Ground Control Point (Point d'appui)

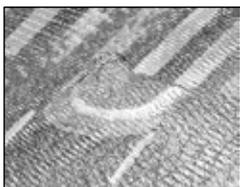


Figure 4 : Qualité visuelle du nuage de points du partenaire B



Figure 5 : Qualité visuelle du nuage de points du partenaire A

Cependant, un contrôle préalable est intégré. En effet, la nouvelle méthode va conserver le contrôle de précision et ajouter un contrôle préalable à tout travail de digitalisation. De plus, un contrôle détaillé des points d'appui sera dorénavant effectué. De plus, avant de lancer l'acquisition complète du dossier, un contrôle de la qualité du système d'acquisition sera réalisé. Ainsi, nous éviterons d'avoir des nuages de points imprécis et inexacts.

4. Méthodes de traitement pour la détection de réseaux

4.1. Méthode de traitement pour la détection de réseaux

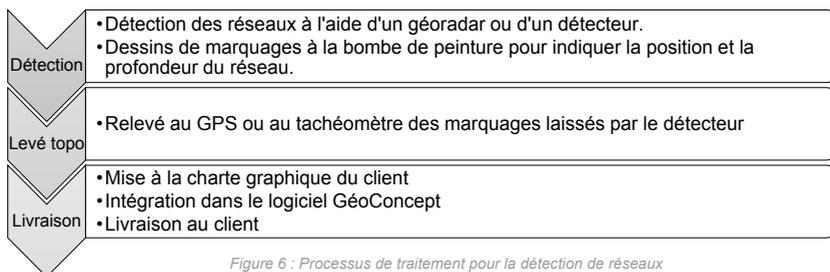


Figure 6 : Processus de traitement pour la détection de réseaux

Cette méthode est la méthode la plus rentable dans le cadre de dossiers de détection de réseaux. Toutefois, une limite existe ; de nombreux facteurs influencent la durée de vie du marquage laissé à la bombe de peinture bien que ces dernières soient prévues pour tenir durant 12 mois. En effet, lorsqu'il pleut, le marquage ne peut être effectué. Ou encore dans certains quartiers très passants, il s'efface rapidement. Un autre facteur à prendre en compte est le type de surface (bitume, gravier, herbes). La question qui s'est alors posée est « Existe-t-il une méthode différente qui permettrait de ne pas devoir recommencer la détection à cause d'un marquage effacé ? ».

4.2. Méthode de traitement pour la détection de réseaux

Même si la méthode de traitement actuelle est la plus rentable, dans certains cas, une méthode alternative est possible lorsque les conditions météorologiques ne sont pas bonnes.

Aujourd'hui de nombreuses entreprises proposent de faire des plans de recollement à l'aide d'une vidéo et de la photogrammétrie. Ainsi, un nuage de points est réalisé et permet d'obtenir les coordonnées des réseaux relevés. Cette méthode couplée à la digitalisation dans CloudCompare permettra donc d'éviter de devoir retourner détecter des réseaux à cause du marquage qui s'est effacé.

5. Conclusion et perspectives

Ce Projet de Fin d'Etudes a permis de mettre en évidence deux problèmes : les points d'appui utilisés par le partenaire A sont imprécis et entraînent une exactitude altimétrique de 9cm entre le nuage de points et le levé topographique ; la qualité du système d'acquisition du partenaire B est insuffisante pour la réalisation d'un PCRC (précision de 3 à 4cm). Le contrôle de précision existant est conservé et une nouvelle procédure de contrôle préalable au démarrage des travaux est mise en place devant permettre d'obtenir un nuage de points plus complet et plus précis.

Concernant la détection de réseaux, des tests de faisabilité sont toujours en cours sur l'acquisition d'un nuage de points à partir de la photogrammétrie. Des partenariats sont également à l'étude.

Pour autant, afin de répondre à la production en cours, des ajustements méthodologiques ont été mis en place pour répondre aux différents problèmes énoncés.

Évaluation des nuages de points photogrammétriques pour l'estimation des caractéristiques des forêts de montagne

PFE présenté par : **Étienne TEISSÈDRE**
Société d'accueil : *Irstea Grenoble*
Directeur de PFE : *Jean-Matthieu MONNET*
Correcteur : *Gilbert FERHAT*



1. Contexte et objectifs de l'étude

La gestion des ressources forestières est un enjeu important du point de vue économique et écologique. La connaissance de ces ressources doit permettre de définir une organisation de la gestion qui se hiérarchise en plusieurs échelles (arbres, forêts, paysage), à différents niveaux d'intervention (stratégique ou opérationnel) et pour divers objectifs (biodiversité, faune sauvage, sylviculture, etc.) (Bergseng *et al.*, 2015). L'ensemble de ces niveaux de décisions impliquent donc des analyses différentes, offrant une grande diversité des études appuyées sur ces données forestières. Les inventaires forestiers sont la principale source de données terrain permettant de connaître à petite échelle (zone de quelques centaines de mètres carrés) des informations au niveau de l'arbre (position, diamètre, essence, hauteur) et de la placette (densité, volume, surface terrière). Ces informations correspondent aux caractéristiques dendrométriques de la forêt qui sont les éléments quantifiables permettant une connaissance de sa structure. Bien que cette source de données soit très complète au niveau d'une placette, elle ne peut être exhaustive et couvrir tout un territoire de façon continue. Il a donc été nécessaire de développer des méthodes innovantes permettant d'étendre cette connaissance à l'ensemble du territoire étudié.

Le projet OUI-GEF, dans lequel s'inscrit cette étude, a pour ambition de vouloir fournir aux acteurs forestiers des outils et données permettant d'acquérir une meilleure connaissance du capital forestier et de son évolution. Beaucoup d'acteurs et de chercheurs sont impliqués, favorisant une approche multidisciplinaire de la problématique. Entre autres, l'étude des technologies d'acquisitions aériennes et du traitement des données qui en sont issues est un enjeu pour la connaissance des ressources. Le LiDAR aéroporté a montré depuis quelques années les possibilités pour cartographier les paramètres forestiers (Monnet, 2011; White *et al.*, 2017). Le coût toujours élevé de cette technologie d'acquisition amène à valoriser le potentiel d'une donnée bien plus ancienne : la photogrammétrie. L'utilisation d'images acquises régulièrement (campagne IGN) permettrait une mise à jour à moindre coût des données forestières.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la précision d'estimation des caractéristiques des forêts de montagne à partir de nuages de points obtenus par photogrammétrie aérienne. Cette analyse doit permettre de situer la donnée photogrammétrique vis-à-vis du LiDAR, justifiant ou non son utilisation pour le suivi régulier des forêts de montagne, dans l'intérêt de l'ONF pour ses travaux de gestionnaire forestier.

2. Moyens matériels

Les données LiDAR et photogrammétriques ont été acquises et traitées par l'entreprise Sintégra Géomètres-Experts (Meylan). La zone d'étude se situe en forêt publique du massif de Grande Chartreuse dans le département de l'Isère et couvre une zone de 124 km². L'acquisition a nécessité la mobilisation d'un hélicoptère pour quatre vols, LiDAR et photos acquis simultanément. Divers livrables ont été fournis, avec notamment un nuage de points brut géoréférencé (classé « sol » et « sursol ») LiDAR et un nuage de points photogrammétrique autocorrélé (tous deux découpés en 695 dalles). Les données d'inventaire forestier ont été fournies par l'ONF. Elles se composent de la base de données des 409 placettes mesurées en 2015. Ces placettes sont normalisées (diamètre :

15m ; géoréférencé X, Y (Lambert 93) ; arbres positionnés en Azimut/Distance depuis le centre de la placette ; arbres : diamètres > 17.5 cm, coordonnées (X, Y), essences, pas de hauteur).

Les outils utilisés pour le traitement des données de cette étude sont Computree (logiciel développé par l'ONF, intégrant l'algorithme de segmentation SEGMA) et le package LidaRtRee, développé par Jean-Matthieu MONNET en langage de programmation R. Ces outils ont été initialement développés pour des données LiDAR. L'adaptation de ces outils aux données photogrammétriques doit faire l'objet d'analyses comparatives avec le LiDAR.

3. Analyses : principes et résultats

Deux grandes méthodes de calcul existent pour l'estimation des valeurs dendrométriques. **L'approche par zones** doit permettre de calculer un modèle de prédiction liant les paramètres du nuage de points (percentiles, écart-type des hauteurs, etc...) à ceux des placettes (surface terrière, volume de bois, etc...). Ce modèle est applicable à l'ensemble de la zone étudiée et permet de connaître les données dendrométriques sur l'ensemble de la forêt. **L'approche par arbre individuel** se base sur la segmentation des couronnes d'arbres dans le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) dérivé du nuage de points. Des caractéristiques peuvent être mesurées et prédites pour chaque couronne, créant ainsi une analyse orientée objet (arbre par arbre) et non surfacique.

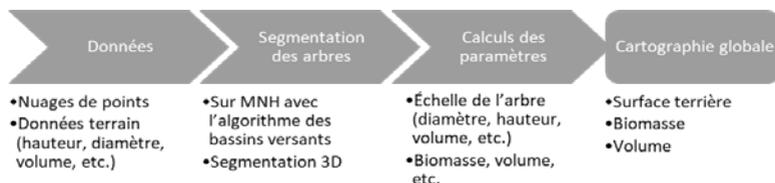


Figure 1 Principe de "l'approche par arbre individuel" ou "ITC" (Individual Tree Crown)

3.1. Analyse structurelle des nuages de points

En ce qui concerne la donnée tridimensionnelle, une forêt peut faire l'objet d'analyses structurelles multi-échelles, au niveau de l'arbre, de la placette ou du peuplement. Différents indicateurs de structure peuvent se révéler intéressants pour une analyse comparative des deux types de données.

La principale différence entre un nuage de points LiDAR et photogrammétrique d'un couvert forestier est la répartition verticale des points. Le LiDAR étant un capteur actif, l'impulsion émise est capable de pénétrer le couvert jusqu'au sol, émettant jusqu'à cinq retours par impulsion. Il en résulte une information de surface et de structure interne de la canopée et permet également d'extraire la surface du sol. Les nuages photogrammétriques sont issus d'un capteur passif. Les points sont uniquement répartis sur la partie visible, c'est-à-dire la surface de la canopée. Pour une comparaison de la description surfacique de la forêt, il a été décidé de ne conserver que les premiers retours du LiDAR, pour être plus cohérent avec la structure du nuage photogrammétrique.

		Hauteur moyenne	Hauteur P90	Écart-type hauteurs
Biais (1 ^{er} retours LiDAR – photo)	(m)	-0,24	0,74	0,77
	(%)	1,7	3,2	10,6
Différence moyenne quadratique	(m)	1,62	1,80	1,09
	(%)	15,6	8,3	14,6

Tableau 1 Statistiques comparées des nuages de points (LiDAR/Photogrammétrie) à l'échelle de la placette

Les analyses au niveau de la placette montrent un biais moyen de -0.24m entre hauteur moyenne LiDAR et Photo, indiquant a priori que les points ont une moyenne plus haute pour le nuage photogrammétrique. Ce biais reste cependant peu significatif en considérant que cette valeur représente une différence de seulement 1,7%. En reliant cette information avec le biais du quatre-vingt dixième percentile qui est de 0.74m, et celui de l'écart-type qui est de 0.77m, on peut conclure que la distribution verticale des points photogrammétriques est plus lisse. Les hauteurs des sommets

semble être sous-estimées (biais du 90^{ème} percentile positif) et des trous entre les couronnes (points bas) surestimées, justifiant un écart type de distribution verticale plus faible avec la photogrammétrie. Des analyses similaires ont été effectuées sur les MNH dérivés des nuages de points. Les biais observés permettent d'aboutir aux mêmes conclusions que celles émises pour les nuages de points.

Lorsqu'un arbre de référence mesuré sur le terrain est associé à un arbre segmenté pour le LiDAR et la photogrammétrie, on parle d'« arbre correspondant ». Pour un certain paramétrage (résolution du MNH et valeur du filtre gaussien appliqué sur celui-ci, distance d'appariement, distance minimale entre deux sommets détectés), il est possible de comparer la structure de ces arbres correspondants.

On voit sur la **figure 2** ci-contre que les hauteurs sont bien corrélées ($R^2 = 0.83$) entre les deux sources de données, avec une tendance de sous-estimation de la photogrammétrie (biais positif de 0.44m). Sur les 2420 arbres correspondants comparés ici, quelques-uns sont aberrants du fait d'une mauvaise autocorrélation de la photogrammétrie. L'écart-type de distribution des hauteurs présente un biais de 1.32m. Cette valeur est cohérente vis-à-vis de l'analyse au niveau de la placette. Les arbres photogrammétriques présentent une distribution verticale des points moins étirée (sommets lissés et bas des houppiers peu décrits). Les surfaces et volumes calculés sont liés aux paramètres de segmentation, plus le lissage sera important, plus la densité d'arbres détectés sera faible, donc plus les surfaces seront importantes. Pour un même paramétrage (résolution du MNH = 0.5m, sigma = 0.5), on observe une segmentation plus dense pour la photogrammétrie.

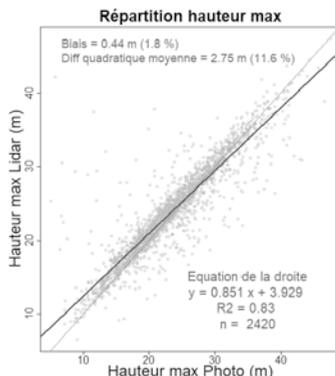


Figure 2 Comparaison des hauteurs des arbres correspondants

3.2. Analyse de la qualité de détection d'arbres

L'analyse de la qualité de détection des arbres individuels dans le Modèle Numérique de Hauteur inclut les taux de bonnes détections, d'omissions et de commissions.

Algorithme	Données	Bonnes détections (%)	Commissions (%)	Omissions (%)	Paramètres (Sigma - Résolution (m) - DeltaH (LiDAR) et Ddrop (Photo))
LidaRtRee	LiDAR	64	10	36	0,3 - 0,5 - 0,03
	Photo	56	9	44	0,5 - 0,5 - 0,04
Computree (SEGMA)	LiDAR	63	10	37	0,5 - 0,5 - 0,60
	Photo	59	14	41	0,6 - 0,5 - 0,70

Tableau 2 Indices de qualité de détection des arbres individuels avec les deux algorithmes testés

Dans le **tableau 2** ci-dessus, il est intéressant de noter qu'afin de se rapprocher des résultats obtenus avec le LiDAR, il est nécessaire d'avoir des paramétrages de lissage plus forts pour la photogrammétrie (valeur sigma du filtre gaussien plus élevée). Les deux données se comportent de la même façon en ce qui concerne les catégories de bois. Des taux d'omissions beaucoup plus faibles sont observés pour les gros bois comparativement aux petits bois (10 % pour les gros bois contre 65% pour les petits bois).

Une étude de l'influence de certains paramètres sur la qualité de détection a été menée afin de comprendre quel peut être le lien entre les caractéristiques des données et la qualité de la détection d'arbres. Pour cela le calcul d'une matrice de corrélation, liant les paramètres de la donnée et les taux de détection, nous informe sur ces possibles influences. La proportion de conifères dans la zone étudiée augmente les taux de bonnes détections, contrairement aux feuillus. Le taux de commission augmente avec la hauteur moyenne (les petits arbres sont masqués par les gros). La pente a une influence négative sur le taux de bonne détection pour les deux données. L'ombrage calculé avec les valeurs RGB du nuage de points photogrammétrique ne semble pas avoir d'influence.

L'exposition reste relativement peu significative, et est de fait liée à d'autres paramètres, notamment le type de peuplement.

3.3. Paramétrages : sensibilité de la détection d'arbres

Les paramètres intéressants pour les étapes de la segmentation sont la **résolution** du Modèle Numérique de Hauteur issu du nuage de points, la valeur de **sigma** pour le filtre gaussien appliqué sur le MNH et le paramètre de **filtrage des maximums** locaux voisins détectés.

L'influence de ces paramètres nous est révélée sur la **figure 3** ci-contre. Pour 70 combinaisons de paramètres, les courbes résultantes de l'évolution des taux de détection sont semblables entre les deux sources de données. Le point théorique parfait est le point (0, 1). On note que la courbe de la photogrammétrie se situe toujours en dessous de celle du LiDAR, indiquant une moins bonne qualité de détection, quels que soient le critère et le paramétrage. Le choix du point optimal pour chaque courbe reste relatif à l'utilisation postérieure de cet inventaire forestier. Une fonction $d = F(p)$ interprétant la distance (d) de la courbe au point (0, 1) peut être définie afin d'aider au choix des paramètres (p). Pour chaque paramètre, l'extremum de F(p) permet de sélectionner sa valeur optimale. La définition de P reste subjective. Pour une équation de la distance pondérant cinq fois le taux de commission, le paramétrage optimal résultant est le suivant : LiDAR (Résolution : 0.5m, Sigma : 0.4, Dprop : 0.04) – Photo. (Résolution : 0.25m, Sigma : 0.7, Dprop : 0.04).

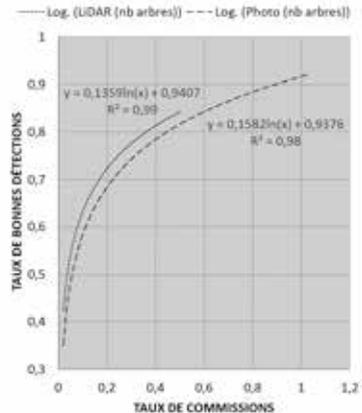


Figure 3 Évolution des taux de détection pour 70 combinaisons de paramétrage (sigma (0,2->0,8; 0,1) Résolution (0,25, 0,50) Dprop (0,03->0,07; 0,01)

4. Conclusion et perspectives

Il a été montré dans cette étude que le nuage de points photogrammétrique reste cohérent d'un point de vue structurel avec les premiers retours d'un nuage de points LiDAR pour le couvert forestier. La structure initiale bien différente entre ces deux données révèle à l'échelle de l'arbre des paramètres de structure semblables (ex : faible biais des hauteurs). Cette analyse structurelle permet de valider la cohérence du nuage de points photogrammétrique et d'expliquer les différences observables dans la suite du traitement. Les algorithmes de segmentation produisent des taux de détections habituels pour ce type de forêt, ce qui rend la donnée exploitable pour un inventaire de l'ensemble du peuplement. Les paramètres influençant la qualité de détection restent similaires pour les deux données (pente, type de peuplement, hauteur moyenne de canopée). Enfin, les tests de paramétrages optimums révèlent un besoin de lissage plus important pour la photogrammétrie qui présente plus de bruits sur la surface du couvert forestier.

Bien que cette étude ait montré le potentiel des données photogrammétriques, les résultats obtenus sont propres aux données de l'étude (forêt de montagne, image à 8cm de résolution au sol) mais restent prometteurs en vue de l'utilisation de données plus accessibles (campagnes IGN). L'utilisation de données telles que les campagnes de photographies effectuées par l'IGN reste à confirmer pour une mise à jour régulière (3-5 ans) de l'information sur le capital forestier.

Se référer au mémoire complet pour l'ensemble des résultats

Références :

- Bergseng, E., Ørka, H. O., Næsset, E. et Gobakken, T. (2015) Assessing forest inventory information obtained from different inventory approaches and remote sensing data sources. *Annals of Forest Science*, vol. 72, n°1, p. 33- 45.
- Monnet, J.-M. (2011) Caractérisation des forêts de montagne par scanner laser aéroporté: estimation de paramètres de peuplement par régression SVM et apprentissage non supervisé pour la détection de sommets, Thèse, 187p.
- White, J. C., Tompalski, P., Vastaranta, M., Wulder, M. A., Saarinen, N., Stepper, C. et Coops, N. C. (2017) A model development and application guide for generating an enhanced forest inventory using airborne laser scanning data and an area-based approach, 48p.

Classification automatique des traces altimétriques pour la détection des surfaces aquifères et l'estimation des volumes d'eau

PFE présenté par : **Pierre ZEIGER**
Société d'accueil : **GET-OMP**
Directeur(trice) de PFE : **Frédéric FRAPPART et José DARROZES**
Correcteurs(trices) : **Gilbert FERHAT**



1. Contexte et objectifs

Le réservoir hydrologique de surface, c'est-à-dire l'ensemble des eaux contenues dans les lacs, fleuves et zones humides du monde, joue un rôle fondamental dans la régulation des cycles hydrologique et géochimique. Les zones humides permettent de stocker d'importantes quantités d'eau douce pendant plusieurs mois, régulant le débit des fleuves, et influençant fortement la biodiversité. La décharge des grands bassins fluviaux est quant à elle liée aux variations de température de surface et de salinité des océans au large des côtes. Pour l'Homme, la gestion de la ressource en eau, notamment des eaux de surface, est également un enjeu de développement clé. Enfin, au niveau géochimique, les variations des zones inondées influent sur le cycle du dioxyde de carbone, ainsi que sur l'émission du méthane (premier contributeur).

Le suivi des eaux de surface nécessite la détermination de l'extension des zones inondées, et celle des hauteurs et des volumes d'eau stockés. Pour l'étendue des zones humides, divers types d'images satellitaires peuvent être employées. L'utilisation de radars à synthèse d'ouverture (SAR : *Synthetic Aperture Radar*) et des micro-ondes permet de s'affranchir des conditions météorologiques, très variables dans les zones équatoriales. La bande L (1-2 GHz) a en outre la faculté de pénétrer le couvert végétal quelle que soit sa densité, et de détecter alors la présence d'eau sous la canopée. Les radars altimètres fournissent quant à eux des informations sur les hauteurs des eaux de surface, à différentes échelles spatiales. Cela permet de contrebalancer le manque de données terrain de certaines régions du globe.

Dans ce contexte, mon projet de fin d'études vise à déterminer une méthode permettant de classer les sols selon la présence ou non d'inondation, et ce à partir de données provenant exclusivement des altimètres. Ensuite, il s'agira de produire des séries temporelles de hauteurs d'eau correspondant aux zones inondées et d'eau libre, afin de disposer de produits à l'échelle d'un bassin versant et/ou d'un continent. Actuellement les séries altimétriques de hauteurs d'eau sont surtout réalisées manuellement, en particulier sur les plaines d'inondation, ce qui rend impossible toute application globale. Pour remédier à cela, l'approche développée au cours de mon projet de fin d'études doit permettre d'automatiser ce processus à partir de paramètres dérivés de l'analyse de l'écho radar altimétrique (ou forme d'onde). Elle doit en outre être applicable sur le plus grand nombre d'environnements, des zones tropicales caractérisées par la présence d'un couvert végétal dense, aux zones péri-arctiques couvertes de neige et de glace une partie de l'année. L'approche mise en œuvre doit également être applicable aux spécificités de l'ensemble des missions altimétriques (orbites à 10, 27 ou 35 jours de répétitivité temporelle, échantillonnage le long de la trace à 18, 20 ou 40 Hz, bandes de fréquences différentes...).

2. La mesure d'altimétrie

L'antenne radar d'un altimètre émet une onde électromagnétique au nadir, généralement en bande Ku ($f = 13,6$ GHz, $\lambda = 2$ cm) ou plus récemment en bande Ka ($f = 35$ GHz, $\lambda < 1$ cm). Le signal réfléchi est ensuite capté par le récepteur, et on peut déduire la distance satellite-sol (appelée *range*) du temps de trajet Δt et de la vitesse de la lumière c :

$$R = \frac{\Delta t * c}{2}$$

L'orbite du satellite étant connue par des techniques de *Détermination précise d'orbite*, on peut déduire de la mesure d'altimétrie la hauteur h des surfaces considérées par rapport à un ellipsoïde de référence. Toutefois des corrections liées à la traversée de l'atmosphère par l'onde et à la forme de la terre doivent être prises en compte. On peut alors calculer la hauteur de la surface h par la formule suivante :

$$h = H - R - \left(\sum \Delta R_{\text{propagation}} + \sum \Delta R_{\text{geophysique}} \right)$$

Où H est l'altitude du satellite. Je ne détaillerai pas ici les différentes corrections apportées, se référer au mémoire pour plus de détails.

La forme d'onde altimétrique, qui représente l'amplitude du signal reçu en fonction du temps, est contenue dans ce qu'on appelle une « fenêtre d'écoute ». La première porte (début de la fenêtre) représente un temps connu, qui est calculé en temps réel par des algorithmes de suivi de bord à partir notamment des mesures précédentes : c'est le « *tracking* ». Pour connaître la distance entre la première porte et l'écho principal, correspondant à la surface réfléchissante, on applique un algorithme de « *retracking* ». La combinaison des deux techniques nous donne une estimation du *range*, et on se reporte alors aux formules ci-dessus. L'aspect de la forme d'onde nous permet de calculer des paramètres comme la rétrodiffusion σ_0 (*backscattering*), ou l'inverse de la largeur de pic (*peakiness*).

Les surfaces continentales sont des objets plus compliqués à analyser que les surfaces océaniques, car elles ne correspondent jamais vraiment à un modèle prédéfini. De plus, des phénomènes d'accrochage (signal puissant réfléchi par un objet d'eau non situé au nadir) et de décrochage (perte du signal en sortant de la fenêtre d'écoute) viennent polluer la mesure.

3. Zones d'étude et données

Dans la logique d'automatisation de traitements manuels, la méthodologie que je propose doit s'affranchir des caractéristiques propres au climat et à la végétation. Cela permettrait d'obtenir une démarche applicable de manière globale, sur les forêts équatoriales denses comme sur bassins fluviaux arctiques. Les zones d'étude sont donc multiples et variées : cuvette centrale du Congo, Amazone, Mississipi, Mékong, La Plata, Mackenzie, Niger...

En ce qui concerne les données, les principales missions altimétriques sont concernées : ENVISAT, Jason-2, SARAL/AltiKa, Sentinel-3A, etc. Pour obtenir des séries temporelles d'une durée supérieure, il est également possible d'ajouter les données Topex/Poseidon et ERS-2 qui ont été recalculées. Le principal paramètre pris en compte dans mon analyse est la rétrodiffusion altimétrique, cependant d'autres sont disponibles : l'inverse de la largeur de pic, et la température de brillance issue des radiomètres. En ce qui concerne la mesure d'altimétrie, toutes les corrections sont déjà calculées à partir des différents modèles existants dans les produits livrés. Les données de validation utilisées sont des cartes d'occupation des sols, des cartes d'inondation réalisées à partir d'imagerie satellitaire (optique, radar passif et actif) et des hauteurs d'eau in-situ ou provenant de produits altimétriques calculés manuellement (base de données Hydroweb du pôle Theia).

4. Travaux réalisés

4.1. Classification des données altimétriques

L'essentiel du travail réalisé a été la construction de plusieurs programmes en python permettant de lire, traiter, classifier et représenter les données altimétriques. Dans le but de répondre aux objectifs du stage, il doit produire des bons résultats quelques soient la zone d'étude et la mission altimétrique. Mon travail consiste à trouver la meilleure configuration entre les paramètres altimétriques mis à disposition, et les méthodes de classification possibles.

Du fait de la faible quantité de données terrain à disposition et des spécificités de l'altimètre (phénomène d'accrochage), j'ai réalisé des classifications non supervisées en me basant sur les paramètres à disposition : la rétrodiffusion, l'inverse de la largeur de pic, et la température de brillance. Plusieurs méthodes de classification ont été essayées avant l'écriture de ce rapport, avec des effets plus ou moins convaincants :

- Méthode des K-means : très simple, elle n'en reste pas moins efficace dans de nombreux cas de figure. Les premiers résultats obtenus avec cette méthode sont corrects, mais soulignent également ses limites pour discerner les différents types d'inondation.
- Classifications hiérarchiques (*Agglomerative Clustering*, *BIRCH*) : les problèmes liés à la mesure d'altimétrie et la variabilité de données ne rendent pas cette méthode adaptée. Le fait

de regrouper deux à deux les classes provoque beaucoup d'erreurs de classification. Des résultats intéressants ont toutefois été observés sur l'eau libre en utilisant l'algorithme BIRCH.

- Classification par densité (DBSCAN) : cette méthode est inadaptée aux données, car il est quasiment impossible de définir les seuils de distance permettant de regrouper efficacement deux classes.

Parmi les premiers tests, la méthode des K-means présente les meilleurs résultats. Cependant l'objectif de la seconde partie de mon PFE est de les améliorer, afin notamment de permettre la distinction entre les types d'inondation. Pour cela une idée serait de pouvoir repérer, par seuillage et par détection de ruptures, les changements dans le cycle de la rétrodiffusion entre une zone d'eau (forte réflexion) et une zone sèche (faible réflexion). Cela permettrait de caractériser les surfaces selon la durée des inondations qu'elles subissent. Pour ces futurs résultats, je renvoie au mémoire. La classification obtenue pour l'heure est présentée ci-joint. Les principales observations réalisées à ce jour sont :

- Les zones d'eau permanente (les plus sombres sur la carte d'inondations) sont assez bien détectées compte tenu des caractéristiques de la mesure d'altimétrie (environ 80% de bonnes détections).
- Mauvaise différenciation des types d'inondations.
- Résultats similaires obtenus avec les différentes missions étudiées.
- « Référence » non exacte car la cartographie des inondations utilisée est obtenue par combinaison d'EV1 MODIS et de produits PALSAR (bande L).

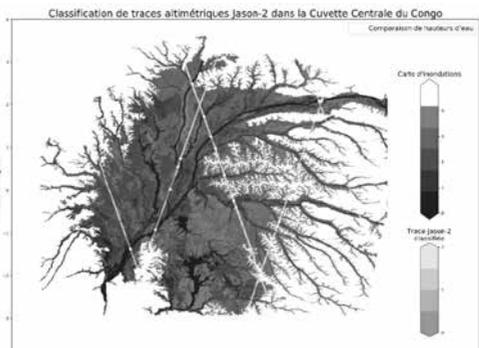


Figure 1 : Carte des inondations et traces altimétriques classifiées sur la Cuvette Centrale du Congo

Au moment où ce résumé est écrit, je n'ai pu travailler que sur la Cuvette Centrale du Congo. Le travail sur des zones d'étude variées me permettra de réaliser des validations en me basant sur des bassins versants mieux étudiés.

4.2. Production de séries temporelles de hauteurs d'eau

La classification des traces altimétriques basée sur les inondations me permet, dans la deuxième partie de mon programme, de calculer les hauteurs d'eau correspondant aux points d'eau libre et d'inondations. Pour cela, je définis des stations virtuelles qui regroupent des mesures sur l'eau dans une même zone géographique (élimination de l'effet de la pente). On considère ensuite la médiane des observations pour chaque cycle afin d'éliminer les mesures absurdes. Cela permet de tracer des séries temporelles de hauteurs d'eau qui sont caractéristiques des objets étudiés (voir figure 2). Pour la Cuvette Centrale du Congo, on distingue trois profils différents :

- Les plaines d'inondations permanentes présentent une variation saisonnière de faible amplitude, marquée par des pics d'un mètre environ lors de crues importantes (figure 2A).
- Les stations virtuelles situées sur le fleuve, en aval de la Cuvette Centrale présentent un cycle bi-annuel d'amplitude modérée (3-4m). Cela correspond aux deux périodes de forte pluviométrie pour chacun des hémisphères, car l'équateur traverse la zone d'étude. Ainsi, en aval, les eaux provenant des affluents de l'hémisphère Nord et de l'hémisphère Sud se regroupent (figure 2B).
- Les stations virtuelles situées en amont de la Cuvette Centrale ou sur des affluents présentent des variations annuelles de forte amplitude (>5m). La période de crue dépend de l'hémisphère du bassin versant de la station. On obtient une courbe très régulière correspondant à un cycle de crues-décrués, avec parfois une amplitude supérieure due à une pluviométrie plus importante (figure 2C)

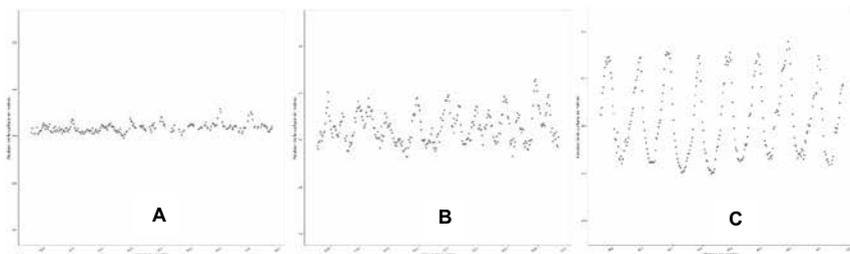


Figure 2 : Séries temporelles de hauteurs d'eau dans la Cuvette Centrale du Congo

La validation de ce résultat a surtout été effectuée avec la base de données Hydroweb, qui contient des hauteurs d'eau altimétriques validées manuellement. Pour l'ensemble des comparaisons effectuées sur la Cuvette Centrale du Congo, des très bons résultats sont observés (voir figure 3). Le coefficient de corrélation est supérieur à 0,98, et l'erreur moyenne quadratique est comprise entre 10cm et 30cm. Les stations virtuelles récupérées sur Hydroweb étant elles-mêmes des produits altimétriques un biais existe, cependant cela est utile pour valider la méthodologie que j'ai employée.

Les hauteurs d'eau produites sont donc assez bonnes, concernant différents types d'inondation. La mesure d'altimétrie, nadirale en bande Ku, permet ainsi d'obtenir une réflexion suffisante du sol. En analysant les écarts avec les mesures issues du LiDAR ICESat, j'ai pu montrer qu'on obtient suffisamment d'information provenant des forêts inondées les plus denses.

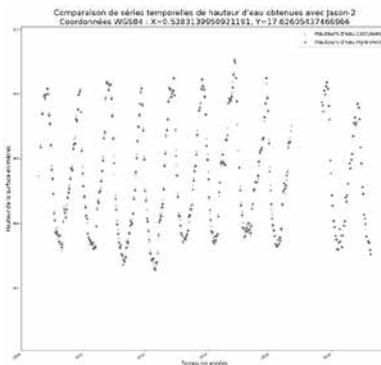


Figure 3 : Comparaison de séries temporelles de hauteurs d'eau avec les SV validées d'Hydroweb

5. Conclusions et perspectives

Mon projet de fin d'études vise donc à simplifier et généraliser l'estimation des variations des stocks d'eau contenus dans les zones humides, afin de mieux caractériser le cycle hydrologique des grands bassins versants. Pour cela, il est nécessaire de calculer les hauteurs d'eau des zones inondées, chose que l'altimétrie radar permet de bien réaliser. En revanche la complication se situe dans la détection de ces zones, qui est généralement réalisée en se basant sur de l'imagerie satellitaire.

En me basant sur les paramètres altimétriques, notamment le coefficient de rétrodiffusion, j'ai pu mettre en place une méthode permettant de classifier les données. Les premiers résultats obtenus à l'aide de méthodes de classification simples sont prometteurs sur les zones d'eau permanente, mais médiocres dans leur capacité à distinguer plusieurs classes d'inondation. La méthodologie permettant de produire les séries temporelles de hauteurs d'eau semble, elle, efficace. Au moment où ce résumé est écrit, je m'intéresse donc à l'amélioration des résultats de la classification, qui permettrait de caractériser les variations spatio-temporelles des inondations. Pour cela, je vais travailler sur une classification en me basant sur la valeur de rétrodiffusion, qui peut caractériser la présence d'eau, et ses variations temporelles qui peuvent être reliées au cycle hydrologique. L'identification de ruptures permettra d'évaluer plus précisément la présence d'eau et la fréquence des inondations. L'objectif reste de généraliser cette méthode et d'obtenir des résultats satisfaisants quelques soient les zones d'étude. L'utilisation de l'altimètre AltiKa (SARAL) en bande Ka, dont la tâche au sol est 5 fois plus petite, pourrait aussi donner de meilleurs résultats pour la détection d'objets d'eau.

Enfin, la future mission *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT, 2022) embarquera un altimètre radar fonctionnant en mode interférométrie SAR, grâce à deux antennes en bande Ka. Cela permettra d'améliorer la qualité et d'augmenter le volume de données acquises en milieu continental, afin de généraliser les applications hydrologiques décrites.

Analyse et amélioration des procédures de calcul de nuages de points issus d'un système de scan cinématique ROBIN PRECISION

PFE présenté par : **Maël MOREAU**
Société d'accueil : **Kadran**
Directeur de PFE : **M. Marc DAEFFLER**
Correctrice : **Mme. Tania LANDES**



1. Introduction

Depuis sa création en 2017, la société Kadran dispose dans son service MMS, pour Mobile Mapping System, d'un scanner cinématique ROBIN. Composé d'un scanner RIEGL et d'une centrale inertielle IGI assistée par un récepteur GNSS Septentrio, ce système dit de cartographie mobile permet d'effectuer le levé de nuages de points sur des linéaires de plus en plus importants. Ainsi, ce procédé de levé topographique est aujourd'hui la solution phare pour des travaux de grandes ampleurs sur lesquels Kadran cherche à se positionner.

Afin de gérer l'important volume de données lié à ce type d'acquisition, et dans une optique de production de livrables répondant aux attentes des différents clients, une procédure complexe est en place dans le service. Très logiquement, l'amélioration de cette chaîne de traitement est un enjeu important pour Kadran. C'est ainsi qu'est né ce projet de fin d'études, qui vise à l'améliorer afin d'optimiser et d'assurer :

- Une qualité de la donnée répondant aux exigences des clients.
- Un temps de traitement réduit par rapport aux méthodes actuelles.
- Les contrôles continus des processus de traitement.



Figure 1 : ROBIN Precision monté sur le véhicule d'acquisition

En couplant une recherche bibliographique à l'analyse des différentes étapes de productions, il a été possible d'identifier les points clés qu'il convenait d'améliorer lors de ce PFE afin de répondre aux objectifs présentés ci-dessus. Il est ainsi important de prendre du recul et d'observer la chaîne de traitement dans son ensemble, telle que simplifiée sur la figure 2. A partir d'ici, une réflexion a eu lieu selon un ordre chronologique démarant de l'acception d'un projet et allant jusqu'à la livraison des éléments demandés.

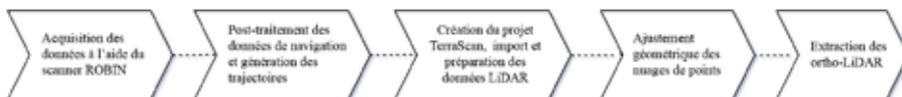


Figure 2 : Diagramme simplifié de la procédure en place dans le service MMS de Kadran

Afin de satisfaire les objectifs de ce projet, on développera notre recherche sur l'analyse des outils en place afin d'évaluer si oui ou non les processus en place sont optimisés et s'il est possible, le cas échéant, de développer les meilleures méthodes. Dans le même temps, on cherchera à mettre en place des outils pour l'automatisation de certaines étapes fastidieuses.

2. Acquisition des données avec le système ROBIN

C'est ainsi que tout logiquement, l'amélioration de l'étape d'acquisition est la première chose à observer. En cherchant à établir un processus de contrôle en direct de l'exhaustivité et de la qualité de la donnée, une remise à niveau de la méthode d'acquisition de la donnée a eu lieu. Nous avons réfléchi dans le service à une méthode plus efficace permettant d'améliorer l'efficacité du levé et c'est l'utilisation d'une application SIG sur Android, permettant le suivi GPS, qui a fait l'unanimité pour remplacer les plans de roulage. Cette efficacité est alors évaluée par l'évolution de la productivité des sessions d'acquisitions. Aujourd'hui, en ayant complètement modifié le support utilisé lors du roulage, on augmente à la fois le confort des techniciens de terrain et on a l'assurance d'un levé complet par la réduction considérable des risques d'oublis.

De plus, cette méthode de suivi du roulage par tracé sur une application permet un contrôle journalier, lorsqu'il est nécessaire, de l'avancée des projets. On a par ailleurs modifié la gestion des suivis de projet, notamment lors de la réception de la donnée brute au bureau, des contrôles ont été mis en place afin d'obtenir dès le retour du technicien de terrain une confirmation de la validité de l'ensemble des enregistrements.

Ces multiples changements permettent d'avoir aujourd'hui une préparation d'acquisition plus pertinente, qui se traduit ensuite par un roulage plus facile et moins risqué, et assurant un contrôle continu de l'exhaustivité de la donnée. Enfin, c'est aussi une aide supplémentaire à la planification des projets de manière générale.

3. Post-traitement GNSS et création des données de trajectoires

3.1 Calcul des trajectoires

La création des données de trajectoires est composée de deux étapes importantes : le calcul de la solution GNSS avec le logiciel GrafNav et le couplage de cette solution aux données de navigation de la centrale inertielle avec AeroOffice. La procédure de Kadran propose déjà des automatisations au niveau du couplage INS/GNSS et afin de chercher à améliorer la qualité de la donnée, il était nécessaire d'étudier les paramètres de post-traitement de GrafNav. La solution que ce logiciel propose est une solution ARTK, pour Advanced Real Time Kinematic, sur laquelle il est possible de modifier certaines variables. Différents tests ont ainsi été effectués pour générer des solutions afin de les comparer lors de la génération du nuage de points. Ainsi, des paramètres restreignant la réception des points ont été ajoutés, d'autres limitant le filtrage effectué ont été mis en avant. Cependant, lorsque l'on compare les nuages, si des différences nettes apparaissent sur les zones avec une réception médiocre du signal GNSS, il a été impossible de mettre en avant une méthode plus pertinente que celle en place. En effet, on est en présence de paramètres qui influent sur un environnement local et il est très difficile et chronophage d'espérer généraliser une unique solution aux vues des environnements de levés, qu'ils soient ruraux, urbanisés ou ultra-urbanisés.

Dans un second temps, c'est l'étude d'une option du logiciel AEROoffice qui a été évaluée. On parle ici d'un mode dit robuste, qui permettrait d'assurer le calcul de trajectoires lorsque les données brutes issues de la centrale inertielle sont de mauvaises qualités. En fixant le biais gyroscopique de la centrale à zéro, ce qui consiste concrètement à assurer une théorie parfaite immobilité de la centrale à l'arrêt, on peut limiter les erreurs importantes liées à une mauvaise initialisation ou désinitialisation de l'appareil. Ici, le résultat valide les recommandations constructeurs et nous permet de considérer cette option en cas de dernier recours, en comprenant cependant qu'une perte de précision est à affecter aux nuages issus de ces trajectoires

Comme pour les tests effectués ci-dessus sur GrafNav, on a cherché à comparer les nuages de points calculés à partir des différentes trajectoires dans un premier temps entre eux, puis par rapport à un plan issu d'un levé topographique traditionnel au tachéomètre.

3.2 Automatisation du découpage des trajectoires

Une fois la position du système connue de façon précise et éditée avec 600 positions par seconde (la centrale inertielle ayant une fréquence de 600Hz), il est possible de calculer le nuage de points. Dans le même temps, il est intéressant de se concentrer sur une étape manuelle et fastidieuse de la procédure : le découpage des trajectoires afin de faciliter le traitement des nuages.

En effet, par la suite, chaque point sera assigné à une trajectoire, et ce en fonction de sa donnée temporelle. On cherche alors à éviter des trajectoires qui pourraient offrir un recouvrement pour une unique zone, car si cette dernière était amenée à être supprimée, il est important de conserver une partie de la donnée. C'est ainsi que le découpage avait donc lieu : lors des manœuvres de retournement, lors des virages prononcés et enfin dans les croisements. Ce découpage nécessitait entre 20 à 30min selon l'expérience de l'utilisateur et il est alors pertinent de l'automatiser. C'est avec le développement d'un programme Python que l'on est parvenu à réduire cette étape au simple lancement d'un script travaillant au maximum dix minutes, c'est alors dix minutes de temps machine et non plus le double ou le triple en temps humain.

Ce programme fonctionne avec deux données d'entrées, un premier fichier où l'on réduit la fréquence des données de positions à une seule localisation par seconde. A partir de ce fichier, nous avons donc à chaque seconde les coordonnées du système, mais aussi les données angulaires (Pitch, Roll et Heading) de la centrale. Il a donc été possible de créer trois critères de découpage automatique :

- Premièrement, lorsque le système prend une direction opposée, qui caractérise une manœuvre de retournement ou une marche arrière.

- Deuxième, lors d'un virage prononcé avec un seuil définit de 90%, identifiable par une variation de l'angle Heading.

- Finalement, un découpage automatique est effectué lorsque la trajectoire est supérieure à 200m, ce qui permet d'assurer une régularité dans le post-traitement.

4. Calcul des nuages de points livrables

4.1 Import et prétraitement du nuage de points

Une fois les nuages de points bruts créés par l'intermédiaire du logiciel MMProcess, il convient de les insérer dans TerraScan, outil de manipulation de nuage de données LiDAR développé par TerraSolid. C'est par nécessité que les efforts de cette étude se sont concentrés sur cette étape. En effet, une grande partie des traitements nécessitait cet import dans TerraScan et cela prenait de plus en plus de temps. Une analyse de l'outil a été effectuée, et en ordonnant les étapes de traitement différemment, il a été possible de réduire les temps de calcul machine par un facteur deux. Le gain est lié à l'optimisation des outils de TerraScan en contournant la difficulté du logiciel à gérer la notion de temps lors de l'import.

Après l'import, c'est l'allègement du nuage et sa classification qui ont été sujets à améliorations. En analysant les paramètres de la macro permettant de réduire la quantité de points dans le nuage ainsi que celle classifiant les points selon des critères prédéfinis, on cherche à améliorer la qualité du livrable.

4.2 Ajustement géométrique des nuages de points

En anglais "Matching", c'est cette étape qui nous permet d'assurer une cohérence entre les différents passages du véhicule. On consolide en quelque sorte nos nuages, issus cependant ici d'un scanner cinématique. C'est l'étape la plus chronophage de l'ensemble de la procédure puisque l'on produit ici le nuage de points final qui sera livré et que l'on cherche à garantir sa qualité selon les exigences du client.

Au cours de ce PFE, les différents outils de traitement de TerraMatch ont été analysés. On cherche à réduire le temps humain alloué à cette production tout en assurant une qualité de nuages correspondant aux attentes du client.

Pour les différentes analyses effectuées dans cette partie, on se reportera au mémoire de fin d'études.

5. Extraction des ortho-LiDAR

Produit demandé par de nombreux clients, les ortho-LiDAR sont des images raster extraites directement du nuage de points et qui étaient jusqu'alors générées depuis TerraScan en deux temps. Une première image était générée en utilisant les points classifiés en hauteurs basses et hauteurs moyennes et un second raster ne comprenait quant à lui que les classes supérieures, en général les feuillages des arbres. Afin d'ajouter un effet de transparence sur la deuxième image, on utilisait un programme utilisant le logiciel FME, Feature Manipulation Engine. Cependant, après recherche sur ce logiciel, il a été décidé d'automatiser l'intégralité de ce processus de trois étapes en un unique espace de travail FME.

En plus du gain de temps machine et humain non négligeable dû à cette automatisation, ce programme a pour objectif d'améliorer la qualité des images en sorties, et donc la qualité du produit livré. Deux axes de travail avaient été mis en évidence : l'interpolation des données de pixels afin de combler les trous de données, et les points de liaison entre les différents raster issus de nuages différents.

Pour le premier point, c'est l'utilisation d'un opérateur de convolution qui nous a permis d'arriver au résultat attendu, en effet, on assigne au pixel sans donnée la valeur issue du calcul utilisant le noyau de convolution. On conserve ainsi la qualité originale, tout en comblant une partie des manques apparents. C'est ensuite l'utilisation de FME par rapport à TerraScan qui résout de façon directe notre second problème. En effet, la gestion des rasters par FME corrige les défauts observés précédemment. La comparaison en figure 3 permet d'observer les changements de résultats selon les deux méthodes.



Figure 3 : Mise en évidence des différences sur les ortho-LiDAR issues de l'ancienne méthode, à droite, par rapport au nouveau processus, à gauche.

Ainsi, avec une préparation des ortho-LiDAR en deux fois moins de temps, on réduit nettement la manipulation humaine. De plus, c'est une amélioration visuelle de la qualité du résultat qui est observable.

6. Conclusion et perspectives

Si l'acquisition par scanner permet aujourd'hui de réduire considérablement les temps de terrain pour la topographie, c'est au détriment d'un temps de traitement beaucoup plus important. Pour Kadran, ce PFE a permis de faire le point sur les méthodes en place et d'améliorer, lorsque possible, les différents processus. Les changements apportés à la chaîne de traitement vont permettre de réduire les délais entre les sessions d'acquisitions et la livraison effective des données au client.

De plus, la mise en place de différents contrôles permet une meilleure planification des projets dans leur ensemble, et une gestion plus efficace des temps de travail sur les différentes étapes de production.

Enfin, des programmes ont été développés afin de faciliter certaines étapes, la généralisation de ce type d'automatisation pourra être mise en avant afin de réduire au plus le temps humain nécessaire aux traitements.

Inspection visuelle de grandes structures sous SIG 3D à l'aide de modèles 3D texturés en pleine résolution

PFE présenté par : **Gauthier VERLIN**
Société d'accueil : **SITES – Rhône-Alpes (Dardilly)**
Directeur de PFE : **Pierre CARREAUD**
Correcteur : **Mathieu KOEHL**



1. Contexte et objectifs de l'étude

L'inspection d'ouvrages est le cœur de métier de SITES depuis sa création. Afin de maintenir son niveau d'expertise, elle possède une cellule de développement pour se tenir à jour des nouveautés dans l'objectif d'améliorer et de renouveler ses techniques d'inspection. L'étude réalisée sur l'inspection visuelle de grandes structures sous SIG 3D s'inscrit donc dans ce cadre.

Les inspections sur les tunnels, les barrages ou les cheminées sont réalisées sur des orthophotographies qui couvrent l'ensemble des structures. Celles-ci sont réalisées à partir de modèles 3D assemblés grâce à des photos prises par drone ou par un assemblage d'appareils photos montés sur un chariot.

Le SIG permet d'intégrer ces orthophotographies et d'annoter les défauts des structures directement dessus. Il permet également d'y associer une base de données très utile pour le suivi des défauts dans le temps.

D'un côté, l'avènement de la 3D dans les SIG permet d'entrevoir une nouvelle utilisation de cet outil. De l'autre, les modèles 3D texturés en pleine résolution sont des supports de qualité qui pourraient être adaptés à l'inspection.

Le sujet se définit donc en deux parties. La première partie concerne la suite de l'étude réalisée sur les SIG 3D au cours du projet de recherche technologique sur le même sujet. Il avait abouti sur le fait qu'ArcGIS Pro possède les fonctionnalités nécessaires à l'inspection en 3D. Nous avons donc pour but de mettre en pratique son utilisation dans le cadre d'une inspection de structure.

La suite de l'étude sur ArcGIS Pro vise donc à se concentrer sur les aspects techniques de l'inspection et les méthodes à mettre en place dans le logiciel pour valider son utilisation dans le cadre de l'inspection. L'étude de la symbologie utilisée et son adaptation à un environnement 3D, l'organisation et la liaison à des bases de données, l'étude des systèmes de coordonnées lors de l'intégration de fichiers 3D texturés sont des points clefs de la première partie de cette étude.

La seconde partie concerne la réalisation de projection en 2D de modèles 3D texturés pyramidés en pleine résolution. La présente étude consiste à développer un programme qui réalise cette tâche pour différents types de structures assimilables à des volumes géométriques simples (cylindre, cône, sphère). Ce système permettrait de réaliser des projections en 2D en utilisant en entrée seulement un modèle 3D, ce qui a pour avantage de réduire la quantité de données à traiter et accélère le traitement. De plus, la pleine résolution du modèle 3D nous permettrait d'obtenir une orthophotographie avec la meilleure résolution possible sans avoir besoin de sélectionner ou découper les images en entrée. SITES possède déjà des méthodes pour réaliser des orthophotographies des structures qu'elle inspecte. Le but de ce programme est donc de proposer une alternative à ces méthodes et de simplifier la création d'orthophotographies. Nous pourrions donc comparer les méthodes de traitement une fois l'application réalisée.

2. Premier résultats

a. Inspection de modèle 3D tuilé sous SIG 3D

L'étude a déjà permis d'aboutir à l'établissement d'une symbologie en 3D, fidèle à celle utilisée actuellement pour l'inspection d'ouvrage en 2D. Le travail sur la symbologie a également permis de se familiariser avec la structure des tables d'attributs utilisées pour caractériser les défauts.

La connexion d'ArcGIS Pro à la base de données Oracle a permis de reproduire une inspection d'un modèle 3D. L'inspection avait été réalisée par le procédé ScanSITES développé par SITES. Une fois la connexion à la base de données effectuée, un traitement de celle-ci à l'aide de script Python a été réalisé afin de récupérer, trier et afficher les défauts de l'ouvrage directement sur le modèle 3D.

Cette expérience nous a donné un bon aperçu de ce à quoi peut ressembler le résultat d'une inspection en 3D sur un modèle 3D.



L'intégration du modèle 3D créé avec Agisoft Photoscan dans ArcGIS Pro a permis de mettre le doigt sur un problème de système de coordonnées lié à l'export du modèle 3D dans Photoscan. Celui-ci ne nous permet pas d'exporter les fichiers 3D dans un système de coordonnées local et nous oblige à nous rattacher à un système de coordonnées global. Or, il est impossible de changer ce système une fois le modèle 3D intégré dans ArcGIS Pro. Ce point reste pour l'instant un frein à l'utilisation des modèles 3D tuilés.

Un autre point fort de l'étude est la création et l'intégration d'outils spécifiques adaptés pour l'inspection en 2D et en 3D dans ArcGIS Pro (add-in). Plusieurs d'entre eux sont toujours en développement afin d'améliorer les contrôles et l'affichage dans le logiciel pour la visualisation des structures.

Le premier outil est un fissuromètre. Il permet de mesurer l'ouverture d'une fissure en fonction de l'éloignement dans la vue à l'aide d'une petite fenêtre mobile. Cette fonctionnalité avait déjà été

FIGURE 1: AFFICHAGE D'UNE INSPECTION REALISEE PAR SCANSITES SUR UN MODELE 3D D'UN AEROREFRIGERANT

développée chez SITES pour la visualisation d'ouvrage dans une application spécifique. Il fonctionne actuellement pour l'affichage en 2D et est en cours d'amélioration pour la vue en 3D.

Le second outil permet de fixer la taille du déplacement dans la vue lorsqu'on utilise les touches du clavier ou une manette. Dans ArcGIS Pro, la valeur de la longueur du déplacement est fonction de l'échelle du dessin. Pour simplifier le déplacement et mieux se repérer lors de l'inspection, il est important de pouvoir le maîtriser. En plus de pouvoir modifier la taille du déplacement, l'outil permet de différencier le déplacement vertical du déplacement vers l'avant en 3D. Cela est indispensable car à l'origine le déplacement vertical dans ArcGIS pro n'est pas fonction de l'échelle et s'effectue par saut de 5m. De plus l'outil est conçu pour être actif lors de la création des défauts. Cet outil a également été adapté pour pouvoir être utilisé avec une manette de jeu vidéo.

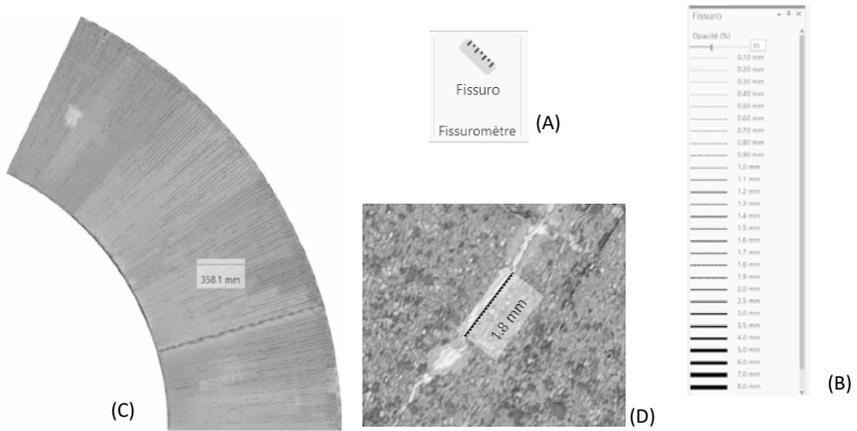


FIGURE 2 : OUTIL FISSUROMETRE AVEC L'ICONE (A), LE PANNEAU DE SELECTION DE L'OUVERTURE ET D'OPACITE DE L'OUTIL (B), L'AFFICHAGE DE L'OUTIL DANS UNE VUE ELOIGNEE (C) ET RAPPROCHEE (D)

b. Développée de modèle 3D

La projection cylindrique d'un modèle 3D d'un aérorefrigérant ainsi que la projection azimutale équidistante d'un dôme ont déjà été réalisées. Celles-ci sont réalisées grâce à un script python sur des modèles 3D au format .obj. Pour le moment les projections sont toujours au format .obj et non dans un format d'image (.tif ou .jpg par exemple). Il reste à adapter cette méthode à un format pyramidé tel que le Agisoft Tile Archive qui utilise des fichiers .obj en structure pyramidale. En appliquant ce procédé à la dernière couche du format (celle qui contient le plus de fichiers .obj avec la meilleure précision, chacun représentant une petite partie de l'ouvrage), nous obtiendrons une image de la projection de la structure avec la meilleure résolution du modèle 3D tuilé.

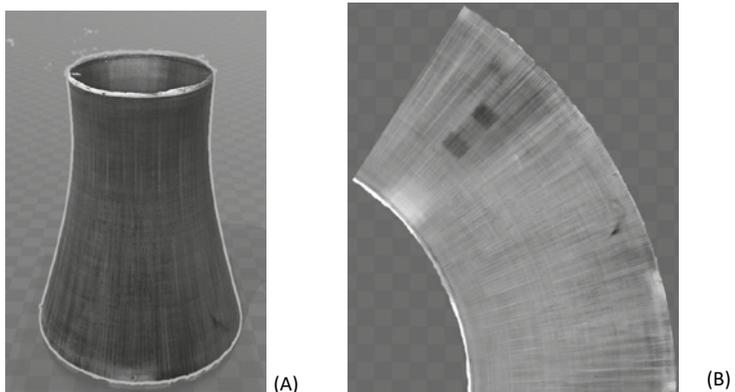
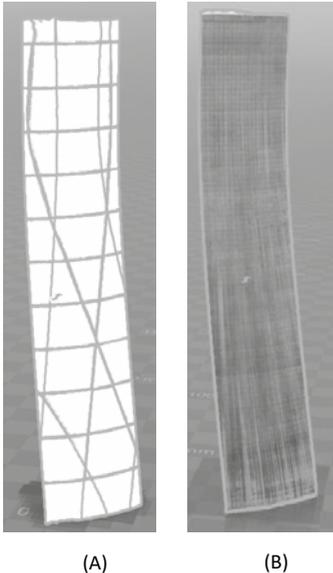


FIGURE 3 : MODELE 3D DE L'INTERIEUR D'UN AEROREFRIGERANT (A) ET SA PROJECTION CONIQUE (B)

Pour l'instant, les projections sont faites à partir de la plus basse résolution du modèle tuilé. Appliquer ces projections directement aux tuiles en pléines résolutions du modèle nous permettra d'obtenir des orthophotographies avec la même résolution que celle obtenue sur les photos d'acquisition.



Les premiers résultats obtenus en utilisant les modèles tuilés ont été réalisés sur la tuile principale d'un modèle d'une partie d'aéroréfrigérant. On peut voir la différence entre le premier niveau de tuile constitué d'une seule tuile et le dernier niveau, découpé en 65 tuiles (figure 4).

Cette partie utilise des fonctions d'un utilitaire de traitement d'images. Le but de l'opération consiste à venir découper les triangles dans la texture du modèle 3D puis de les projeter. La difficulté réside dans le découpage et l'assemblage des triangles. La figure 4 présente un aperçu du fichier de texture de tuile principale du modèle 3D ainsi que tous les triangles qui le composent.

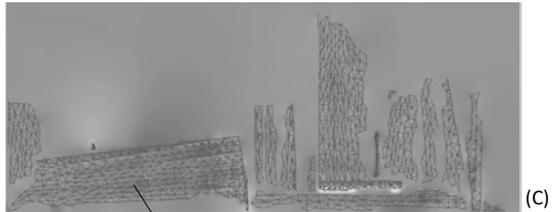


FIGURE 4 : DECOMPOSITION DES TUILES D'UN MODELE 3D (A), TUILE PRINCIPALE (B) ET FICHIER DE TEXTURE ASSOCIE A LA TUILE PRINCIPALE (C)

3. Conclusion et perspectives

La finalisation de ces procédés doit permettre de compléter les méthodes déjà utilisées par SITES pour l'inspection d'ouvrages.

Il reste encore à tester une inspection sur un modèle 3D tuilé texturé dans ArcGIS Pro afin de définir si l'inspection sous SIG 3D est opérationnelle ou s'il reste des points à améliorer. La méthode étant également dépendante de la performance du logiciel, il conviendra de suivre l'évolution d'ArcGIS Pro dans ce sens.

Après avoir corrigé les derniers défauts de projection des triangles, le programme de développé 3D doit être complété afin de l'adapter au dernier niveau de tuilage du modèle 3D tuilé. Il conviendra également d'essayer d'optimiser le code pour pouvoir l'essayer sur des modèles 3D tuilés complets. Les résultats obtenus avec ce programme pourront être confrontés à ceux actuellement réalisés par SITES.

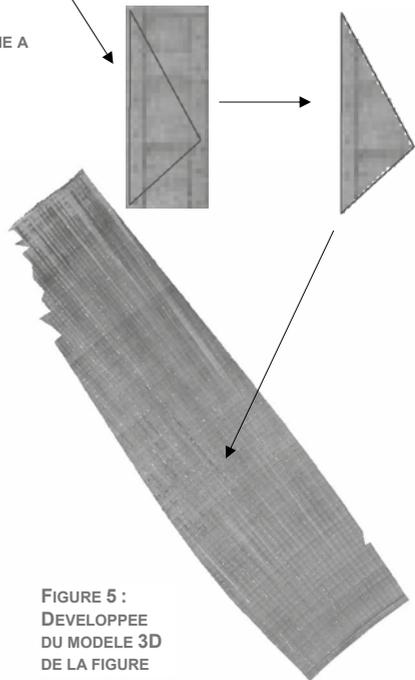


FIGURE 5 : DEVELOPPEE DU MODELE 3D DE LA FIGURE

Détection de fenêtres dans un nuage de points de façade et positionnement semi-automatique dans un logiciel BIM

PFE présenté par : **Julie THIERRY**

Société d'accueil : **Laboratoire ICube UMR 7357, équipe TRIO**

Directrice de PFE : **Tania LANDES**

Encadrante : **Hélène MACHER**

Correcteur : **Amadi MURTIYOSO**



1. Contexte de l'étude

Le BIM (Building Information Model) s'est naturellement imposé comme une des solutions ayant le potentiel de transformer les méthodes de travail. Ces outils permettent de modéliser un bâtiment ou une ville sous de nombreux aspects pour répondre à des objectifs multiples. La maquette numérique 3D contient des données intelligentes et structurées dont les avantages sont conséquents pour tous les intervenants à toutes les étapes d'un projet. Avec le développement de celle-ci, les nuages de points deviennent donc des données de plus en plus utilisées et l'évolution des technologies d'acquisition 3D tels que les scanners laser permettent de collecter rapidement une grande quantité de données. Cependant, la création de maquettes numériques de bâtiments à partir de nuages de points reste une succession d'étapes manuelles. Les défis d'aujourd'hui sont d'automatiser ces étapes pour réduire le temps de traitement et le volume de données à traiter manuellement. Cette problématique amène donc à extraire automatiquement le maximum d'informations du nuage de points, en vue d'intégrer le résultat dans un logiciel de BIM à partir de nuages de points de l'intérieur de bâtiments [Macher et al, 2017]. Quant aux travaux de [Boulaassal, 2010], ils réalisent une segmentation automatique de primitives géométriques à partir d'extraction de contours d'un nuage de points de façade.

Ce projet de fin d'études consiste à automatiser la reconstruction 3D de bâtiments existants et plus particulièrement la reconstruction de fenêtres. Il s'insère dans le cadre d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche, intitulé Modélisation Intérieur et Extérieur de Bâtiments (BIOM) et vise à une détection et une modélisation automatique des fenêtres par le biais de données acquises en intérieur et en extérieur d'un nuage de points. L'objectif de reconstruire les fenêtres exige une détection préalable pour proposer un processus automatisé permettant d'intégrer les fenêtres dans un modèle 3D. Les données de nuages de points du musée zoologique de Strasbourg seront utilisées pour ces différentes étapes. Le doctorant Rami ASSI travaille actuellement sur cette problématique, et les résultats de ce PFE pourront lui être utiles dans sa démarche de travail.

2. Méthodologie

2.1. Détection des fenêtres

Les travaux de [Boulaassal et al, 2010] proposent une segmentation et une modélisation géométrique des façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres. La première étape consiste à extraire des segments plans à l'aide des algorithmes de RANSAC (RANdom SAmple Consensus) et de croissance de régions. Ceux-ci permettent d'isoler tous les plans principaux constituant la façade pour ensuite extraire automatiquement les points formant les contours par la méthode de triangulation de Delaunay. Ces « contours » correspondent à l'ensemble des points du nuage constituant les arêtes extérieures ou intérieures d'un élément situé sur la façade d'un bâtiment. Les travaux basés sur les contours extraits permettent d'obtenir une première segmentation de façade et d'optimiser la détection des fenêtres. A partir de ces contours, les segments droits sont triés pour ne garder que ceux représentant les bords de chaque fenêtre. Une médiane est calculée pour chaque segment droit vertical et obtenir les intersections de la fenêtre comme illustré sur la figure ci-dessous.

Chaîne de traitement de
[Boulaassal et al, 2010]

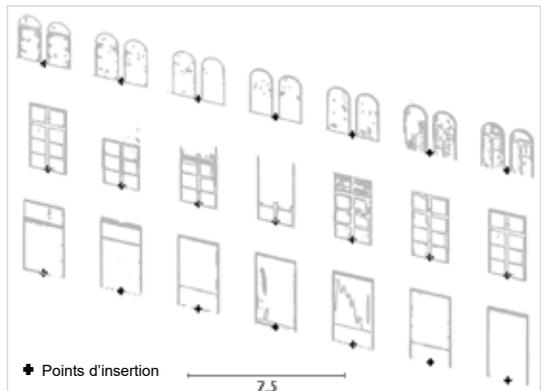
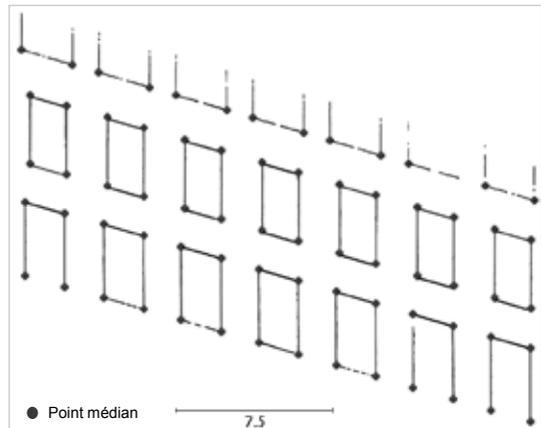
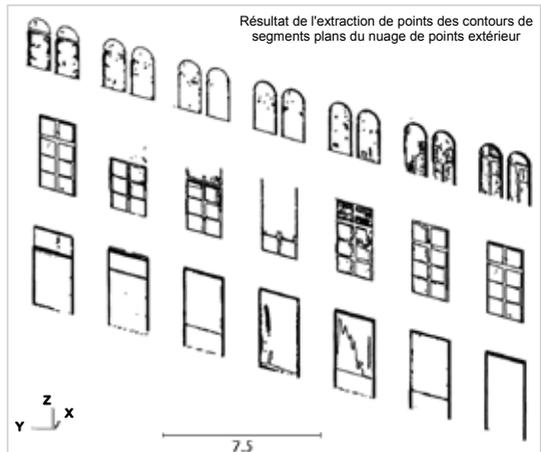
1. Détection des segments plans dans un nuage de points avec l'algorithme de RANSAC,
2. Extraction automatique des points constituant les contours des segments plans,
3. Classification des points de contours en segments droits selon leurs directions : horizontaux ou verticaux.



4. Sélection automatique des segments droits horizontaux et verticaux constituant les ouvertures d'une façade,
5. Calcul d'une médiane pour les segments droits verticaux correspondant aux bords des fenêtres pour chaque fenêtre,
6. Calcul de l'altitude moyenne des segments droits horizontaux détectés sur un étage.



7. Calcul du milieu bas de chaque fenêtre qui sera utilisé comme point d'insertion dans un logiciel BIM,
8. La méthode est appliquée sur le nuage de points intérieur de la même façade.



Le point déterminé pour chaque fenêtre servira pour l'insertion dans le logiciel Revit.

2.2. Insertion dans un logiciel BIM

La seconde partie du projet concerne l'insertion semi-automatique des fenêtres dans un logiciel BIM. Un protocole de modélisation dans le logiciel Revit sera proposé et analysé pour définir les règles de positionnement des fenêtres au niveau d'une façade. Les dimensions d'une fenêtre type du musée zoologique ont été levées pour permettre une modélisation précise. De plus, il fallait prendre en compte les différents types de fenêtres que proposait le musée selon ses différents étages. En parallèle, une maquette numérique a été créée manuellement à partir du nuage de points global du bâtiment (Figure 1) pour servir de référence lors de l'insertion des fenêtres.

Le logiciel Revit propose différentes fonctionnalités telles que la création de macro ou l'utilisation de Dynamo représentant un environnement de programmation visuelle. Dans le cadre du projet, une chaîne de traitement a été développée pour permettre l'importation semi-automatique des fenêtres du musée dans une maquette numérique. Après l'étape d'extraction des contours, les coordonnées du point d'insertion sont exportées dans un fichier Excel. Le nuage de points et la maquette numérique sont géoréférencés (l'ouverture possède des coordonnées qui lui sont propres). Cette solution permet une rapidité d'insertion et un positionnement automatique d'un modèle de fenêtre. Elle peut être répétée pour l'ensemble des fenêtres d'une façade.

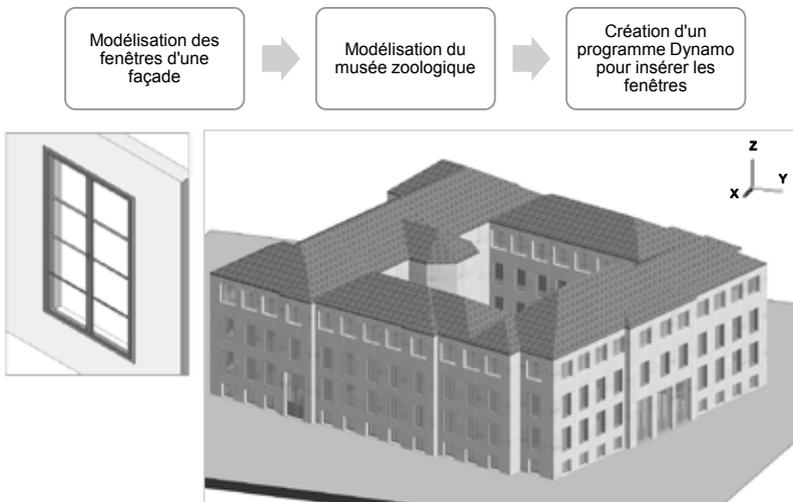


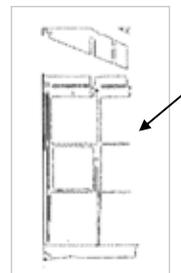
Figure 1 : (à gauche) Modélisation d'une fenêtre et (à droite) maquette numérique du musée zoologique de Strasbourg réalisée sous le logiciel Revit (environ 2000 m²)

3. Evaluation des résultats

3.1. Comparaison extérieur/intérieur

Pour évaluer les résultats, les écarts entre chaque point d'insertion (calculés en X et en Y) ont été déterminés dans les deux nuages pour 21 fenêtres d'une façade du musée (Figure 2). Les coordonnées du point d'insertion sont censées être les mêmes pour le nuage de points intérieur et extérieur. Le manque de points du nuage causé par des masques engendre un écart entre les coordonnées des médianes. En ne prenant en compte que les fenêtres visibles, les écarts sont d'environ 3 cm (Figure 3).

Figure 2 : Illustration du manque de points dans le nuage de points intérieur



	Avec fenêtres masquées	Sans fenêtres masquées
Extérieur / Intérieur	6 cm ± 12 cm	3 cm ± 1 cm

Tableau 1 : Comparaison des résultats « Extérieur et Intérieur »

3.2. Comparaison avec les données extraites manuellement

Afin de valider le positionnement semi-automatique des fenêtres, celui-ci est comparé au positionnement manuel de la maquette. Ces écarts correspondent à une distance calculée en X et Y, entre le point d'insertion placé manuellement et le point d'insertion obtenu automatiquement. Des comparaisons ont également été réalisées avec un plan 2D et une orthophoto du nuage de points de la même façade. Les 3 fenêtres masquées ne sont pas prises en compte dans ces résultats (Tableau 1).

Manuelle Automatique	Modèle BIM 3D	Plan 2D	Orthophoto
Extérieur	2cm ± 2 cm	1 cm ± 1 cm	2 cm ± 2cm
Intérieur	3 cm ± 2 cm	3 cm ± 1 cm	4 cm ± 2 cm

Tableau 2 : Comparaisons des résultats avec des données extraites manuellement (19 fenêtres)

La comparaison des résultats avec différentes références a permis de montrer que les écarts sont de l'ordre du centimètre. Il convient cependant d'apporter une nuance à ces propos en sachant que le positionnement manuel dans Revit est d'une précision de plusieurs centimètres selon les utilisateurs. En effet, les modèles 3D des fenêtres sont positionnés approximativement dans la maquette numérique avec l'aide du nuage de points. Ces résultats sont satisfaisants, même si des améliorations restent à effectuer.

4. Conclusion et perspectives

A travers ce projet, la présence inévitable d'occlusions dans les nuages de points acquis en intérieur a pu être mise en avant. L'algorithme développé permet de segmenter successivement les segments plans d'une façade afin d'en extraire les fenêtres. D'après les différentes comparaisons, les résultats sont encourageants et permettent de valider notre approche.

De nombreuses pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Le fait d'utiliser un nuage de points intérieur et extérieur permet d'envisager une solution combinant les deux. Dans notre cas, le manque de points du nuage intérieur causé par l'encombrement des pièces amène à exploiter davantage le nuage de points extérieur, et vice-versa.

De plus, cette méthode reste semi-automatique et différents mécanismes, notamment le « Deep Learning », sont de plus en plus adoptés pour la reconnaissance d'images 2D mais aussi pour la segmentation sémantique de nuages de points. Ainsi, les travaux de [Assi et al, 2019] se penchent sur cet algorithme d'apprentissage profond pour une détection automatique des fenêtres du Musée Zoologique.

5. Bibliographie

Assi, R., Landes, T., Macher, H., and Grussenmeyer, P.: Energy function algorithm for detection of openings in indoor point clouds, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 747-752, 2019.

Boulaassal, H., Landes, T. and Chevrier, From Laser Data to Parametric Models: Towards an Automatic Method for Building Façade Modelling. *EuroMed: Digital Heritage*, pp. 42-55, 2010

Macher, H., Landes, T. and Grussenmeyer, P. From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied sciences* 7(10), 30 pages, 2017

Modélisation de platines pré-scellées depuis le nuage de points

PFE présenté par : **Laura SANSON**
Société d'accueil : **Sites, Aix-en-Provence (13)**
Directeur de PFE : **Matthieu HANSEN**
Correcteurs : **Emmanuel ALBY**



1. Introduction

La société Sites¹ est créée en 1984 par Jean-François SAGEAU. Elle a pour objectif principal de contrôler, surveiller et suivre la résistance au vieillissement des grands ouvrages de génie-civil. Elle regroupe ainsi différentes compétences afin de proposer des études, des outils et des solutions permettant de garantir la sécurité et la pérennité d'actifs structurels exceptionnels.

Le groupe MIM-TOP² de l'entité d'Aix-en-Provence intervient régulièrement 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). Il y réalise, entre autres, différents travaux de topographie tels que l'auscultation, l'implantation et le relevé pour contrôle de positionnement.

La modélisation de platines pré-scellées s'inscrit dans ces travaux. Présentes par milliers sur les voiles, plafonds et planchers des projets ITER (environ 100 000) (Figure 1) et RJH, elles sont destinées à supporter différents équipements. En effet, les enjeux radiologiques des structures obligent à éviter le percement du béton. L'utilisation des scanners laser 3D pour leur acquisition a pour objectif d'acquérir de grandes quantités de données et ce, de manière précise et rapide. Cependant, les phases de traitement restent fastidieuses et soumises à l'erreur humaine. L'automatisation de ces processus permet alors à l'entreprise d'optimiser cette opération longue et complexe.



Figure 1 : a. Exemple d'environnement des platines (Iter ©) ; b. Platine avec délimitation géométrique ; c. Platine sans délimitation géométrique

¹ Sites, acronyme de Société d'Instrumentation, de Traitements et d'Essais sur Sites

² MIM-TOP : Mesure – Instrumentation – Monitoring et Topographie Optique et Photogrammétrique

2. Du processus de modélisation à son automatisation

Les platines pré-scellées sont assimilables à des plans dans les tolérances d'usinage. Un contrôle des pièces étant généralement réalisé avant réception sur le chantier, l'hypothèse que les platines sont des plans aux dimensions connues est admise.

Le processus choisi, décrit en figure 2, a été établi en se basant sur l'adaptabilité de la méthode aux différents types de configuration.

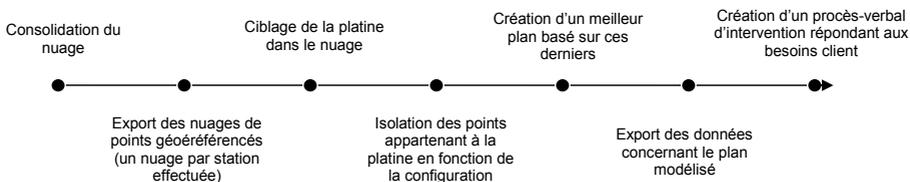


Figure 2 : Processus de modélisation

En effet, les platines peuvent présenter différents types de protections ainsi que différentes couleurs, géométries (rondes, carrées, rectangulaires) et dimensions. Afin de limiter le nombre d'algorithmes à développer, les platines sont regroupées en deux catégories :

- les platines présentant une délimitation géométrique visible (Figure 1.b.) ;
- les platines sans délimitation géométrique visible (Figure 1.c.).

Ayant pour but de faire gagner du temps à l'opérateur mais surtout d'éviter les tâches répétitives souvent sources d'erreurs, l'automatisation concerne ici les phases de :

- modélisation des platines dans le nuage de points consolidé et géoréférencé ;
- export des données précédemment générées ;
- génération du procès-verbal.

Elle consiste, pour les deux premières phases, en la définition et l'écriture d'un script adapté au module JavaScript présent dans le logiciel 3DReshaper de Technodigit. Le procès-verbal est quant à lui généré automatiquement dans une feuille Excel suite à l'écriture d'un script VBA (*Visual Basic for Application*).

3. Automatisation des différentes phases

Modélisation des platines

Suivant le processus présenté en figure 2, la modélisation des platines est effectuée à travers 3 étapes :

- le ciblage de la platine : reconnaissance et identification de la platine dans le nuage ;
- l'isolation des points lui appartenant : segmentation du nuage pour ne garder que les points mesurés sur la platine ;
- la création d'un meilleur plan basé sur le nuage segmenté.

Avant travaux, le client fournit les centres théoriques des platines, leurs dimensions et les tolérances d'implantation du génie-civil. Un fichier .csv contenant l'ensemble des informations doit être créé par l'opérateur. En le renseignant au lancement du script, il permet ainsi la reconnaissance de chaque platine dans le nuage. Une segmentation est ensuite effectuée afin d'isoler la zone dans laquelle la platine doit se trouver. Cette action permet, en plus de limiter le volume de données lors du déroulement de l'algorithme, de distinguer facilement deux classes de points : ceux appartenant au mur et ceux appartenant à la platine.

Les points appartenant à la platine sont ensuite isolés. De nombreuses méthodes de segmentation existent. Certaines techniques utilisent la géométrie de l'objet à partir des coordonnées des points et des normales, d'autres traitent le nuage comme une image en utilisant les données radiométriques enregistrées par l'appareil. La diversité des configurations pousse à employer chacune de ces solutions.

Une fois les points de la platine extraits, un meilleur plan est calculé sur ces derniers et enregistré aux dimensions théoriques de la platine.

Export des données à partir des plans

Après avoir contrôlé visuellement les résultats obtenus, l'opérateur peut exporter l'ensemble des données des plans modélisés dans un fichier .csv. Ce dernier regroupe alors le centre de chacun des plans, son vecteur normal w ainsi que les vecteurs d'orientation du plan u et v (Figure 3).

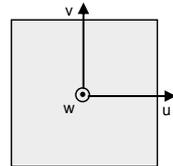


Figure 3 : Platine et référentiel platine

Génération d'un procès-verbal automatique

Une fois les platines modélisées et les données exportées, l'opérateur se trouve en possession de deux fichiers .csv, l'un contenant les données théoriques des platines, l'autre les données après modélisation. Afin de limiter les erreurs liées à une mauvaise copie, un script VBA a été développé. Il permet de récupérer facilement les fichiers via un explorateur Windows et de générer un procès-verbal complet. En renseignant les tolérances fixées sur la première page, les informations hors tolérances sont automatiquement mises en avant.

4. Evaluation de l'automatisation de la méthode

L'automatisation du processus a permis un gain de temps important sur les traitements associés à la modélisation des platines depuis le nuage de points. Cependant, il reste nécessaire d'évaluer sa fiabilité. Les erreurs rencontrées sur la modélisation des platines font référence à leur localisation, leur orientation et l'absence de modélisation (Figure 4). Si des critères et des solutions ont été trouvés pour éviter chacune d'entre elles, deux méthodes de contrôle ont été mises en place : un contrôle qualitatif et un contrôle quantitatif.

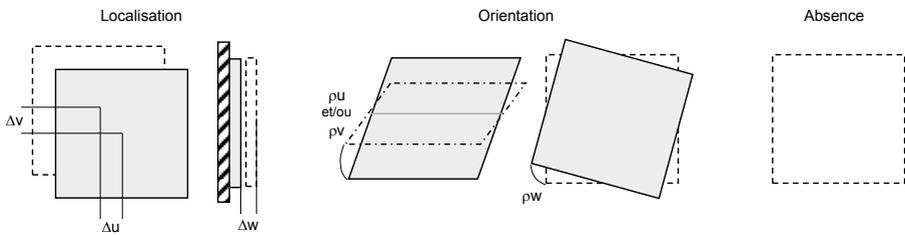


Figure 4 : Erreurs possibles de modélisation

Evaluation qualitative

Le résultat obtenu pour chaque platine (nuage extrait et plan) est contrôlé visuellement par comparaison avec le nuage consolidé. Les outils de comparaison de 3DReshaper permettent ensuite d'analyser la position du plan par rapport au nuage extrait.

Evaluation quantitative

Afin de permettre un contrôle quantitatif des résultats obtenus, 80% des platines ont été relevées à l'aide d'un tachéomètre de précision. Le relevé a été effectué par station libre dans le référentiel de précision sub-millimétrique du projet. Les platines ont été levées en cinq points : les quatre premiers au plus proche des coins et le cinquième vers le centre de la platine.

Ces données permettront de réaliser une comparaison avec les résultats obtenus et ainsi de valider ou non la méthode.

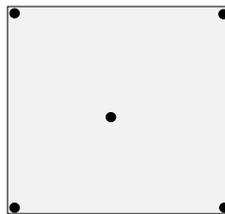


Figure 5 : Positionnement des points de mesures pour levé des cinq points sur la platine

5. Premiers résultats

Afin d'évaluer la fiabilité du script, un levé au scanner 3D comprenant cent platines a été utilisé. Il est formé de vingt stations de scanner réalisées de façon à obtenir un pas de balayage de 3 mm. Dix points ont été géoréférencés, permettant une consolidation avec une erreur résiduelle de l'ordre du millimètre.

Après application du processus, 91 platines ont été modélisées. Les neuf non modélisées étaient en partie masquées. L'évaluation qualitative du nuage a permis d'identifier douze platines mal positionnées. Leur analyse montre un défaut d'acquisition à l'extrémité haute des platines, dû à un fort angle d'incidence et à la géométrie de la zone. Après avoir manuellement apporté les corrections, les données ont été comparées avec les acquisitions tachéométriques. La comparaison des résultats a fourni un écart-type inférieur à 2 mm sur la localisation de la platine et à 0,9 % sur son orientation (soit 1,5 mm d'erreur à l'extrémité de la platine). Ainsi, la méthode de modélisation est validée. Des améliorations vont cependant être apportées afin d'optimiser les résultats.

6. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études a pour but d'automatiser la modélisation de platines pré-scellées depuis le nuage de points. Un essai en situation réelle a permis d'évaluer la qualité des outils développés et de pointer certaines adaptations à mettre en place. Afin d'assurer le bon fonctionnement de l'algorithme, des procédures d'acquisition adaptées vont être définies. Des supports de formations sont réalisés afin de permettre à l'ensemble des membres de l'équipe de réaliser ce type d'intervention.

Pour ce qui est des perspectives, elles concernent dans un premier temps, la possibilité de modéliser des platines de forme circulaire. Ceci permettrait de couvrir la totalité des formes de platines existantes sur les projets ITER et RJH. Dans un deuxième temps, il serait intéressant de se pencher sur le développement d'un système de réalité augmentée adapté à la visualisation de l'interface génie-civil / équipement. En effet, Mathilde MALLERON a réalisé en 2018 un projet de fin d'études concernant l'acquisition et l'implantation sur un mur de la structure métallique le constituant. Ce projet avait pour but de faciliter la réalisation de perçage pour la fixation d'équipements. La réunion de nos deux projets permettrait de regrouper dans une visualisation 3D l'ensemble des informations de l'interface génie-civil / équipement. Ces dernières forment aussi un ensemble de données d'entrée facilement exploitable pour les études des équipements. Une autre application de ces projets pourrait être la mise à jour automatique de maquette de type BIM, permettant l'identification automatique des non conformités.

Création d'une plateforme en ligne de visualisation et de production de données issues de nuages de points.

PFE présenté par : **Thibaut Nugue**
Société d'accueil : **ADAGE**
Directeur de PFE : **Vincent Grandeau**
Correcteur : **Emmanuel Alby**



1. Introduction

Le cabinet ADAGE s'est lancé récemment dans la production de données 3D à l'aide de la lasergrammétrie. Après avoir bien intégré au sein de l'entreprise les différentes phases d'acquisition des données et leurs traitements, les dirigeants souhaitent pouvoir optimiser les phases de production à partir de nuages de points et diversifier leur offre en matière de livrables. En effet, bien que les relevés sur le terrain soient maintenant très rapides grâce aux scanners 3D, la phase de traitement au bureau est très chronophage et mérite encore d'être améliorée. De plus, bien que ces données permettent une représentation de l'espace inédite et puissent avoir de nombreuses applications, leur utilisation actuelle par les cabinets de géomètres classiques est souvent réduite à la production de plans 2D alors qu'il serait intéressant de pouvoir partager plus largement les nuages de points issus de ces relevés.

Le cabinet étant composé de quatre agences réparties sur trois départements différents, il ne faut pas que les solutions apportées démultiplient les coûts en termes d'achats de licence de logiciels et de matériel informatique par agence. Dans le même temps, il est nécessaire d'envisager des solutions qui permettent d'être facilement utilisables par les collaborateurs qui pour la plupart, ne sont pas spécialistes du travail à partir de ce type de données. La réalisation de guides d'utilisation et la formation du personnel à l'utilisation des outils développés est aussi importante afin que ce projet puisse s'inscrire durablement au sein de l'entreprise.

Ce sont ces différentes problématiques qui ont porté et encadré le développement et la réalisation de ce projet de fin d'études.

2. Présentation de la plateforme en ligne

La plateforme en ligne utilisée dans le cadre de ce projet de fin d'études est créée à partir de la plateforme *open-source Potree* qui permet le rendu de nuage de points de très grandes tailles (plusieurs milliards de points) dans de simples pages web. Cette technologie a l'avantage de ne pas nécessiter un ordinateur avec des capacités de calculs ou de mémoire très importantes considérant qu'elle fonctionne aussi sur tablette et smartphone.

Cette particularité est due à la gestion du chargement des points par le *Viewer* qui implique qu'à chaque instant seul un nombre réduit de points est chargé. Cette plateforme a aussi l'avantage de pouvoir accueillir d'autres types de données que les nuages de points. En effet, il est possible d'intégrer des maillages (leur taille est limitée par les capacités de l'ordinateur utilisé) ou encore des couches de données SIG au format *Shapefile*. De plus, s'agissant d'un produit purement utilisable sur le web, la personnalisation de la plateforme offre de très grandes possibilités permettant de modifier tout ce que l'on souhaite à condition de maîtriser les bases de la programmation web dont les langages *HTML*, *CSS* et *JavaScript*.

C'est en tenant compte des avantages cités ci-dessus et du fait qu'il existe une grande quantité de ressources en ligne ainsi qu'une communauté active qui aide au développement de cette plateforme, que nous avons choisi d'utiliser ce support pour le développement de ce projet de fin d'études.

3. Mise en place

Afin d'utiliser le *Viewer Potree* au sein de l'entreprise et d'être en mesure de partager nos nuages de points il faut tout d'abord mettre en place certains outils en amont.

Par exemple, pour le partage des données dans un cadre extérieur à l'entreprise, il est nécessaire de disposer d'un hébergement web. Pour cela, nous nous sommes servis de

l'hébergement dédié à celui du site internet de l'entreprise. En effet, celui-ci nous permet de faire remonter un très grand volume de données qui n'est pour le moment pas employé car seul le site internet était hébergé au début de l'étude.

Afin de pouvoir avoir un contrôle complet sur les outils développés et l'environnement du *Viewer*, nous avons choisi de créer un sous-domaine internet à celui que possède l'entreprise : « *3dviewer.adage.pro* ». Pour également garantir un minimum de sécurité à l'accès des nuages de points, nous avons mis en place un portail d'authentification afin de s'assurer que chaque personne voulant accéder aux données en ait le droit. En fonction de l'identifiant et du mot de passe fourni par les utilisateurs, ils seront alors redirigés directement vers les données leur correspondant. Ainsi, ils ne peuvent accéder qu'à un seul *Viewer* qui correspond à leur identifiant.

Nous avons aussi restructuré les serveurs internes de la société afin de pouvoir mieux gérer et partager les nuages de points entre les collaborateurs. Cette nouvelle gestion a l'avantage de faciliter l'accès aux données à l'ensemble des collaborateurs du cabinet. En effet, avec l'arrivée de la fibre et l'augmentation de la vitesse du transfert des données, on peut envisager que des collaborateurs de différentes agences puissent travailler en même temps sur un même nuage de points pour la réalisation de livrables sans avoir besoin de s'envoyer les données afin d'en avoir une copie locale, permettant ainsi une plus grande flexibilité dans la gestion des affaires et du personnel.

4. Développement des outils de production

Afin de rendre le *Viewer* accessible à tous les collaborateurs du cabinet, nous avons choisi de simplifier l'utilisation de la plateforme en agissant à plusieurs niveaux.

4.1. Convertisseur de données

Pour obtenir une page web capable d'afficher des nuages de points, il faut tout d'abord commencer par convertir les données des nuages de points vers un format adapté. Cette structure de données est générée à l'aide d'un petit exécutable qui se lance via la ligne de commandes Windows. Bien qu'il soit très bien expliqué et relativement accessible, cet environnement reste inadapté à un usage quotidien par des personnes sans connaissances particulières en programmation considérant qu'elles pourraient rapidement y être désorientées et commettre des erreurs. Pour contrer ce problème, nous avons alors développé un petit exécutable autonome afin de rendre la conversion beaucoup plus facile :

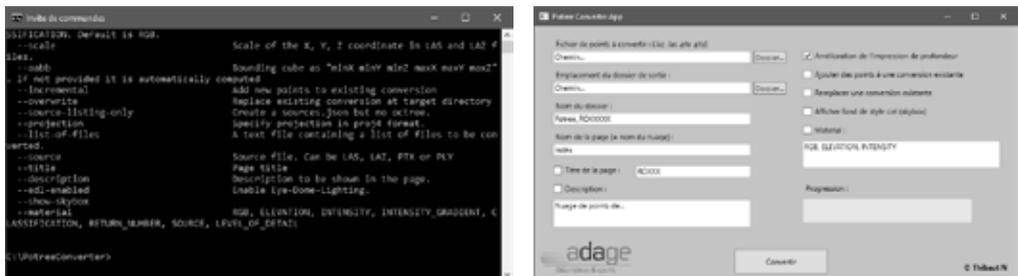


Figure 1 : Comparaison des environnements de conversion des données avec et sans l'application.

Comme on peut le voir sur la *figure 1*, notre application se présente sous la forme d'une boîte de dialogue dans laquelle il est possible de renseigner toutes les options que l'on retrouve à l'aide de la ligne de commande Windows de manière beaucoup plus simple et ergonomique. Cela permet à n'importe quel collaborateur d'être en mesure de convertir les données dont il a besoin en s'aidant de la documentation fournie.

4.2. Viewer web personnalisé

Une fois les données converties, elles sont utilisables à l'aide du *Viewer Potree*. Lorsque les données sont hébergées en ligne, la plateforme fonctionne alors sur tous les plus grands navigateurs internet actuels (ex. Chrome, Firefox, Safari, Opera). C'est un très grand avantage qui permet de partager les données à un public très large sans problèmes de versions et de compatibilité.

Nous avons alors personnalisé l'interface de base des pages web Potree afin qu'elle corresponde à la charte graphique de l'entreprise. Ensuite, nous avons défini les outils qui seraient accessibles en fonction du type de client auquel s'adressent les données ou du type de travail demandé. Il est en effet important de garantir que les personnes qui auront accès aux données puissent en avoir une utilisation adaptée.

4.3. Version de production du Viewer

Après avoir avancé sur la version publique du *Viewer Potree*, nous nous sommes concentrés sur les possibilités d'améliorer la production de livrables avec l'aide de cette plateforme. En effet, étant dans un environnement 3D simple d'utilisation et facilement modifiable, nous avons souhaité être en mesure de faciliter et d'accélérer la production de plans à partir du *Viewer*.

Au sein de l'entreprise, le processus d'élaboration des plans avant la réalisation de ce PFE nécessitait des ordinateurs puissants et l'accès à plusieurs logiciels afin de travailler sur les nuages de points (*RealWorks*, *ReCap*, *AutoCAD*, *Covadis*...) considérant que la plupart des collaborateurs travaillaient en réalisant des coupes de nuages de points, ce qui n'est pas très pratique. En effet, la plupart du temps certains objets peuvent masquer ce qui nous intéresse et la compréhension des coupes n'est pas aisée si l'environnement présente de nombreux objets, en particulier si le dessinateur n'est pas la même personne que celle qui a fait le relevé.

Afin d'assurer une stabilité plus complète et une communication plus aisée entre les logiciels pouvant avoir recours aux données envoyées par le *Viewer* (pour l'instant seulement AutoCAD), nous avons alors choisi de faire migrer le *Viewer Potree* vers une version locale et plus stable de la plateforme. Cette adaptation permet de dépasser la plus importante limite imposée par le travail dans un environnement web, à savoir le cloisonnement de l'échange des données vers l'ordinateur sur un navigateur configuré avec des paramètres de sécurité classiques.

En effet, une page web ne peut pas communiquer librement avec une application installée sur l'ordinateur (comme AutoCAD ou SketchUp). Cela nous permet donc de nous affranchir de cette limite tout en garantissant une stabilité accrue en se détachant des mises à jour continues des navigateurs web qui induisent des erreurs. Nous nous détachons dans le même temps de la nécessité d'effectuer des mises à jour qui impliquent d'avoir une personne qualifiée dans l'entreprise capable d'effectuer ces corrections.

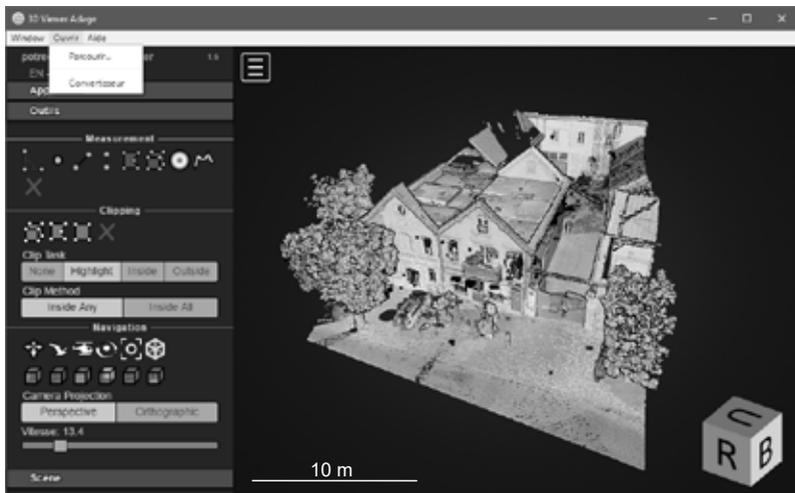


Figure 2 : Présentation de la version locale de l'application

Avec l'appui de la version locale du *Viewer*, les outils nécessaires ont tous été réunis en une seule application qui utilise un lien en temps réel avec *AutoCAD*. Comme on peut le voir sur la *figure 2*, le convertisseur de données est directement accessible depuis cette interface tout comme la documentation afin de se servir du *Viewer*. Ainsi, une fois les nuages de points produits par

lasergrammétrie ou photogrammétrie, tout le processus d'utilisation des données pour créer des plans ou des maquettes reste identique pour les dessinateurs. Pour faciliter le dessin, des modes de déplacements supplémentaires ont été ajoutés au *Viewer* afin d'assurer une navigation plus intuitive et ergonomique.

4.4. Outils AutoCAD

Nous disposons à ce stade du projet de données converties dans un format utilisable par notre *Viewer* et d'une version locale du *Viewer* permettant un échange d'informations entre programmes facilité.

Nous nous sommes alors concentrés sur le développement d'outils permettant de faciliter le dessin sur *AutoCAD* en utilisant un lien en temps réel avec le *Viewer*. En effet, avec l'aide de ces outils nous tirons pleinement parti des avantages liés aux relevés des données en 3D. Nous dessinons nos polygones et nos points en sélectionnant directement les points dans l'environnement 3D et, dès qu'un objet (ligne, point, bloc...) est terminé, il est alors automatiquement dessiné dans le dessin courant d'*AutoCAD*. Pour l'instant les outils développés se limitent aux suivants :

- Points
- Polygones
- Figuration automatique des hauteurs sous plafonds
- Dessin de pièces à l'aide de prolongements
- Projection selon des plans prédéfinis pour faciliter le dessin de façades ou coupes
- Insertion de blocs (portes, fenêtres avec attributs)

Ces outils sont propres à *AutoCAD* et sont développés en fonction des données envoyées par le *Viewer*. Considérant que nous pouvons choisir les informations qui ressortent du *Viewer* grâce à un contrôle total sur le code source de l'application, nous pouvons donc ressortir à peu près n'importe quelle information disponible en fonction des outils que nous souhaitons développer. Le développement consiste alors en la création d'une bibliothèque de commandes *AutoCAD* à l'aide de *Visual Studio* (en utilisant le langage C#) qui est très répandu pour la création de nouvelles commandes sous *AutoCAD*.

5. Perspectives de développement

Nous réalisons les nouvelles commandes *AutoCAD* au fur et à mesure en fonction des besoins des différents collaborateurs et en fonction des projets sur lesquels intervient l'entreprise.

Les différentes pistes d'amélioration les plus évidentes se trouvent au niveau de l'automatisation du dessin. En effet, il est pour le moment possible d'insérer seulement certains blocs et il serait intéressant à l'avenir de pouvoir utiliser des bibliothèques de blocs complètes comme celle existante sous *Covadis* afin de diversifier les possibilités lors de la création de plans. Pour le moment, la société ADAGE se concentre sur la création de plans de bâtiments car c'est dans ce type d'environnement qu'elle acquiert la plus grande partie de ses nuages de points. Toutefois, si à l'avenir elle se diversifie en utilisant la photogrammétrie pour faire l'acquisition de nuages de points alors de nouveaux blocs et outils seront plus pertinents pour la création de plans d'un environnement extérieur.

Une autre possibilité est aussi la modélisation 3D sur le même principe de temps réel qui pourrait être mise en place. En effet, de la même manière que l'on communique avec *AutoCAD*, on peut envisager la communication avec des logiciels plus adaptés à la création de maquettes tels que *SketchUp*, *REVIT* ou encore *Rhinoceros3D*.

6. Conclusion

À la fin de ce projet de fin d'études, la plateforme de visualisation des nuages de points est opérationnelle et l'entreprise est maintenant capable de fournir un *Viewer* pour n'importe quel nuage de points qu'elle acquiert, ce qui permet de partager des données à un public beaucoup plus large et de manière beaucoup plus aisée.

De plus, les processus de production à partir de nuages de points ont été améliorés en permettant un déploiement plus large au sein de l'entreprise du fait de la gratuité de l'application, des faibles ressources matérielles nécessaires pour travailler avec les nuages de points, et de sa simplicité d'utilisation. En effet, le lien en temps réel entre le *Viewer* et *AutoCAD* permet un gain de temps important lors de la production de livrables, tout en limitant les erreurs du fait de contrôles facilités au fur et à mesure de la production.

Développement d'un Système d'Information Archéologique partagé à l'échelle de la région pour une exploitation scientifique de la donnée archéologique

PFE présenté par : Claire NGUYEN
Société d'accueil : Archéologie Alsace
Directeur de PFE : Matthieu FUCHS, Directeur Général
Responsable scientifique : Florian BASOGE, Ingénieur Topographe
Encadrant : Mathieu KOEHL
Correcteur : Emmanuel ALBY



1. Contexte et objectifs du projet

Archéologie Alsace, établissement à l'initiative de ce projet, est une structure publique basée à Sélestat dans le Bas-Rhin. Elle mène des missions majeures de conservation, de valorisation et d'étude de différents sites et vestiges présents sur la région alsacienne. Le service regroupe ainsi l'ensemble des compétences et moyens nécessaires au suivi complet de toutes les opérations archéologiques réalisées en Alsace. En son sein, neuf périodes chronologiques y sont étudiées ainsi que plusieurs spécialités propres à l'archéologie, telles que la carpologie ou l'archéologie du bâti par exemple. La topographie devient une discipline primordiale à la mission de l'établissement. En effet, par définition, l'archéologie est une science dont l'essentiel de sa documentation est acquise à travers des travaux de terrain et la spatialisation de ses éléments fait partie intégrante des études.

Un premier projet relatif à un Système d'Information Archéologique (SIA) a été mené lors du Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2018 de Théotime Fragnol qui consistait au développement d'un SIA sur la commune de Horbourg-Wihr.

Désormais, ce projet a pour but d'intégrer dans le travail des archéologues une utilisation courante des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Il s'agit d'un outil d'analyse et de gestion de la donnée puissant et parfaitement adapté au domaine de l'archéologie où les informations sont, par définition, spatialisées. Ce projet consiste alors à mettre en place et à développer un Système d'Information Archéologique partagé à l'échelle de la région permettant une exploitation scientifique de la donnée archéologique. En d'autres termes, il s'agit de mettre en place un SIG spécialisé et adapté à l'archéologie qui permet l'intégration des données relatives à toutes les opérations menées par la structure, qu'il soit question de fouilles ou de diagnostics. Cet outil devra prendre en compte dans sa conception les différentes méthodes de travail pratiquées mais devra également permettre aux archéologues, non initiés à l'utilisation d'un tel outil, de pouvoir l'exploiter.

Il s'agit dans un premier temps de créer un Modèle Conceptuel de Données robuste et complet qui permet de mettre en place une base de données où l'ensemble des informations nécessaires à une étude archéologique seront accessibles. Par la suite il faudra également mettre différents outils à disposition permettant de mener des actions sur les bases de données sans avoir de connaissances particulières en SIG ou dans le langage informatique SQL.

Le développement d'un SIA nécessite plusieurs années de travail et de développement. Il est alors demandé de créer des outils pensés pour un développement sur du moyen et long terme. Une réflexion approfondie sur les perspectives d'amélioration pour le système devra également être menée au terme de ce projet.

2. Notions archéologiques

Un travail d'appropriation des notions archéologiques a été effectué afin de cerner l'ensemble des problématiques et des contraintes liés à une exploitation de la donnée archéologique. Il était important de comprendre, dans un premier temps, l'organisation d'une opération pour ensuite pouvoir traduire ses différents éléments dans une base de données.

Pour commencer, Archéologie Alsace mène plusieurs types d'opérations archéologiques qui se décomposent en deux catégories distinctes : les *fouilles programmées* qui consistent à étudier un site sur plusieurs années et dont le potentiel archéologique est bien connu, et les opérations d'ordre préventif. Elles-mêmes se composent des *diagnostics*, qui permettent d'évaluer le potentiel archéologique d'un terrain, qui peuvent amener à une *fouille préventive* si ce potentiel est avéré.

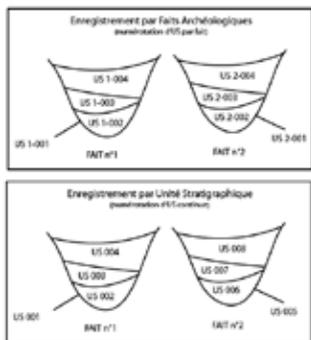
Organisation générale d'une opération archéologique

L'*unité stratigraphique* (US) est l'élément central de notre SIA car elle représente la plus petite unité d'une opération archéologique. De manière générale, la stratigraphie est un concept qui permet de définir des enchaînements chronologiques à partir des positionnements relatifs des séquences. Cependant, la notion d'unité stratigraphique est plus large que celle de simple couche stratigraphique. Il s'agit de tout élément qui est le résultat d'une action, qu'elle soit naturelle ou anthropique, et visible ou non sur le terrain [Py, 1997]. Un élément qui ne possède pas de numéro d'US n'existe pas en archéologie. Elles peuvent être de trois types différents :

- les **US positives** qui présentent un volume mais qui ne découlent pas d'une activité de construction (ex : couche de remblai, comblement de fosse)
- les **US négatives** qui sont tous les types de profil, section ou surface sans volume (ex : creusement de fosse, arasement de mur)
- les **US construites** qui sont des US positives, mais qui sont liées à une activité de construction (ex : élévation d'un mur)

L'utilisation de ces US permet de définir les relations stratigraphiques qui existent entre les différents éléments enregistrés. Pour mieux les visualiser et ainsi les analyser de manière systématique, il existe un modèle graphique appelé *diagramme de Harris* (ou matrice de Harris). Cet outil donne la possibilité d'associer les US selon quatre relations possibles : la relation de postériorité « **sur** », la relation d'antériorité « **sous** », la synchronie absolue « **égale** » ou la synchronie relative « **équivalente** » [Djindjian, 1991].

Une fois que cette notion a été bien définie, la structure d'une opération archéologique devient plus précise. La plus petite unité est ainsi l'*unité stratigraphique*. Un ensemble d'US représente un *fait archéologique*, encore appelé structure archéologique. Plusieurs faits composent un *ensemble archéologique*, ou contexte archéologique. Ces différents éléments devront parfaitement s'intégrer au système qui sera mis en place.



Méthodes d'enregistrement terrain

La compréhension du fonctionnement des différentes méthodes d'enregistrement des données sur le terrain nous ont permis de préciser les éléments qui devaient être liés entre eux dans notre base de données. En effet, celle-ci devra permettre une utilisation des deux modes d'enregistrement qui existent : la **méthode par fait archéologique**, souvent utilisée sur des opérations en milieu rural, et la **méthode par unité stratigraphique**, utilisée en milieu urbain en général [Racinet, 2004]. La principale différence entre ces deux modes est la numérotation des US comme illustré sur la figure ci-contre.

Figure 1 : Illustrations des différentes méthodes d'enregistrement des données archéologiques

3. Création du Modèle Conceptuel de Données et mise en place de la base de données PostgreSQL

L'étude précédente a permis de comprendre précisément la structure générale d'une opération archéologique. Nous avons mis en place un Modèle Conceptuel de Données pour nous aider à construire notre base de données via la méthode Merise, qui est une méthode d'analyse, de conception et de réalisation de systèmes. Pour nous aider dans notre démarche et nous conforter dans nos choix, il était important de travailler en étroite collaboration avec les différents archéologues

possibilité aux agents non initiés à l'utilisation de SIG et de BD de pouvoir travailler avec le SIA. Nous avons alors décidé de développer un plugin d'intégration de données sous Python pour QGIS. Il était important que cet outil soit ergonomique, intuitif et que son automatisations soit maximale pour s'affranchir d'erreurs de non-respect du thésauros. Nous nous sommes largement inspirés des fiches papier d'enregistrement terrain actuellement utilisées par les archéologues pour concevoir l'ensemble des boîtes de dialogues avec QTDesigner (figure 3). Il était important de proposer un outil qui permette une intégration rapide avec un minimum de champ à saisir et pour que son utilisation reste agréable et fluide.

Pour tester cet outil, la manière la plus efficace consiste à l'intégration d'un rapport de fouille dans le SIA via le plugin *sia-integration*. Cette étape permettra également de valider de manière plus sûre la structure de notre base de données.

Des manuels d'explication pour les utilisateurs et les administrateurs sont également fournis pour que le développement de cet outil suive bien la ligne directrice de départ qui était de proposer un outil accessible à tous.



Figure 3 : Boîte de dialogue pour l'intégration d'un US dans le SIA

5. Perspectives et conclusion

Grâce à ce projet, nous avons construit des bases solides pour le développement futur du Système d'Information Archéologique de l'établissement. La base de données proposée prend en compte tous les éléments relatifs à une opération archéologique et a été conçue pour permettre l'intégration des données terrain via les deux modes d'enregistrement existants. Le plugin d'intégration qui a été développé permet également d'initier les archéologues encore réticents à une manipulation courante des SIG dans leur métier, à une utilisation de QGIS et des bases de données. L'ensemble a bien été mis en place dans une démarche de gestion de toutes les informations issues des opérations archéologiques réalisées en Alsace ce qui permettra par la suite de mener des analyses et de travailler en prenant en compte tous les éléments disponibles.

De nombreuses possibilités s'ouvrent à Archéologie Alsace alors pour la suite du développement du SIA. Tout d'abord, un des objectifs serait de développer l'outil pour qu'il serve d'appui au travail des archéologues, non plus seulement dans le but de regrouper les données dans un même système, mais pour qu'il accompagne les agents des phases de terrain jusqu'aux études et à la rédaction des rapports d'opération. Une idée serait alors de convertir le plugin d'intégration mis en place à une utilisation via tablette pour permettre aux archéologues d'enregistrer directement toutes leurs données dans la base, et surtout en s'affranchissant des fiches d'enregistrement papier qui ne sont pas toujours pratiques. Cela permettrait également de mener des analyses plus larges sur le terrain en ayant accès en tout temps à l'ensemble des opérations qui ont été menées à proximité de la fouille étudiée.

Le développement d'un tel projet offre de vastes possibilités et laisse place à la créativité. Il serait intéressant de travailler au développement d'outils connexes tels que des générateurs automatiques de requêtes SQL ou à la mise en place de diagrammes stratigraphiques par exemple. Ce genre d'outil permettrait un gain de temps considérable lors des phases terrain, des phases d'étude et laisserait plus de temps à l'étude scientifique archéologique.

Références :

Djindjian, F., 1991, *Méthodes pour l'archéologie*. Armand Colin Editeur, Paris. ISBN 2-84274-290-7, pages 152-162 / 382.

Py, M., 1997, *Lattara 10, Systat 3.1 – Système d'Information Archéologique – Manuel de référence*. Co-édité par l'Association pour la recherche archéologique en Languedoc Occidental et l'Association de fouilles archéologiques nationales, Lattes.

Racinet, P., Schwerdroffer, J. et al., 2004, *Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie*. Editions du temps, Nantes. ISBN 2-84274-290-7, pages 143-187 / 382.

Modélisation 3D du château disparu des Wurtemberg à Horbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine

PFE présenté par : **Laurine CARTIER**
Société d'accueil : **Archéologie Alsace**
Laboratoire ICube, UMR 7357, Groupe TRIO
Directeur de PFE : **Mathieu FUCHS**
Encadrant : **Mathieu KOEHL**
Correcteur : **Emmanuel ALBY**



1. Contexte de l'étude

La commune d'Horbourg-Wihr, située dans le Haut-Rhin en Alsace, a gardé en son sol les traces de plusieurs phases d'occupation au cours des siècles, lui conférant ainsi un très fort potentiel archéologique. Des vestiges datant de la période antique (1^{er} - IV^e siècles ap. J.-C.) et de la période moderne (XVI^e - XVIII^e siècles ap. J.-C.) ont notamment été retrouvés au cours de campagnes de fouilles entreprises à partir de la fin du XVII^e siècle.

Les vestiges de deux édifices notables ont ainsi pu être relevés et analysés pour la conservation et la sauvegarde du patrimoine local. Il s'agit pour le premier d'un fort militaire romain, appelé *castellum*, construit vers le milieu du IV^e siècle ap. J.-C. dont la modélisation a été réalisée l'an passé par Thibaut NIVOLA au cours de son projet de fin d'études (Fig.1). Le second édifice est quant à lui un château construit à la Renaissance par la famille de Wurtemberg dans l'angle Nord-Est des ruines du *castellum*. Peu de traces de ce château subsistent aujourd'hui, celui-ci ayant été complètement démantelé au XVII^e siècle dès la fin de la guerre de 30 ans.

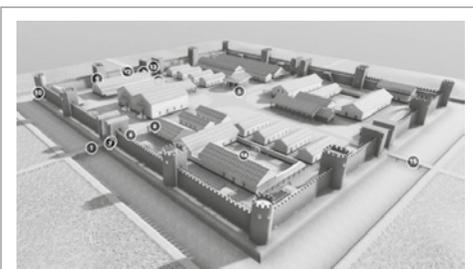


Figure 1 : Rendu photo-réaliste du castellum d'Horbourg-Wihr, visualisable depuis la plateforme Sketchfab

Depuis quelques années, la commune de Horbourg-Wihr souhaite promouvoir ce patrimoine et profiter du rayonnement touristique de Colmar pour affirmer une identité propre et susciter la curiosité du public. Plusieurs projets de valorisation ont ainsi été menés par Archéologie Alsace dont plusieurs en partenariat avec l'INSA de Strasbourg. Ce projet de fin d'études s'inscrit dans cette lancée et porte tout particulièrement sur la reconstitution du château des Wurtemberg et sur sa mise en valeur auprès des archéologues et du grand public.

2. Objectifs

Les nombreuses découvertes historiques sur la commune d'Horbourg-Wihr soulèvent aujourd'hui la question essentielle de leur diffusion et de leur valorisation auprès du public. L'enjeu de ce projet de fin d'études est de répondre à ce questionnement en proposant des solutions adaptées aux problématiques rencontrées.

La première partie du projet consiste en la réalisation de maquettes numériques 3D du château pouvant être mises en ligne sur des applicatifs libres et exploitables sur tablette numérique ou encore sur smartphone. Le premier objectif de cette modélisation est de parvenir à créer un outil de synthèse archéologique, c'est-à-dire un modèle faisant apparaître les parties attestées par archéologie et celles qui ne le sont pas. Ainsi, le niveau de certitude et la source de chacun des éléments doivent être clairement affichés.

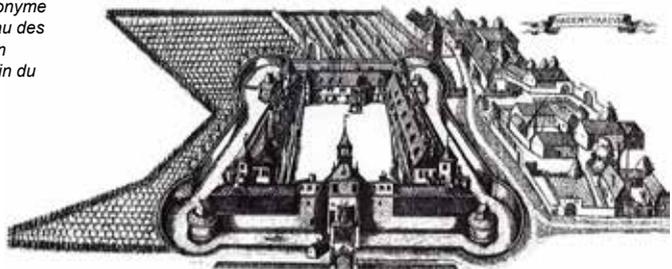
La logique de modélisation étant différente selon le type de rendu souhaité, le deuxième objectif est de livrer des modèles qui seront facilement utilisables ou modifiables par la suite. Ainsi, les modèles créés devront être aisément exportables, compatibles avec de multiples plateformes et optimisés pour le rendu en temps réel.

La deuxième partie de ce projet consiste en l'intégration des maquettes numériques nouvellement créées dans la trame urbaine contemporaine. L'objectif est ici de parvenir à faire cohabiter *castellum* et château sur un même applicatif doté des mêmes repères urbains. Pour cela, des solutions de réalité augmentée seront développées.

3. Analyse et interprétation des données

Les premières semaines de ce projet ont été consacrées à l'étude des données et aux relations que ces dernières entretiennent entre elles. Peu d'éléments permettent aujourd'hui de situer et de représenter le château. Une des données les plus importantes en notre possession est une gravure le représentant à la fin du XVI^{ème} siècle (Fig.2).

Figure 2 : Gravure anonyme représentant le château des Wurtemberg après son réaménagement à la fin du XVI^{ème} siècle



Quatre sondages archéologiques ont été menés entre 2004 et 2017 dans l'optique de retrouver des vestiges du *castellum* et du château. Les rapports de fouilles ont été étudiés afin de saisir les enjeux de chacun des sondages effectués pour ensuite isoler les faits et hypothèses nécessaires et suffisantes pour la modélisation. Ces informations ont ensuite été intégrées à la maquette numérique pour justifier du positionnement, de l'orientation et de la géométrie des éléments principaux du château.

Les éléments dont nous disposons ne permettant pas de restituer le château dans sa majeure partie, nous avons pu au cours de ce projet visiter des sites similaires au château, de par leur architecture et leur époque, et pouvant ainsi servir d'inspiration pour la modélisation. Le château de Riquewihr, construit quelques années seulement avant celui d'Horbourg-Wihr par le même architecte, fait notamment partie de ceux-ci.

Tous ces éléments ont été ensuite mis en relation pour proposer des reconstitutions du château. Ce travail est présenté régulièrement aux archéologues, qui valident ou bien corrigent le modèle. Parfois, plusieurs propositions sont nécessaires avant d'être satisfait par la modélisation d'un seul élément. Ces aller-retour sont chronophages, mais permettent de fournir un modèle abouti et dont chaque élément est justifiable.

4. Modélisation 3D du château

Deux logiciels ont été utilisés pour la modélisation du château. Il s'agit de SketchUp Pro et de Maya, développés respectivement par les sociétés Trimble et Autodesk. Ces logiciels possèdent des spécificités propres et s'opposent particulièrement dans le principe de conception des modèles 3D. En effet, SketchUp autorise une grande liberté sur la façon de concevoir un objet. Il est ainsi possible de revoir complètement et rapidement un objet 3D si celui-ci ne convient plus. *A contrario*, dans Maya le retour en arrière est bien plus compliqué, ce qui oblige à être certain du résultat à obtenir avant de commencer la modélisation. Nous avons choisi ce logiciel car nous avons pu, à travers de ce projet, se rapprocher des limites de SketchUp principalement en ce concerne l'application des textures. Maya permet quant à lui de maîtriser chacune des étapes de construction du modèle et de gérer parfaitement la géométrie de ses objets 3D. Il permet également d'alléger le modèle en appliquant des méthodes d'optimisation améliorant de cette façon les performances du rendu, notamment en temps réel. Enfin, Maya produit des rendus très propres esthétiquement, ce qui en fait un choix par excellence pour la production de modèles réalistes.

La combinaison des 2 logiciels convient donc parfaitement à un travail en relation avec l'archéologie : les objets 3D ont pu être créés sur SketchUp et retravaillés au fil des réunions avec les archéologues. Une fois leur géométrie fixée de manière définitive, ils ont pu être reconstruits dans Maya pour obtenir cette fois-ci un modèle très propre (Fig. 3) sur lequel les textures vont pouvoir être appliquées facilement.

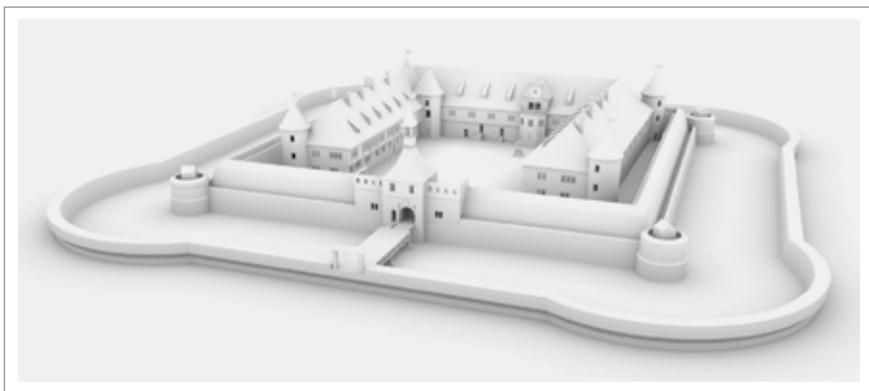


Figure 3 : Volumes principaux du château (Maya)

L'un des objectifs de ce projet de fin d'études est de proposer une visite interactive du château, avec l'ajout de contenu en réalité augmentée. Un rendu temps réel devra pour cela être utilisé. Dans ce type de rendu, chaque image de la scène 3D est calculée en quelques millièmes de secondes juste avant d'être affichée à l'écran. Plus un modèle est composé d'objets 3D, plus il sera lourd et plus il sera compliqué de proposer un rendu graphique en temps réel. Un des points clés de la modélisation est donc l'utilisation de techniques d'optimisation des objets 3D, qui sont brièvement évoquées dans la partie suivante.

Plusieurs techniques d'optimisation ont été appliquées au cours de ce projet, permettant ainsi d'alléger de manière conséquente le modèle 3D. Le nombre de faces de chaque objet doit par exemple être limité en fonction de la position ou bien de l'importance de ce dernier. Un élément de décor lointain se verra ainsi extrêmement simplifié puisque le visiteur ne s'en approchera jamais. Pour des objets complexes dont la géométrie ne peut être simplifiée, des méthodes d'optimisation sont applicables sur la base d'un travail de texture de ces objets. Cette dernière méthode a par exemple été appliquée sur les façades en pan-de-bois du château (Fig. 4).



Figure 4 : Création du pan-de-bois du château à partir de textures créées sur Photoshop

5. Mise en valeur du château

Dès lors qu'une maquette 3D est générée, la question de sa diffusion devient essentielle. L'objectif principal étant de valoriser et de faire découvrir le patrimoine historique de la commune d'Horbourg-Wihr, nous devons mener une réflexion afin de proposer le moyen de communication le plus cohérent par rapport au public visé ainsi que par rapport au message que nous souhaitons diffuser. En ce sens, nous avons retenu les deux solutions suivantes :

- ➔ Tout d'abord, le modèle 3D a été utilisé pour compléter une visite virtuelle réalisée par Thibaut NIVOLA l'an passé. Cette visite permet de se promener virtuellement dans la commune d'Horbourg-Wihr à travers une dizaine de points de vue et de naviguer entre les différentes époques afin de voir apparaître le *castellum* et le château à l'endroit précis où ceux-ci se tenaient à l'époque.
- ➔ La deuxième solution consiste en l'utilisation de la réalité augmentée, qui permet d'ajouter à notre perception du réel une surcouche d'information contextuelle. Cette technologie est préférée à la réalité virtuelle pour ce projet car elle permet de ne pas couper l'utilisateur de l'environnement contemporain et de lui procurer des repères urbains utiles à sa compréhension.

6. Conclusion

Ce projet de fin d'études a tout d'abord permis la création d'une maquette numérique 3D du château des Wurtemberg à Horbourg-Wihr. Les enjeux de ce modèle sont multiples, dont certains essentiels d'un point de vue archéologique. Les données utilisées pour la reconstitution doivent transparaître dans le résultat final afin de comprendre facilement le processus interprétatif réalisé. En effet, la plupart des vestiges archéologiques retrouvés ne représentent qu'une petite portion des vestiges originaux et ne renseignent pas totalement sur la configuration initiale du site. De multiples interprétations sont alors possibles et la reconstitution finale doit justifier de celle choisie. Il s'agissait également d'exprimer la fiabilité de la modélisation, à l'aide d'une représentation visuelle intégrée au modèle virtuel, permettant ainsi de saisir la relation entre la réalité archéologique (ce qui existe encore) et la réalité virtuelle (ce qui a été reconstruit virtuellement).

Un travail important a également été réalisé sur le modèle 3D en lui-même, avec l'objectif de le rendre le plus réaliste possible. De nombreuses textures ont pour cela été créées et retravaillées jusqu'à obtenir le résultat souhaité. Des techniques d'optimisation appliquées au modèle 3D autorisent ce dernier à être utilisé pour du rendu en temps réel, notamment pour des applications de réalité augmentée.

Enfin, le *castellum* et le château d'Horbourg-Wihr cohabitent sur le même applicatif grâce à une visite virtuelle s'inscrivant dans la trame urbaine contemporaine.

Rendu 3D et topographie des sites archéologiques d'Eridu et Ur, Irak

PFE présenté par : **Laurene Moroni**
Société d'accueil : **MISHA UMR 7044**
irecteur de PFE : **Philippe Quenet**
Correcteurs : **Emmanuel Alby**
Mathieu Koehl



Maison Interuniversitaire des
Sciences de l'Homme
- Alsace -



INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG



1. Contexte et objectifs de l'étude

En Mésopotamie, les sites archéologiques sont remarquables car ce sont des buttes ("tells" en arabe) qui s'élèvent au-dessus de la plaine. Ces collines sont toutes artificielles ; il était coutumier à l'époque sumérienne (III^{ème} millénaire av. JC) de bâtir sur d'anciens sites démolis préalablement nivelés. Au fur et à mesure des nouvelles constructions, le bâtiment prenait de la hauteur et son accès n'était alors possible que par l'ajout d'un escalier. Cette architecture provient du fait que l'on voulait distinguer ce bâti par une esthétique monumentale. Ces édifices nommés ziggurats étaient des temples et leur architecture avait aussi pour vocation de donner l'impression que le bâti s'élevait vers le ciel et donc vers le monde des dieux.

Les sites d'Eridu et d'Ur sont les sujets de notre étude, ils font partie de ces anciennes cités sumériennes qui comprenaient un temple dédié respectivement au Dieu Enki (Dieu créateur de l'humanité) et au Dieu Nanna (Dieu de la Lune). En 2016, ces deux sites ont été inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO car ils font partie des cités les plus anciennes et les plus importantes de la période sumérienne. Ces lieux ont déjà été prospectés et fouillés au cours des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles puis délaissés durant les guerres qui ont frappé l'Irak. Néanmoins, une récente expédition composée d'archéologues, de géophysiciens et d'un droniste a permis, au cours du mois d'avril 2018, de créer une nouvelle documentation de ces sites grâce à la mise en place de levés photogrammétriques par drone. Ces nouvelles données vont permettre la restitution en trois dimensions de la topographie du site d'Eridu ainsi que de l'architecture des vestiges de la ziggurat d'Ur, rénovée dans les années 1960.

Les objectifs des missions du PFE ne sont pas les mêmes pour les deux sites. En effet, concernant Eridu, l'enjeu principal est de créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui va pouvoir servir de base au recalage de plans de fouilles antérieures et à son enrichissement par des nouvelles données. Une riche documentation ancienne est disponible à propos de ce lieu, constituée de :

- Plans topographiques de Safar de 1947 et 1981 ;
- Photos aériennes de la Royal Air Force de 1926 ;
- Plans topographiques de Hall de 1919 ;
- Plan topographique de Thompson de 1918 ;
- Plan topographique de Taylor de 1854.

Des données récentes géoréférencées sont disponibles et pourront servir au recalage des plans anciens :

- Levés géophysiques réalisés en 2018 ;
- MNT produit à partir du levé photogrammétrique de 2018 ;
- Images aériennes Bing maps.

Le recalage de cette documentation permettra d'analyser en détail les fouilles déjà réalisées par les différents archéologues énumérés ci-dessus. En effet, il est utile d'estimer si ces travaux ont une cohérence dans le temps ou s'ils ont été faits sans lien avec les précédents. La création d'une orthophoto permet d'obtenir un fond de plan pour la



Figure 1 : Plan topographique de la zone Est du Tell 1 du site d'Eridu, Hall 1919.

localisation de tous ces sites et a servi de support pour la mission d'avril 2019 afin d'aider les archéologues à se repérer sur le terrain.

Pour Ur, l'objectif est de créer un modèle 3D le plus réaliste et précis possible de la ziggurat rénovée.

2. Le site d'Eridu

Le site d'Eridu ne présente plus de traces superficielles éloquentes de la ziggurat car les matériaux du monument ont été de nombreuses fois pillés dès l'Antiquité. Néanmoins, on peut encore distinguer ici et là la présence de murs, terrasses et escaliers.

2.1 Le levé photogrammétrique

Dans le but d'appréhender la globalité du site, la mise en place d'un levé photogrammétrique a été décidée afin d'obtenir un MNT qui permettra de redessiner les traces du bâti ainsi que de géolocaliser la documentation ancienne. Ce levé a été réalisé par Francis Galluser de la société Coléoptère, droniste de formation. Il a été effectué dans des conditions climatiques parfois difficiles (vent, pluie, sable en suspension, soleil...) ce qui a créé un jeu de données très hétérogène au niveau de la qualité des photos. De plus, par mesure de sécurité liée à la localisation du site, le levé a été réalisé avec un recouvrement de plus de 90% entre chaque cliché ce qui a produit presque 10 000 photos pour une zone d'une surface de 13 ha.

2.2 La réalisation du MNT

Au vu du nombre important de clichés, il a été décidé dans une première phase de test, de prendre en considération une photo sur deux et de découper la zone en cinq pour le traitement. Un second essai conservait un cliché sur trois sur l'ensemble de la zone. Ces deux projets ont été traités en parallèle sur le logiciel Photoscan avec lequel nous avons obtenu des résultats inégaux. On distingue nettement la différence entre les deux MNT. Sur celui produit avec les différentes bandes, on observe des différences d'altitude entre les jointures des zones traitées. Cela est dû au fait que nous ne possédions que 17 points d'appui sur le site et donc seulement 4 points d'appui pour certaines bandes, ce qui ne permet pas de garantir le bon géoréférencement du projet, notamment en altitude. De plus, le levé GPS a été réalisé par Bruno Gavazzi, géophysicien, qui disposait d'un GPS différentiel avec une base stationnaire et un mobile mis en place dans un sac à dos. Le levé des cibles s'est donc effectué avec le placement du sac à dos sur chacune d'entre elles. La précision des coordonnées de chaque point ne peut pas être inférieure à 10 cm. Nous pouvons donc affirmer qu'un traitement en bloc de la zone est dans ce cas plus approprié.

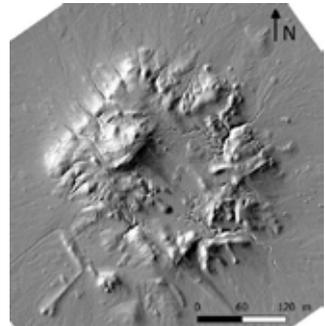


Figure 2 : MNT produit avec ombrage réalisé sous Qgis.

2.3 La réalisation d'une cartographie des sites anciens

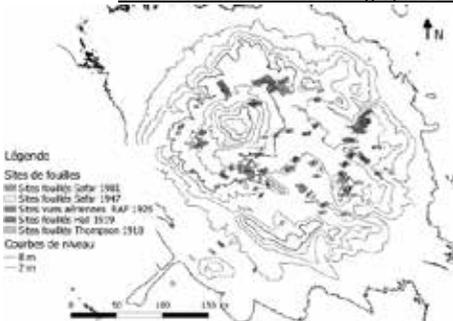


Figure 3 : Cartographie proposée des anciens sites de fouilles.

Le logiciel Qgis nous permet de géoréférencer des rasters grâce à plusieurs méthodes qui conservent les formes de ces derniers ou non. Après plusieurs tests notamment avec la transformation de Helmert, nous avons préféré utiliser la transformation de la Spline qui donne de meilleurs résultats en cohérence avec le MNT produit et le levé magnétique. Après calage de toute la documentation ancienne, nous avons pu, par ajout de polygones, recenser tous les sites ayant été fouillés. Nous obtenons ainsi la position estimée de ces zones qui serviront à la prospection archéologique sur le terrain.

3. Le site d'Ur

3.1 Le levé photogrammétrique

Le levé s'est effectué dans les mêmes conditions que sur le site d'Eridu, même si la zone photographiée est sensiblement plus petite et donc le nombre de photos considérablement plus faible. Le défi provenait, dans ce cas, du fait que l'ensemble des photos verticales aient été prises à très faible distance de la façade (moins de 10 mètres) et que les photos nadirales et obliques aient été prises à une distance de 30 mètres au-dessus de la ziggurat. Cette variation de distance objet-captteur ne permet pas au logiciel d'orienter correctement les différents jeux de données. On se retrouve avec deux nuages de points à différentes altitudes : le nuage de points créé à partir des photos verticales est plus bas que le nuage de points créé à partir des photos nadirales et obliques.

3.2 Réalisation du modèle 3D

Pour arriver à créer le modèle 3D, il a donc fallu réfléchir à différencier les protocoles de traitement des données pour les deux prises de vue. Nous avons donc procédé à plusieurs tests pour finalement conserver la chaîne de traitement la plus à même de produire un modèle texturé le plus réaliste possible. La première étape fut de produire un nuage de points géoréférencés grâce aux photos nadirales et obliques. Ensuite, il fut possible de récupérer les coordonnées de points remarquables (angles de terrasses, de marches...) en insérant ce nuage de points dans CloudCompare. Ces points furent alors insérés comme points d'appui dans chaque projet de façades. Effectivement, chaque façade fut traitée séparément, car même les photos verticales entre elles ne s'alignaient pas correctement, certainement en raison de l'absence de cibles géoréférencées sur les murs. Chaque projet de façade a permis de produire un nuage de points dense des quatre faces de la ziggurat qui furent recalées sur le nuage de points produit avec les photos nadirales.

Nous avons pu par la suite insérer ce nouveau nuage de points, rééchantillonné (1pt/5mm) dans Photoscan. La création du maillage s'est effectuée en mode "low", car, le nombre de points étant très important, il était impossible pour le logiciel de produire un maillage en mode "medium". Finalement, nous avons texturé le modèle avec les photos verticales et quelques photos nadirales pour avoir la texture du sommet des terrasses.

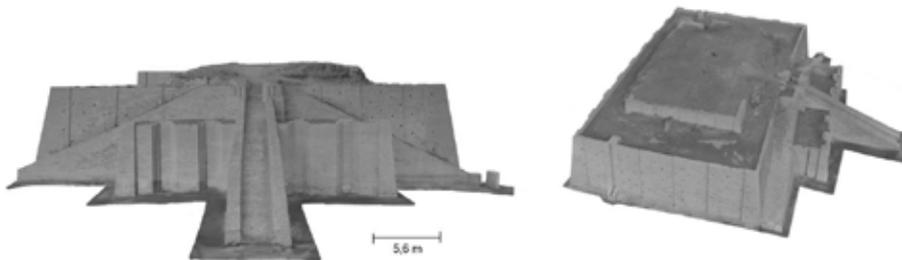


Figure 4 : Modèle 3D texturé de la ziggurat d'Ur.

4. Les sites de la mission d'avril 2019

Une mission archéologique s'est déroulée lors de mon PFE, en avril 2019 afin de procéder à la prospection archéologique, magnétique et photogrammétrique de trois autres sites. En effet, le site d'Eridu protégé par des digues comprend plusieurs tells (6 au total).

4.1 Création d'un protocole photogrammétrique

Afin d'optimiser le levé photogrammétrique, pour ne pas se retrouver avec 10 000 photos ce qui est très contraignant à traiter, nous nous sommes inspirés des protocoles existants dans la littérature comme celui de [Murtyoso, 2016], [Kraus, 1997] ou encore [Grob, 2014]. Ainsi, nous avons opté pour un recouvrement longitudinal de 70% et transversal de 60% entre les photos. La hauteur de vol a été fixée à 30 m afin d'obtenir un pixel objet inférieur à 1 cm. Et pour garantir ce pixel objet, nous avons décidé d'effectuer le levé des photos nadirales en quadrillage, c'est à dire un premier vol dans une direction puis un second vol dans une direction perpendiculaire à la première. Les photos obliques

Laurene Moroni 3/4

devaient être réalisées seulement si le terrain présentait de fortes irrégularités. Finalement nous avons pu effectuer un levé qui permet de calculer le nombre de photos en fonction du recouvrement choisi, de l'aire photographiée et de la hauteur de vol. Pour la même aire de 50 000 m², avec les paramètres du levé de 2018, nous obtenons 10 909 photos et avec les paramètres de notre étude nous parvenons à 2518 clichés. La différence de plus de 8000 photos n'est pas négligeable.

4.2 Les nouveaux sites prospectés

Les nouveaux sites prospectés sont les sites 3, 4, 5 visibles sur la carte ci-contre qui ont été numérotés par Safar en 1940 ; le site 1 correspondant au tell principal que nous avons traité au début de ce résumé. En effet, les monticules 3 et 4 ont révélé la présence de poteries de la seconde moitié du II^e millénaire av. J.-C. (Kassite et post-Kassite, 1650-1200 av. J.-C.), tandis que sur le monticule 5 des traces des bâtiments du I^{er} millénaire avant J.-C. ont été découvertes sur une grande surface par photographie aérienne. Ils ont été levés avec le drone Mavic Pro II. Les cibles codées ont été placées de façon à bien encadrer la zone afin de garantir le géoréférencement du projet comme nous l'avions prévu dans le protocole. Néanmoins, les déplacements sur le site sont complexes (seulement en 4x4) et il est très compliqué d'amener du matériel sensible tels que des GPS ou des drones dans la région. Seul un GPS différentiel a pu être emmené par l'équipe des géophysiciens, qui ne restait pas durant le mois entier de la mission. Les cibles Photoscan n'ont pas toutes pu être levées par GPS différentiel, certaines l'ont seulement été avec un GPS de poche Garmin. De plus, le levé avec le différentiel s'est effectué sans base mais juste avec un mobile que l'on a placé quelques secondes sur la cible. Cela ne permet pas de garantir la précision des points. De ce fait, le géoréférencement des sites ne pourra pas être garanti. Néanmoins, nous avons pu créer des MNT pour chacun de ces sites qui pourront servir à l'analyse du terrain. De plus, le géoréférencement des projets pourra se faire a posteriori avec le levé de points caractéristiques repérés au préalable sur l'orthophoto, puis levés lors de la future mission qui se déroulera en 2020.

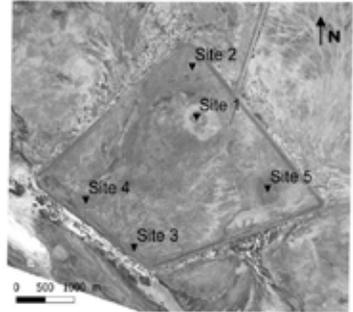


Figure 5 : Localisation des différents tells du site d'Eridu.

5. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études aura permis de fournir de nouveaux outils d'analyse aux archéologues sur des sites n'étant pas faciles d'accès ; leur offrant ainsi un recours permanent à la topographie des lieux d'intérêt. Ces travaux ont déjà pu servir de support de communication pour un colloque qui s'est déroulé à Strasbourg intitulé « *Rencontres Interdisciplinaires et Interprofessionnelles Géosciences - Archéologie* » et qui fera l'office d'une publication. En effet, les livrables de ce PFE permettront de créer une base de données qui serviront à la recherche archéologique ainsi qu'une diffusion auprès du grand public. Néanmoins, la contrainte de la région n'a pas permis de géoréférencer les sites 3, 4 et 5 de façon optimale, il conviendra alors de réeffectuer sur le terrain un levé GPS différentiel avec la mise en place d'une base. Ces travaux rentrent dans l'objectif de créer une nouvelle documentation des différents tells d'Eridu liée à son classement au patrimoine mondial de l'UNESCO qui a permis à une équipe franco-italienne (Franco D'Agostino, Philippe Quenet *et al.*) de réinvestir le site en 2018, 2019 et dont la prochaine mission est prévue en 2020.

Références

- [Grob, 2014] Grob, M. Kadded, F. (2014). Acquisition par drone pour les relevés topographiques. Revue XYZ n°141, p42-46.
- [Krauss, 1997] Krauss, K. (1997). *Manuel de photogrammétrie*. Hermès.
- [Murtyoso, 2016] Murtyoso, A. (2016). *Protocoles d'acquisition d'images et traitement des données par drones Modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie*. INSA Strasbourg.

UNE APPROCHE VECTORIELLE POUR CLASSIFIER DES DONNEES IMAGES ET VECTEURS DANS LE BUT D'EXTRAIRE UNE CARTOGRAPHIE DES ZONES CLIMATIQUES LOCALES DES QUARTIERS DE STRASBOURG



PFE présenté par : **Olivier Montauban**
Organisme d'accueil : **Laboratoire ICube UMR 7357, équipe TRIO**
INSA Groupe PAGE
Directeur de PFE : **Georges Najjar**
Encadrants de PFE : **Tania Landes, Mathieu Koehl**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



1. Mots-clés

Zones climatiques locales, climatologie urbaine, îlot de chaleur urbain, approche SIG, classification, télédétection.

2. Contexte de l'étude

Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est l'un des mécanismes les plus connus qui sont étudiés en climatologie urbaine et qui participent à la formation du microclimat urbain. Il se manifeste dans certaines conditions météorologiques par l'apparition d'un dôme thermique. Ce dernier traduit une augmentation localisée des températures nocturnes maximales et moyennes dans les agglomérations en comparaison avec les zones moins artificialisées et péri-urbaines à proximité (figure 1). Ce phénomène est lié à différents paramètres comme la densité et la morphologie urbaine, les propriétés d'absorption et de stockage de la chaleur des matériaux, les activités anthropiques, ou encore la substitution des espaces végétalisés par des surfaces minérales. La compréhension de l'îlot de chaleur urbain permet d'affiner la connaissance du fonctionnement climatique et énergétique de la ville.

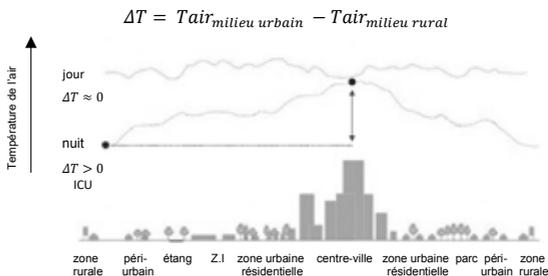


Figure 1 Illustration du dôme thermique caractéristique d'un îlot de chaleur urbain. Figure modifiée de Voogt (2000)

Ce projet de fin d'étude (PFE) fait suite à des travaux de recherche en climatologie urbaine ayant lieu à Strasbourg. Il est la suite directe de deux projets de recherche technologiques (PRT) de l'INSA menés en 2018 et 2017 et vient en complémentarité de deux thèses, celle d'Elena Bournez (2018) et d'une seconde qui est actuellement en cours. Cette dernière a pour objet l'étude du rôle de la végétation et de la géométrie urbaine dans la réduction de l'îlot de chaleur urbain strasbourgeois. Ces travaux de recherche visent à déboucher sur une série de prescriptions afin de trouver les meilleures solutions pour améliorer les conditions de vie et de confort des citadins lors des paroxysmes climatiques et atténuer de manière plus efficace les effets négatifs de l'îlot de chaleur urbain.

Stewart et Oke (2012) ont défini et proposé à la communauté des climatologues le concept nouveau de zones climatiques locales (ou LCZ pour *Local Climate Zone*) pour servir d'appui aux travaux

de recherche dans le domaine de la climatologie urbaine. Une LCZ est une unité de surface décrivant le paysage en liant le principe d'homogénéité de composition urbaine à celui d'homogénéité climatique. Ce tramage du territoire repose sur une description en 17 classes (10 classes « bâties » et 7 classes « d'occupation des sols »), permettant de qualifier les paysages urbains à travers le monde via 10 indicateurs climatiques décrivant la morphologie des rues et des bâtiments, la nature et l'occupation du sol, le niveau d'activité anthropique et les propriétés thermiques et radiatives des surfaces et des matériaux.

La cartographie des zones climatiques locales du territoire de l'Eurométropole de Strasbourg servira à l'analyse spatiale de la dynamique de l'îlot de chaleur strasbourgeois et à la définition des ambiances climatiques locales pour la recherche en climatologie urbaine.

3. Enjeux et objectifs du projet

Les travaux du PRT de Camille Gourguechon en 2017 ont permis d'aboutir à une première carte LCZ par une approche raster. Ces travaux se sont appuyés sur la méthode de cartographie LCZ définie par l'initiative WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tool*) et décrite dans Bechtel *et al.* (2015). Cette méthode, normalisée et généralisée, plébiscite une approche globale reposant sur des techniques de télédétection pour aboutir à une classification permettant d'obtenir une première approximation qualitative de la répartition spatiale des LCZ. N'importe quel territoire peut être ainsi décrit en termes de zones climatiques locales car cette approche repose sur le traitement d'images satellites à couverture mondiale et accessibles librement. En revanche, la description quantitative des zones climatiques, pour chacun des 10 paramètres climatiques, se limite avec cette approche, pour le moment, à des intervalles théoriques sans apporter de valeurs adaptées aux travaux en climatologie à Strasbourg.

À côté de cette approche raster, il existe des approches qualifiées de vectorielles permettant d'affiner la représentation spatiale des LCZ tout en calculant directement certains paramètres climatiques avec des techniques SIG. Cependant elles ne sont pas aussi directes et universelles que l'approche WUDAPT niveau 0. En effet elles nécessitent que le territoire d'étude bénéficie d'une diversité de données permettant de traduire la géométrie des bâtiments, des rues, de la végétation ou l'occupation et la couverture des sols en différents comportements climatiques locaux. Bien que les principes définissant ces méthodes puissent être généralisés, la stricte application de ces approches dépend pour beaucoup d'un contexte local, régional ou national qui doit être favorable.

L'Eurométropole est un territoire qui bénéficie d'un accès au niveau mondial, national ou local à différentes sources de données vectorielles et raster pouvant servir à la mise en place d'une carte LCZ. Il s'agit dans ce PFE de tirer profit de ce contexte afin de développer, de façon plus approfondie, une approche vectorielle adaptée à notre zone d'étude, en vue de quantifier les différents facteurs descriptifs des LCZ. Cette approche devra :

- Intégrer des caractéristiques géométriques de la végétation dérivées de données Lidar.
- Approfondir et améliorer le calcul des paramètres climatiques décrivant la morphologie urbaine par l'introduction de nouvelles sources de données.
- Aboutir par une approche SIG à une carte LCZ équivalente au niveau 1 tel qu'il est défini par l'initiative WUDAPT.

4. Stratégie de détermination des paramètres climatiques

Nous avons amélioré certains algorithmes de traitements SIG en Python mis sur pied au cours du premier PRT et nous en avons créé de nouveaux avec le logiciel ArcMap afin de calculer les paramètres climatiques.

Un des aspects importants de notre travail réside dans le choix des données employées pour établir une carte LCZ. Notre stratégie de travail a consisté à faire usage de données Open Source et/ou gratuites, prêtes à l'emploi, ou à défaut suffisamment abouties au regard de notre besoin (tableau 1). Cependant, nous avons veillé à ce que ces données soient produites soit par des institutions ou organismes publics, soit par des experts scientifiques ou bien qu'elles fassent l'objet de publications scientifiques afin que nos travaux s'appuient sur des éléments de base fiables. De plus, ces données devaient permettre d'atteindre un niveau de détails allant de plusieurs mètres à une vingtaine de mètres

de façon à obtenir une représentation des LCZ à l'échelle du quartier, la plus fine et pertinente d'un point de vue qualitative et quantitative.

Le processus de classification mis en place et basé sur une approche vectorielle se veut être un exemple de procédures faciles à mettre en place par un utilisateur afin de recouper, croiser et transformer des données rapidement accessibles. Du fait de la diversité des contextes urbains, l'inégalité des territoires dans la possession de données géographiques pour les décrire, nos travaux ne sauraient être transposables en tout point du globe. Cependant certaines stratégies ou nouvelles sources de données pourraient inspirer ou compléter d'autres travaux en particulier en France.

Organisme source	Nom du produit	Format	Accessibilité	Résolution spatiale / Echelle	Usage/ Paramètres climatiques
EMS	Raster d'élévation du sol	Raster-TIFF	Licence ouverte Etalab	0,5 m	SVF, TRC
EMS	Raster hauteur de végétation	Raster-TIFF	Licence ouverte Etalab	0,5 m	HRE, SVF, TRC
IGN	BD Topo®	Vecteur -ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 5 000 au 1 : 50 000	Unité de base, BSF, PSF, ISF, HRE, SVF, TRC
IGN	BD Parcellaire®	Vecteur -ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 250 a 1 : 10 000	Unité de base
IGN	BD Carto®	Vecteur -ESRI Shapefile	Licence gratuite pour la recherche publiable	Du 1 : 50 000 au 1 : 200 000	Unité de base
IGN	Référentiel Parcellaire Graphique	Vecteur -ESRI Shapefile	Licence ouverte Etalab	Du 1 : 2 500 au 1 : 10 000	Unité de base
CES OSO	Occupation des sols	Raster - GeoTIFF	Open Data Commons Attribution Licence (ODC-BY)	20 m	ISF, PSF
EODC, BOKU	Albedo	Raster - JPEG 2000	Aucune limite légale	10 m	Albédo de surface

Tableau 1 Inventaire des données vectorielles et raster utilisées pour le calcul des paramètres climatiques.

5. Développement d'un processus de classification

Parmi les différentes études qui ont permis de créer une carte LCZ par une approche vectorielle, trois d'entre elles ont principalement retenu notre attention. Premièrement, à l'instar des travaux de Hidalgo *et al.* (2019), nous avons retenu, pour le calcul direct des paramètres climatiques, l'idée d'un découpage de notre zone d'étude en flots de polygones issus du traitement du parcellaire cadastral et d'autres bases de données vectorielles de l'IGN. En procédant de la sorte, on est en mesure de capter la diversité d'occupation des sols et la géométrie du paysage urbain du fait des modifications anthropiques et ainsi d'avoir une représentation spatiale des LCZ et des valeurs de paramètres climatiques pertinents. Les données à notre disposition nous permettent de déduire six paramètres climatiques sur les dix pour chaque polygone de calcul.

Nous nous sommes inspirés des travaux de Unger *et al.* (2014) et de leur méthode de classification basée sur la logique floue à l'aide d'une fonction trapézoïdale comme règle de décision d'appartenance à une classe LCZ. Afin de mieux distinguer les classes bâties et non bâties entre elles, nous avons amélioré notre processus discriminatoire par l'introduction d'indicateurs supplémentaires et l'usage de certains paramètres climatiques à différents niveaux dans un arbre de décision, à l'instar des travaux de Geletic et Lehnert (2016).

6. Prise en compte des caractéristiques locales et du contexte régional

Lorsque nous comparons notre approche vectorielle de niveau 1 à l'approche raster WUDAPT de niveau 0, nous pouvons extraire des tendances climatiques communes en dépit des différences qui existent (figure 2). La représentation spatiale des classes non-bâties (LCZ A-G), entre les deux approches, est similaire contrairement à celle des classes bâties (LCZ 1-10). Il n'existe pas de cartographie de référence, cependant une approche vectorielle a l'avantage de mieux capturer les spécificités locales de la morphologie urbaine en s'affranchissant des problèmes de mélange de pixels. De plus notre approche introduit des informations à la fois sur la hauteur des édifices et sur celle de la végétation. Cela permet de mieux représenter les classes de faible ou moyenne hauteur.

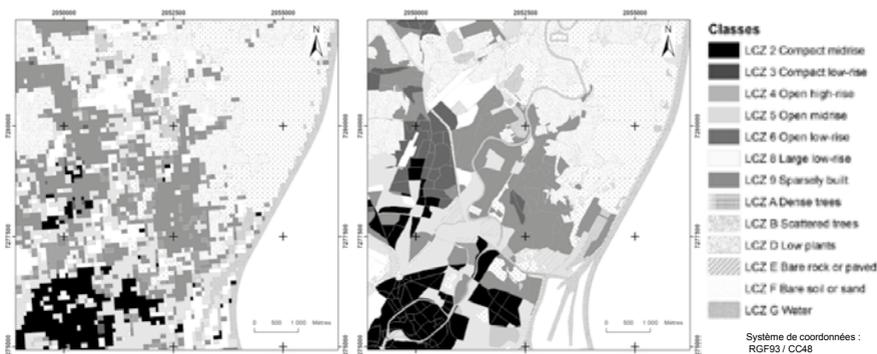


Figure 2 (Gauche) Approche raster : WUDAPT L0 résolution 200 x 200m. (Droite) Approche vecteur développée dans le cadre de ce PFE.

Stewart & Oke (2012) décrivent 17 classes LCZ aux comportements uniques avec 10 paramètres. Si l'on considère uniquement les intervalles théoriques de valeurs pour les 6 paramètres que nous avons retenus, certaines classes n'ont alors plus de comportement suffisamment unique. Ainsi il devient difficile de distinguer, sans le paramètre du flux de chaleur anthropique, les classes LCZ 8 et 10. Les premières correspondent à des zones commerciales ou d'entrepôts tandis que les secondes correspondent à des zones d'industries lourdes. Il nous faut améliorer la définition de ce qu'est une classe de faible, moyenne et grande hauteur ou une classe compacte, dense et éparse dans le contexte d'une ville type européenne de taille moyenne comme Strasbourg. En adaptant certains intervalles de paramètres, nous nous assurons que le schéma global de classification LCZ prend en compte la variabilité et les spécificités régionales de certaines classes.

7. Conclusions et perspectives

Ce projet de fin d'études a permis de mettre en œuvre une approche vectorielle en parallèle à une approche raster déjà testée permettant de décrire des zones climatiques locales. Elle permet de caractériser les zones avec un niveau de détails qui affine les paramètres à l'échelle des quartiers et des canyons urbains. Nous avons mis en place des traitements et employé des données qui améliorent la définition des paramètres climatiques en intégrant des informations sur la végétation notamment. Ainsi nos travaux, pourront servir d'appui à la thèse en cours sur l'étude de l'ICU strasbourgeois. Dans le futur, d'autres travaux pourraient être envisagés sur la description de la morphologie urbaine à partir des différentes sources de données raster et vectorielles réunies au cours de ce PFE. Il pourrait être intéressant de comparer, voire de rapprocher nos travaux de ceux du projet MAPUCE, une communauté d'experts français qui a mis au point une méthode vectorielle de cartographie LCZ valable et applicable en France. Une telle expertise extérieure pourrait être bénéfique pour améliorer nos résultats. Les résultats définitifs de notre étude seront présentés lors de la soutenance.

8. Références

- Bournez, E. (2018). *Etude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg.
- Geletic, J. et Lehnert, M. (2016). GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports*, 24(3):2–12.
- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R. et Mills, G. (2019). Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, 27:64–89.
- Stewart, I. D. et Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12):1879–1900.
- Unger, J., Lelovics, E. et Gál, T. (2014). Local climate zone mapping using GIS methods in Szeged. *Hungarian Geographical Bulletin*, 63(1):29–41.
- Voogt, J. A. (2000). Urban Heat Island. In *Encyclopedia of Global Environmental Change*, vol. 3. T. Munn (Ed), pp. 660 - 666 (Chichester: Wiley).

Optimisation et industrialisation d'un process d'acquisition dans le cadre de relevés MMS (Mobile Mapping Systems) en environnements souterrains.

PFE présenté par : **Arnaud FOUCHER**
Société d'accueil : **ATGT Géomètre-Expert**
Directeur de PFE : **M. Antoine Billault**
Correcteur : **Dr. Pierre Grussenmeyer**



1. INTRODUCTION

Contexte

Les systèmes de cartographie mobiles se sont développés depuis la fin des années 1980, jusqu'à aujourd'hui ces systèmes n'ont cessé de s'améliorer et de se perfectionner. Ce sont maintenant des outils usuels et privilégiés pour les acquisitions de données spatiales de masse. ATGT dans l'optique de développer ses activités et d'être à jour sur les dernières technologies, a investi il y a 5 ans dans un système de cartographie mobile Lynx SG-1 d'Optech Teledyne (voir figure 1). Ce système a ouvert les possibilités d'acquisitions de données sur de grands espaces de manière efficace et exhaustive. Au cours de ces 5 dernières années ATGT a su maîtriser complètement l'outil que ce soit au niveau des chaînes de traitements que de l'opérabilité de l'outil sur différents vecteurs (automobile, ferroviaire, fluvial).

Cependant l'emploi de ce système dans des environnements souterrains n'est pas totalement maîtrisé et dépasse le cadre de l'utilisation standard de ce matériel. Le système étant toujours performant 5 ans après son acquisition, ATGT a la volonté de développer son système et sa chaîne de traitement des données pour le rendre pleinement utilisable dans des environnements souterrains. C'est dans ce contexte que s'inscrit mon projet de fin d'étude. Un intérêt majeur de ce développement est de pouvoir répondre aux marchés de cartographie de réseaux d'ouvrages souterrains tels que la cartographie de réseaux ferrés, routiers et miniers.



Figure 1 : Système Lynx SG-1 sur véhicule

Objectifs

Un projet de relevé du réseau de ligne de métro Lyonnais avait été entrepris par ATGT en 2015 mais de nombreuses difficultés ont été rencontrées, les calculs des données MMS étaient très laborieux et une refonte du processus de calcul était alors nécessaire. Une phase d'analyse des soucis rencontrés lors de ces précédents essais est à entreprendre pour identifier les problèmes et cibler les points sur lesquels appuyer les recherches. Des tests sur le terrain sont également à mener pour tenter de quantifier les limites du système de cartographie suivant les différentes configurations possibles d'acquisition. Le problème principal lors d'acquisitions en milieu souterrain est l'absence de signal GNSS, le calcul de la trajectoire est alors basé uniquement sur les autres capteurs. L'information d'odométrie qui n'est en temps normal pas essentielle devient alors indispensable. Combiné au fait qu'ATGT ne dispose pas de capteur odométrique pour les acquisitions en milieu ferroviaire, l'intégration d'un nouveau capteur odométrique devient inévitable. Une étude comparative de capteurs odométriques ainsi que leur intégration sur le système MMS est à réaliser. Un travail d'optimisation de la phase de traitement de la donnée est à entreprendre. Suivant les résultats obtenus, un protocole d'acquisition et de traitement des données devra être proposé.

Calcul trajectographique

Les calculs trajectographiques s'effectuent dans le logiciel POSPac et consistent en l'import des données brutes, des stations de références et à la combinaison de l'ensemble de ces données pour aboutir au calcul de la trajectoire. Cette combinaison est effectuée via la méthode Applanix IN-Fusion qui reprend le principe du filtre de Kalman.

La donnée GNSS

Dans le cas d'un relevé en milieu souterrain, les contraintes liées à l'usage et l'exploitation du lieu en font qu'il n'est pas forcément possible de débiter et de finir le relevé MMS avec une vision sur le ciel permettant la réception GNSS. Cette absence de visibilité a de réelles conséquences sur le calcul de la trajectoire. En effet suite aux acquisitions de 2015 dans le métro, les équipes ont été dans l'impossibilité de calculer certaines trajectoires du MMS à cause de cette absence de signal GNSS. Seule la trajectoire brute a dans ce cas pu être utilisée. Or cette dernière n'est pas corrigée de ses erreurs et peut présenter des incohérences importantes comme des morcellement (*figure 2*), des changements brutaux de caps, des déformations et de grandes dérives sur la trajectoire.



Figure 2 : Présence de sauts liés à un problème de trajectoire

De cette constatation et du dialogue avec le constructeur du MMS est apparue la nécessité de devoir encadrer la mission par l'acquisition de signaux GNSS ou du moins de renseigner la position du MMS en début et fin de mission. La solution proposée est alors de déployer deux antennes GNSS en configuration GAMS (GNSS Azimuth Measurement System) à l'extérieur du métro et de les relier par câble au MMS en début et fin de mission.

Afin de vérifier le bon fonctionnement de cette technique nous avons reproduit ce scénario. Pour des raisons techniques seule une antenne a été utilisée lors du scénario et le calcul de la trajectoire a bel et bien pu être effectué. Cependant il a été constaté que la phase d'initialisation était relativement longue et que le RMS sur les valeurs de cap était assez important, de l'ordre d'un degré à son plus bas niveau. A noter que la mise en place de la configuration GAMS permettrait normalement de pallier ces soucis d'initialisation et de précision sur le cap.

Influence de la donnée odométrique

La donnée odométrique au sein d'un système MMS a une importance particulière pour contrer les effets de dérive de la centrale inertielle lors des phases d'arrêts. De plus cette donnée permet d'ajouter une contrainte sur la trajectoire. Afin d'évaluer l'influence des capteurs odométriques (DMI) lors de missions en souterrain, un scénario a été élaboré dans le tunnel de la Croix Rousse (1.8 km) à Lyon. Le trajet a été effectué à deux reprises, avec et sans odomètre et les rapports de calculs POSPac ont été analysés. Les résultats du *tableau 1* montrent des erreurs en position plus faible lors de l'usage de l'odomètre ce qui justifie son emploi sur le système Lynx. Les statistiques avant calcul exposent d'autant plus cette incertitude sur la position lors de l'absence d'odomètre.

	Performance "Temps réel"				Performance après calcul			
	Min	Max	Moyenne	RMS	Min	Max	Moyenne	RMS
Erreur en position N (m)	1.05	9.02	2.08	2.68	0.01	1.50	0.20	0.45
	0.96	106.50	18.63	31.92	0.01	1.64	0.52	0.78
Erreur en position E (m)	0.99	24.59	3.67	6.46	0.01	1.77	0.23	0.52
	1.56	38.60	8.21	12.23	0.01	1.45	0.42	0.66
Erreur en position Alt (m)	1.74	7.37	4.24	4.35	0.02	1.27	0.19	0.40
	1.87	5.74	3.33	3.49	0.02	1.30	0.43	0.64

DMI connecté DMI non connecté

Tableau 1 : Statistiques sur l'usage d'un odomètre en environnement souterrain – Erreurs en position estimées

Ajustement du nuage et étude de précision

Au jour de l'écriture de ce résumé, la campagne d'acquisition des données liée aux opérations d'ajustement du nuage et d'étude de précision a été réalisée. Les traitements sont en cours et les résultats associés seront disponibles dans le mémoire. Le but de cette phase de l'étude est de proposer une méthode d'ajustement pour gérer la dérive de la trajectoire au cours du temps et l'impact que cela produit sur la position du nuage entre un trajet aller et retour. L'absence de géométries dans un environnement de type tunnelier participe à rendre complexe les opérations d'ajustement. Les phénomènes de glissements longitudinaux étant particulièrement difficiles à corriger.

Intégration de capteur odomètre

Comme nous l'avons vu, l'odomètre tient une place importante dans l'amélioration du calcul de la trajectoire dans des environnements sans signal GNSS. L'intégration d'un capteur est alors devenue une priorité. L'odomètre dont dispose ATGT est un équipement de type codeur qui vient se fixer sur la roue d'un véhicule. Dans le cadre de relevés ferroviaires, il est impossible d'adapter cet odomètre sur un wagon de par la conception de son système d'attache et des règles de sécurité liées au milieu ferroviaire. Un odomètre mesurant à distance est donc nécessaire. Le choix s'est porté vers le capteur Kistler S-Motion et le Polytech LSV-2100 qui ont tous deux été testés et comparés. Le système MMS Lynx laisse la possibilité d'adapter des capteurs autres que ceux vendus initialement par le constructeur, cependant il est nécessaire d'effectuer une phase d'interfaçage pour que ces derniers soient bien reconnus par le MMS. Deux points ont dû être résolus : la compatibilité du signal transmis et la fixation des capteurs au véhicule.

Du point de vue signal, seul le capteur Kistler a nécessité des modifications. Pour y parvenir, une transformation du signal électrique du capteur a été réalisée via la conception en interne d'une carte électronique. Une seconde solution a été la transformation via un système Arduino, et une dernière l'a été via modification de la configuration interne du capteur. Après tests sur le terrain, seule la première solution a pu être validée, les autres étant trop contraignantes pour le déroulement de la mission ou menaient à des erreurs d'interprétation par le MMS.

La fixation du capteur est également une problématique, bien que le capteur Kistler dispose d'éléments de fixation rapide de type ventouses et aimants, le capteur Polytech n'en dispose pas. Le capteur Polytech étant initialement prévu pour une utilisation dans un milieu industriel, des supports de fixation rapide ne sont pas disponibles, nous avons donc dû concevoir et monter un support sur mesure pour adapter le capteur sur le flanc du véhicule (figure 3).

Les capteurs ont été testés sur leur capacité de mesure. La mise en évidence et quantification du bruit de mesure à l'arrêt ont été entreprises. En effet, la bonne détection de la phase d'arrêt ou « zero update » est une information très importante pour le calcul trajectographique et permet de contrer les dérives inertielles. Les deux capteurs ont été placés sur le véhicule, moteur en marche, et ont enregistré sur une même période de temps une série de mesures alors que le véhicule restait immobile. Les résultats regroupés dans le tableau 2 montrent que les deux capteurs sont tous deux exempts de systèmes et donc correctement calibrés, les moyennes arithmétiques des plages de valeurs étant toutes deux égales à la valeur vraie de 0 km/h. La dérive dans le temps est cependant différente entre les deux capteurs. Elle

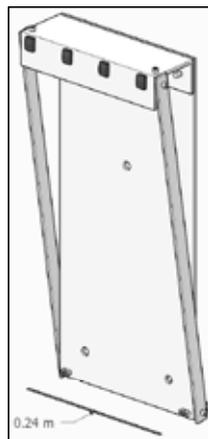


Figure 3 : Support pour capteur Polytech

	Kistler S-Motion			Polytech LSV-2100		
	Vitesse [Km/h]	Distance [mm]	Amplitude [mm]	Vitesse [Km/h]	Distance [mm]	Amplitude [mm]
Valeur minimale	-0.055	-47.0	54.0	-0.023	-0.5	1.8
Valeur maximale	0.047	12.0		0.029	1.3	
Valeur moyenne	-9.55E-05			-1.09E-04		
	Ecart type σ	mql	Nombre de valeurs	Ecart type σ	mql	Nombre de valeurs
	0.021	0.021	7881	0.014	0.014	40340

Tableau 2 : Résultats statistiques liés au test de mise en évidence du bruit de mesure

est observable sur la distance maximale cumulée enregistrée par les capteurs. Le capteur Kistler affiche une amplitude de 5.40 cm sur un durée de 1 min 20 sec contre uniquement 0.18 cm pour le Polytech. Cette amplitude atteint même 17 cm sur une période de 6 min pour le capteur Kistler. Le capteur Polytech se place bien plus favorablement sur ce test.

Nous supposons que les vibrations engendrées par le moteur du véhicule sont la cause de la forme particulière des histogrammes de fréquence d'occurrence de la *figure 4*. En effet, dans le cas où les capteurs sont parfaitement immobiles, sans vibrations, les écarts devraient être répartis sous la forme d'une courbe de Gauss centrée en 0. La plus faible précision σ du capteur Kistler est observable sur ces mêmes histogrammes par une plus grande dispersion des valeurs.

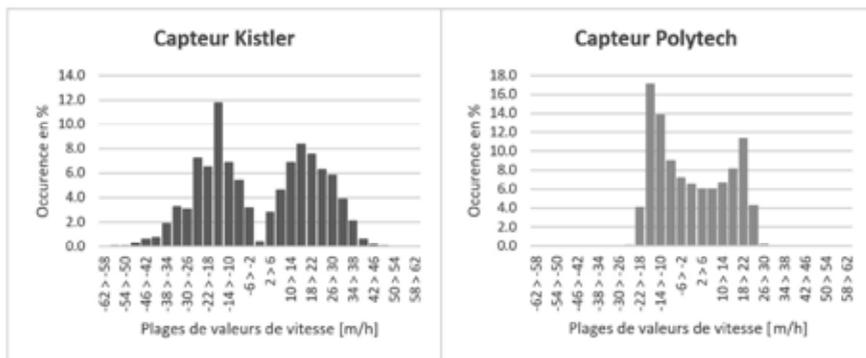


Figure 4 : Histogrammes des fréquences d'occurrence des mesures

Lors de la phase de test, il a été observé que le capteur Polytech présente une plus grande stabilité de fonctionnement tant au niveau matériel que logiciel. En effet à plusieurs reprises, des pannes du logiciel et des mises en erreur du capteur Kistler ont été observées. D'après les différentes constatations, nous pouvons dire que d'un point de vue purement fonctionnel, le capteur Polytech est à privilégier par rapport à son homologue de chez Kistler.

D'un point de vue pratique le capteur Polytech est bien moins intégrable sur un véhicule de par sa plus grande taille, poids et par l'absence de support de fixation facilement adaptable à un véhicule. Cependant dans le cadre de travaux MMS, il semble évident de privilégier la stabilité de fonctionnement du capteur à sa facilité de montage pour ne pas risquer de mettre en péril le bon déroulement de la mission. La conception d'un support universel pouvant s'adapter aux différents matériels ferroviaires sera à entreprendre si un achat de ce capteur est prévu.

Conclusion et perspectives

Les contraintes qu'imposent les projets d'acquisitions de données en milieu souterrain ont été mises en valeur au cours de ce projet. La cartographie de ces environnements reste tout de même un défi technique qui implique de nombreuses contraintes. Pour autant une méthode d'acquisition particulière a pu être détachée afin de permettre le calcul de projets lors d'une absence prolongée de signal GNSS. La donnée odométrique a pu être mise en valeur et son utilité dans les projets souterrains est jugé indispensable. Le projet a permis de réaliser un processus de recherche et développement lié à l'intégration d'un nouveau capteur sur un système existant. Ceci a abouti à la validation de l'intégration du capteur Polytech pour une utilisation ferroportée et souterraine. Les analyses en cours devraient permettre de quantifier les précisions relatives atteignables avant et après la phase de traitement de la donnée Lidar.

Auscultation automatique à l'aide de nuages de points : élaboration d'un processus de traitement automatisé.

PFE présenté par : **Etienne Broquet**
Société d'accueil : **MIRE SAS**
Directeurs de PFE : **Vincent Demeule et Pierre Gusmano**
Correcteur : **Gilbert Ferhat**



1. Introduction

La société MIRE SAS réalise de nombreuses opérations d'auscultations en temps réel grâce à des méthodes de topographie qu'elle complète avec des mesures instrumentales. L'entreprise a fait l'acquisition de plusieurs stations totales Leica Nova MS50 qui permettent de réaliser des nuages de points. La société souhaite utiliser cette fonction pour réaliser le suivi de structure pour des chantiers de génie civil

Ce projet a débuté en 2017 avec William Peny qui a travaillé sur le « Traitement d'un nuage de points scannés via GeoMos en vue d'automatiser le post traitement des données ». Il a étudié la possibilité de créer une chaîne de traitements automatisée pour permettre de comparer des nuages de points.

Son sujet était de réaliser le suivi de l'évolution d'une falaise avec des tendances aux glissements de terrains. Il a pu développer une solution semi-automatisée permettant de mettre en avant les mouvements. La société souhaite maintenant développer l'auscultation automatique à partir de nuages de points sur des ouvrages, c'est le but de ce projet.

2. Auscultations réalisées par l'entreprise

La société a développé un ensemble de méthodes qu'elle a mis en place sur le chantier pour suivre son évolution. L'utilisation des instruments classiques de topographie (niveau et tachéomètre) permet de réaliser des auscultations en mode absolu.

L'auscultation avec un tachéomètre (mesure d'angles et de distances) permet de suivre l'évolution des prismes que l'on place au préalable sur l'ouvrage. Lors de l'équipement en prismes d'une façade, certaines zones ne sont pas accessibles facilement. De plus certains bâtiments ne peuvent pas être équipés à cause de leur valeur historique.

L'utilisation d'un tachéomètre permet d'obtenir des résultats rapidement avec une précision de $\pm 2\text{mm}$ de manière locale. Le tachéomètre est relié à un caisson qui permet d'alimenter l'appareil, de recevoir les instructions et de transmettre les données.

Le suivi tachéométrique peut être complété avec des méthodes d'instrumentation de l'ouvrage. En équipant le chantier avec différents capteurs, il est possible de mesurer les rotations, les déformations, la température ou l'inclinaison.

En utilisant un scanner laser, il est possible de réaliser un suivi global de l'ouvrage. À la suite des traitements des données, une précision millimétrique peut être attendue. Cependant, il n'est pas possible de relever les mêmes points lors de chaque mesure car il n'y a pas de repère mis en place.

3. La multi-station MS50

La société a fait l'acquisition de plusieurs stations Leica Nova MS50 qui est un appareil permettant de réaliser des scans (scanner à impulsion). La précision pour la mesure de distance est de 1mm +1.5ppm sur prisme et 2mm +2ppm pour les mesures sans réflecteurs. La précision angulaire est de 0,3mgon. La portée annoncée pour la fonction scan est de 1000m et l'appareil peut mesurer jusqu'à 1000 points par seconde jusqu'à 300m.



Figure 1 : Multi-station Leica Nova MS50.

4. Chaîne de traitements de William Peny

La fonction scan que propose cette multi-station a été étudiée par William Peny en 2017 pour suivre l'évolution d'une falaise avec des tendances à l'érosion et effondrement. La station est commandée via le logiciel GeoMos depuis le bureau. La chaîne de traitements utilisait le logiciel Leica Infinity et CloudCompare ainsi que des scripts en Python. On peut suivre les traitements sur la figure 2.

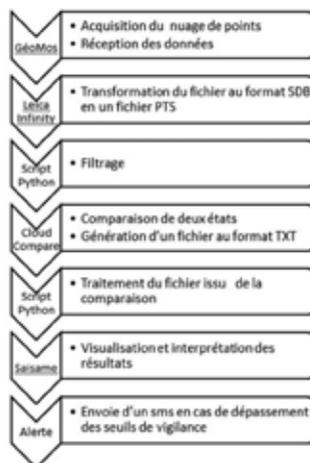


Figure 2 : Chaîne de traitements développée par William Peny.

5. Automatisation de la procédure

La chaîne de traitements avait besoin d'utiliser le logiciel Leica Infinity uniquement pour transférer les fichiers au format .SDB en fichier PTS. L'article L122-6-1 du code de la propriété intellectuelle stipule que l'on peut développer un script permettant de lire un fichier propriétaire pour permettre l'interopérabilité entre les logiciels (Voir figure 3).

Les informations ainsi obtenues ne peuvent être :

1° Ni utilisées à des fins autres que la réalisation de l'interopérabilité du logiciel créé de façon indépendante ;

Figure 3 : Partie de l'article 122-6-1 du code de la propriété intellectuelle.

Dans l'optique de développer un ensemble de traitements en interne, il a fallu choisir un langage de programmation. En découvrant la bibliothèque PCL (Point Cloud Library) qui regroupe une multitude d'algorithmes, nous avons privilégié le langage C++. Cette bibliothèque peut travailler avec des fichiers au format .PCD qui est semblable au format ASCII.

L'acquisition est faite avec le logiciel GeoMos qui génère un fichier .SDB qui est transformé en format ASCII puis en format .PCD grâce à un script Python.

Une première partie de script va permettre de filtrer les données pour retirer les points aberrants des deux nuages à comparer. Ensuite, un ensemble d'algorithmes va permettre de détecter des plans et les points qui sont sur les plans.

Une autre partie de script va mettre en relation les plans détectés sur le premier nuage avec les plans homologues dans le deuxième nuage. Lorsqu'un plan est détecté dans les deux nuages que l'on souhaite comparer, il sera possible de déterminer les angles de rotations entre les deux états.

Les angles de rotations entre les deux états vont mettre en avant les éventuelles déformations que l'ouvrage a pu subir. Il est possible également de connaître les translations que le plan subit au cours du chantier.

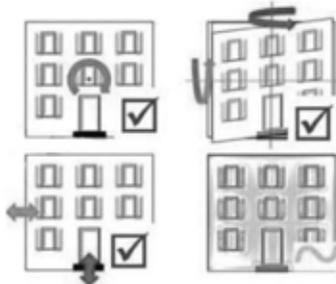


Figure 4 : Représentation des mouvements identifiables grâce à un nuage de points (Vincent Barras et al, 2017).

La société MIRE réalise le suivi d'un grand nombre de chantier, pour ce faire, elle a développé un SIG en ligne nommé Saisame. Cette plateforme permet de visualiser les déplacements, les écarts et les variations sous forme de graphiques. Il est possible ainsi de voir l'évolution des données des différents capteurs (Voir figure 5). De plus, un système d'alerte permet d'envoyer un message lorsque les écarts sur un capteur dépassent les seuils de vigilance ou d'alerte.

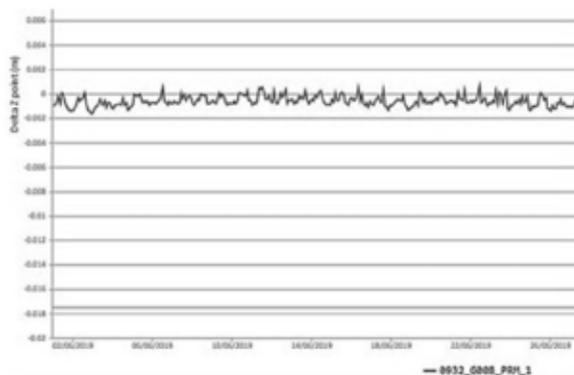


Figure 5 : Graphique sur Saisame.

Sur la figure 6, on peut voir la chaîne de traitements mise en place pour ce projet.

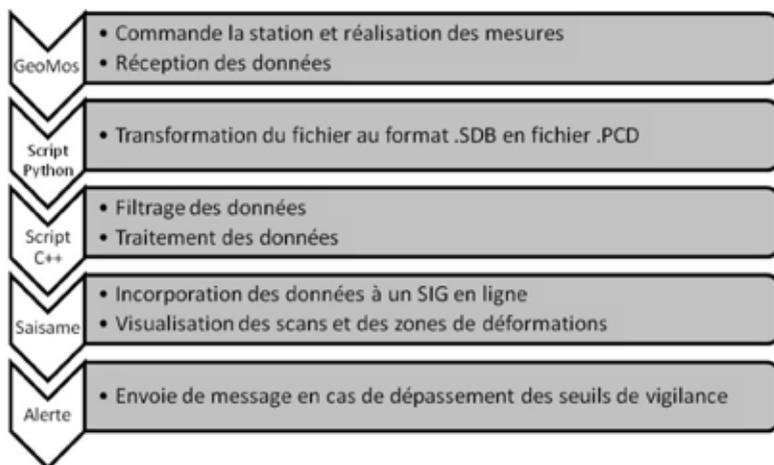


Figure 6 : Chaîne de traitements réalisée durant le projet.

6. Conclusion

Ce projet reprend une grande partie des travaux et des pistes réalisés par William Peny en 2017. La volonté d'automatiser au maximum les tâches et de créer ses propres scripts a été un défi important lors de ce projet de fin d'étude.

Il reste maintenant à réaliser différents tests pour mettre à l'épreuve ce travail. Il sera ainsi possible de déterminer son efficacité et de voir les améliorations possibles à réaliser.

L'ensemble des scripts auront besoin d'une maintenance et d'améliorations régulières pour permettre de perfectionner le système. La chaîne de traitements pourra être modifiée pour répondre au mieux aux besoins des clients. La réalisation d'une étude de marché permettra de mesurer et d'analyser les potentiels de notre système.

Étude et optimisation des mesures de convergences en tunnel au sein du chantier ligne 15 T3C du Grand Paris Express : substitution de la tachéométrie et automatisation du traitement des données.



PFE présenté par : **Alexandra Spofford**
Société d'accueil : **Dodin Campenon Bernard – Chantier
CAP L15 T3C Grand Paris Express**
Directeur de PFE : **Thomas Noirot**
Correcteur : **Jacques Ledig**



1. Contexte de l'étude

Les mesures de convergences font partie des opérations d'auscultation couramment mises en place dans le cadre de la surveillance de tunnels en construction. Celles-ci sont essentielles pour le suivi des déformations de l'ouvrage ainsi que pour garantir sa sécurité.

La convergence représente le déplacement relatif entre deux points de la paroi. Elle s'analyse à partir de la distance entre ces points à plusieurs époques. On parle de section de convergence pour définir un anneau ausculté.

Actuellement, ces mesures sont réalisées de manière conventionnelle à l'aide de tachéomètres et de prismes. Or, ces derniers sont souvent détériorés et la mise en place de nouveaux réflecteurs induit un certain coût, impacte le planning en ralentissant la production et entraîne avant tout une absence de mesures sur une certaine période.

Avec l'arrivée de nouveaux appareils de mesure ne nécessitant pas de réflecteurs et pouvant approcher la précision des tachéomètres de haute précision, le but de ce projet de fin d'études était de déterminer s'il est envisageable de substituer à la tachéométrie une nouvelle solution. Nous recherchions ainsi une méthode permettant une exactitude de ± 2 mm par rapport à la tachéométrie.

La principale technique étudiée dans le cadre du projet est la lasergrammétrie, à l'aide du scanner laser Leica RTC 360. La photogrammétrie a brièvement été exploitée, mais le capteur utilisé, de type grand public, a rapidement montré ses limites. Cette technique a été abandonnée puisqu'elle fournissait des écarts par rapport à la tachéométrie supérieurs à 5 cm.

Les principaux objectifs du projet étaient de :

- Étudier la précision théorique et effective des techniques de mesures,
- Définir un mode opératoire et un type de cibles adaptés,
- Effectuer des mesures tests pour déterminer leur exactitude et précision effectives,
- Comparer les temps d'exécution et de traitement,
- Automatiser le traitement de la solution retenue,

2. Convergence : acquisition des données lasergrammétriques

La première étape des mesures a consisté à définir le type de cibles à utiliser, un des objectifs du projet étant de remplacer les prismes par des éléments moins contraignants à installer et moins soumis à incidents (prismes arrachés, détériorés ou salis).

Des cibles à damiers imprimées sur papier A4 plastifié et autocollant ont dans un premier temps été retenues. Ce choix permettait d'assurer une détection des cibles dans la plupart des logiciels de lasergrammétrie et de photogrammétrie tout en ayant l'avantage de ne pas être encombrant et de se confondre à la paroi du tunnel.

Un anneau pour effectuer les tests a ensuite été choisi sur un des tunnels du chantier et a été équipé de six mini-prismes, de sept cibles RSAK130 (deux faces avec cibles réfléchissantes) et de sept cibles à damiers, répartis sur la paroi (cf figure 1 et figure 2). Les prismes et plaquettes ont permis de suivre la convergence de l'anneau de manière classique.

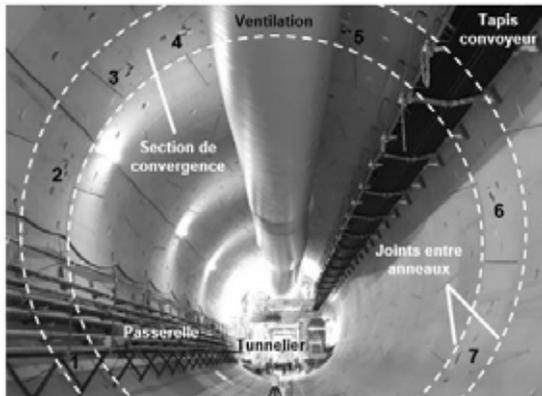


Figure 1: Tunnel et position numérotée des différentes cibles sur l'anneau



Figure 2 : Les différentes cibles utilisées. De gauche à droite : plaquette de surveillance, mini-prisme et cible à damiers

Trois séries de mesures ont été réalisées par lasergrammétrie et tachéométrie.

Le scanner RTC 360 propose trois types de résolution spatiale : haute, moyenne ou basse, qui correspondent respectivement à des mesures d'un point tous les 3 mm, 6 mm ou 12 mm à 10 m.

Toutes les séries de mesures ont été réalisées dans ces trois types de résolution afin de déterminer la résolution minimale à choisir pour atteindre l'exactitude souhaitée.

Suite au décollement de certaines cibles damiers, un nouveau type de cibles a été choisi : des cibles à damiers peintes en noires sur la paroi à l'aide d'un pochoir. Plusieurs tests au scanner ont été effectués afin de vérifier la bonne détection des cibles par les logiciels d'assemblage de scan et de traitement de nuage de points.



Figure 3 : Cible à damiers peinte sur la paroi du tunnel

3. Analyse de l'exactitude des mesures de convergences lasergrammétriques : comparaison à la tachéométrie

A partir des données de chaque série de mesures, un échantillon de 45 distances a été obtenu. Les écarts vrais, par rapport aux distances tachéométriques, et les écarts apparents, obtenus à partir des valeurs les plus probables de chaque distance, ont permis de déterminer l'erreur moyenne quadratique et l'écart-type pour chaque type de données (cf tableau 1).

Exactitude et précision effectives des mesures				
Mesures lasergrammétriques	Type de résolution	Résolution Spatiale Haute	Résolution Spatiale Moyenne	Résolution Spatiale Basse
	Emq (mm)	1,7	1,9	2,1
	Écart-type (mm)	0,4	0,4	0,9
Mesures tachéométriques	Type de mesure	Mesure sur prisme		Mesure au laser (damiers)
	Écart-type (mm)	0,5		1,5

Tableau 1 : Emq et Écart-type effectifs sur les convergences

Ces résultats nous ont permis de conclure que l'utilisation du scanner laser en remplacement de la tachéométrie était possible en résolution spatiale moyenne ou haute (emq inférieure à 2 mm).

De plus, dans ces mêmes conditions, la dispersion des mesures lasergrammétriques est très faible et permet d'assurer un écart-type équivalent à celui observé sur les mesures tachéométriques sur prismes.

4. Simulation de déformations sur l'anneau

Afin de déterminer quels écarts en termes de millimètres les mesures au scanner laser étaient capables de détecter, une déformation de l'anneau a été simulée en fixant sur la paroi trois plaques d'acier de 10 cm² et d'épaisseur 1 mm, 2 mm et 5 mm (cf figure 4).

Les résultats ont été analysés à partir des comparaisons des différents maillages entre eux ; une partie des analyses est visible dans les tableaux 2 et 3 ci-dessous.

Détection des plaques – Comparaison avant/après				
Résolution spatiale		Haute	Moyenne	Basse
Densité du maillage		3 mm	6 mm	12 mm
Niveau de détection	Plaque 1 mm	Détectée à 85%	Non détectée	Non détectée
	Plaque 2 mm	Détectée à 100%	Détectée à 55%	Détectée à 45%
	Plaque 5 mm	Détectée à 100%	Détectée à 90%	Détectée à 85%

Tableau 2 : Résultats de la détection par lasergrammétrie de déformations sur l'anneau

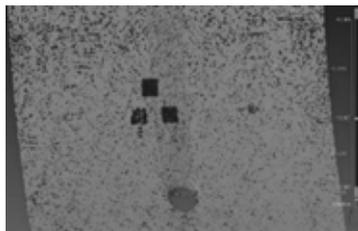


Figure 4 : Détection des plaques, résolution spatiale haute, avant/après. En noir les écarts supérieurs à ± 1 mm.

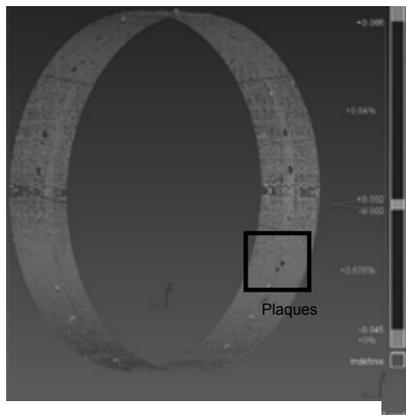


Figure 5 : Écarts globaux sur l'anneau. Résolution spatiale haute, comparaison avec la mesure 0. En noir les écarts supérieurs à ± 2 mm.

Écarts sur l'anneau entier – Comparaison avant/après			
Résolution spatiale	Haute	Moyenne	Basse
% Écarts entre [-1mm ; 1mm]	90%	90%	88%
% Écarts entre [-2mm ; 2mm]	99%	98%	97%

Tableau 3 : Écarts entre deux mesures lasergrammétriques d'un même anneau

Ce même type d'inspection a été réalisé avec un maillage issu de la série de relevé 0, après recalage des nuages entre eux à l'aide des cibles.

Les écarts sont alors globalement plus élevés en raison de l'erreur de recalage résiduelle, qui est de l'ordre de 1 ou 2 mm.

Cependant les écarts sont dans le cas le plus défavorable compris à plus de 94% entre ± 2 mm, le reliquat correspondant à la plaque 5 mm ou à des objets absents dans un des deux maillages.

Ces constatations permettent de conclure que nous pouvons détecter des déformations de l'ordre du millimètre en résolution spatiale haute (3 mm à 10 m) et de l'ordre de 2 mm en résolution spatiale moyenne ou basse (respectivement 6 mm à 10 m et 12 mm à 10 m).

5. Analyse des temps d'exécution et des temps de traitement

Après avoir validé l'exactitude des mesures lasergrammétriques il était nécessaire de prendre en compte les temps d'exécution et de traitement.

En effet, bien que les mesures au scanner laser soient très rapides (une mesure pure en 1min42s maximum en résolution spatiale haute), elles peuvent rapidement entraîner des temps de traitement très chronophages.

La différence entre les temps de traitement selon la résolution spatiale d'acquisition montre que ceux-ci sont divisés par trois lorsque nous passons d'une résolution spatiale haute à moyenne. De même en termes de stockage, la quantité de données est quasiment divisée par deux puisque pour la mesure d'un anneau, nous passons de 4,75 Go à 2,45 Go.

C'est pourquoi il est intéressant d'opter pour la résolution moyenne plutôt que haute, sachant que l'emq et l'écart-type restaient acceptables selon nos critères.

En résolution basse, les temps de traitement et la quantité de données sont respectivement divisés par six et sept, mais l'exactitude et la précision des mesures ne sont pas assez satisfaisantes pour conserver ce type de mesures.

Pour déterminer l'intérêt à utiliser la lasergrammétrie plutôt que la tachéométrie, les temps d'acquisition et de traitement de chaque procédure ont été mesurés de manière détaillée.

Les résultats donnent alors une durée de 44 min au tachéomètre, pour une mesure terrain et un traitement bureau, contre approximativement 32 min au scanner laser ; soit un gain d'environ 12 min.

Celui-ci est possible grâce à plusieurs facteurs :

- Un matériel plus léger (6 kg pour le scanner contre 15 kg pour la station totale), qui atténue la pénibilité et peut permettre de raccourcir le temps de trajet,
 - Une mise en station du scanner très rapide (2min45s contre 7 min au tachéomètre),
 - Une mesure scan également très rapide, qui ne nécessite pas de conditions particulières contrairement aux mesures des cibles RSAK130 qui doivent être éclairées une à une (2 min contre 13 min au tachéomètre),
 - Un temps de traitement réduit ; un seul scan étant réalisé, aucun assemblage n'est requis.
- De plus seul un nettoyage grossier est nécessaire pour conserver la section de convergence et celui-ci est facilité grâce au repérage des joints entre anneaux.

Ce gain de temps est particulièrement intéressant dès que nous considérons une intervention avec plusieurs anneaux à mesurer. Pour quatre anneaux, la durée totale passe de 1h52min au tachéomètre à 1h17min au scanner laser.

Le seul inconvénient réside dans le stockage des données.

Pour le chantier L15 T3C, 33 anneaux au total sont concernés par les mesures de convergences, qui sont réalisées quotidiennement pendant sept jours, hebdomadairement pendant un mois puis une fois tous les trois mois jusqu'à la réception de l'ouvrage. Cela représenterait alors près de 500 Go de données, ce qui n'est pas compatible avec l'utilisation actuelle d'un serveur commun à tout le chantier. Il faudra ainsi envisager une solution de stockage sur disques durs séparés.

6. Conclusion

Ce projet a permis de mettre en place une nouvelle procédure de mesure des convergences.

La lasergrammétrie apporte un gain de temps sur le terrain, avec un temps d'exécution diminué de près d'1/4 sur une mesure simple et d'1/3 sur quatre mesures.

Grâce à cette méthode, l'opérateur bénéficie aussi d'un équipement plus léger et compact à transporter.

De plus, cette technique permet de disposer d'un modèle 3D de l'anneau entier, ce qui peut s'avérer utile pour étudier de manière plus approfondie d'éventuelles déformations.

Malgré des temps de traitement réduits, un des derniers objectifs du PFE est d'améliorer les traitements sous 3DReshaper. Une automatisation du nettoyage du bruit et de la détection des cibles est à envisager.

Suivi du bilan hydro-sédimentaire du bassin du lac Tonle Sap par télédétection satellitaire multi-capteur

PFE présenté par : Jules GREUSARD

Société d'accueil : Institut National de Recherche Agronomique (INRA)

Directeur(trice) de PFE : Frédéric FRAPPART

Correcteurs(trices) : Tania LANDES



1. Contexte et objectifs

Les lacs et réservoirs sont souvent considérés comme des sentinelles du climat. Les évènements météorologiques se répercutent sur ces milieux aux écosystèmes souvent fragiles. L'étude des variations temporelles des paramètres physiques et hydrologiques de ces zones participe à leur compréhension globale. En comprenant les phénomènes qui régissent cet environnement, il devient plus aisé de le protéger et d'anticiper ses modifications éventuelles.

Le lac Tonle Sap et les plaines d'inondations qui l'entourent se situe au Cambodge. Ce secteur représente la plus grande zone d'habitat naturel en zone humide du bassin du Mékong tandis que le Tonle Sap est l'étendue d'eau douce permanente la plus importante d'Asie du Sud-Est. Le Cambodge est lié au lac tant d'un point de vue économique que culturel. Le lac est relié au Mékong par la rivière homonyme. Le Tonle Sap jouit d'un système hydraulique extraordinaire, sensible aux modifications physiques et climatiques dans le bassin du Mékong, la météorologie de ce dernier étant fortement influencée par un régime de mousson. Durant la saison des pluies, la rivière Tonle Sap change de direction et s'écoule vers le lac Tonle Sap à cause de la crue du Mékong. Le Tonle Sap agit donc comme un réservoir naturel pour le Mékong. En conséquence sa superficie varie fortement au cours d'une année, pouvant fluctuer entre 2500 km² et 15000 km². Des études, dont celle de (Kummu et al., 2014) dresse la répartition des sources de l'eau du Tonle Sap avec 60 % provenant du Mékong, tandis que 30 % provient des affluents directs du lac, le reste provenant des précipitations. En outre, la décharge du Tonle Sap vers le Mékong représente presque 90 % des flux sortants.

Du fait du développement du Mékong en amont, avec l'urbanisation, la construction de réservoirs, de barrages, ... l'équilibre de l'écosystème très productif de la zone peut être menacé. D'après (MEA, 2005) les barrages modifient l'habitat aquatique en altérant le flux de matière et d'énergie. La rétention des sédiments et des nutriments pourrait réduire la productivité et la fertilité du système du Tonle Sap. La pêche et l'agriculture étant les activités économiques prédominantes de la région, ces enjeux sont fondamentaux pour la population. Au-delà des modifications sédimentaires, la modification du flux du Mékong pourrait avoir des conséquences sur le niveau de l'eau du lac. L'altération du flux du Mékong entraînerait une augmentation du niveau de l'eau en saison sèche et une diminution du niveau d'eau maximal pouvant atteindre 60cm. De même la surface du lac permanent pourrait croître de 15 à 40 % tandis que la superficie de la plaine d'inondations diminuerait de 7 à 16 % en fonction des scénarios. Plus la surface inondée est faible plus la zone d'échange entre milieu aquatique et terrestre diminue mettant en péril cet écosystème varié reconnu par plusieurs zones protégées.

La télédétection spatiale permet l'observation du globe et la détermination de caractéristiques de la surface et de l'atmosphère terrestre. Ainsi elle est un outil de choix pour l'étude d'une zone telle que le bassin du Tonle Sap. Le couplage des techniques de télédétection passives et actives offre un panel d'outils permettant d'étudier des zones étendues et pas nécessairement accessibles. Au fur et à mesure du lancement des missions satellitaires, des méthodes ont été développées afin d'utiliser toutes les données produites et les convertir en résultat probant.

Dans la continuité des travaux précédemment menés, ce projet de fin d'études (PFE) s'articule autour de deux aspects. Le premier vise à l'étude des variations spatio-temporelles entre les inondations, les matières en suspension (MES) et la chlorophylle dans l'eau du bassin du Tonle Sap, avec comme objectifs la collecte et l'exploitation de données satellitaires issues de plusieurs sources. La manipulation des données reprendra certaines méthodes et outils existant en les adaptant à notre zone d'étude. Le second aspect du stage va être l'identification de l'apport de nouvelles observations satellitaires et modèles numériques de terrain (MNT) pour un calcul plus précis du volume des inondations du Tonle Sap.

Au sein de l'INRA, l'unité ISPA (Interaction Sol Plantes Atmosphère) et plus précisément son équipe MOST (Modélisation et Observations Spatio-Temporelles) relie la télédétection à différents modèles de fonctionnement à long terme. C'est donc au cœur de cette équipe que notre projet a été mené. Cette étude est soutenue par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) par le biais du programme TOSCA (Terre solide, Océan, Surfaces Océaniques, Atmosphère).

2. État de l'art

2.1. L'altimétrie satellitaire

L'altimétrie issue des satellites radar a initialement été développée pour mesurer la topographie des surfaces océaniques. Par la suite elle a permis la détection de surfaces en eau sur des zones terrestres. Le radar présent dans le satellite va émettre des ondes électromagnétiques dans la direction nadirale et mesurer le temps de retour des ondes réfléchies par la surface terrestre. L'étude de la forme d'onde reçue permet l'accès à différentes informations, par exemple la distance satellite / surface, la hauteur significative des vagues, ... L'altitude du satellite (par rapport à l'ellipsoïde de référence) est déterminée à partir des techniques orbitographiques. Des corrections géophysiques et des corrections de propagation dues aux interactions entre les ondes électromagnétiques et l'atmosphère doivent être appliquées. L'association de plusieurs satellites permet d'accroître l'échantillonnage temporel de l'objet d'étude.

L'altimétrie radar à synthèse d'ouverture (Synthetic Aperture Radar : SAR) est une technique récente, utilisée pour la première fois en 2010 pour la mission CryoSat-2. Cette méthode exploite l'effet Doppler causé par le mouvement du satellite le long de sa trajectoire. L'obliquité de l'extrémité d'une impulsion permet de séparer les échos d'une empreinte au sol. Le traitement à partir d'une transformée de Fourier est appliqué à une salve d'impulsions réfléchies et détermine les bandes Doppler (ou cellules), sous-parties de l'empreinte au sol de l'onde radar.

2.2. L'imagerie satellitaire et ses applications

Les capteurs de télédétection passifs sont composés de radiomètres. Ces cellules photoélectriques captent la lumière réfléchie ou émise par les objets dans certaines longueurs d'onde spécifiques. De nombreux satellites qui embarquent ces capteurs sont en orbite autour du globe. Ils possèdent des résolutions radiométriques, spatiales et temporelles variées. De nombreuses chaînes de traitement découlent de ces données et fournissent des informations sur la surface terrestre.

Une méthodologie a été développée par (Sakamoto et al., 2007) pour détecter les évolutions temporelles de la végétation et des étendues d'inondation au niveau du delta du Mékong. Elle repose sur le traitement de séries temporelles d'images multi-spectrales acquises par les capteurs MODIS à bord des satellites Terra et Aqua. Les présences de végétation et d'eau sont obtenues par seuillage sur l'indice de végétation EVI (Enhanced Vegetation Index), l'indice de surface en eau LSWI (Land Surface Water Index) et la différence entre ces deux indices. Ces indices sont calculés à partir des réflectances au sol pour chaque pixel de l'image acquise.

La « couleur » de l'eau permet d'estimer les propriétés de la couche superficielle de l'océan (ou de grandes étendues d'eau continentales), comme les paramètres biogéochimiques (chlorophylle, MES,...), des paramètres physiques (par exemple la salinité), la bathymétrie... Ces différentes propriétés sont déterminées à partir du signal radiométrique émis par l'océan et capté à bord des satellites. Le rayonnement de lumière blanche, composé d'un spectre de couleurs, émis par le soleil va être affecté par les différentes substances présentes dans l'eau. Les couleurs du spectre vont alors être absorbées, transmises ou réfléchies, caractérisant l'apparence de l'eau.

Les travaux de (Han et al., 2016) ont retenus notre attention car ils proposent une méthode de détermination des concentrations de matières en suspension dans les milieux aquatiques par télédétection. L'algorithme proposé s'applique à la réflectance sur l'eau. Cette méthode a été développée en s'appuyant sur les données in-situ de plus de 500 sites de mesures répartis tout autour du globe dans des zones aux concentrations variées. De plus, plusieurs de ces sites se situent au VietNam. La fiabilité est donc assurée dans des conditions similaires à celles rencontrées sur le Tonle Sap.

2.3. Volume d'inondation

Le suivi du réservoir d'eau de surface dans son intégralité nécessite de connaître à la fois les niveaux d'eau, l'extension et le volume de l'ensemble des plans d'eau à la surface de la Terre. En fournissant des informations à différentes résolutions spatiales, temporelles et spectrales, les missions satellitaires d'observation de la Terre donnent à la fois accès à l'extension spatiale des zones en eau et au niveau d'eau. Des études récentes ont montré qu'il est possible d'estimer les variations de volume d'eau de surface par combinaison d'images satellitaires et de mesures d'altimétrie radar

(Créaux et al., 2016) et (Duan and Bastiaanssen, 2013). (Frappart et al., 2018) élabore un calcul du volume d'inondation du Tonle Sap. La combinaison entre les niveaux d'eau issus de l'altimétrie satellitaire, les surfaces d'inondation (suivant l'approche de (Sakamoto et al., 2007) simplifiée par (Normandin et al., 2018)) et un MNT permet d'estimer les variations de volume du lac.

3. Acquisition des données et traitements

3.1. Données

Notre projet s'inscrit dans la continuité des travaux menés par (Frappart et al., 2018) traitant du volume des inondations du Tonle Sap et mettant en évidence un lien avec les anomalies de températures à la surface de l'océan pacifique (phénomènes appelés El Niño / La Niña). Les données de volumétrie utilisées dans nos traitements correspondent à la série temporelle issue de cette étude et couvrent la période de 1993 à 2017. Dans cette étude, le niveau d'eau est calculé grâce au logiciel MAPS. Les indices d'inondation sont fournis par Cassandra NORMANDIN pour la période de 2000 à 2017 selon la méthode exposé dans (Normandin et al., 2018). L'acquisition de données issues des satellites imageurs est un point crucial du projet. Peu d'observations sont libres d'accès. Cependant, le projet *CCI ocean colors* mené par l'ESA, fournit des données sur les couleurs d'eau à l'échelle planétaire. Les données sont issues directement d'observations satellitaires corrigées ou issues d'algorithmes appliqués aux mesures de télédétection. Afin de limiter les trous dans les séries temporelles nous avons choisi d'utiliser des jeux de données mensuelles. Pour un indice étudié, les données pour un pixel sont calculées par moyenne arithmétique des valeurs du pixel (couvrant 16km²) au cours du mois. Les valeurs de chlorophylle fournies correspondent à la concentration estimée à partir de l'algorithme *chl_a* développé par la NASA.

3.2. Traitements et résultats

Nous avons dans un premier temps recalculé les niveaux d'eau du lac à l'aide de l'application MAPS et ainsi complété la série temporelle avec l'année 2018. Les indices d'inondations fournis par Cassandra NORMANDIN ont été utilisés pour calculer les étendues d'inondations de 2000 à 2017 avec une résolution spatiale de 500 m. Les cartes d'inondations associées ont été produites.

Nous avons élaboré un algorithme permettant la lecture et l'utilisation des données CCI obtenues au format *NetCDF*. Il effectue des traitements spécifiques à chaque propriété de l'eau que nous analysons. Les trois paramètres étudiés sont la concentration en chlorophylle, la concentration en matières en suspension ainsi que le rapport entre ces deux dernières. Outre les séries temporelles de chacun des paramètres au cours de la période 2002-2012, nous avons calculé les variations annuelles (moyennes des valeurs de chaque mois au cours de la période d'étude) et les variations interannuelles. La *Figure 1* présente la série temporelle obtenue pour la concentration en MES et la *Figure 2* présente les variations annuelles du même indicateur. On remarque une quantité de données plus faible pour les mois d'avril, mai et juin malgré la réduction de la période d'étude aux années pour lesquels le nombre de capteurs utilisés dans le programme CCI était maximal. En dehors de ces dates, la couverture de la zone est plus faible donc davantage dépendante d'éléments extérieurs comme par exemple des nuages obstruant la capture d'informations radiométriques issues du sol.

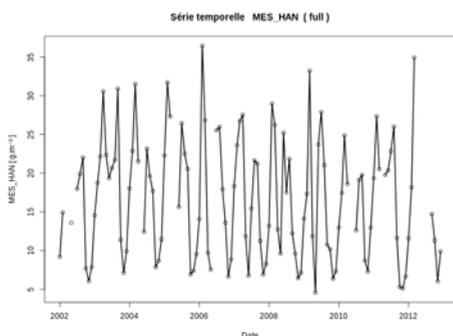


Figure 1 : Série temporelle de la concentration en MES

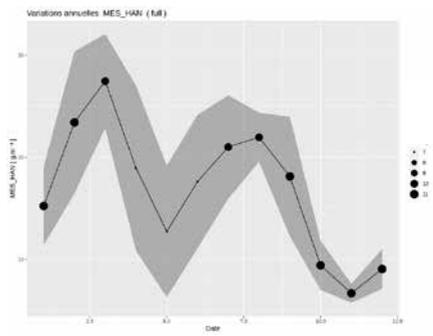


Figure 2 : Variations annuelles de la concentration en MES

Des cartes de paramètres ont aussi été éditées, laissant apparaître des différences parfois significatives entre les parties amont et aval du lac. Nous avons donc ajouté un masque à notre algorithme, isolant l'une ou l'autre de ces zones afin de comparer les variations spatiales au sein du Tonle Sap. Il en ressort notamment un pic de la concentration en chlorophylle plus important d'environ 50 % et atteint un mois plus tard (en avril) pour la partie amont par rapport à la partie aval du lac.

Les volumes ont été traités de manière à être utilisable sous le langage de programmation R, pour le calcul d'une série temporelle, et pour l'obtention des variations annuelles et interannuelles. Une comparaison est ensuite effectuée pour mettre en évidence une éventuelle inter-corrélation avec la couleur de l'eau. Les résultats obtenus semblent montrer une anti-corrélation entre le volume et la concentration en chlorophylle comme le montre les *Figures 3 et 4*. Le même constat est fait pour le volume et les MES bien qu'une diminution de la concentration en MES intervienne aux mois d'avril, mai et juin comme le montre la *Figure 2*. Ce phénomène peut être lié à la stabilité du volume du lac à cette période, les flux sont réduits donc provoqueraient moins de déplacement de matière.

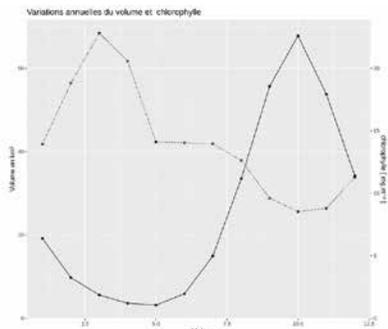


Figure 3 : Variations annuelles du volume et de la concentration en chlorophylle

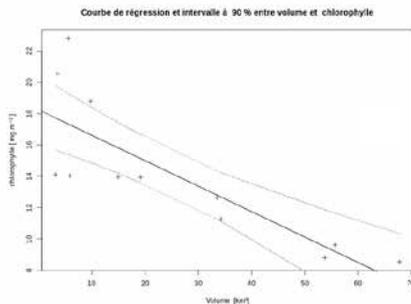


Figure 4 : Courbe de régression et intervalle à 90 % entre concentration en chlorophylle et volume

Dans un second aspect du stage nous avons étudié l'influence de l'utilisation d'observations satellitaires à différentes résolutions sur le calcul des surfaces d'inondation ainsi que la répercussion du choix du modèle numérique de terrain sur le calcul du volume d'inondation.

4. Conclusion et perspectives

À travers ce projet, nous avons pu constater le potentiel de la télédétection pour la détermination de paramètres et de l'étendue des milieux aquatiques. Bien que la combinaison avec des données acquises in situ permettrait d'accroître la fiabilité des modèles, la télédétection offre des couvertures spatiales et temporelles avantageuses. L'apport des nouvelles missions satellitaires devrait affiner les résultats obtenus et ainsi améliorer le suivi et la compréhension des zones étudiées.

Bibliographie

- Crétaux, J.F., Abarca-del-Río, R., Bergé-Nguyen, M., Arsen, A., Drolon, V., Clos, G., Maisongrande, P., 2016. Lake Volume Monitoring from Space. *Surveys in Geophysics*.
- Duan, Z., Bastiaanssen, W.G.M., 2013. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment* 134, 403–416.
- Frappart, F., Biancamaria, S., Normandin, C., Blarel, F., Bourrel, L., Aumont, M., Azemar, P., Vu, P.L., Le Toan, T., Lubac, B., Darrozes, J., 2018. Influence of recent climatic events on the surface water storage of the Tonle Sap Lake. *Science of the Total Environment* 636, 1520–1533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.326>
- Han, B., Loisel, H., Vantrepotte, V., Mériaux, X., Bryère, P., Ouilion, S., Dessailly, D., Xing, Q., Zhu, J., 2016. Development of a semi-analytical algorithm for the retrieval of suspended particulate matter from remote sensing over clear to very turbid waters. *Remote Sensing* 8.
- Kummu, M., Tes, S., Yin, S., Adamson, P., Józsa, J., Koponen, J., Richey, J., Sarkkula, J., 2014. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake-floodplain system. *Hydrological Processes* 28, 1722–1733.
- MEA, 2005. Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2013-The Physical Science Basis*. World Resources Institute, p. 74.
- Normandin, C., Frappart, F., Lubac, B., Bélanger, S., Marieu, V., Blarel, F., Robinet, A., Guiastrénnec-Faugas, L., 2018. Quantification of surface water volume changes in the Mackenzie Delta using satellite multi-mission data. *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 1543–1561.
- Sakamoto, T., Van Nguyen, N., Kötter, A., Ohno, H., Ishitsuka, N., Yokozawa, M., 2007. Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. *Remote Sensing of Environment* 109, 295–313.

Création d'un moteur de détection automatique d'éléments ponctuels dans une base de données de scanner dynamique

PFE présenté par : **Arthur PICARD**
Société d'accueil : **TT Géomètres-Experts**
Directeur de PFE : **Guillaume BERSON**
Correctrice : **Tania LANDES**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Avec la démocratisation des systèmes de cartographie mobile, l'acquisition de nuages de points à la volée s'est répandue. Ces systèmes, généralement constitués d'un ou plusieurs capteurs *LIDAR*, d'une antenne GNSS, d'une centrale inertielle et éventuellement de caméras permettent de calculer des nuages de points denses texturés et géoréférencés avec une précision de l'ordre de quelques centimètres.

Cette qualité et richesse de données s'accompagnent cependant d'un temps de traitement accru par rapport à des levés plus classiques. Au-delà des étapes de recalage et géoréférencement de l'acquisition, il est notamment question d'isoler les informations pertinentes du reste du nuage.

Dans le cadre de la réalisation d'inventaires d'objets particuliers (candélabres, bouches d'incendie, panneaux de signalisation, ...), ce temps peut rapidement s'échelonner à plusieurs heures de travail. Ces tâches étant longues, répétitives, et ne nécessitant pas de compétences expertes, il est naturel de chercher à les automatiser. De cette manière, il serait possible de transformer ce temps humain en temps machine.

Suivant ces considérations, *TT Géomètres-Experts* souhaite développer au sein de son Pôle Innovation des processus de traitements automatisés capables d'extraire la position d'objets divers à partir de nuages de points associés à une prise de vue à 360°, et ce avec la meilleure précision possible.

Jusque récemment, l'automatisation de tels traitements était complexe, et nécessitait une réelle expertise pour inclure dans un algorithme la connaissance permettant de distinguer les objets d'intérêt.

La réapparition des réseaux de neurones profonds au sein de la communauté de l'apprentissage automatique a permis de renverser la donne. Il est notamment devenu possible d'inclure un niveau d'information sémantique aux données acquises, et ce sans nécessiter de connaissances expertes en termes de géométrie, colorimétrie ou autres caractéristiques prépondérantes des objets d'intérêt. En ce sens, il n'est plus question pour l'Homme d'indiquer à la machine ce qui selon lui permet de reconnaître les objets pertinents, mais de lui apprendre à les reconnaître de manière autonome par le biais d'un apprentissage supervisé.

Ce projet s'inscrit dans la volonté de *TT Géomètres-Experts* de faire fructifier l'ensemble des données acquises et d'être capable d'en extraire automatiquement un maximum d'information.

L'ensemble des développements réalisés se décomposent en plusieurs « briques », chacune d'entre elles se voulant comme une extension de la précédente. Celles-ci permettent d'extraire dans un premier temps les objets d'intérêt de l'imagerie panoramique, pour en déterminer les points correspondants dans le nuage dans un second temps. Enfin, les objets ayant été extraits du nuage, il s'agit de déterminer la position de leur centre suivant les 3 composantes (X,Y,Z) .

2. Détection automatique d'objets ponctuels dans les photographies 360°

La méthode élaborée repose sur l'exploitation sémantique des prises de vues panoramiques. Les algorithmes de reconnaissance et détection d'objets dans des données image s'étant montrés suffisamment robustes et matures en la matière, nous choisissons d'évaluer leur potentiel pour la détection fine d'objets.

Ces algorithmes, couramment désignés par le terme « réseaux de neurones convolutifs » sont particulièrement adaptés au traitement de données image, car essentiellement basés sur des produits de convolution. Ils constituent à ce jour la meilleure solution pour la reconnaissance d'objets.

Cette première brique consistant à détecter de manière fine les objets d'intérêt dans les photographies panoramiques, il s'agit typiquement de segmenter chaque pixel appartenant aux objets d'intérêt du reste de l'image par le biais d'un masque de segmentation sémantique. Pour y parvenir, nous utilisons une implémentation de l'algorithme *Mask R-CNN* [1] légèrement modifiée par nos soins.

La détection dans l'image présuppose de disposer d'un modèle de détection entraîné à repérer les éléments voulus. Par conséquent, il convient avant tout de constituer un jeu de données d'entraînement. Celui-ci permet à l'algorithme d'apprendre par lui-même à reconnaître les objets en présence au cours d'un apprentissage supervisé.

Bien que ce type de méthode soit capable de détecter un très grand nombre d'objets de manière autonome (certains modèles de détection en distinguent plusieurs centaines), de telles performances ne sont atteintes qu'à l'aide d'un jeu de données varié et soigneusement annoté. On considère ainsi de manière générale qu'il est nécessaire, dans le cadre d'une mise en production, de disposer de plusieurs milliers d'images de chaque type d'objet, présentant des conditions d'acquisitions, des géométries, mais aussi des contextes différents.

Détecter des objets dans des images panoramiques soulève toutefois un problème, puisque ce type de projection induit la présence de distorsions. Celles-ci sont variables suivant la position de l'objet dans l'image, ce qui complique la constitution d'un jeu d'entraînement adapté.

Pour surmonter ces difficultés, la méthode proposée implémente le processus illustré en Figure 1 et Figure 2. Celle-ci permet ainsi d'éliminer les distorsions inhérentes à la projection de l'image, et d'ainsi se dispenser de constituer un jeu d'entraînement constitué à partir d'images panoramiques. Chaque image panoramique étant décomposée en 6 images rectifiées, il est nécessaire de reprojeter les résultats dans le système de projection panoramique afin de faciliter l'étape décrite au paragraphe suivant.

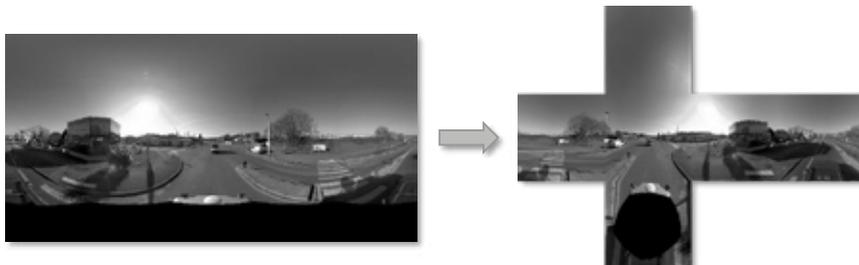


Figure 1 : Décomposition des photographies panoramiques en facettes de cube

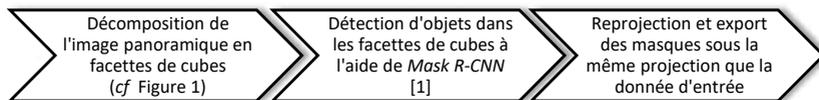


Figure 2 : Processus de détection d'objets dans les photographies panoramiques

3. Mise en correspondance photographies/nuage de points et extraction des objets dans le nuage

Connaissant les coordonnées et les angles de rotation de chaque prise de vues, il est possible de calculer la transformation entre nuage de points et photographies panoramiques et par là même associer la sémantique des pixels des masques de segmentation aux points du nuage.

Pour y parvenir, l'environnement local de chaque prise de vues est extrait du nuage, avant d'être translaté de la position de la caméra dans les 3 dimensions. Les coordonnées de chaque point sont ensuite transformées en coordonnées sphériques, puis finalement en coordonnées images, comme le récapitule la Figure 3.

Sont finalement conservés les points dont les coordonnées images sont en intersection avec les masques de segmentation. Ceux-ci sont ensuite isolés et extraits du reste du nuage.

La Figure 4 illustre un résultat de l'étape d'extraction (en gris clair, figure de droite) des points appartenant aux objets d'intérêts du nuage (ici, des candélabres).

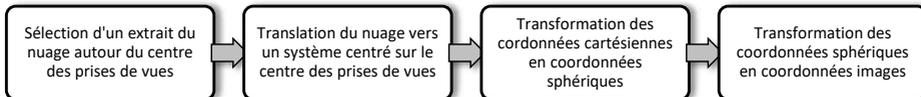


Figure 3 : Projection du nuage de points dans l'image panoramique



Figure 4 : Extraction des points du nuage (à gauche : nuage d'origine, à droite : superposition du nuage avec les points extraits (marqués par les ellipses blanches)

4. Calcul des positions finales des objets

Les objets d'intérêt extraits étant souvent sujets à la présence de points parasites, ceux-ci sont nettoyés à l'aide de l'algorithme de coalescence *HDBSCAN* [2]. Ce dernier permettant la détection de bruit, nous éliminons ainsi les points les plus susceptibles de ne pas appartenir à l'objet recherché.

Enfin, nous calculons les positions 3D (X,Y,Z) des centres des objets.

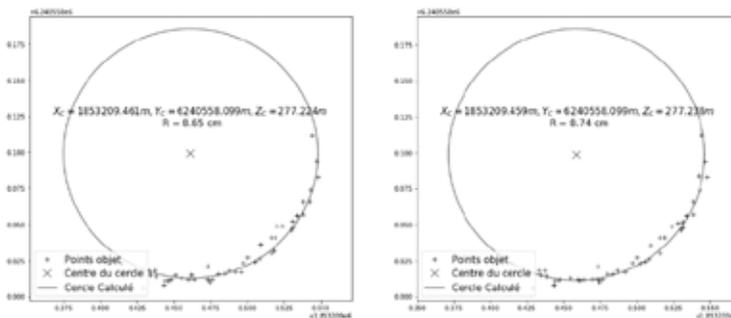


Figure 5 : Calcul des paramètres des cercles de chaque tranche

Pour y parvenir, nous proposons de décomposer chaque objet en tranches d'élévation d'épaisseur e fixée, avant de projeter chacune de ces tranches dans le plan normal à l'axe de rotation principal de l'objet par le biais d'une Analyse en Composantes Principales (ACP).

Nous calculons ensuite pour chaque tranche les paramètres du meilleur cercle à l'aide de l'algorithme *RANSAC* [3], de manière à obtenir la position du centre de chaque cercle, comme illustré en Figure 5. Les rayons sont également calculés à cette occasion, ce qui permet de faciliter l'élimination de valeurs aberrantes.

Le partitionnement de l'objet en différentes tranches permet de disposer d'une redondance quant à la détermination du centre de l'objet, et d'en éliminer d'éventuelles anomalies (provenant de bruit rémanent par exemple).

A l'issue du calcul des centres des tranches, un filtrage est effectué sur la base des premiers et troisièmes quartiles sur les composantes X et Y . Tous les centres n'étant pas simultanément dans ces intervalles sont purement et simplement éliminés. En procédant de la sorte, nous réduisons ainsi la dispersion des données, et ne conservons que les points les moins dispersés. La composante Z est finalement déterminée par l'algorithme des k plus proches voisins appliqué sur les points du sol autour de la position (X, Y) précédemment déterminée.

5. Résultats obtenus

Après un entraînement de *Mask R-CNN* [1] sur un jeu de données réduit (environ 500 images pour environ le double de candélabres) et indépendant du jeu de test, on détecte entre 60% et 70% de la vérité terrain, dont plus de 75% avec des écarts inférieurs à 5cm en 3D.

6. Conclusion et perspectives

Les travaux réalisés ont permis l'élaboration d'une chaîne de traitements entièrement automatisée et bâtie sur une brique d'intelligence artificielle permettant la reconnaissance et détection de différents objets. Cette dernière est construite à partir de solutions *open-source* et d'algorithmes élaborés par nos soins.

Les résultats de cette étude montrent qu'il est possible d'obtenir un inventaire relativement exhaustif de certains types d'objets. On compte par exemple un maximum de 70% de candélabres détectés dans le jeu de données de test.

Concernant la qualité du positionnement des centres d'objets, on dénote une précision moyenne inférieure à 4cm sur chaque composante (X, Y, Z) de l'objet, tandis que la totalité des objets détectés sont quasi-systématiquement situés dans un cercle de rayon inférieur à 5cm de la vérité terrain.

La méthode développée permet ainsi de réaliser d'importantes économies en termes de temps humain. Celui-ci est toujours nécessaire à des fins de contrôle d'exhaustivité et de qualité du résultat en sortie, et également de complétion en présence de faux négatifs.

Les résultats obtenus montrent que malgré les récents progrès en la matière, les méthodes intégrant une couche d'intelligence artificielle n'atteignent toujours pas une exhaustivité absolue. L'intervention humaine est par conséquent toujours nécessaire, mais largement réduite par rapport à un traitement manuel.

En termes d'évolution future des performances, l'intégration de nouvelles données d'entraînement après clôture de chaque projet permettra de les renforcer et de rendre la méthode plus robuste. De ce fait, les performances du moteur de détection seront amenées à évoluer positivement, sans modification particulière du code source.

Il serait également possible d'envisager l'extension de la méthode à des objets non ponctuels. Les résultats obtenus lors de la phase d'extraction des points du nuage démontrent la faisabilité de l'extraction de la majeure partie d'un objet. La totalité de ces points pourrait même être extraite en couplant cette méthode à un algorithme de croissance de régions.

Références

- [1] K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, et R. Girshick, « Mask R-CNN », *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, vol. 2017-Octob, p. 2980-2988, 2017.
- [2] L. McInnes, J. Healy, et S. Astels, « hdbscan: Hierarchical density based clustering », *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, n° 11, p. 205, 2017.
- [3] M. A. Fischler et R. C. Bolles, « Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography », *Communications of the ACM*, vol. 24, n° 6, p. 381-395, 1981.

Étude de solutions de réalité virtuelle et augmentée pour des visites inédites du château du Haut-Kœnigsbourg.

PFE présenté par : **Jules ROBERT**
Société d'accueil : **C.D. 67 – château du Haut-Kœnigsbourg**
Laboratoire ICube UMR 7357, Groupe TRIO
Directeur de PFE : **M. Bruno Caro**
Encadrante : **Mme Tania Landes**
Correcteur : **M. Mathieu Kœhl**



1. Introduction

La direction du château du Haut-Kœnigsbourg, malgré une offre qui séduit plus de 500.000 visiteurs par an, a constaté une faible fréquentation chez les 15-40 ans. Pour y remédier, elle souhaite engager des actions dans le domaine du numérique, avec la volonté de travailler avec des acteurs locaux. Impressionné par la présentation du travail réalisé au château du Kagenfels (PFE Benazzi 2018), M. Caro, le directeur, a voulu faire renaitre la collaboration entre le château et le groupe PAGE de l'INSA de Strasbourg (Équipe TRIO / Laboratoire ICube UMR 7357). En effet, les équipes dirigeantes précédentes avaient vu la réalisation notamment d'un Projet de Recherche Technologique portant sur l'étude d'opportunités dans le but d'une modélisation du château (PRT Degrain et Toubois, 2010).

2. Contexte et objectifs de l'étude

La réalisation de ces travaux au cours du Projet de Fin d'Études s'appuie sur les conclusions rendues en janvier 2019 dans l'étude théorique réalisée lors du Projet de Recherche Technologique. Ce dernier a permis de trouver la solution adaptée au château du Haut-Kœnigsbourg, parmi les nombreuses technologies existantes : lunettes et casques de réalité virtuelle, visites virtuelles, réalité augmentée, vidéos à 360°, photos panoramiques, etc. Une contrainte fixée par le partenaire a permis de faire le tri parmi ces solutions. Elle porte sur la volonté d'obtenir un outil complémentaire aux visites réalisées par les guides, qui ne disparaîtront pas au profit des visites numériques. C'était d'ailleurs une crainte de certains guides, qui voyaient au départ ce projet d'un œil circonspect. Ces craintes ont été levées à l'occasion des différentes rencontres, de la présentation de l'étude théorique à la démonstration lors de laquelle ils ont pu visiter le nuage de points en réalité virtuelle.

L'objectif fixé lors des réflexions communes est de construire un modèle maillé et texturé d'un lieu emblématique du château. Le choix s'est porté sur la cour du logis dont la taille raisonnable permettait d'envisager ces travaux dans le cadre d'un Projet de Fin d'Études. En parallèle, nous disposons de photographies d'archives prises par Bodo Ehardt, architecte de l'Empereur Guillaume II, lors de la rénovation du site entre 1900 et 1908. Elles devaient permettre de proposer une comparaison de l'état du site avant et après sa rénovation.

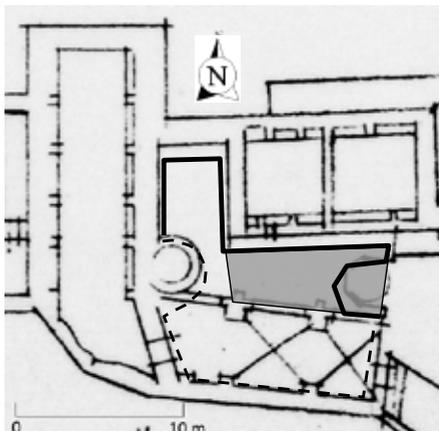


Figure 1 : Extrait d'un plan réalisé par Bodo Ehardt, centré sur la cour du logis (état restauré). En gris, l'étendue visible sur une photo de 1900 (voir figure 2). En trait gras, les murs couverts par la campagne photogrammétrique. En pointillés, l'emprise restante à texturer.

La cour du logis est située au cœur de la partie habitable du château, entourée par toutes les pièces principales : le donjon, les appartements, la salle de réception de l'Empereur, etc. Elle est un passage obligé et important du circuit, où les guides profitent de l'espace pour arrêter leurs groupes. Les conditions seraient donc réunies pour profiter de cet arrêt pour faire visiter le modèle virtuel, permettant notamment de découvrir les fresques murales du 2^{ème} étage, qui ne sont pas visibles depuis le sol, ou de faire un point sur la restauration en visualisant l'état antérieur. Les guides auraient alors la possibilité de baser leur discours sur un support de type smartphone ou borne, eux qui ne racontent pas toute l'histoire du château faute de pouvoir montrer aux visiteurs les lieux inaccessibles ou les documents anciens. Une solution sur smartphone, très mobile, permettrait également d'offrir aux personnes en situation de handicap la visite virtuelle de la cour du logis, à laquelle ils n'ont pas accès, en plus de la cour basse où ils sont accueillis par un film, ce qui étofferait un peu leur expérience de visite.

3. Travaux de relevés topographiques

Les principaux relevés ont été effectués au scanner laser terrestre *Faro Focus 3D X330*. En complément, les pièces entourant la cour ont été relevées au *GeoSLAM Zeb-Revo RT*, un scanner laser à main dynamique nouvellement acquis par l'équipe. Les nuages produits au *GeoSLAM* n'auront finalement pas été utilisés dans la modélisation mais sont conservés dans l'éventualité de nouveaux travaux sur le site. Cette campagne de mesures aura également permis de tester cet appareil, pour connaître les conditions dans lesquelles il est plus intéressant qu'un scanner laser statique.

4. Travaux de modélisation

Deux types de modélisation sont associés. Dans un premier temps, modéliser l'existant à partir de relevés lasergrammétriques est la technique conventionnelle largement répandue dans notre spécialité. En parallèle, la modélisation de l'état antérieur à la restauration sur la seule base d'une photographie de l'époque a été un défi inhabituel à relever.



Figure 2 : a) Photographie de 1900 de la cour du logis (côté Est) avant sa restauration. b) Photographie de l'état actuel, où l'on voit l'imposant escalier.

Comme on peut le voir dans la figure 2, la perspective sur les murs latéraux est importante sur la photographie de 1900 et devra être corrigée. La difficulté réside dans la modélisation sur la base d'un aperçu visuel de l'objet plutôt que sur un relevé. Néanmoins, cela offre une certaine liberté d'action, l'objectif étant d'abord d'obtenir un résultat visuel suffisamment bon pour que le visiteur ne sorte pas de l'immersion à cause d'un trou dans le modèle par exemple. Tout le principe des techniques de réalité virtuelle repose sur la capacité à tromper notre cerveau, et, même si ce n'est pas habituel en

topographie de déformer la réalité, il faut combler les parties non visibles sur cette photographie pour obtenir un modèle vraisemblable.

La modélisation de l'état actuel sur la base des relevés effectués au scanner laser comprend deux phases : la modélisation de la géométrie et l'application de textures. La modélisation de la géométrie a été réalisée sur le logiciel *3DReshaper*, tandis que plusieurs méthodes ont été combinées pour la création de textures. La chaîne de traitement mise en place pour la modélisation de l'état actuel est schématisée dans la figure 3.

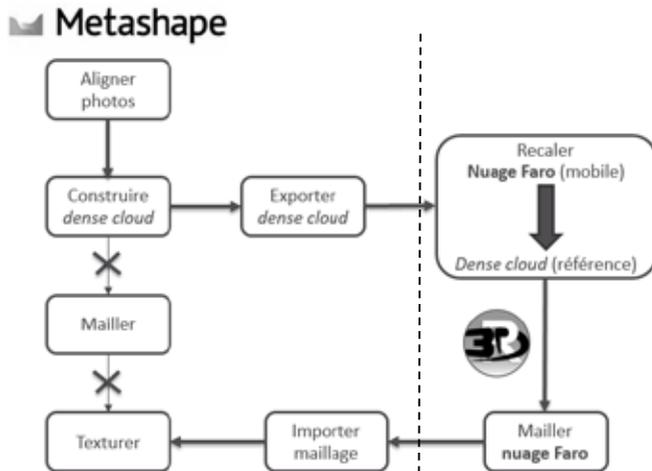


Figure 3 : Chaîne de traitement mise en place pour mailler et texturer le nuage de points relevé au scanner laser Faro.

En théorie, il est possible de reconstruire en 3D les murs de la cour du logis en maillant le nuage de points dense issu des photographies. Alors, l'application de textures est réalisable sur le logiciel de photogrammétrie *Agisoft Metashape* (colonne de gauche, figure 3). Toutefois, le nuage dense est à la fois moins complet et moins précis que le nuage de points acquis par lasergrammétrie. Un maillage de bien meilleure qualité pourra être obtenu à partir du nuage de points relevé directement au scanner laser, en utilisant par exemple le logiciel *3DReshaper*. Dans l'optique de texturer ce maillage grâce à la campagne photogrammétrique, il faut que ce dernier soit positionné dans le même repère que les prises de vues. Le moyen le plus exact pour recalibrer le nuage relevé sur le nuage calculé à partir des photographies est d'utiliser des points de calage choisis sur les deux nuages. Le nuage relevé n'étant pas géoréférencé, j'ai travaillé tout au long de la phase de maillage dans ce repère propre au jeu de photographies (axe Y vertical). Une fois le maillage texturé terminé, une transformation a été appliquée pour obtenir le meilleur aspect dans l'outil de visualisation (axe Z vertical).

Utiliser plusieurs méthodes pour texturer le modèle implique de le diviser en plusieurs parties selon la méthode appliquée. En effet, pour la partie qui n'a pas fait l'objet d'une campagne photogrammétrique, plusieurs autres solutions existent. Il est d'abord possible d'appliquer au modèle la couleur des points du nuage. À première vue, cela semble très intéressant. Malheureusement, la luminosité changeante au cours du levé a occasionné quelques désagréments sur la couleur d'une partie des points. Des couleurs non réalistes, du bleu au rose, sont présentes dans le nuage et rendent le résultat très mauvais. La segmentation du nuage de points selon le critère de la couleur des points a permis de supprimer les points aux couleurs faussées par les variations d'éclaircissement. Malgré ce traitement, le résultat n'est pas satisfaisant, dans ce cas précis, pour un objet de taille importante, mais cette technique pourrait être utilisée localement. En outre, dans le cadre d'un levé dans des conditions de luminosité constantes, l'utilisation de la couleur des points du nuage pourrait donner des résultats probants. Une autre solution est l'application directe de photographies sur le modèle, dans le logiciel utilisé pour le maillage, *3DReshaper*.

5. Partage des travaux

Il existe de nombreux moyens d'organiser des visites virtuelles, avec une fourchette de prix très large. Les contraintes comme l'espace nécessaire pour utiliser des systèmes imposants, le matériel

nécessaire, les compétences pour assurer la maintenance des outils ou la nécessité d'avoir un accès Wi-Fi peuvent également être fortes ou au contraire abordables. Pour l'heure, il est préférable que la solution mise en place dans cette phase de test soit peu coûteuse et qu'elle ne nécessite pas un espace important puisque cela réduirait le nombre de visiteurs qui pourraient y avoir accès. Il y a donc plusieurs solutions, à adapter selon les caractéristiques de l'événement :

- La visualisation d'un nuage de points en réalité virtuelle, à l'aide d'un système avec lunettes comme le *HTC Vive*. Cela nécessite l'achat d'un casque au coût important, ainsi qu'un ordinateur relativement puissant et un espace dédié, où un seul visiteur peut profiter de l'immersion.
- La visualisation d'un modèle dans une application de réalité virtuelle ou augmentée comme *Sketchfab* (voir figure 4). Dans le cadre d'un partage au plus grand nombre, cette solution semble être la plus appropriée. En effet, l'immense majorité des visiteurs possède un smartphone (surtout dans la tranche d'âge ciblée dans le cadre de ce projet). Selon les appareils, la fonction permettant de visualiser le modèle en réalité augmentée n'est pas disponible. La liste des smartphones compatibles avec les applications de réalité augmentée est disponible en ligne (et en annexe de mon mémoire). La direction du château pensait également profiter de cette solution pour proposer la mise à disposition de lunettes de réalité virtuelle de type *Cardboard*, à l'effigie du site, dans lesquelles on installe son smartphone pour s'immerger dans le modèle.

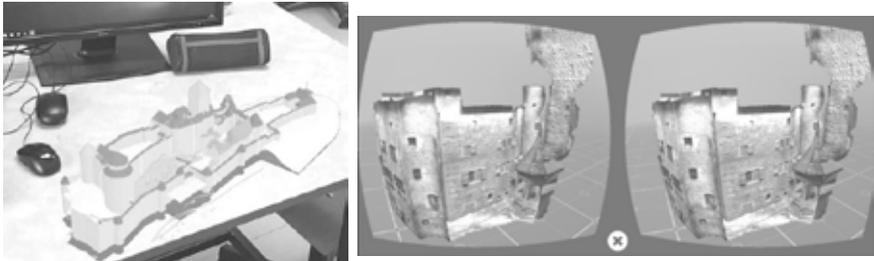


Figure 4 : a) Visualisation en réalité augmentée d'un modèle réalisé sous Sketchup et transmis par l'équipe dirigeante du château. b) Aperçu, en réalité virtuelle, d'une partie du modèle réalisé dans ce PFE (utilisable via une *Cardboard*).

Le choix de l'application *Sketchfab* a pesé dans la fabrication du modèle puisque le niveau de détails des maillages habituellement produits lors de travaux de ce type engendre un fichier de taille largement supérieure à celle que l'application permet d'importer. Pour un compte gratuit, la taille maximale est de 50 Mo. La géométrie, par exemple au format *.obj*, accompagnée d'un fichier image regroupant toutes les textures utilisées sont regroupés dans un dossier compressé qui ne doit pas dépasser 50 Mo. Des outils de réduction du nombre de faces du maillage ont permis d'atteindre cette taille raisonnable. Je ne conseille pas l'abonnement à un compte payant permettant d'importer des fichiers de 200Mo car un modèle plus lourd occasionnera un affichage et un déplacement moins fluides, surtout sur les smartphones les moins récents.

6. Conclusion et perspectives

Toutes les données acquises sur site n'ont pas été utilisées, en particulier les relevés effectués au scanner à main, qui pourront servir de base à un projet futur : celui de modéliser des pièces du château donnant sur la cour modélisée. Le niveau de détail ne sera pas très élevé mais la géométrie peut être dégagée et texturée, éventuellement avec des photographies sphériques, que nous avons en partie déjà capturées avec la caméra 360° *Ricoh Theta*. Une chaîne de traitement semblable à celle décrite sur la figure 3 pourrait être mise en œuvre. Prochainement, nous serons en mesure de proposer une visite de la cour du logis, au travers de lunettes *Cardboard* ou *HTC Vive*, durant laquelle l'utilisateur pourra passer de l'état actuel virtuel à l'état de 1900. Ces travaux ouvrent la porte à de nombreuses idées et solutions d'immersion qui permettront bientôt aux visiteurs de découvrir le château en réalité virtuelle, grâce à la démocratisation des systèmes de visualisation, ou en réalité augmentée, le marché étant inondé de smartphones performants à des prix de plus en plus abordables.

Optimisation des modes et méthodes d'acquisition et de traitement de levés de bâtiments par scanner 3D, et valorisation de la donnée par maquette numérique

PFE présenté par : **Victor MOREL**
Société d'accueil : **HAMEL Associés**
Directeur de PFE : **Stéphane AVERTY**
Correcteurs : **Emmanuel ALBY, Tania LANDES**



1. Contexte et objectifs de l'étude

HAMEL Associés est un cabinet de géomètres-experts réalisant des missions telles que des levés topographiques, bornages, divisions, copropriétés, lotissements, implantations ou encore relevés de bâtiments en amont des projets de réhabilitation. C'est notamment pour cette dernière activité que le cabinet avait fait le choix d'acquérir un Scanner Laser Terrestre (SLT), le FARO Focus^{3D} X330. Cependant il n'était que peu utilisé du fait du manque de connaissances et de l'achat en commun avec un autre cabinet. L'entreprise est aujourd'hui dans une dynamique de développement de cette activité, qui se concrétise par la livraison aux clients de plans d'intérieur 2D, de plans de façades et de coupes. C'est pourquoi elle souhaiterait optimiser sa chaîne d'acquisition et de traitement de données issues d'un SLT.

Cette optimisation, qui se conclura notamment par l'achat d'un nouveau matériel, a mené l'étude à la réalisation de plusieurs tests sur différents appareils. Les scanners dynamiques, plus particulièrement le ZEB-REVO RT (GeoSLAM) dans cette étude, se développant et étant plus rapides que les scanners statiques lors de l'acquisition et du traitement des données, il sera ici question de définir s'ils pourraient convenir à l'utilisation que le cabinet souhaiterait en faire. Le scanner statique RTC360 (Leica) sera aussi testé et comparé aux autres systèmes à notre disposition. Ces comparatifs seront surtout réalisés sur les documents 2D qui sont produits par l'entreprise dans ce type de missions, et nécessitant une précision de 2cm.

L'utilisation d'appareils de différents fournisseurs amenant à utiliser plusieurs logiciels, une étude sur ces derniers sera menée. En effet, les résultats qu'ils peuvent fournir, les temps de traitement qu'ils induisent ou encore leur accessibilité entrent totalement en compte dans cette phase d'optimisation.

Il est aussi de plus en plus fréquent que les clients et partenaires demandent si l'entreprise est en capacité de réaliser des maquettes numériques, ou de se servir des leurs en vue de la production de documents à vocation foncière (division en volume, copropriété, ...). L'utilisation de ce type de produit tend à se développer, notamment avec l'essor du BIM (Building Information Modeling). C'est pourquoi ce projet s'est aussi porté sur la modélisation 3D issue de nuages de points. Ceci sera une entrée en matière dans ce domaine pour le cabinet HAMEL Associés, même si ce dernier est beaucoup plus complexe qu'une simple maquette 3D.

2. Analyse des différents moyens d'acquisition

2.1. Enseignements tirés du ZEB-REVO RT

Dans le processus d'optimisation de l'activité de relevé de bâtiments, le ZEB-REVO RT, scanner dynamique de GeoSLAM a voulu être testé, notamment car il permettrait d'être jusqu'à 10 fois plus rapide qu'en utilisant les méthodes traditionnelles¹. Cet appareil se base sur le SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) qui est un processus par lequel un robot mobile peut construire une carte d'un environnement (*mapping*) et en même temps utiliser cette carte pour en déduire sa position (*localization*).

¹ Cadge, S. (2016). Welcome to the ZEB REvolution. GEOmedia, vol. 20, no 3.

Afin de le prendre en main, des tests ont été réalisés dans les locaux de l'entreprise. Nous nous sommes d'abord intéressés à la méthode de levé à adopter. Ainsi les bureaux ont été levés de 4 manières différentes : les trois premières en réalisant une boucle fermée (conseillé par le constructeur) à 3 vitesses de levé distinctes (allure lente, normale et rapide), et la dernière en réalisant une boucle ouverte. Quatre nuages de points sont obtenus et comparés à un nuage de référence acquis au FARO Focus^{3D} X330.

	Distance moyenne par rapport à la référence (cm)	Pourcentage des valeurs* inférieures à 1 cm	Pourcentage des valeurs* inférieures à 2 cm	95% des valeurs* inférieures à (cm)
Allure lente	0,8	46,1	73,0	7,4
Allure normale	0,7	56,5	81,5	7,6
Allure rapide	0,8	22,1	42,4	12,5
Boucle ouverte	1,0	41,4	68,9	6,8

Tableau 1 : Comparaison des distances entre les nuages de points issus des différents levés au ZEB-REVO RT et celui issu du FARO Focus^{3D} X330. (*une valeur correspond à la distance séparant un point dans un nuage et son point semblable dans celui de référence)

Les plans 2D qui sont fournis aux clients sont issus d'une digitalisation sur le nuage de points, faisant du bruit de la mesure un facteur important. Ce bruit a été quantifié pour les tests de levé à différentes vitesses, à 3 endroits différents, en ajustant un plan sur un mur.

	Allure lente	Allure normale	Allure rapide
Écart-type (cm)	0,8	0,9	0,9
Moyenne (cm)	0,5	0,5	0,5
Maximale (cm)	4,8	4,5	5,5

Tableau 2 : Comparaison des résultats de l'ajustement d'un plan au nuage de points correspondant à un mur (moyenne des résultats obtenus sur 3 murs différents).

On remarque que les écart-types et moyennes sont tous du même ordre, cependant l'écart maximal qui sera visible lors de la digitalisation est le moins important pour le test 2. Ces différents tests nous amènent à la conclusion que la vitesse « normale » est la plus adaptée aux types de travaux réalisés au sein du cabinet.

De plus cela semble logique car une vitesse trop lente entraîne un temps d'acquisition plus long et une plus grande quantité de points, alors que la vitesse rapide peut compliquer les calculs SLAM qui sont basés sur les points acquis, ainsi, s'il y en a peu, les résultats seront logiquement moins bons.

2.2. Comparaison des différents appareils

Le scanner statique RTC360 de Leica a aussi pu être testé. Cet appareil peut être intéressant grâce à sa vitesse d'acquisition ainsi que la possibilité de réaliser une pré-consolidation sur le terrain grâce à une tablette équipée du logiciel Cyclone FIELD 360 et une liaison wifi avec l'appareil. Il permet par exemple de réaliser un scan complet avec une résolution de 12mm à 10m en 36 secondes, là où le FARO actuellement possédé par l'entreprise nécessite 1 minute et 52 secondes. Il a alors été décidé de comparer le ZEB-REVO RT, le FARO Focus^{3D} X330 ainsi que le RTC360.

Pour ce faire, des données de référence provenant d'un levé à la station totale GEOMAX Zoom90 (précision angulaire de 0,6mgon) ont été utilisées. Le cheminement polygonal fermé qui a été réalisé, a une fermeture planimétrique de 15mm, angulaire de 3,8mgon et altimétrique de 0mm, pour une longueur de 500m et 22 stations.

Les données provenant des différents scanners ont toutes été assemblées avec le logiciel Cyclone REGISTER (Leica) afin d'avoir des nuages de points comparables. Les parties communes au levé du tachéomètre ont ensuite été dessinées par digitalisation sur les nuages de points grâce au plugin CloudWorx (Leica) intégré dans AutoCAD, puis un recalage de Helmert à l'échelle 1 a été effectué, sur la base de 10 points répartis sur l'ensemble du chantier.

	Erreur moyenne quadratique (cm)	Écart minimal (cm)	Écart maximal (cm)
FARO Focus ^{3D} X330	0,5	0,1	1,0
RTC360	0,7	0,0	1,7
ZEB-REVO RT	2,9	0,3	3,9

Tableau 3 : Résultats de l'adaptation de Helmert par rapport aux données de référence.

Ce tableau met en avant qu'ici la précision des plans 2D issus du nuage de points du FARO est la meilleure, même si celle du RTC360 est très proche. En revanche, ceux du ZEB-REVO RT sont plus éloignés de la référence et ne rentrent pas dans la précision demandée pour la réalisation de ces plans.

Enfin nous avons comparé le rendement issu de chacun des appareils, chose importante dans une entreprise. Comme attendu, le ZEB-REVO RT permet de réduire les temps d'acquisition et de traitement (3 fois plus rapide par rapport au FARO) tout comme le RTC360 (1,5 fois). En combinant les résultats de cette étude, le scanner de Leica semble être la meilleure option si un achat devait être effectué.

Appareil	Temps d'acquisition	Temps de traitement/consolidation	Temps de dessin	Temps total
ZEB-REVO RT	5h	4h30	3h	12h30
Leica RTC360	11h	12h	3h	26h
FARO Focus3D X330	16h	20h	3h	39h

Tableau 4 : Tableau des rendements issus des différents SLT testés.

3. Optimisation de la chaîne de production

3.1. Chaîne actuelle

Actuellement, la méthode adoptée sur le terrain est prévue pour une consolidation nuage/nuage. Il faut donc veiller à avoir suffisamment de recouvrement entre deux stations. Le géoréférencement du nuage de points, quant à lui n'est que rarement réalisé étant donné que la plupart du temps il n'est pas nécessaire pour les plans d'intérieur, coupes ou façades, mais ils sont rattachés en altimétrie grâce à des points levés sur le plancher de chaque étage.

Le traitement des données est lui réalisé grâce au logiciel SCENE de FARO. Puis PointCab est utilisé pour réaliser des coupes horizontales ou verticales, créant des orthophotos du nuage de points (projection des points se situant sur la coupe sur un même plan). Elles sont ensuite importées sur AutoCAD qui permet la digitalisation. Les points levés à la station totale servent ensuite à contrôler les plans obtenus. Le problème de ces orthophotos est la nécessité de faire des allers-retours entre les deux logiciels si des parties ne sont pas visibles sur l'une ou l'autre des coupes.

3.2. Optimisation

Après plusieurs dossiers réalisés, nous nous sommes rendu compte qu'avec la simple méthode de consolidation nuage/nuage, des problèmes pouvaient survenir, notamment lors de levés dans des bâtiments avec de grands couloirs où les pièces se ressemblent (EHPAD ou lycées par exemple). Ainsi dans ce genre de cas, nous pourront utiliser des sphères pour simplifier l'assemblage, tout comme pour les levés d'extérieur avec peu de bâtiments aux alentours non propices aux calculs nuage/nuage.

L'utilisation de plusieurs scanners a permis de tester différents logiciels de traitement de nuages de points :

- SCENE de FARO
- Cyclone REGISTER de Leica
- Cyclone REGISTER 360 de Leica

SCENE permet de réaliser la consolidation mais il est difficile de pouvoir réaliser des contrôles à part se fier aux résultats (écart en distance entre les points de deux nuages). De plus il est difficile de gérer de gros projets (plus de 200 scans), notamment lorsqu'il y a des soucis de superposition entre des nuages, ou bien lors de la création du nuage de points final qui demande beaucoup de mémoire à l'ordinateur.

Cyclone REGISTER, déjà possédé par l'entreprise mais non utilisé, est celui qui a été employé pendant ce projet pour assembler les données des différents appareils. Un de ses avantages est la possibilité de réaliser des coupes afin de se contrôler à n'importe quel moment de la consolidation. Ainsi il est possible de savoir quel nuage est mal placé et de le rectifier. Il possède aussi beaucoup de fonctions le rendant très complet, cependant, son point faible est son ergonomie. Tout est sous la forme de menu déroulant, avec plusieurs sortes de vues pour un même nuage de points, des noms spécifiques, etc..., le rendant compliqué à prendre en main.

Enfin Cyclone REGISTER 360 est une version simplifiée de REGISTER classique. Il est plus visuel et intuitif et permet aussi de réaliser des contrôles parallèlement à la consolidation. Ce dernier est notamment optimal pour traiter les données provenant du RTC360 même si Cyclone REGISTER le permet aussi.

Un des soucis de la chaîne de traitement actuelle est la nécessité de passer régulièrement de PointCAB à AutoCAD. Ce problème peut être résolu grâce au plugin CloudWorx de Leica intégré dans AutoCAD. Il permet de pouvoir travailler directement sur le nuage de points dans AutoCAD, évitant le passage par PointCAB et rendant la digitalisation beaucoup plus fluide. De plus, le cabinet HAMEL en est déjà équipé. Cependant, il fonctionne avec les vues présentes sur Cyclone ou bien le format LGS (spécifique à Leica et qui est une sorte de vidéo du nuage de points et lisible avec des supports Leica) obligeant à passer par un produit Leica à un moment donné. C'est pourquoi il a finalement été choisi d'intégrer Cyclone REGISTER dans la chaîne de production.

Enfin, un manuel d'utilisation reprenant la méthode à adopter sur le terrain ainsi que l'utilisation de Cyclone REGISTER et CloudWorx a été rédigé, dans le but d'homogénéiser le travail des employés avec des données provenant d'un scanner laser.

4. Modélisation 3D

Le traitement des données provenant de scanners maintenant maîtrisé, il a été choisi de les mettre en valeur par la réalisation d'une maquette numérique 3D. Ceci s'inscrit dans une volonté pour l'entreprise de pouvoir être compétente dans le domaine du BIM par la suite (notamment avec un prochain PFE).

Elle a été réalisée à l'aide du logiciel Revit de la suite Autodesk, en se basant sur un nuage de points. Une fois montée, des plans et coupes ont été directement extraits de celle-ci, puis comparés à ceux provenant de la digitalisation sur le nuage de points. Ceci nous permet de nous rendre compte du temps nécessaire à la réalisation d'une maquette numérique ainsi que de la quantité de travail à fournir pour produire ce type de livrables.

5. Conclusion

La comparaison des différents scanners laser terrestres, à savoir le ZEB-REVO RT, le FARO Focus^{3D} X330 et le Leica RTC360 nous a permis de nous rendre compte de l'utilisation qu'il pouvait en être fait. Ainsi, nous arrivons à la conclusion que le scanner dynamique ZEB-REVO RT ne répond pas à la précision demandée pour la production de plans 2D (2cm). Concernant le rendement de chacun, le RTC360 permet d'arriver aux mêmes résultats 1,5 fois plus rapidement qu'avec le Faro utilisé actuellement, même si le scanner de GeoSLAM permet lui d'aller 3 fois plus vite.

Cette étude a permis d'utiliser différents logiciels et appareils, rendant possible la mise en place d'une nouvelle chaîne de traitement des données issues de SLT. Un manuel reprenant toutes les étapes de cette chaîne ainsi que les méthodes à adopter sur le terrain a alors été rédigé pour assurer une cohérence au sein de l'entreprise.

Enfin, la partie sur la modélisation 3D a permis de prendre en main le logiciel Revit et de quantifier la quantité de travail à fournir pour réaliser ce type de rendu. Un prochain PFE orienté BIM devrait venir approfondir cette partie. Il serait notamment intéressant de pouvoir définir la précision globale d'une maquette 3D et de s'intéresser à la partie renseignement de cette dernière.

Développement des processus de production et d'évaluation de la maquette numérique TQC à partir de nuages de points d'acquisitions mixtes, pour le BIM et l'export de plans de bâtiment.



PFE présenté par : **Manon BILLIARD**

Société d'accueil : *Groupe Parera*

Directrice de PFE : *Mme Aurélie LABORDE*

Correcteurs : *Mme Tania LANDES et M. Emmanuel ALBY*



1. Introduction

► Le Scan-to-BIM : du nuage de points à la maquette numérique tel-que-construit.

La gestion intelligente du patrimoine bâti existant passe de plus en plus souvent par l'utilisation d'une maquette numérique du bâtiment. Les informations physiques et fonctionnelles issues de ce jumeau virtuel offrent une utilisation et un échange inédit des données. Elles permettent de prévoir la maintenance, la restauration et la modification d'un bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie. De plus, les avancées en matière d'acquisition de nuages de points et de représentations tridimensionnelles offrent aujourd'hui une rapidité et une précision suffisantes pour extraire les informations des éléments intérieurs et extérieurs du bâtiment.

C'est donc naturellement que la production de maquettes numériques à partir de nuages de points s'est intégrée dans la gestion de la vie du bâtiment (BIM¹), et en particulier pour la gestion du patrimoine (GMAO²). Cette méthode est plus couramment appelée *Scan-to-BIM*, ce qui peut être traduit par "du nuage de points à la maquette numérique". On parle alors de Maquette Numérique Tel-Que-Construit (MN-TQC). Le schéma ci-dessous (Figure 1) illustre le processus du Scan-to-BIM jusqu'à l'exploitation de la MN-TQC tout au long du cycle de vie du bâtiment.

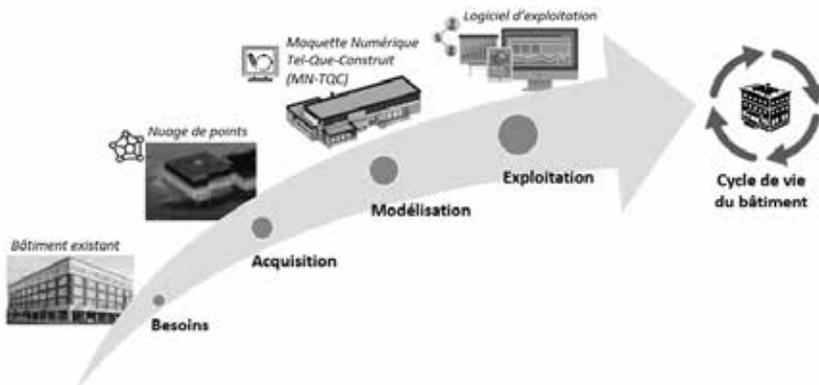


Figure 1 : Processus de production d'une Maquette Numérique Tel-Que-Construit (MN-TQC) à partir d'un nuage de points, communément appelé Scan-to-BIM. La maquette est ensuite intégrée dans un logiciel d'exploitation GMAO ou BIM pour prévoir la gestion du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie.

¹ *Building Information Model* : Méthode de gestion d'un bâtiment depuis une maquette numérique enrichie.

² Gestion et Maintenance Assistées par Ordinateur.

► **Une gestion des données à deux vitesses.**

Le groupe Parera est aujourd’hui acteur dans la production des données nécessaires à la gestion du patrimoine bâti existant. À travers ce projet, il a choisi d’adapter ses méthodes de production dans REVIT³ pour mieux intégrer le principe du Scan-to-BIM. Parera évolue donc avec les avancées technologiques et améliore ainsi le temps et la qualité de production.

La demande de MN-TQC est encore minoritaire parmi les acteurs du bâtiment existant. Cela s’explique par une évolution à deux vitesses entre les entreprises et les acteurs du bâtiment. Ces derniers demandent majoritairement des livrables au format DWG (plan AutoCAD, en 2D) car leurs moyens techniques et/ou humains ne sont pas encore opérationnels pour exploiter les données de la MN-TQC.

► **Les objectifs de ce projet.**

Depuis ces changements de méthodes, les objectifs de Parera pour ce projet sont doubles : améliorer le processus de production de modélisation de maquette numérique pour inclure un export DWG depuis REVIT et créer une méthode d’évaluation des MN-TQC.

2. Export DWG depuis REVIT

► **Développer l’export DWG depuis REVIT.**

Pour s’adapter à la demande du client tout en restant compétitif, Parera a souhaité dans un premier temps ancrer sa méthode de production de maquette numérique à partir de nuages de points d’acquisitions mixtes. Le processus développé dans REVIT doit intégrer un export DWG, sans toucher à l’intégrité de la maquette.

Le principal problème soulevé provient du logiciel en lui-même car tous les outils de REVIT sont pensés pour la 3D. Les outils tels que les exports DWG sont alors peu développés et assez basiques. L’ajout d’outils et de fonctionnalités supplémentaires est donc indispensable.

► **Un Plugin pour l’export DWG avancé.**

La solution proposée au cours de ce projet est l’utilisation d’un Plugin REVIT d’outils avancés de configuration de l’export DWG. Il permet entre autres d’exporter les paramètres de calques d’un gabarit AutoCAD (format DWT) directement dans le projet REVIT. En parallèle, j’ai élaboré une charte graphique 2D de Parera qui s’adapte au mieux aux contraintes des objets de REVIT.

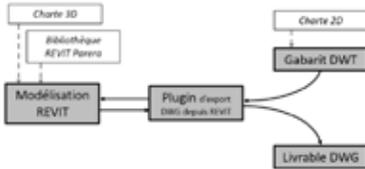


Figure 2 : Chaîne de traitement pour réaliser un export DWG avancé depuis REVIT. Le Plugin permet de faire le lien entre la charte 2D et 3D de Parera.

Les exports sont préparés dans REVIT avec la mise en place de *feuilles de vue*. Elles sont automatiquement préparées grâce à un gabarit REVIT qui utilise un cartouche créé pour Parera et les informations du projet en cours. Au final, le Plugin exporte les feuilles vers de nouveaux fichiers DWG, qui sont, après contrôles, prêts à être livrés. (Figure 2)

On observe un gain de temps considérable sur la mise en place de la configuration de l’export en amont, mais aussi sur les reprises, le contrôle et la présentation du fichier exporté en aval. Au final, ¼ du temps de production de la maquette numérique est ainsi économisé en temps de travail 2D.

► **Création d’une bibliothèque REVIT pour Parera.**

Une fois l’outil d’export DWG mis en place, l’étude des résultats a montré un problème de lisibilité des objets REVIT exportés. La bibliothèque d’objets du logiciel (ou celles issues des constructeurs⁴) présente une trop grande quantité de traits de représentations à l’export, ainsi que des dimensions fausses car non paramétrables (Figure 3).



Figure 3 : Comparaison d’un détail d’une fenêtre exportée au format DWG depuis REVIT. L’objet A est une famille constructeur et l’objet B est la famille que j’ai créée.

³ Logiciel d’Autodesk, leader dans la modélisation de maquette numérique en France.

⁴ Objets téléchargés depuis le web : BIM&co, Polantis, BIM Objet, etc.

La solution est alors de créer une bibliothèque d'objets personnalisables et adaptés pour l'export DWG. J'ai ainsi conçu, entre autres, un ensemble de portes et fenêtres standards qui conserve l'intégrité de la MN-TQC et offre un export DWG au plus proche de la réalité terrain. Une étude de précision sera présentée durant la soutenance.

3. Évaluation de la maquette numérique tel-que-construit

► Que faut-il évaluer ?

Produire une MN-TQC devient accessible au plus grand nombre grâce à des solutions de modélisations semi-automatiques disponibles sur le marché (*As-built Trimble, Edgewise ClearEdge, PointCab, etc.*). Même si ces outils proposent de placer les composantes de la maquette au plus proche du nuage de points, il est nécessaire de contrôler leur fiabilité réelle. D'autant plus que ces données seront intégrées dans les logiciels de GMAO et de BIM : leurs qualités impacteront directement la prise de décision des gestionnaires du bâtiment.

Or une MN-TQC est très riche en données à évaluer. Il est donc nécessaire de déterminer celles qui sont essentielles pour optimiser le temps de contrôle. J'ai ici retenu trois catégories (Figure 4) :

- L'homogénéité de la maquette numérique,
- Les informations de la base de données,
- Les géométries de la maquette numérique.

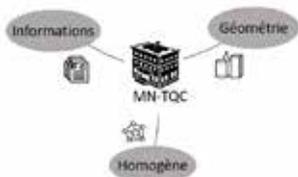


Figure 4 : Lors de ce projet, j'ai évalué la MN-TQC sur ses informations, sa géométrie, son homogénéité.

► Contrôle de l'homogénéité de la MN-TQC

La méthode de production de la MN-TQC est normalisée pour aboutir à des MN homogènes. Cela se traduit par des familles d'objets cohérents entre eux, d'un projet et d'un dessinateur à un autre. Les choix des familles d'objets sont similaires (niveaux de détails, style de représentation, etc.) et les mêmes règles de dessins sont appliquées.

J'ai mis en place une charte de modélisation 3D spécialement pour la MN-TQC. Elle s'applique en pratique par l'utilisation d'un gabarit REVIT et par l'application de fiches de contrôles rédigées pendant mes expérimentations. Le dessinateur qui commence un projet n'a donc plus à configurer REVIT, les risques de divergences d'une MN à une autre sont ainsi réduits. Il peut ensuite réaliser les étapes clés de la production (début, intermédiaire, fin) guidé par ces fiches de contrôles.

Les erreurs systématiques et les fautes sont de ce fait limitées. En cas de problème, les fiches de contrôles servent également de rapport de suivi et de liaison avec l'équipe (Figure 5).

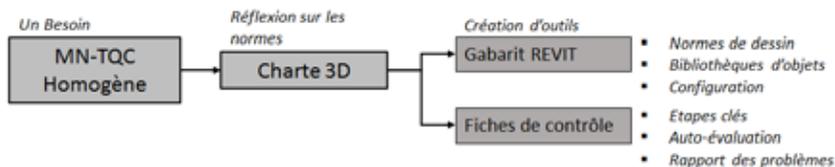


Figure 5 : Description de la stratégie des règles et outils mise en place pour garantir une MN-TQC homogène.

► Contrôle des informations de la MN-TQC

Une maquette numérique est enrichie d'informations contenues dans une base de données liée. C'est le « I » du BIM. Les logiciels d'exploitation de la MN-TQC vont se baser sur ces données pour répondre aux requêtes des gestionnaires. La fiabilité de ces informations est essentielle car elles sont à l'origine de la prise de décision tout au long du cycle de vie du bâtiment. Une erreur dans les surfaces peut provoquer un surcoût en achat de matériaux par exemple.

Pour garantir la base de données de la MN-TQC, j'ai mis en place l'utilisation d'un Plugin issu des outils de « BIM interoperability tools » d'Autodesk. Il est alors rapide d'interroger la base de données sur des points importants personnalisés. Un rapport d'erreur identifie et localise les anomalies que le dessinateur doit corriger.

► **Contrôle de la géométrie de la MN-TQC**

Une maquette numérique est une représentation en volume simple d'une structure complexe et hétérogène de la réalité terrain. La méthode la plus efficace et rapide pour contrôler la géométrie est de réaliser une analyse des écarts entre la MN-TQC et le nuage de points de référence (Figure 6). Cette étude globale peut être suivie d'une étude locale, objet par objet, mais cela reste encore très lourd en traitements.

J'ai ainsi évalué la géométrie de MN-TQC réalisée par Parera en utilisant le logiciel *CloudCompare (EDF R&D)*. Les résultats offrent une analyse visuelle satisfaisante mais les outils à disposition limitent la quantification des écarts. Son utilisation se révèle aussi chronophage car elle demande d'exporter et de réimporter la MN-TQC. C'est pourquoi d'autres outils d'analyse (*As-built de Trimble, Verity de ClearEdge3D, Cyclone 3DR de Leica, etc.*) sont étudiés. L'analyse visuelle des résultats permet entre autres d'identifier des fautes de modélisation (Figure 7) et de les corriger dans REVIT. Les résultats seront présentés lors de la soutenance.

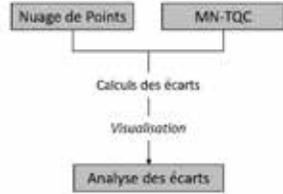


Figure 6 : Chaîne de traitement pour contrôler la géométrie de la MN-TQC. [Macher 2019] modifié.

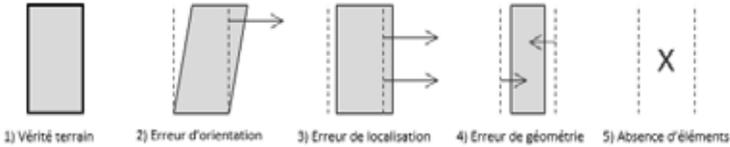


Figure 7 : Illustration de fautes de modélisation (2 à 5) qui peuvent être identifiées par analyse visuelle des écarts entre la maquette numérique et le nuage de points de référence (1).

4. Résultats et perspectives.

Les évolutions constantes des technologies et des demandes des clients rendent les méthodes de production de maquettes numériques très changeantes. Il est essentiel de continuer à adapter les process de Scan-to-BIM pour toujours produire plus rapidement et mieux.

Les exports DWG depuis la maquette numérique vont d'ici plusieurs années tendre à se réduire au profit des exports IFC, adaptés à la donnée 3D partagée. D'autres besoins clients seront alors demandés et des solutions seront à trouver.

Dans l'immédiat, les exports DWG depuis la REVIT se révèlent essentiels. Les outils et la bibliothèque d'objets de Parera continueront à se développer avec les besoins des prochains projets. La mise en place des fiches de contrôles permettra de garder cette bibliothèque homogène. J'ai mis un point d'honneur à prendre en compte les avis et remarques des dessinateurs 3D pour adapter et rendre mes outils les plus viables et simples possibles. Parera est donc prêt à produire des MN-TQC sur le long terme.

Ce projet m'a permis d'approcher le rôle du BIM Manager au sein de Parera, mais aussi d'apporter la compétence d'évaluation de la qualité de la MN-TQC pour déterminer sa fiabilité. Que ce soit pour améliorer la production ou garantir la précision de MN finales, il est aujourd'hui essentiel de réaliser ces études. Ces efforts de développement ont contribué à un gain de temps de production, de reprise et de contrôle.

Référence citée :

Macher, H., Chow, L. et Fai, S. (2019). Automating the Verification of Heritage Building Information Models Created From Point Cloud Data., *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9 (February), p. 455-460.

Mise en place de nouvelles méthodes d'acquisition rapides au scanner pour les plans d'architecture – Impacts sur la qualité et la précision



PFE présenté par : **Marie Schoenmaekers**
Société d'accueil : **ATGT Géomètre-Expert**
Directeur de PFE : **Bruno Guion**
Tutrice de PFE : **Emma Bonhomme**
Encadrant INSA : **Emmanuel Alby**



1. Introduction

1.1 Contexte du projet

Depuis sa création en 1947, ATGT Géomètre-Expert n'a jamais cessé d'évoluer en prenant en compte les grandes avancées technologiques que connaît le secteur de la topographie.

A la fin des années 1980, la technologie des systèmes de cartographie mobiles (*MMS : Mobile Mapping System*) a commencé à se développer et ne cesse de s'accroître aujourd'hui (Toschi et al., 2015). De plus en plus de solutions de cartographie mobile utilisant un scanner laser sont proposées sur le marché notamment grâce au début de l'époque BIM (*Building Information Modeling*). Ces outils de numérisations 3D présentent un grand intérêt pour la prise de mesures rapides d'un site.

Avec la forte influence de la technologie de cartographie mobile ainsi que la volonté de toujours utiliser une technique innovante et précise, le groupe ATGT souhaite évoluer en mettant en place une méthode d'acquisition rapide utilisant les scanners lasers mobiles dans le but de réaliser des plans d'intérieurs tout en livrant un travail précis.

1.2 Objectifs du projet

Les plans d'intérieurs (tels que les plans de détails (1/50ème, 1/100ème), plans de surfaces, plans de coupes...) représentent 6% du chiffre d'affaires annuel de l'entreprise. La société souhaite donc trouver une méthode plus rentable que les méthodes actuellement utilisées en investissant dans un système mobile de cartographie d'intérieur (*IMMS : Indoor Mobile Mapping System*).

Les objectifs de ce projet de fin d'études sont répartis de la manière suivante :

- Observer les méthodes actuellement utilisées dans l'entreprise (Distancemètre, PIC et scanner statique) : déterminer les points forts et points faibles de chacune ;
- Evaluer différents scanners laser mobiles en prenant en compte les paramètres suivants : ergonomie, autonomie, portée, précision... ;
- Mener une étude de précision sur les différents appareils testés : étude relative (comparaison entre les instruments testés) et étude absolue (comparaison avec un appareil de référence plus précis) ;
- Choisir une solution qui correspond aux attentes de l'entreprise.

2. Étude et analyse des scanners laser mobiles

Après avoir répertorié les scanners laser mobiles proposés sur le marché, il a été possible de les classer selon 3 catégories : les scanners laser à main, les scanners sac-à-dos et les scanners sur chariot (Nocerino et al., 2017) :

- Les scanners à main (« *Handheld MMSs* ») sont caractérisés par le fait que l'utilisateur tient dans sa main le scanner et se déplace dans la zone de lever. Ces appareils sont généralement équipés

d'une centrale inertielle et d'un capteur lidar. Certains modèles possèdent en plus une caméra ce qui permet d'avoir un nuage de points colorisés ;

- Les scanners sac-à-dos (« *Backpack* ») sont des systèmes équipés de capteurs GNSS (*Global Navigation Satellite System*), d'une centrale inertielle ainsi que d'une ou plusieurs caméras. Certains appareils, comme le système Heron, ne sont pas équipés de capteurs GNSS ;
- Les scanners sur chariot (« *Trolley MMSs* ») sont équipés de capteurs GNSS, d'une centrale inertielle ainsi que de caméras. Tous ces éléments vont être intégrés à un chariot que l'utilisateur pourra facilement déplacer.

Au cours de ces six mois de stage, quatre scanners laser mobiles ont pu être testés dans les locaux de l'entreprise à Bobigny (93) à savoir le ZEB REVO RT de Geoslam, le BMS3D de Viamétris, le Heron Lite de Gexcel et le PX-80 de Paracosm. Plusieurs études ont alors été réalisées afin de déterminer les avantages et inconvénients de ces appareils ainsi que la qualité et l'exactitude des nuages de points résultants.

2.1 Étude absolue

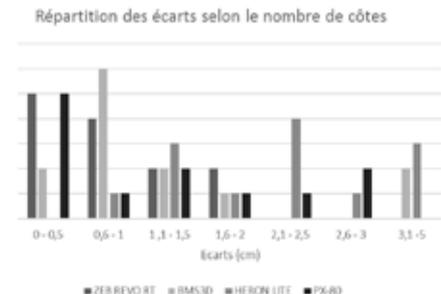
La première méthode consiste à comparer les nuages de points acquis par des systèmes de cartographie mobiles avec un système d'acquisition statique, ici le FARO FOCUS X130 utilisé comme référence avec sa précision inférieure au centimètre ($\pm 2\text{mm}$ à 10m d'incertitude de mesure). Avant de pouvoir commencer la comparaison de distance de nuage à nuage, il a fallu superposer les nuages entre eux grâce à une méthode ICP (*Iterative Closest Point*) sur le logiciel RealWorks.



Après analyse, nous pouvons constater que le ZEB REVO RT est l'appareil qui concentre les meilleurs résultats (90% des points du nuage ont un écart de distance compris entre 0 et 2 cm par rapport aux points acquis par le FARO) et cela confirme les données constructeur affirmant une précision relative de 1-3 cm. On remarque également que le PX-80 concentre 60% de ses points avec un écart compris entre 0 et 2 cm. Le Heron Lite et le BMS3D ont une répartition plus faible de leurs écarts avec néanmoins 50% des points avec un écart de distance compris entre 0 et 3 cm.

Figure 1 : Représentation des écarts de distance entre les points du nuage par un scanner mobile et le nuage acquis par le scanner FARO

La seconde méthode consiste à analyser les écarts entre les mesures prises sur le nuage de points acquis par le Faro Focus^{3D} et les mesures prises sur les autres nuages. Cette méthode va permettre de confirmer ou non les résultats de l'étude précédente. Afin d'obtenir un résultat concluant, les mesures ont été choisies de manière à avoir des diagonales et des distances courtes et longues.



Finalement, on remarque que la majorité des écarts sont compris entre 0 et 2 cm pour le ZEB REVO RT, le BMS3D et le PX-80. En revanche, le Heron Lite a des écarts beaucoup plus importants avec une majorité comprise entre 2 et 2,5 cm.

À la suite de cette étude, nous pouvons confirmer que l'ensemble de ces appareils respecte les données constructeur affirmant une précision relative de 1-3 cm. Le ZEB REVO RT et le PX-80 sont les deux systèmes obtenant les meilleurs résultats contrairement au Heron Lite qui se montre moins précis.

Figure 2 : Représentation des écarts de distance entre les mesures prises sur le nuage de points acquis par un scanner mobile et celui du FARO

2.2 Étude relative

Cette seconde étude, dite relative, permet de comparer la qualité des différents nuages de points acquis par les scanners laser mobiles. Le but de ce projet est de réaliser des plans d'intérieur en utilisant un système de cartographie mobile. Il a donc été nécessaire d'analyser les nuages de points en vue de réaliser un plan d'intérieur. Pour cela, les éléments tels que les escaliers, embrasures de portes et fenêtres, poutres ont été étudiés.

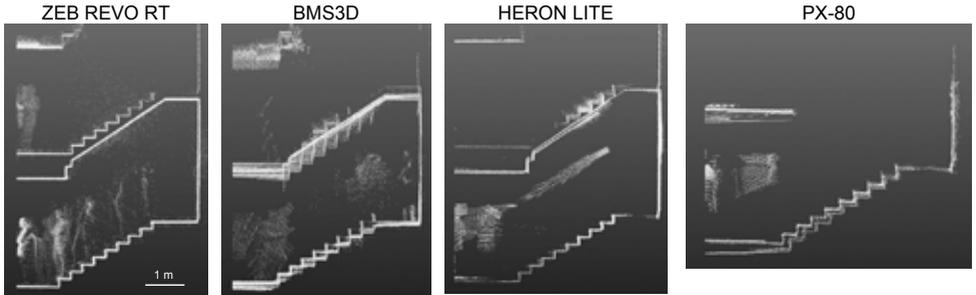


Figure 3 : Vues en coupe des escaliers sur RealWorks selon le scanner mobile utilisé

Après avoir étudié le cas des escaliers sur les différents nuages de points (cf. Figure 3), on constate un nombre important d'erreurs. Les décalages importants ainsi que le bruit sont dus à la dérive du SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). En effet, en raison des changements de niveaux avec les marches de l'escalier, l'algorithme SLAM du scanner n'arrive plus à se situer dans son environnement. Néanmoins, le résultat que l'on obtient avec le ZEB REVO RT est assez satisfaisant.

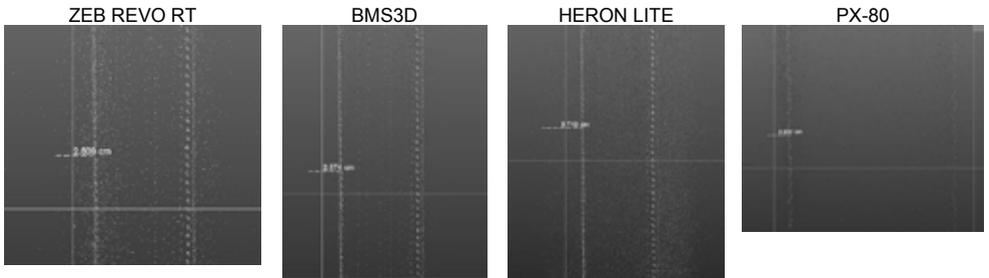


Figure 4 : Vues en coupe d'une fenêtre sur RealWorks afin d'analyser le bruit

Afin d'analyser le bruit des différents scanners mobiles, plusieurs coupes ont été réalisées. Sur la figure ci-dessus (cf. Figure 4), la coupe réalisée au niveau d'une fenêtre nous a permis de constater que le PX-80 est l'appareil avec le plus faible bruit (± 1 cm). En revanche, le Heron Lite est le scanner qui engendre le bruit le plus important (± 4 cm). Concernant le ZEB REVO RT et le BMS3D, ces deux dispositifs ont le même bruit (± 3 cm) mais le nuage du BMS3D est beaucoup moins dense en termes de points que celui du ZEB REVO RT. Avec un nuage moins dense, la compréhension du nuage pour réaliser le plan peut être plus compliquée.

3. Synthèse et résultats

Au vu des études précédentes, on peut affirmer que deux appareils se distinguent des quatre scanners testés : le ZEB REVO RT et le PX-80. Par sa précision et sa capacité à scanner des éléments de différents niveaux (escaliers, rampes...), le ZEB REVO RT semble être une solution adaptée à la demande de l'entreprise de même que le PX-80 qui, par sa précision et son faible bruit, réalise des nuages de points de qualité.

La qualité du nuage de points n'étant pas le seul critère important de cette étude, il a également été nécessaire d'étudier le rendement de ces systèmes ainsi que leurs limites d'utilisations. En termes de rendement, le PX-80 est celui qui permet d'acquérir le plus de données en peu de temps (5000 m² en 15 min dans le cas de grands espaces). Le ZEB REVO RT et le Heron Lite ont un rendement plus faible avec environ 2000 m²/h pour des espaces petits et clos et 5000 m²/h dans le cas de grands espaces. Concernant le rapport temps d'acquisition/temps de traitement, le ZEB REVO RT et le Heron Lite ont un rapport égal à 1 alors que pour le PX-80, le temps de traitement peut durer 4 à 6 fois le temps d'acquisition selon la complexité du bâtiment et aux alentours de 3 fois le temps de d'acquisition pour le BMS3D.

En termes de polyvalence et de limite d'utilisation, le ZEB REVO RT permet d'obtenir de bons résultats pour scanner les intérieurs de petites tailles (appartements, bureaux) en garantissant une précision centimétrique. En revanche, les bâtiments de grandes envergures tels que les parkings semblent perturber le scanner qui n'arrive pas à se localiser dans son environnement.

Au contraire, le PX-80 semble parfaitement adapté pour des bâtiments de petites et grandes envergures même si les escaliers/rampes ne présentent pas des résultats exploitables. Son avantage principal est la caméra intégrée qui permet d'obtenir un nuage colorisé et de bonne qualité ce qui facilite grandement la détection d'éléments.

De son côté, le BMS3D ne semble pas adapté pour des bâtiments de petites envergures nécessitant au minimum 50cm de chaque côté du scanner. La qualité du nuage de points au niveau des escaliers ainsi que sa faible densité de points ne permettent pas de construire le plan d'intérieur. Malgré le fait que cet appareil possède une caméra, le rendu du nuage de points colorisés ne permet pas de distinguer facilement les éléments de mobiliers fixes dans un bâtiment.

Concernant le Heron Lite, bien que cet appareil soit adapté en intérieur pour tout type de bâtiments (entrepôts, bureaux, logements...), les résultats sont décevants que ce soit en termes de précision ou de qualité du nuage de points. Il pourrait être intéressant de recommencer une acquisition avec un autre mode de levé afin d'obtenir des résultats plus convaincants.

4. Conclusion et perspectives

De manière générale, on constate que deux appareils semblent répondre aux attentes de l'entreprise : le ZEB REVO RT et le PX-80. Ces deux scanners mobiles ont chacun leurs avantages et inconvénients qu'il va falloir analyser en détail avec l'entreprise afin d'acquérir le matériel qui répondra le mieux aux besoins de ATGT.

À la suite de ce choix, une dernière étude sera faite afin de mettre en place une méthode d'acquisition et de traitement utilisant le nouveau système d'acquisition mobile dans la chaîne de traitement actuelle de l'entreprise sans impacter son bon déroulement.

Toutefois, il est nécessaire de rappeler que ces deux systèmes de cartographie mobiles ayant une précision globale de 1-3 cm, leur utilisation pour certains travaux peut ne pas être adaptée. Le géomètre-expert étant garant de la précision, certains plans d'intérieur demandant une précision inférieure au centimètre ne pourront être réalisés à partir de scanners mobiles. Dans les prochaines années, il serait intéressant de suivre l'évolution des capteurs Lidar (*Light Detection and Ranging*) afin de constater une éventuelle amélioration dans la précision relative de ceux-ci.

Références bibliographiques :

- Durrant-Whyte H., Bailey T. (2006). Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I the essential algorithms. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Robotics & Automation Magazine, Volume 13, Issue 2.
- Maboudi M., Banihdi D., Gerke M. (2017). Evaluation of indoor mobile mapping systems. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU-Braunschweig.
- Nocerino E., Menna F., Remondino F., Toschi I., Rodríguez-González P. (2017). Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems.
- Toschi I., Rodríguez-González P., Remondino F., Minto S., Orlandini S., Fuller A. (2015). Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4.

WEBMAPPING 3D : Un outil pour l'aménagement du territoire

PFE présenté par : **Clara BERNHARD**
Société d'accueil : *Eurométropole de Strasbourg*
Directeur de PFE : *M. Philippe SLISSE*
Correcteur : *M. Mathieu KOEHL*



1. Contexte et objectifs de l'étude

L'Eurométropole de Strasbourg (EMS), qui représente aujourd'hui près de 25% de la population en Alsace, accorde une grande place au développement de la 3D pour l'aménagement du territoire. De nombreuses campagnes d'acquisition de données 3D y sont menées depuis 2010, telles qu'une campagne LIDAR (Light Detection And Ranging) ou plus récemment pendant l'été 2018, la réalisation d'un photomaillage 3D qui couvre les 340km² du territoire de l'EMS. Calculé à partir de photos aériennes de résolution 5cm, ce photomaillage illustre parfaitement les avantages que peut représenter la 3D au sein d'une collectivité : réalisme, compréhension et analyse intuitive du territoire, amélioration du dialogue entre les différents acteurs, etc.

Ainsi, ce Projet de Fin d'Etudes (PFE) a pour objectif principal de développer les usages de cette donnée 3D existante (tout particulièrement le photomaillage au vu de sa récente acquisition), sous la forme d'une ou plusieurs applications sur internet. Le but est également d'aller plus loin qu'une application de visualisation du photomaillage en croisant celui-ci avec des données SIG et projets 2D et 3D en tirant partie des technologies web. Pour ce faire, la première tâche consiste à identifier les besoins de l'EMS en termes de webmapping 3D, via des rencontres avec différents acteurs de l'aménagement du territoire. Ensuite, une analyse et comparaison des différentes techniques de webmapping 3D a été réalisée, afin de choisir la ou les plus adaptées au projet. Enfin, la ou les applications devront être développées à l'aide des langages de développement web classiques, c'est-à-dire HTML, CSS et Javascript.

2. Identification des besoins en webmapping 3D

Ce PFE s'effectue au sein du service Géomatique et Connaissance du Territoire (GCT), faisant lui-même partie de la Direction Urbanisme et Territoire (DUT) de l'EMS. Afin de pouvoir fixer un cadre thématique et temporel au sujet, il a été décidé que les rencontres et identifications de fonctionnalités intéressantes se feraient uniquement au sein de la DUT. La DUT consiste en cinq différents services (hormis le service GCT) : Habitat, Police du bâtiment, Politique foncière et immobilière, Aménagement du territoire et projets urbains, Conduite des projets d'aménagement, auxquels s'ajoutent six Directions de Territoire, représentant chacune un ou plusieurs quartiers de Strasbourg, chacun avec des rôles et des besoins bien distincts.

Dans le cadre de ce PFE, dix rencontres ont ainsi été organisées avec une ou plusieurs personnes de chaque service et avec deux directions de territoire. Nous disposons au préalable d'une application prototype ayant été codée l'année passée par un stagiaire ; ces rencontres ont donc consisté à la présenter afin d'ouvrir le dialogue sur les nouveaux outils qu'il pourrait être intéressant de développer, le but étant que la 3D apporte une réelle plus-value et permette d'enrichir, de valoriser et de simplifier le travail des personnes concernées.

Les demandes suivantes ont ainsi pu être clairement identifiées :

- Insertion de couches de données (surfaciennes, linéaires et ponctuelles) issues du SIG ;
- Affichage des ombres portées par les bâtiments et la végétation ;
- Affichage d'informations provenant des attributs des objets ;
- Mesures de coordonnées, de distances et de surfaces sur le photomaillage ;
- Dessin de points, lignes, surfaces et volumes (avec possibilité d'afficher des cotations) ;
- Découpage d'un trou dans le photomaillage (pour l'insertion de projets) ;
- Enregistrement du point de vue de la caméra ;
- Réalisation d'une coupe horizontale par rapport au sol ;
- Réalisation de profils ;
- Insertion de projets d'aménagement du territoire en 3D ;

- Comparaison du photomaillage avec une photo ou un autre maillage (à l'aide d'un *slider* séparant l'écran en deux parties par exemple) ;
- Insertion de symboles 3D (végétations, mobilier urbain) sous la forme d'une bibliothèque de symboles ;
- Affichage de la flèche nord et éventuellement d'une échelle ;
- Simulation de la visibilité depuis un point donné.

Par ailleurs, deux aspects d'usages différents ont pu être identifiés. De nombreux utilisateurs y ont vu, grâce au réalisme du photomaillage, un potentiel pour l'analyse de la ville existante d'un point de vue réglementaire. La possibilité de rajouter des informations telles que les couches du Plan Local d'Urbanisme (PLU) et de pouvoir les visualiser en 3D pourrait par exemple servir d'aide à la délivrance d'un permis de construire. La végétation est également bien visible : pouvoir se représenter la hauteur et l'envergure d'un arbre ainsi que son appartenance dans le paysage de la zone concernée permettrait souvent d'éviter une visite sur le terrain. A l'inverse, d'autres utilisateurs ont fait ressortir le potentiel de planification de l'application : introduire des projets futurs au sein du photomaillage et projeter les ombres futures de celui-ci représente un réel avantage pour l'aménagement du territoire. Certaines de ces fonctionnalités sont déjà mises en œuvre avec d'autres logiciels, comme par exemple InfraWorks 360. En effet, le service GCT avec son unité de projet SIG3D proposait déjà la possibilité aux agents d'insérer leurs futurs projets au sein de la maquette 3D. La réelle plus-value ici est l'accessibilité simplifiée (*i.e.* sans aucune installation préalable) de cette plateforme sur internet et la rapidité de production de tels scénarios, garantissant une certaine autonomie pour l'utilisateur sans nécessiter de formation lourde.

3. Comparaison des techniques et maquette de l'application

3.1 Etude des différentes techniques

En parallèle à ces rencontres s'est effectué un état de l'art et une comparaison des techniques de webmapping 3D. Les besoins identifiés ont en effet permis d'avoir un cahier des charges de ce que cette technique devrait permettre de faire afin d'être adaptée au projet. Très rapidement, il a été possible de classer ces technologies en deux catégories :

- Les logiciels prêts à l'emploi payants. On peut alors simplement fournir la donnée pour obtenir une application de webmapping 3D avec des outils préexistants. Certains de ces logiciels disposent toutefois d'une *Application Programming Interface* (API), permettant de rajouter des outils personnalisés ;
- Les bibliothèques (souvent *opensource*) constituées uniquement d'une API, c'est-à-dire d'un ensemble de fonctions permettant la visualisation 3D et d'autres outils liés à la même thématique. Rien n'est préexistant : il faut coder entièrement l'application, depuis son interface jusqu'aux outils à intégrer.

On peut alors lister les différentes techniques de webmapping 3D analysées :

Logiciels	Bibliothèques
Terra Explorer for Web	Cesium
VirtualCityMAP	iTowns
ESRI 3D Scene Viewer	X3DOM
F4map	Threejs
CityPlanner Online	Nasa Web World Wind
Unity (export web)	GIScene
	OSG.js

Tableau 1 : Logiciels et bibliothèques de webmapping 3D étudiés

En gras sont représentées les techniques qui ont particulièrement retenu notre attention. Parmi les bibliothèques *opensource*, Cesium est très vite apparue comme la plus complète et la plus performante en termes d'aménagement du territoire. De plus, elle dispose d'une communauté d'utilisateurs et de développeurs très actifs qui postent régulièrement de nouveaux exemples et tutoriels. TerraExplorer for Web est un logiciel développé par la société américaine Skyline et qui est basé sur la bibliothèque Cesium, tout comme VirtualCity Map, développé par la société berlinoise VirtualCity Systems. Ces logiciels présentent tous les deux des fonctionnalités intéressantes, avec un grand nombre d'outils pré-intégrés ainsi qu'une API qui permettrait de développer de nouveaux outils. Le coût d'une licence s'élève à environ 15 000€, auxquels s'ajoutent les frais de maintenance annuels et la formation du personnel à son utilisation. Cependant, ces solutions proposent généralement leur propre service d'hébergement des données ; dans le cas de l'EMS, ceci est déjà prévu sur leurs

serveurs internes et déplacer ces données n'est pas envisagé au vu de leur poids (supérieur à 500Go) et du surcoût que cela engendrerait. Contrairement aux solutions *opensource*, le risque est que ces logiciels se rapprochent plus d'un service prestataire avec une direction bien définie (planification territoriale ou analyse de l'existant), produisant alors un site sans possibilité complète d'évolution et ne permettant pas de garantir la pérennité de l'application. Nous étions aussi convaincus que Cesium présentait les fonctionnalités les plus prometteuses, les plus adaptables et les plus évolutives ; c'est pour cette raison que nous avons convenu que les développements se feraient à partir de cette bibliothèque pour ce PFE. Les solutions telles que TerraExplorer for Web et VirtualCity Map restent néanmoins envisagées dans un futur dépassant le cadre de ce PFE dans le cas où le développement des besoins concernant les usages de la 3D au sein de l'EMS permettrait de justifier la mise en place d'un tel dispositif.

3.2 Maquette de l'application

Au vu des besoins exprimés par les différents acteurs et des différents potentiels observés par ceux-ci, le but était de créer une application agile, adaptable à tous ces utilisateurs variés et facilement administrable. Le projet pouvait selon nous prendre plusieurs directions possibles : soit une seule application était réalisée, comportant la totalité des couches, soit plusieurs applications étaient créées. Dans le cas d'applications multiples, on aurait alors à nouveau le choix de publier des applications personnelles (comportant uniquement les couches de données demandées individuellement), ou alors des applications thématiques, comportant chacune les données relatives à un thème cohérent (PLU ou écologie du territoire par exemple). Cependant, les deux cas comportent des inconvénients importants : créer plusieurs applications est peu pérenne, dans le sens où une nouvelle version devrait être créée pour chaque nouvel utilisateur ou nouveau thème, complexifiant la tâche pour l'utilisateur qui souhaiterait visualiser des données de deux thèmes différents. Le projet est également destiné à être publié sur les serveurs de l'EMS pour proposer une version bureau aux agents : conserver plusieurs applications pose alors des problèmes en termes de déploiement. Rapidement, il a donc été convenu de ne développer qu'une seule application. Puisqu'inclure toutes les couches aurait risqué de perdre l'utilisateur et de ralentir l'application ; notre choix a été de concevoir une application vide où les onglets de données thématiques sont visibles mais ne contiennent pas de données. Chaque utilisateur peut alors charger ses couches à l'aide d'une configuration personnalisée, qui affichera les couches disponibles sous chaque onglet thématique. L'utilisateur a également la possibilité d'importer des couches de données sans qu'elles soient intégrées directement à l'application ; elles se placeront alors sous l'onglet « Mes couches ». Bien que cette option nécessite elle aussi la création d'un fichier de configuration pour chaque nouvel utilisateur, il est prévu une configuration « par défaut » qui affiche les couches de données les plus demandées, permettant à l'utilisateur de commencer à travailler le temps que ce fichier soit créé.



Figure 1 : Présentation du fonctionnement du menu de l'application

4. Développement des fonctionnalités

L'application charge par défaut le photomaillage réalisé en août 2018. Afin de lui laisser la plus grande place possible à l'écran, notre premier choix a été de mettre en place un menu déroulant qui peut être caché par l'utilisateur. Ensuite, les boutons à droite de ce menu représentent la boîte à outils de l'application. Ils permettent alors de réaliser des fonctionnalités de base, qui avaient été exprimées pour la plupart lors des rencontres avec les différents acteurs.

Actuellement, l'utilisateur a accès aux outils suivants :

- Effectuer des mesures de coordonnées, de distances et de surfaces ;
- Réaliser des dessins de points, lignes, surfaces et volumes ;
- Ajouter un plan de coupe horizontal ;
- Effectuer une découpe dans le photomailage ;
- Afficher les ombres projetées (en choisissant le jour et l'heure) ;
- Se localiser par adresse ;
- Enregistrer des points de vue de caméra ;
- Partager la scène à un autre utilisateur en sauvegardant le zoom.

Voici un exemple d'utilisation de ces outils : l'utilisateur a chargé le modèle 3D du bâtiment à l'aide de l'ajout de couche interactif. Afin de mieux visualiser son projet, il découpe le photomailage à l'endroit concerné afin d'enlever les bâtiments existants et affiche les ombres pour visualiser l'insertion de son projet au sein du quartier. Il dessine ensuite un nouveau bâtiment de 30m de haut sous la forme d'un volume simple, et fait apparaître un plan horizontal à cette hauteur pour avoir une comparaison avec le quartier existant. Il peut également faire apparaître les axes de circulation principaux de la zone et mettre en valeur certains points.



Figure 2 : Illustration des fonctionnalités de dessin et d'affichage de couches de données

5. Conclusion et perspectives

Ce PFE s'inscrit dans la démarche de développement des usages de la 3D actuellement en cours à l'Eurométropole de Strasbourg. Dans un premier temps, ce projet aura permis de faire ressortir des besoins en termes de webmapping 3D chez différents acteurs de l'aménagement du territoire. Le développement d'une application en ligne à partir de la bibliothèque *opensource* Cesium a ensuite constitué la plus grande partie du travail réalisé, avec un nombre d'outils et de fonctionnalités qui permettent déjà de répondre à une partie de ces besoins. Cependant, ces outils ont vocation à être encore enrichis (voir mémoire de fin d'études), et il sera indispensable de les faire évoluer à l'avenir dans un cadre dépassant celui fixé pour ce PFE. Enfin, afin d'assurer la pérennité d'une telle application, un grand soin devra être apporté à la rédaction d'une documentation du code, ainsi qu'à la rédaction de notices pour les futurs utilisateurs. Bien que l'application soit destinée à un usage interne, le développement est *opensource* (code disponible sur la plateforme GitHub) et l'EMS envisage de publier une version grand public.

Étude d'un moyen de visualisation et d'exploitation des données 3D couvrant les parois d'une grotte ornée

PFE présenté par : **Brice LAVERGNE**
Société d'accueil : **FUGRO SAS**
Directeur de PFE : **Bertrand CHAZALY**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**



1. Contexte : la grotte Cosquer

La grotte ornée qui fait l'objet de notre étude est la grotte Cosquer, située dans les calanques de Marseille en France. Sa grande particularité est son accès, ne pouvant se faire qu'en plongeant à 36 mètres de profondeur et en s'enfonçant dans un couloir étroit long de 175m (figure 1), ce qui la rend quasi infranchissable. Elle est découverte par hasard en 1985 par le plongeur Henri COSQUER. En 1991, la grotte est classée monument historique, après s'être rendu compte qu'elle abritait des trésors d'art pariétal entièrement conservés. Les peintures représentées dans Cosquer sont associées à l'époque du paléolithique supérieur (Homo Sapiens), et on estime que les œuvres ont été peintes à deux périodes distinctes, remontant à environ 27 000 et 19 000 ans.

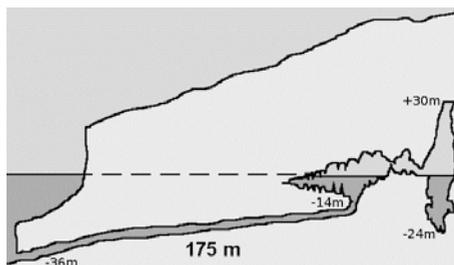


Figure 1 : Accès à la grotte Cosquer

Depuis environ dix ans, des nouvelles campagnes photogrammétriques et lasergrammétriques sont régulièrement programmées dans la grotte, avec des outils bien plus performants que dans les années 90. Ces mesures se font dans le but d'analyser en détail les œuvres que renferme Cosquer. Il est nécessaire de conserver cet art pariétal unique, malheureusement menacé par le niveau de la mer montant. Le ministère de la Culture souhaite également que Cosquer jouisse d'une plus grande renommée, car elle est encore trop peu connue du grand public aujourd'hui.

2. Objectifs du sujet

Des données photogrammétriques et essentiellement lasergrammétriques ont déjà été acquises en grand nombre lors des campagnes de mesures dans la grotte. Celles-ci ont déjà été rattachées au système de coordonnées Lambert 93 CC44, et on estime que le positionnement de la grotte est précis à plus ou moins 1m en planimétrie. Il convient d'abord d'étudier et de traiter ces données brutes, pour pouvoir ensuite les exploiter, les conserver et enfin les diffuser. Nous détaillerons dans le prochain point les différentes étapes de post-traitement : le tri des nuages par secteur, la segmentation, le rééchantillonnage, puis le maillage et le texturage. Chaque étape a son importance dans le processus qui va permettre d'exploiter au mieux les données.

La phase d'exploitation a pour but de mettre en valeur les principaux groupements d'œuvres, que nous avons géolocalisés au sein de la grotte. Pour interpréter au mieux ces peintures, nous avons travaillé sur la différence de hauteur entre plafond et sol en tout point de la grotte. Connaître le relief particulier de Cosquer permet par exemple de savoir à quelle hauteur chaque œuvre a été peinte, ou encore d'identifier les endroits à préserver en priorité. En effet, le but de ce PFE est également de mettre l'accent sur la conservation de la grotte en danger. L'eau salée a déjà commencé à ronger les œuvres situées au ras de l'eau, il est donc nécessaire de trouver rapidement des solutions pour sauvegarder ce patrimoine unique.

Le dernier grand objectif de notre étude est la diffusion de ces données à deux types d'utilisateurs. D'une part aux experts dans le domaine (topographes, archéologues, conservateurs) en utilisant des logiciels adaptés à leurs besoins et permettant d'exploiter davantage les données. D'autre part, nous travaillons sur un « moyen de visualisation » pour diffuser nos travaux au grand public. Nous veillons pour cela à choisir un support interactif simple d'utilisation, qui permettra à un utilisateur lambda de découvrir les principales œuvres de la grotte et de s'y repérer.

3. Post-traitement des données

La grotte étant divisée en 18 secteurs (figure 2), il a d'abord fallu déterminer un nuage de points global par zone. Les nuages bruts sont associés à une position de scan géoréférencée qui couvre un petit ensemble. En s'aidant du plan d'ensemble de la grotte indiquant ces positions, la première manipulation a été de déterminer sur le logiciel Faro Scene quelles positions étaient à assembler pour un secteur donné. Nous avons d'abord trié les nuages bruts dans des répertoires associés aux secteurs, et les avons exportés en fichier E57. C'est le principal format des nuages de points, facilement exploitable par les autres logiciels de post-traitement comme CloudCompare ou 3D Reshaper.

L'assemblage de ces nuages s'est ensuite fait grâce à l'outil « Merge » du logiciel CloudCompare. Pour découper la partie du nuage qui correspond réellement au périmètre du secteur, nous pouvons utiliser l'outil de segmentation également disponible sur ce logiciel. Nous affichons le nuage de points fusionné en vue du dessus, et en s'aidant du plan d'ensemble, nous pouvons découper grossièrement la partie correspondante au secteur. Pour pouvoir par la suite créer un nuage global de la grotte, il faut veiller à garder une zone de recouvrement en bordure de secteur lors du découpage. Il est également nécessaire de rééchantillonner le nuage fusionné et segmenté pour obtenir partout la même densité de points. Le principal paramètre à déterminer pour utiliser ce dernier outil est le pas entre chaque point. Nous avons choisi de sauvegarder des fichiers avec deux pas différents. Le premier à 2mm, qui permet d'obtenir un nuage encore très dense avec peu d'information perdue. Le deuxième rééchantillonnage à 5mm permet d'enregistrer des fichiers moins complets avec plus d'écart entre les points, mais considérablement plus légers. La sauvegarde de ces 36 nouveaux nuages de points (deux rééchantillonnages différents par secteur) s'est constamment opérée sous deux formats de fichiers : le format de nuage E57 et un format texte où les coordonnées de chaque point sont stockées dans différentes colonnes.

Pour un rendu 3D plus réaliste de la grotte, l'étape du maillage d'un nuage de points est indispensable. Nous l'avons réalisée sous le logiciel 3D Reshaper, pour des parties de secteurs ou dans leur totalité. On utilise pour les parois de la grotte la modélisation par maillage car sa géométrie est relativement complexe. La finalité de cette technique est une surface reliant les différents points du nuage, se voulant la plus représentative de la réalité possible. Comme pour le rééchantillonnage, le maillage s'opère avec un pas entre chaque point. Nous avons testé plusieurs pas et analysé ensuite le rendu. Un pas égal à celui du rééchantillonnage n'est pas la solution adaptée : aux endroits où la densité de points n'est pas maximale, de gros trous sont à constater, ce qui ne permet pas de distinguer correctement la structure de la grotte. Il faut également veiller à ne pas choisir un pas trop grand, ce qui rend la surface sans trous mais trop grossière et imprécise. Le juste pas à choisir est égal à 2 à 3 fois celui choisi lors du rééchantillonnage. Cependant, la solution finale dépend grandement de l'ampleur de la structure à mailler : un secteur entier n'est pas aussi simple à mailler qu'une petite partie de secteur où est concentré un groupement d'œuvres. Le mieux est de tester plusieurs pas sur 3D Reshaper pour



Figure 2 : Configuration et répartition en secteurs

décider celui qui offre un meilleur rendu. Il faut savoir que ce même logiciel propose des outils permettant d'abord de combler les trous puis ensuite de lisser le maillage, qui sont intéressants à utiliser pour améliorer le résultat final.

Pour que l'impression d'avoir la grotte devant nos yeux soit encore plus vraie, il est intéressant de recouvrir le maillage d'une texture réaliste obtenue à partir d'images numériques : on parlera alors de modèle "photo-réaliste". C'est lors de cette étape que les données photogrammétriques acquises par le scanner vont se révéler très utiles. Chaque photo a été prise depuis une station de scan en mode panoramique et est donc géoréférencée. Le texturage des maillages peut se faire grâce à un traitement que propose le logiciel PhotoScan. Il faut d'abord modifier la structure interne du code (fichier doc) d'un projet, en indiquant la matrice de calage finale composée de 12 paramètres. Nous les avons calculés sur Excel grâce aux trois matrices de rotation issues des paramètres PhotoScan pour chaque photo et en prenant en compte la rotation du panorama sphérique. Une fois le fichier doc modifié, les images numériques vont se caler au bon endroit dans le projet. Il ne reste plus qu'à lancer l'outil de texturage pour que les photos se retrouvent projetées sur le maillage en quelques dizaines de secondes.

4. Exploitation et conservation des données

Notre étude s'est concentrée sur les parties de la grotte où l'art est le plus condensé, et notre choix s'est finalement porté sur six groupements d'œuvres : le panneau des chevaux, la paroi des mains rouges, la zone des pingouins, la faille des bisons, la zone du grand cerf et la draperie des mains noires. Chaque groupement compte deux à six œuvres et tous sont situés à des endroits différents de la grotte.

Certaines œuvres sont directement menacées par la montée des eaux : c'est notamment le cas pour la représentation de deux chevaux (*figure 3*) qui ont déjà été partiellement rongés par le sel. Les différentes campagnes photogrammétriques permettent de se rendre compte de l'évolution du niveau de l'eau montant et 3D Reshaper permet de dessiner des objets pour prévenir les risques. En calculant l'intersection entre notre modèle maillé et un plan avec une altitude Z fixée (correspondant au niveau maximum de l'eau), nous avons tracé la ligne en-dessous de laquelle les œuvres sont en grand danger de disparition. Cela peut permettre de classer les œuvres à conserver prioritairement, de calculer la surface d'art à préserver et enfin d'analyser les futures conséquences de la montée des eaux.

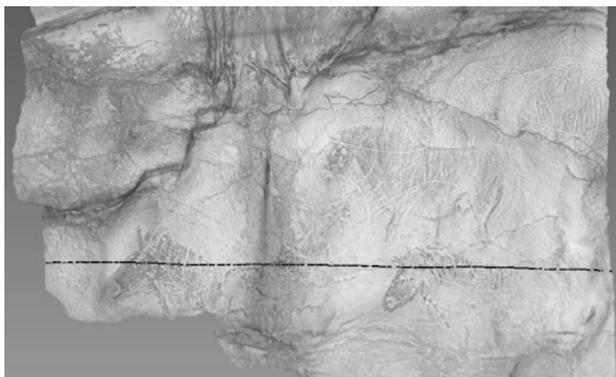


Figure 3 : Modèle maillé et texturé du panneau des chevaux avec ligne de la montée des eaux

Pour géolocaliser l'art pariétal, nous avons procédé de la même façon à chaque fois : après avoir repéré le secteur dans lequel les œuvres se trouvent, il convient d'abord de segmenter un nouveau nuage de points en se concentrant exclusivement sur celles-ci. Les étapes décrites précédemment (maillage et texturage) sont ensuite appliquées à ce nouveau nuage. Une fois le modèle maillé et texturé importé sur 3D Reshaper, il est possible de dessiner l'œuvre d'art souhaitée en suivant les contours de la peinture ou de la gravure. Quand la polyligne est tracée, le logiciel crée automatiquement une boîte englobante, permettant d'afficher les coordonnées minimales et maximales en X, Y et Z et donc de connaître l'emprise 3D de l'œuvre. Nous avons répertorié toutes ces données dans un tableau Excel, et créé une colonne « centre de l'œuvre » pour pouvoir toutes les localiser dans la grotte grâce à un seul point. La création de plans moyens pour chaque œuvre et chaque groupement est également nécessaire pour l'étape de diffusion des données où l'on va définir des points de vue, qui permettront de se retrouver directement face à l'œuvre et à une distance optimale de celle-ci.

Une autre particularité de Cosquer est son relief très variable d'un bout à l'autre de la grotte, qui mérite d'être analysé. Le but était de réaliser une carte indiquant la hauteur sous plafond pour toute position de la grotte en planimétrie. L'altitude Z de chaque point étant connue, la méthode imaginée pour concevoir la carte a été de travailler sur la différence de hauteur maximale pour chaque position en utilisant la relation $Z_{\max} - Z_{\min}$. Nous avons procédé secteur par secteur, et avons utilisé Excel qui permet de traiter une grande quantité de données et de travailler avec des tableaux croisés dynamiques. Une fois le fichier de points importé, les coordonnées X et Y sont concaténées et arrondies à 5cm pour réduire le nombre de données. Excel permet à la fin de la manipulation d'afficher un tableau ayant la structure d'un repère orthonormé. Il est alors possible d'afficher les différences de hauteur selon un dégradé de couleurs pour se rendre compte du dénivelé.

Cette analyse des différences de hauteur permettra sans doute à un visiteur virtuel de mieux appréhender la structure de la grotte. Elle peut aussi servir à une étude plus approfondie des œuvres, notamment pour les archéologues qui pourront déterminer la position la plus probable du peintre.

5. Diffusion des données et perspectives

3D Reshaper est le logiciel que nous avons majoritairement utilisé lors de notre étude. Il est relativement simple d'utilisation, bien qu'il soit avant tout conçu pour des topographes et autres experts de la 3D. Il présente la particularité de pouvoir configurer des vues et de les enregistrer, permettant de se retrouver face à une œuvre en un clic. Deux paramètres sont nécessaires pour cela : définir un point de vue et une direction. En intégrant dans un même projet tous les groupements d'œuvres, il est possible de se promener à travers la grotte d'un simple clic pour se retrouver face à une œuvre. L'utilisateur est libre de faire apparaître à l'écran ce qui lui convient entre le nuage de points, le modèle maillé brut ou texturé.

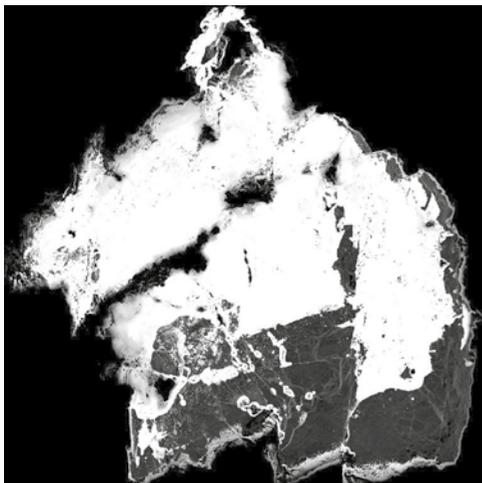


Figure 4 : Contour de la grotte et différences de hauteur

possible de se promener à travers la grotte d'un simple clic pour se retrouver face à une œuvre. L'utilisateur est libre de faire apparaître à l'écran ce qui lui convient entre le nuage de points, le modèle maillé brut ou texturé.

L'intégration des données dans un logiciel de SIG est également un bon moyen de visualisation pour les topographes. Nous avons exporté les fichiers Excel des différences de hauteur en fichier ASCII .txt, qui sont lisibles sur ArcGIS ou QGIS. Nous avons utilisé ArcMap pour convertir nos fichiers textes assemblés en raster, puis en image JPEG (figure 4). L'importation de ce dernier type de fichier sur AutoCAD a permis de connaître plus en détail le périmètre de la grotte que nous avons donc retracé. En utilisant la même coupe horizontale, nous avons également indiqué sur AutoCAD la position planimétrique du centre de chaque œuvre ainsi que le périmètre des groupements, pour pouvoir les situer facilement. En réexportant les fichiers .dwg dans le SIG, nous pouvons facilement jongler entre différentes couches de visualisation, selon ce que l'utilisateur souhaite voir apparaître.

Il reste à trouver un moyen simple de naviguer entre toutes ces données pour un utilisateur non expert en topographie et ne disposant pas des logiciels associés. 3D Reshaper permet de créer des vidéos où l'on visite la grotte d'œuvre en œuvre, constituant un rendu idéal pour les enfants par exemple. Il est ensuite possible de les exporter et de réaliser un montage vidéo où l'on intégrera des commentaires sur les œuvres, pour qu'il puisse être finalement visionné par le grand public. PowerPoint est également un outil intéressant et à la portée de tous qui pourrait permettre de se promener avec une liberté totale entre les diapositives, grâce à des hyperliens cachés sous la représentation des données. Il nous reste donc à creuser ces pistes pour permettre une visite interactive et didactique de la grotte Cosquer, avec des informations et des interprétations archéologiques sur chaque œuvre. Cette visite au choix virtuelle ou interactive se veut la plus simple possible, pour que quiconque souhaitant découvrir Cosquer puisse enfin percer les secrets d'une grotte encore trop peu connue aujourd'hui.

Apports de l'imagerie satellitaire pour caractériser les évolutions morphologiques de l'embouchure du Tage

PFE présenté par : **Anne Jaouen**
 Société d'accueil : **Laboratoire Littoral, Environnement et Sociétés UMR 7266, Equipe Dynamique Physique du Littoral**
 Directeur de PFE : **M.Xavier Bertin**
 Correcteur : **M.Gilbert Ferhat**



I- Contexte

L'embouchure du Tage représente des enjeux socio-économiques considérables et fait face à des problèmes classiques des environnements d'embouchures, comme l'érosion des littoraux adjacents, la submersion des zones basses du littoral ou le maintien de voies de navigation. Plus particulièrement, le village de Segundo Torrão, situé le long de la rive gauche de l'embouchure du Tage, subit d'importants problèmes d'érosion et de submersion, pour lesquels les autorités locales ne parviennent pas à apporter de solutions adaptées.

Dans le cadre du programme "Nouveaux commanditaires", la fondation de France finance le projet de recherche intitulé "Segundo Torrão" incluant le LIENSS et lancé à l'initiative des résidents du village. Afin de comprendre la dynamique hydro-sédimentaire de l'embouchure, il est nécessaire de connaître au mieux les évolutions morphologiques des fonds. L'objet de ce Projet de Fin d'Etudes est d'étudier la possibilité d'obtenir des informations bathymétriques à partir d'images satellitaires Sentinel et Landsat pour suivre les évolutions morphologiques de l'embouchure du Tage depuis les années 1980.

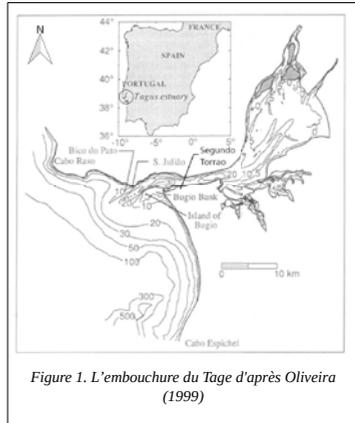


Figure 1. L'embouchure du Tage d'après Oliveira (1999)

II- Etat de l'Art

L'obtention de données bathymétriques à partir de comptes numériques a fait l'objet d'études déjà anciennes, notamment à partir de photos aériennes. Le modèle de référence de la relation entre comptes et hauteur d'eau a été proposé par Lyzenga en 1978. Cette relation utilise la différence de luminances entre des eaux profondes et des eaux à fond visible clair. Cette différence fait intervenir trois phénomènes : l'absorption, la rétrodiffusion et la réflexion. L'absorption est décrite par la loi de Beer-Lambert.

En eau profonde, la lumière sortant de la surface provient de la rétrodiffusion de la luminance sur toute la colonne d'eau. En eau peu profonde, cette rétrodiffusion est arrêtée au niveau du fond et la lumière est réfléchi vers la surface. Le modèle le plus utilisé amène la formule :

$$h = \frac{1}{2k} \times \left(\ln \left(\frac{1}{\pi} \times \rho - r_{rs}^D \right) - \ln \left(r_{rs} - r_{rs}^D \right) \right)$$

où :

- ρ est l'albédo du fond
- r_{rs}^D est la réflectance juste sous la surface en eaux profondes
- r_{rs} est la réflectance juste sous la surface
- h est la hauteur d'eau
- k est le coefficient d'atténuation verticale de la lumière.

En pratique, après obtention des grandeurs ρ et r_{rs}^D , le coefficient k est obtenu par la méthode des moindres carrés. Ce modèle suppose l'homogénéité des propriétés optiques de l'eau sur l'étendue de la zone d'étude et en profondeur. Dans ces conditions, la méthode est présumée donner des résultats satisfaisants. Elle peut prendre deux aspects : une inversion synchrone qui étend les résultats dans l'espace, une inversion diachrone qui les étend dans le temps.

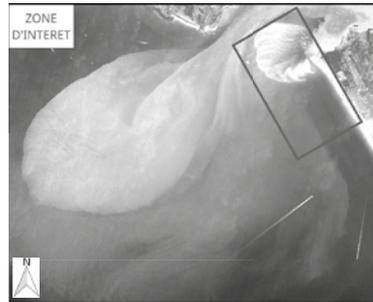
III- Inadéquation de la méthode semi-analytique à la situation d'étude

Les méthodes d'inversion reposent sur des calages bathymétriques (LIDAR, sondeurs monofaisceaux et multifaisceaux) et des images non perturbées contemporaines de ces mesures. Les méthodes semi-analytiques supposent encore la connaissance préalable de données physiques.

Ici, seuls des relevés bathymétriques sont disponibles et sur quelques années de la période 2007-2017. L'étude imposant de travailler dans le passé, il n'est pas possible de compléter le jeu de données existant par des données *in situ* utilisées par les méthodes semi-analytiques (Lafon 2002, Dehouck 2014 par exemple) : relevés bathymétriques, mesure de réflectances juste sous la surface, mesure d'albédos.

Enfin, l'estuaire est une zone d'eau océanique mêlée aux eaux turbides du Tage. Elle sort de l'hypothèse des propriétés optiques de l'eau **homogènes**. Le panache de turbidité varie quotidiennement dans l'embouchure.

Le défi de cette étude est donc d'adapter une méthode d'inversion à l'environnement de l'estuaire et ce, en utilisant les données historiques.



Echelle 1:70 000 - Embouchure du Tage - scène Sentinel 2 B3 du 1-12-17

Figure 2. Les eaux de l'embouchure n'ont pas des propriétés optiques homogènes

IV- Travaux effectués

Après une étude exploratoire consistant à la représentation et à l'étude des très nombreuses scènes dont nous disposons, nous avons pu fixer une zone de calage. Nous avons entrepris une recherche d'estimation de la luminance en eau profonde qui conduit à exposer un premier résultat.

L'obtention de cette grandeur notée c est basée sur la linéarisation de la relation entre la hauteur d'eau et la quantité $\ln(CN - c)$ où CN représente le compte numérique d'un pixel. Obtenue par dichotomie, c est alors la valeur qui maximise le coefficient de détermination. Nous avons à ce moment dû introduire une méthode raisonnée de troncature des nuages.

Nous avons poursuivi par la recherche de méthodes d'inversion diachrones par transfert des paramètres depuis des scènes disposant de relevés bathymétriques contemporains vers les scènes à inverser. Cela a abouti à exposer trois procédés : l'inversion par caractéristiques moyennes, l'inversion par rapprochement de scènes et l'inversion par égalisation d'histogrammes.

Nous avons enfin présenté une méthode d'inversion synchrone qui est exposée dans la suite.

En dernier lieu, une étude sur la zone d'intérêt du Bugio concernant le déplacement d'un banc de sable a été effectuée.

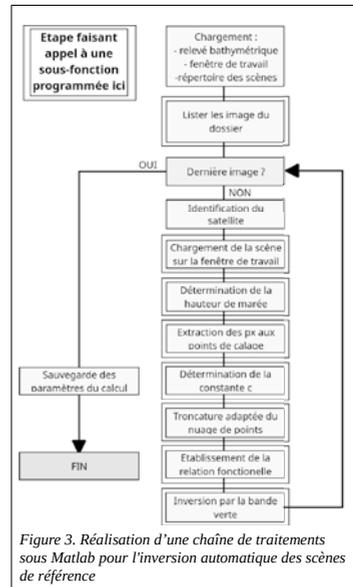


Figure 3. Réalisation d'une chaîne de traitements sous Matlab pour l'inversion automatique des scènes de référence

Il s'agit de déterminer empiriquement une équation d'inversion à partir uniquement des caractéristiques de la scène à inverser. Classiquement, ces paramètres sont au nombre de trois : a, b et c. Nous utilisons la forme du modèle semi-analytique mais nous ne cherchons pas à attribuer une valeur physique aux paramètres a, b et c. Il s'agit empiriquement de déterminer la meilleure formule d'inversion possible sur la zone de calage d'une scène.

$$h = a \times \ln(CN - c) + b$$

Nous introduisons une hypothèse supplémentaire de constance de la cote à -5m (par rapport au zéro hydrographique de Cascais), hypothèse tenable au vu des bathymétries connues.

La hauteur de marée étant issue du marégraphe de Cascais, nous pouvons calculer h et la valeur de compte numérique associée à cette profondeur, ce qui fournit une équation.

Nous avons établi une relation liant les hauteurs d'eau, les comptes à ces diverses profondeurs et les coefficients c estimés par la méthode exposée ci-dessus. En utilisant les points précédents, nous pouvons maintenant obtenir le coefficient c sans connaître la bathymétrie.

L'étude exploratoire des données nous amène à construire les histogrammes des comptes dans une zone englobant zone intertidale et sable sec. Nous conjecturons et vérifions expérimentalement que le premier minimum relatif (hors borne) de cet histogramme est associé à une profondeur nulle. Nous obtenons la seconde équation.

Nous pouvons donc proposer une méthode jamais rencontrée dans la bibliographie qui résoudrait les difficultés pré-citées.

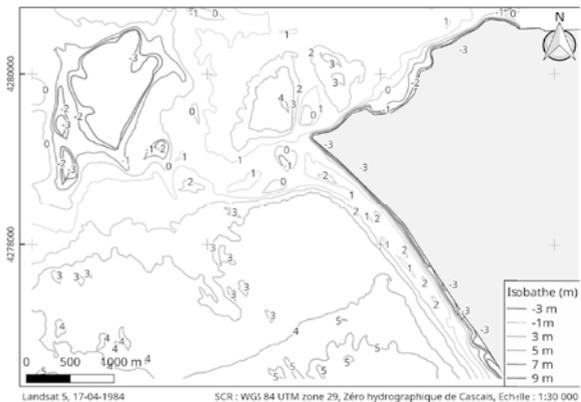
V- Validation et discussion de la méthode d'inversion synchrone

L'inexactitude est liée essentiellement aux écarts entre les hauteurs mesurées au marégraphe de Cascais et celles du site d'étude. Nous l'évaluons de l'ordre du décimètre. Elle n'est pas contrôlable dans le cadre de l'étude.

Il est apparu tout au long de cette étude que seules quelques scènes contemporaines de calages atteignaient une précision suffisante dans le contexte de l'étude. Par exemple, un coefficient de corrélation de 0,98 conduit à un EMQ de 0,40 m. Or nous validons en comparant la bathymétrie obtenue par mesure et celle obtenue par inversion de la scène comme si nous n'avions pas de bathymétrie. Les résultats obtenus trop peu nombreux n'ont pas de solidité statistique. A ce stade, c'est l'utilisateur qui déterminera si un modèle apporte une information intéressante. Cette limitation tient en partie à la nature du site, un estuaire.

La détermination de la constante c à l'aide des comptes relevés à différentes profondeurs est assez sûre : elle fournit une valeur réaliste, surtout déterminée très localement, c'est-à-dire à partir de la zone de calage, là où les autres méthodes de la bibliographie s'éloignent du site. Cela conduit en estuaire à des propriétés optiques très différentes.

Bien sûr, il serait souhaitable de consolider cette méthode par une analyse plus approfondie et contrôlée par acquisitions ultérieures.



VI – Une exploitation des images satellites : la mobilité du banc du Bugio

L'isobarycentre du banc du Bugio a été établi tous les cinq ans depuis 1984 à partir des lignes de niveau calculées. On voit sur la figure 5 la migration vers l'Est de ce banc, puis l'apparition d'un banc secondaire à l'Ouest, au niveau du phare du Bugio.

Le calcul des coordonnées du barycentre permet d'évaluer la vitesse d'évolution. Des phases de déplacements brutaux et de sur-place alternent, concordant avec les observations de Lira et Taborda (2014).

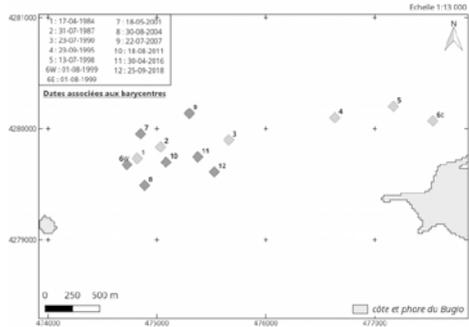


Figure 5. Positions de l'isobarycentre du banc du Bugio dans le temps

Conclusion

L'objectif principal de ce stage est l'étude de l'évolution de la morphologie de l'embouchure du Tage par inversion de la bande verte.

Dans un premier temps, il s'est agi d'établir la relation fonctionnelle entre les comptes numériques satellitaires et les profondeurs issues de relevés bathymétriques. Il apparaît que les coefficients caractéristiques obtenus à chaque date ne décrivent le plus souvent qu'une partie de la dispersion obtenue sur les comptes numériques et sont très variables dans le temps.

L'imprécision constatée le plus souvent, est attribuée à l'éloignement de l'hypothèse d'homogénéité spatiale des propriétés optiques de l'eau. La variabilité des paramètres entre scènes est attribuée aux variations de la turbidité dans le temps.

A quelques dates seulement, les coefficients de détermination indiquent une précision acceptable pour le projet d'étude.

Dans un second temps, il s'est agi de réaliser l'inversion :

En l'absence de méthode existante connue, l'orientation du stage s'est infléchi vers la recherche de méthodes alternatives.

Une méthode synchrone est proposée qui est assez réaliste pour proposer des bathymétries.

Quelques orientations permettraient d'améliorer cette méthode, elles portent sur la sélection des images à inverser et permettraient entre autres une meilleure réalisation des hypothèses. Par ailleurs, toute information d'origine analytique peut contribuer à améliorer la méthode. Un progrès serait d'avoir des connaissances plus précises sur la turbidité.

En conclusion, la méthode peut être utile comme complément d'une analyse visuelle ou d'une étude préalable. Elle est en pratique une méthode auxiliaire, ce qui est bien sa fonction dans le cadre du projet "Segundo Torrao".

Cette étude s'inscrit enfin dans la recherche de techniques peu onéreuses accessibles aux autorités du littoral, l'augmentation du niveau des mers, de la fréquence des phénomènes "exceptionnels", des populations côtières induisant une demande croissante du suivi du littoral.

REFERENCES

- OLIVEIRA, E. M., FORTUNATO, A. B., FORTES, C. J. E. M., *et al.* Protecção do Farol do Bugio contra a Acção de Ondas e Correntes. 1999.
- LAFON, V., FROIDEFOND, J. M., LAHET, F., *et al.* SPOT shallow water bathymetry of a moderately turbid tidal inlet based on field measurements. *Remote sensing of Environment*, 2002, vol. 81, no 1, p. 136-148.
- LIRA, Cristina et TABORDA, Rui. Advances in applied remote sensing to coastal environments using free satellite imagery. In : *Remote Sensing and Modeling*. Springer, Cham, 2014. p. 77-102.
- LYZENGA, David R. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied optics*, 1978, vol. 17, no 3, p. 379-383.

Estimation des déplacements relatifs de la surface du sol sur un réservoir de gaz sur la base d'une approche modifiée du traitement interférométrique des données Sentinel-1



PFE présenté par : **Verena Simon**
Société d'accueil : **Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**
Directeur(trice) de PFE : **Prof. Dr.-Ing. Hansjörg Kutterer**
Correcteurs(trices) : **Dr. Andreas Schenk, Dr. Malte Westerhaus**



1. Introduction

Débutées dans la première moitié du 20^{ème} siècle, les missions de capteur radar SAR ont démontrées leurs hautes performances dans l'étude de la surface de la terre et des océans. Le champ d'application de ces capteurs est très varié. Ils sont utilisés afin de mieux comprendre les catastrophes naturelles comme les éruptions volcaniques ou les tremblements de terre, d'étudier l'évolution des glaciers, de détecter des ruptures, de suivre des zones d'inondation, de détecter les pollutions en mer etc.

L'étude séparée des images radar ne donne que peu d'informations, seule la combinaison des images est exploitable. En combinant deux images radar, on parle d'un couple interférométrique ou d'un interférogramme, la méthode utilisée est l'interférométrie. L'interférométrie à base de Radar à Ouverture Synthétique (SAR) est une technique avec laquelle il est possible de déterminer les déplacements relatifs de la surface du sol avec une précision millimétrique à partir de deux images radar acquises à des dates différentes.

La technique de suivi des réflecteurs permanents, appelé Persistent Scatterer Interferometry (PSI) est une extension du SAR. Cette méthode permet de décrire précisément l'évolution dans le temps des déplacements de points à forte rétrodiffusion radar afin de mesurer les faibles déplacements de la surface du sol. Contrairement à l'interférométrie à base de Radar à Ouverture Synthétique, la technique du PSI est capable d'analyser des interférogrammes qui sont plus perturbés, avec des décorrélations plus grandes.

Pour cette étude, j'ai utilisé une troisième méthode afin de traiter les données de Sentinel-1. Cette technique, appelée « Multi-SBAS » a été développée par Schenk (2015) et est une variante de la méthode PSI. Au lieu de former des couples interférométriques avec une seule image, l'image maîtresse, cette nouvelle méthode d'analyse utilise aussi des interférogrammes contenant des images esclaves. De plus, cette méthode permet d'intégrer des données externes au traitement comme la température ou la pression afin de mieux estimer les déplacements de la surface du sol.

Ce PFE fait partie d'un projet ayant pour but de superviser des réservoirs de gaz. La variation de la pression dans une caverne est susceptible d'induire des déplacements de la surface du sol. Dans ce projet il s'agit donc de mesurer les déplacements non linéaires et de les mettre en contexte avec le remplissage et la vidange des réservoirs de gaz. L'utilisation des données Sentinel-1 doit faciliter la détermination des faibles déplacements grâce aux acquisitions tous les six jours. Comme données externes, j'ai utilisé la pression mesurée dans les réservoirs de gaz afin de mieux déterminer les déplacements relatifs de la surface.

2. Zone étudiée

Dans ce PFE, le traitement des données Sentinel-1 a été réalisé au-dessus d'un champ de cavernes à Epe, au nord du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie en Allemagne.

Une caverne est un réservoir de gaz naturel ou de pétrole située à une profondeur d'environ 1000m qui a été construite la plupart du temps dans un dôme de sel. La principale caractéristique du sel est sa viscosité : le sel change de forme en fonction de la pression, de la température et du temps. Ce

comportement de fluctuation du sel a pour conséquence que la taille de la caverne diminue au fil du temps, on dit qu'elle converge. La taille de la convergence dépend de la profondeur, de la géométrie et de l'environnement de la caverne. Le support stocké dans la caverne et son comportement de mouvement joue également un rôle essentiel. Les liquides ne peuvent se déplacer que lentement, les gaz peuvent être stockés et externalisés beaucoup plus rapidement. L'injection et le retrait du support modifient constamment le bilan de forces dans la caverne. L'injection du support de stockage augmente la pression dans la caverne, la différence entre la force interne et externe diminue et la convergence ralentit. Le support de stockage peut faire ralentir la convergence, mais pas l'arrêter. La pression dans la caverne est toujours fixée entre une pression minimale et maximale. La convergence de la caverne entraîne des mouvements d'affaissement à la surface. En raison de la grande profondeur des cavités d'environ 1000m, des grandes dolines se forment.

Ce travail est basé sur des images de la mission Sentinel-1 de l'Agence Spatiale Européenne (ASE). Les données Sentinel-1 sont libres d'accès et pourraient être récupérées sur le portail internet « Copernicus Open Access Hub ». Les images couvrent la période de février 2015 à décembre 2017, donc d'une durée de deux ans et dix mois. Pour cette période 78 images radar pouvaient être utilisées pour le traitement. Les enregistrements traités couvrent une superficie de 67 km x 76 km. L'analyse du mouvement de la surface du sol a été finalement limitée afin de minimiser le temps de calcul des programmes utilisés.

Pour ce travail, j'ai utilisé la méthode M-SBAS qui permet d'intégrer des données externes afin de mieux estimer les mouvements de la surface du sol. Comme paramètres externes, j'ai utilisé les différentes pressions dans les cavernes pendant la période d'évaluation de deux ans et dix mois. Le champ de cavernes à Epe comprend plus de 70 stockages individuels. Chaque caverne varie en profondeur et en volume total. Les données externes ont été fournies par un partenaire du projet. Elles ne sont pas présentes pour chaque caverne, mais ont été uniformisées. Pour le champ de caverne au total, il existe donc une courbe de pression, qui varie en fonction du temps. Les valeurs de la courbe de pression sont données en termes relatifs sous forme de jeu de pression en pourcentage. Un jeu de pression de 100% signifie que les cavernes sont remplies au maximum.

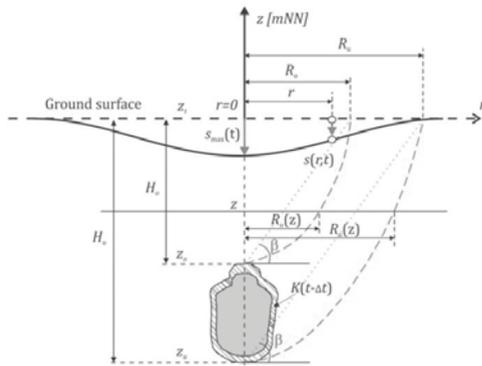


Figure 1 : Modélisation des déplacements de la surface au-dessus d'une caverne.

3. Traitement interférométrique

Le traitement a été réalisé avec deux programmes différents : j'ai d'abord utilisé SNAP pour générer des couples interférométriques et ensuite la technique M-SBAS pour l'estimation des déplacements relatifs finaux au-dessus du champ de cavernes.

Les images Sentinel-1 ont d'abord été traitées à l'aide du programme SNAP. SNAP, abréviation pour Sentinel Application Platform, est un logiciel de l'Agence Spatiale Européenne pour l'analyse des données de télédétection. Les différentes étapes du traitement sont présentées dans la figure 2. Les calculs avec SNAP ont conduit au prétraitement des images radar.

Dans les premières étapes, les images radar, composées de plusieurs sections, sont assemblées. Comme les images couvrent une surface de la terre beaucoup plus grande que nécessaire, elles sont adaptées à la zone d'étude. Le choix d'une image maîtresse appropriée est important pour la suite du traitement, surtout lors de la formation des interférogrammes, la coregistration et la sélection des points à forte rétrodiffusion radar. Le choix dépend de la décorrelation globale des interférogrammes maîtresse-esclave : une image est déclarée maîtresse, où la décorrelation de tous les interférogrammes est totale. L'enregistrement sous-pixel de deux images SAR est une condition élémentaire pour le traitement ultérieur. Pour la formation des couples interférométriques, les images

maîtrese-esclaves doivent être exactement superposées. Ensuite, les interférogrammes maîtrese-esclave sont formées à l'aide d'une multiplication complexe des deux images. Le géocodage à la fin du traitement permet de transformer les interférogrammes en passant des coordonnées radar à un système de coordonnées de référence géodésique.

La plus grande partie du temps, je me suis occupée de la programmation de la transition entre SNAP et M-SBAS. Les deux programmes n'ont jamais été utilisés ensemble, M-SBAS n'a jamais été exécuté sur des données Sentinel-1.

Une étape importante mais également la plus complexe de toutes les procédures PSI est l'estimation des composants de signal modélisables. M-SBAS est une méthode robuste pour une telle estimation. Le procédé décompose l'estimation des composantes du signal d'une phase, le mouvement de point, la hauteur de point et le mouvement lié à la pression en problèmes à un seul paramètre afin de minimiser les efforts de calcul. Dans cette approche, une sélection astucieuse d'interférogrammes est utilisée pour estimer les composantes du signal. Ainsi, la proportion de mouvements de la surface du sol induits par la pression est clairement visible.

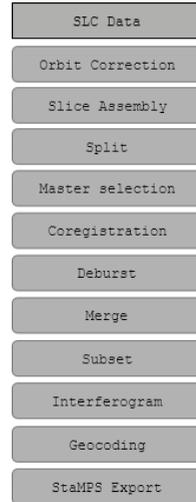


Figure 2 : Étapes de l'évaluation avec SNAP

4. Résultats et interprétations

L'évaluation avec M-SBAS a été effectuée sur une zone de la taille de 12,9 km x 12,5 km. Pour cette zone d'observation, environ 79 000 points à forte rétrodiffusion radar ont été identifiés. Après avoir réduit ce nombre de points, il restait environ 51 000 points fiables. Les mouvements de la surface du sol ne sont détectables que pour ces points. Ces points se trouvent principalement dans la partie nord de l'image dans les zones urbaines et le long des routes et des chemins de fer. Une petite partie des points a été détectée dans la zone du champ des cavernes à Epe.

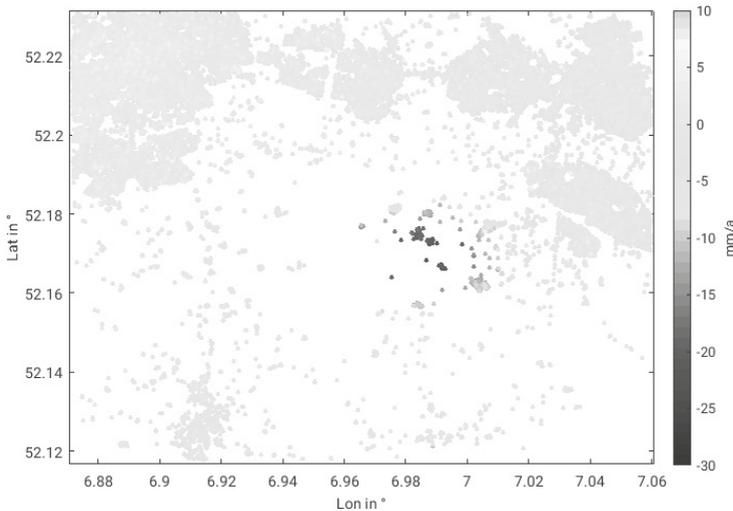


Figure 3 : Déplacements des points à forte rétrodiffusion. Au centre se trouve le champ de cavernes avec des vitesses de déplacement d'environ -22 mm/a.

Dans la *figure 3*, les vitesses de déplacement pour l'ensemble de la zone étudiée sont présentées. Au nord et au sud de l'image les points sont relativement stables avec une vitesse de déplacement maximale de 1 à 2 mm/a. Au centre de l'image se trouve une zone d'affaissement avec des vitesses de déplacement maximales de -22 mm/a. Cette zone a une extension de 5 km de l'ouest à l'est et de 3 km en direction nord-sud. C'est exactement la zone dans laquelle le champ de cavernes est situé.

Les points dans la zone d'affaissement montrent de forts déplacements non linéaires de 10mm. En août 2015, cette proportion diminue fortement et atteint son premier minimum. Par la suite, la partie non linéaire augmente lentement et atteint un maximum fin 2016. Jusqu'à la fin de la période d'observation, cette proportion diminue à nouveau. Le tracé de la courbe du mouvement non linéaire des points coïncide avec celui de la courbe de pression. Cependant, les courbes ne sont pas exactement superposées, mais sont décalées dans le temps. Le changement du déplacement non linéaire ne se produit toujours qu'après la variation du jeu de pression. Les déplacements non linéaires agissent avec retardement. La variation du jeu de pression se passe dans les cavernes situées à une profondeur de 1000m. Un déplacement de la surface n'est détectable que 90 jours après.

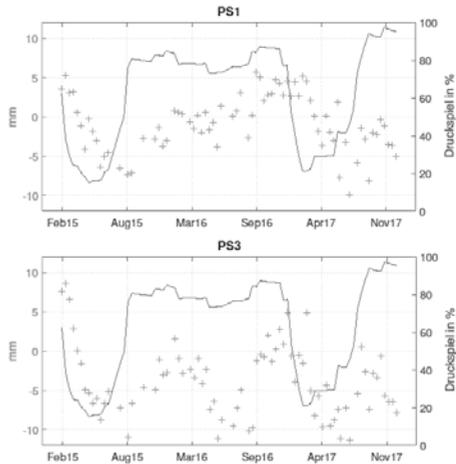


Figure 4 : Déplacements non linéaires des points à forte rétrodiffusion (croix, échelle à gauche) et la courbe de jeu de pression (ligne, échelle à droite) pendant la période d'observation. Les deux courbes sont similaires, mais décalées de 90 jours.

5. Conclusion

Dans la zone étudiée des points à forte rétrodiffusion avec un taux d'abaissement de 22 mm/a ont pu être détectés. La descente se concentre au-dessus du champ des cavernes à Epe. L'environnement reste relativement constant et augmente que de quelques millimètres par an. Les points au centre du champ montrent de forts déplacements non linéaires, dont le parcours est égal à la courbe de pression. La variation de la pression dans les cavernes à une profondeur de 1000m ne conduit à des déplacements de la surface du sol qu'après une période d'environ 90 jours.

Bibliographie

- 1 – Schenk, A. (2015). PS-Interferometrie in urbanen Räumen : Optimierte Schätzung von Oberflächenbewegungen mittels Multi-SBAS Verfahren. Thèse de doctorat. Karlsruher Institut für Technologie.
- 2 – Hanssen, R. F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Kluwer Academic. New York, Boston, Dordrecht, Londres, Moscou.
- 3 – Hooper, A. J. (2006). Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modelling of volcanic deformation. Thèse de doctorat. Stanford University.

Development and application of an inversion method for water vapour tomography with a novel infrared measuring device



PFE présenté par : **Bettina Raible**

Société d'accueil : **KIT**

Directeur de PFE : **Jan Cermak**

Correcteurs : **Andreas Rietbrock, Michael Höpfner**



1. Motivation

The distribution of water vapour in the troposphere is required in weather prediction and it is still the cause of great uncertainty. The tropospheric water vapour is required to better understand weather processes, especially the formation and properties of clouds. The DFG (Deutsche Forschungsgesellschaft) Project "High-resolution atmospheric water vapor fields based on satellite geodetic exploration, tomographic fusion and atmospheric modelling" (Short name: AtmoWater, Project no.: 321886779, Original title: "Hochauflösende atmosphärische Wasserdampffelder basierend auf satellitengeodätischer Erkundung, tomographischer Fusion und Atmosphärenmodellierung") aims to investigate this variable in more detail. Primarily geodetic observations, including INSAR and GNSS, are included in a data fusion approach. Those measurements are mainly obtained in a vertical direction. As a horizontal complement ground-based infrared measurements could be used. A schematic drawing of the associated data is shown in Figure 1.

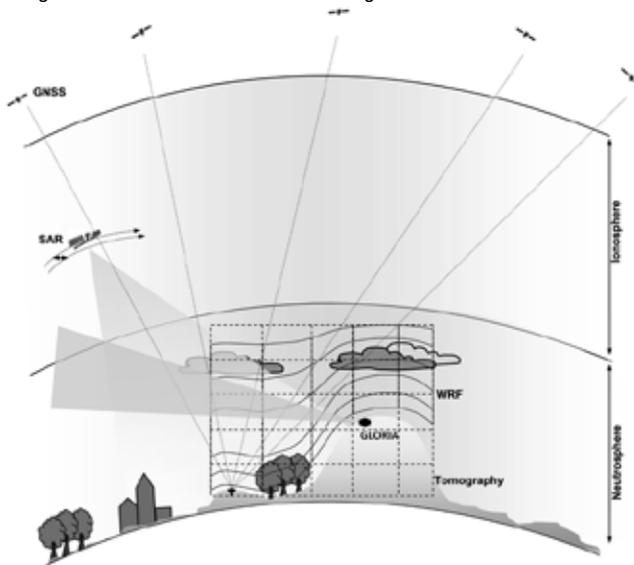


Figure 1: Schematic drawing of the AtmoWater project

GLORIA is based on a Michelson interferometer together with an infrared camera. It was originally designed to investigate the UTLS (Upper troposphere/lower stratosphere) from research aircraft or

stratospheric balloons. Thus infrared information from the wave number range of $780\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ of the respective tangent points, which are located in 3D space, is generated on the 2D detector array. In principle, the device can also be operated from the ground, but the changed mounting geometry must be taken into account.

The aim of this work is to explore the potential of the infrared measuring device GLORIA for the determination of a water vapour tomography in ground-based use. Existing inversion techniques are applied and extended to the specific investigation context. The goal of this work is to gain a data set containing information on the water vapour content in the 3D space.

2. Problem definition

A measurement campaign is planned and carried out during this master thesis. The data are examined for their suitability for an inversion. The tropospheric water vapour shall be retrieved from the available data sets.

The central question to be answered during this work is: Is GLORIA suitable for this measurement configuration? Additionally more specific questions are posed: What is the quality of the measurement data? How well can the parameters be retrieved? What are the limits for the retrieval?

The main tools to get answers to those questions are the radiation transfer program KOPRA and corresponding inversion program KOPRAfit, which were developed at IMK-ASF. Appropriate parameters for those programs have to be found and the data prepared and investigated by developing and adapting other programs, in FORTRAN90, IDL, Origin and Python.

3. Methods

In this work, established programs and parameter retrievals were used and adapted to investigate the suitability of the infrared instrument GLORIA for a new measurement configuration. This instrument was originally designed for balloon-borne limb observations. Initially some forward modelling was used to determine conditions for a field campaign. Using the modelling with KOPRA, spectral signatures were investigated and a first selection of micro-windows was made. The location for this campaign has been chosen with regard to the conditions of the instrument, the infrastructure and in context with the AtmoWater project. The measurements were carried out at the 17th and 18th of October 2018 near the top of the Black Forest mountain Blauen, overlooking the Upper Rhine Graben in the south-western part of Germany. At three different azimuth angles six elevation angles are measured to get one cycle of measurements. This procedure is repeated several times during the day. An example of one spectrogram at $+10^\circ$ azimuth angle is shown in Figure 2.

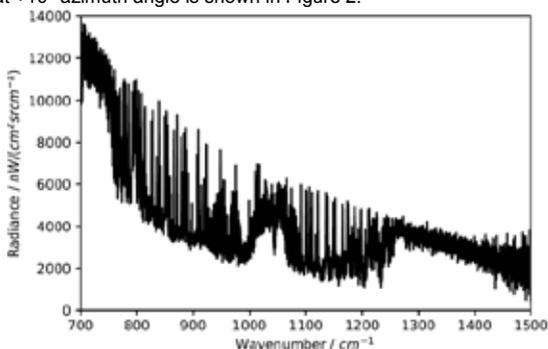


Figure 2: Spectrogram of the middle pixel at $+10^\circ$ elevation

The spectral data of the campaign was then examined for non-saturated spectral lines and those lines identified using the HITRAN database. The different elevation angles were investigated and it was concluded to concentrate for this thesis on the highest, most promising elevation angle of $+10^\circ$.

First inversions were calculated in appropriate spectral ranges using only single pixels. Tools for the assessment of the retrieval results used are difference plots, the RMS, micro-window intercomparison, line fitting, sensitivity analyses and the resulting noise and vertical resolution.

With the adapted parameters for the inversion process, whole images are inverted to test the homogeneity of the data and results. Due to those tests it was concluded, that a horizontal binning is appropriate.

4. Results

The main result of this work is the diurnal evolution of the water vapour volume mixing ratios. In Figure 3, the course of the day for azimuth angle 286° is shown. Figure 4 displays the corresponding noise and Figure 5 the vertical resolution. One timestep equals 13 s, but the breaks are cut out and the time steps enlarged for better visualization. The time axis is not in scale, the marked points in time are given for orientation. Longer measurement breaks are highlighted with vertical lines.

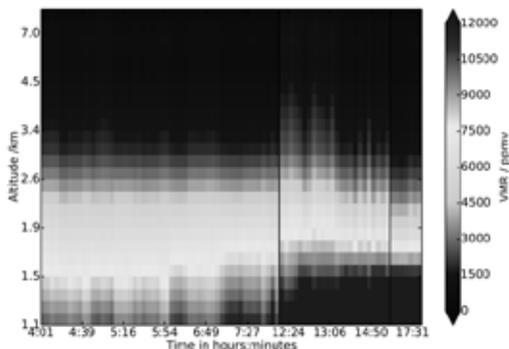


Figure 3: Volume mixing ratio of water vapour

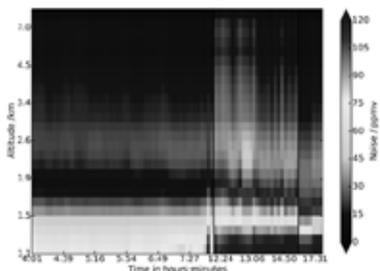


Figure 4: Noise

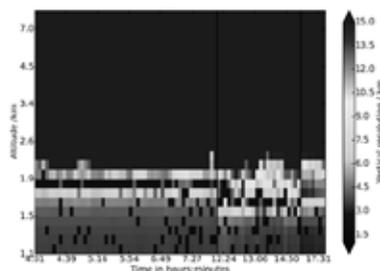


Figure 5: Vertical resolution

In the morning hours the VMR is low, after sunrise the values start to rise. The decrease above 1.8 km stays constant although the values below rise. After the measurement break the values are at the upper limits of the shown range up to 1.5 km of height. They stay high for about 2 hours and slightly decrease afterwards as the sun goes down. This behaviour coincides with the observations of rising fog from the valleys and a slight descend in the evening, although the view was still worse in the evening than in the morning. The decrease is best visible at the azimuth angle of 286°, because there are more measurements in the evening at this angle after filtering. The other azimuth angle suffer from a huge loss of measurements due to the RMS threshold applied.

The noise levels are generally below 1% of the VMR. It rises and decreases parallel to the VMR. The slightly increased noise values above 2 km in the afternoon are also noticeable. However, this has to

be relativized if one considers the corresponding vertical resolution. For the latter the range is set from 0 to 15 km. The values of the vertical resolution are between 2 and 5 km up to 2 km of altitude and spiking to very high values above. This leads to the conclusion that only information about the first kilometre above the instrument is available. Any signatures above 2 km are artefacts and do not contain any real information. The reason could be insufficient spectral information, because only one micro-window is used and this might not contain enough information of greater heights. Possible is also, that the VMR are so high, that the information of the VMR behind this first layers is covered and therefore not available. Weak signatures might not be detectable behind such a strong signal.

In the afternoon the profiles of vertical resolution are noisier than in the morning. Parallel observations can be made with the RMS. It is significantly higher in the second part of the campaign. There are multiple possible explanations for the increased noise and worse inversion results in the afternoon. Firstly, the sun is getting close to the line-of-sight of the instrument. Some measurements are even left out, because the sun is too close. The strong signal of the sun might interfere with the much weaker signal of atmospheric water vapour. This would also explain, why the lower azimuth angles are stronger effected. A third possibility is the optimisation process itself. For testing mostly the datasets in the morning are used and the parameters accordingly adjusted. But optimal inversion parameters for a subsample of datasets might not be ideal for the whole dataset.

Nevertheless, the results are homogeneous and consistent over the course of the day. The diurnal evolution with fog rising and descending can be observed.

5. Conclusion

The diurnal evolution is clearly observable at all azimuth angles. The fog is rising from the valleys during the morning hours and slightly descending again in the evening. The results are homogeneous in the time domain after filtering out the results with a high RMS. There are no differences observed between the azimuth angles. The results are consistent also in comparison to ERA5 data.

In conclusion, GLORIA is suitable for the tested ground-based measurement configuration. The data are homogeneous. The results of single pixel parameter retrieval are comparable among each other and withstand quality assessments. The results of the final inversion are homogeneous in space and time, so the diurnal evolution is clearly observable. But only information about the first kilometre above the instrument could be derived, which means that it only has a horizontal reach of less than 7.5 km. Horizontal differences are expected to be observable, if there are any in the detection range. Additional problems occurred in the afternoon and evening, the cause of which can so far only be speculated upon.

6. Outlook

There are many questions arising during this work, these could be basis for future research. This section gives a brief overview of ideas that emerged from this thesis.

Firstly, the worse results in the afternoon and evening could be due to the optimisation of the inversion parameters in the morning. Another set of parameters could be derived using datasets of the evening for optimisation. If this was the reason for the worsening, the sun and high volume mixing ratios could be eliminated from the list of reasons causing it.

Secondly, this work showed that, with the spectral information used, only information about the first kilometre above the instrument is retrieved. Multiple spectral windows could add information and extend the detection range.

Thirdly, this work only inverted the highest elevations measured. Inversions of the other elevation angles would provide information for lower altitudes. For the elevations below the horizon new challenges will appear due to the Earth's surface as background.

Lastly, a data fusion with other observations could be used for a tomographic approach, as these measurements act as complements to most water vapour observations which are performed in a vertical line-of-sight.

Plus d'infos : <http://topographie.insa-strasbourg.fr>
www.linkedin.com/showcase/topographie-insa-strasbourg



Contact

jdt2019@insa-strasbourg.fr

Avec l'aide de Tania Landes

Maître de conférences INSA Strasbourg
tania.landes@insa-strasbourg.fr
tél. 03 69 32 20 17

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