

21^e JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE

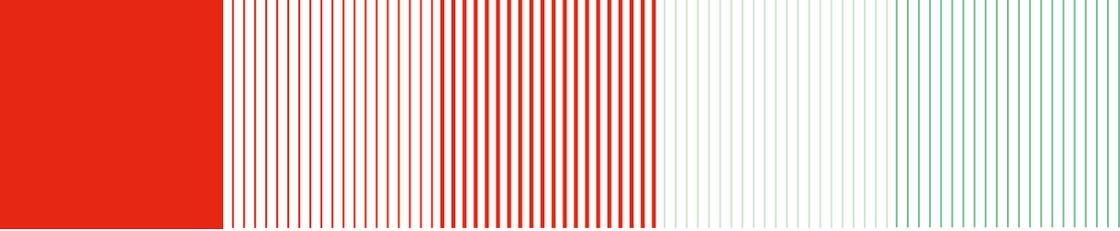
→ DU 18 AU 20/09/2024

SPORT
ET TOPOGRAPHIE



Mesures de lancers de marteau réalisées
à l'aide d'un tachéomètre par **Charles Balland**
lors d'une compétition internationale.
Charles Balland est étudiant Sportif de haut
niveau (SHN) en lancer de disque et de poids
en 5^e année de la spécialité topographie
à l'INSA Strasbourg.





SOMMAIRE

Mot du directeur.....	p.	5
Programme.....	p.	6
Salon des exposants.....	p.	7
Conférence: « Sport et topographie ».....	p.	8
Des étudiants topographes et sportifs de haut niveau	p.	9
Ordre de passage des PFE.....	p.	11
Résumés des PFE	p.	15



MOT DU DIRECTEUR

C'est avec enthousiasme que l'INSA Strasbourg organise cette année encore les Journées de la topographie. Cet événement, qui a célébré son vingtième anniversaire lors de la précédente édition, entre donc dans sa troisième décennie et demeure plus que jamais un moment fort de la rentrée pour l'ensemble des parties prenantes de la spécialité topographie.

La 21^e édition des Journées de la topographie (JDT) mettra en exergue les soutenances des Projets de fin d'études (PFE), constituant l'ultime étape du parcours des étudiants menant à l'obtention du diplôme d'ingénieur en topographie. Les JDT leur offriront également l'opportunité de rencontrer des entreprises du secteur lors du salon des exposants, qui est un lieu d'échanges privilégiés entre professionnels et étudiants. Qu'ils soient au commencement de leur cursus ou en passe d'entrer dans la vie professionnelle, les étudiants pourront profiter de cette manifestation pour découvrir la richesse des activités en topographie ainsi que les nombreuses offres d'emploi et de stage proposées par les entreprises.

La conférence des JDT portera sur le thème « Sport et topographie ». En résonance avec les Jeux olympiques de Paris 2024, il illustre la place que tient la topographie dans le domaine sportif, notamment pour mesurer les performances des athlètes. Il n'est d'ailleurs pas rare, lors de compétitions, de voir des instruments de mesure topographiques montés sur des trépieds aux abords du terrain. Les mesures sont également cruciales lors de l'installation et de l'homologation des équipements sportifs.

L'organisation des JDT bénéficie toujours de l'appui des professeurs et des étudiants topographes de l'INSA Strasbourg.

Cet événement peut également compter sur des partenariats durables avec l'Association francophone de topographie (AFT) et l'Ordre des géomètres-experts (OGE).

En tant que directeur de l'INSA Strasbourg, je me réjouis de ce rendez-vous incontournable de la communauté des topographes. Je souhaite exprimer ma gratitude à tous les acteurs impliqués pour leur dévouement au service d'une profession dynamique : les étudiantes et étudiants, les équipes pédagogique, technique et administrative, ainsi que les professionnels.

PROGRAMME

	MERCREDI 18 SEPTEMBRE	JEUDI 19 SEPTEMBRE	VENDREDI 20 SEPTEMBRE
8 h	Accueil - salle topographie		
9 h	Soutenances de Projets de fin d'études (PFE)	Soutenances de PFE	Accueil - salle topo
10 h	Jury 1 salle topographie, bâtiment C	Jury 1 salle C1.11, bâtiment C	Conférence : « Sport et topographie » 9 h - 11 h salle topographie, bâtiment C
11 h	Jury 2 salle topographie, bâtiment C	Jury 2 salle C1.16, bâtiment C	
12 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie, bâtiment C	Délibération et annonce des résultats salle topographie, bâtiment C	Cérémonie de clôture et verre de l'amitié 11h15 - 12h30 salle topographie, bâtiment C
13 h			
14 h	Soutenances de PFE	Salon des exposants	Présentation du métier de géomètre-expert
15 h	Jury 1 salle topographie, bâtiment C	13 h 30 - 17 h 30 salle topographie, bâtiment C	13 h 30 - 14 h 30 salle C1.16, bât. C
16 h	Jury 2 salle topographie, bâtiment C		
17 h			
18 h	Délibération et annonce des résultats salle topographie, bâtiment C	Conseil de l'Association francophone de topographie (AFT) (Réservé aux membres) 17 h - 20 h salle C1.16, bâtiment C	
19 h			

SALON DES EXPOSANTS

JEUDI 19 SEPTEMBRE

DE 13 H 30 À 17 H 30

Le salon des exposants des Journées de la topographie (JDT) est de retour cette année encore. Nous sommes ravis d'accueillir des entreprises de topographie dans les locaux de l'INSA Strasbourg.

Ce salon offre une occasion unique d'échanges entre étudiants et professionnels. Les entreprises y présenteront leurs équipements et solutions logicielles, et proposeront également leurs offres de stages et d'emploi sur un panneau d'affichage prévu à cet effet.

Pour être en phase avec le thème des journées, des « jeux de la topographie » seront organisés pendant le salon des exposants. Des activités, ouvertes à tous, seront proposées : estimer la distance entre deux objets à l'œil nu, installer une station de mesure le plus rapidement possible... Chaussez vos baskets et préparez votre ruban, nous vous attendons nombreux pour participer à ces jeux pas comme les autres !

Entreprises du salon des exposants (liste non exhaustive)



Azimut topo



Mire/NGE



ComNav Technology Europe Srl



Positics groupe Geomesure



Eiffage route



Sitech France



Faro France



Sites



Futurmap



Sogelink



Geofit



Teria



Geotopo



AFT



Imag'ing



OGE

Invités d'honneur



Leica geosystems

CONFÉRENCE :

« SPORT ET TOPOGRAPHIE »

VENDREDI 20 SEPTEMBRE
DE 9 H À 11 H

Un athlète fait les cent pas en regardant la piste devant lui. Il visualise chaque pas qu'il va faire dans sa tête. Il s'imagine atteignant la ligne blanche, sautant et étirant ses jambes aussi loin que possible. Il sent déjà le sable granuleux se répandre autour de lui lors de l'atterrissage. Il prend sa position de départ et attend le coup de pistolet. À l'autre bout de la piste, un topographe se prépare, lui aussi, à mesurer le résultat qui déterminera le classement de l'athlète. Aura-t-il franchi une distance suffisante pour être victorieux ou manquera-t-il la marque de quelques millimètres ? Sa victoire ou sa défaite sera confirmée par les technologies de mesure.

La topographie est présente dans le sport, notamment lors des compétitions pour mesurer les performances des athlètes. Il n'est pas rare de voir des instruments de mesure topographiques sur des trépieds autour des terrains lors de ces événements.

La mesure topographique intervient également en amont lors de l'installation ou de la construction d'équipements sportifs.

Lors de cette conférence, les normes et techniques d'acquisition pour les mesures en compétitions sportives ainsi que pour l'homologation des équipements sportifs seront présentées.

La conférence sera aussi l'occasion d'aborder la question de la conciliation entre vie d'athlète et vie de topographe.

Intervenants (liste non exhaustive)

Charles Balland

Étudiant en 5^e année en topographie à l'INSA Strasbourg, sportif de haut niveau en lancer de disque et de poids.

Baptiste Mischler

Athlète et ingénieur d'études Système d'information géographique (SIG) au sein du Groupe OTE, bureau d'études pluridisciplinaire en bâtiment.



DES ÉTUDIANTS TOPOGRAPHES ET SPORTIFS DE HAUT NIVEAU

La filière Sportif de haut niveau (SHN) de l'INSA Strasbourg a été créée en 2003. Elle permet aux étudiants de concilier études supérieures et pratique sportive de haut niveau.

L'objectif étant de décrocher un diplôme d'ingénieur ou d'architecte de l'INSA Strasbourg tout en poursuivant une carrière sportive.

Pierre Carreaud, étudiant en spécialité topographie de 2003 à 2007, a été le premier étudiant SHN de l'INSA Strasbourg en kayak.

Depuis, plusieurs étudiants de la spécialité topographie ont suivi son chemin.

Baptiste Mischler, premier étudiant SHN qualifié aux JO

Baptiste Mischler a bénéficié du statut de sportif de haut niveau depuis sa 1^{re} année à l'INSA Strasbourg en 2015. Brillant aussi bien sur la piste que dans ses études pour devenir ingénieur topographe, Baptiste a atteint l'objectif qu'il s'était fixé : participer aux Jeux olympiques de Tokyo 2020. Une première historique pour l'INSA Strasbourg puisque Baptiste a été le premier étudiant sélectionné olympique de l'école. Aux JO de Tokyo sur sa distance fétiche du 1 500 m, il a terminé 11^e de sa série en 3 min 37 s 53, échouant à moins d'une seconde pour se qualifier en demi-finale. Baptiste a été diplômé en topographie en 2023 et continue les compétitions. Il a terminé 4^e aux Championnats de France à Angers sur 1 500 m en 2024.

Il se confiait en 2019 sur son parcours de SHN : « J'ai envie que tout soit parfait dans les moindres détails. Ce que je fais en sport, je l'applique aussi dans mes études, et inversement. À l'école, j'ai aussi besoin de cette adrénaline, j'ai envie de me surpasser. Je pense aussi, et nos enseignants nous le disent, que les sportifs de haut niveau sont en général très organisés car ils ont peu de temps, nos emplois du temps sont millimétrés. Ce n'est pas facile tous les jours mais je trouve que le sport et les études se marient parfaitement bien, cela m'apporte un équilibre. Je trouve parfaitement mon compte dans les études d'ingénieur car ce sont les mêmes valeurs, les mêmes ressentis. »



Les étudiants SHN topographes en 2023-2024

En 2023-2024, quatre étudiants topographes étaient sportifs de haut niveau :



Charles Balland

- | Étudiant en 4^e année de topographie
- | Athlétisme/disque et poids
- | Il a remporté le concours du lancer de disque lors du championnat de France universitaire de Salon de Provence en 2023.



Étienne Bayer

- | Étudiant en 3^e année de topographie
- | Athlétisme/3000 m *steeple*.
- | Il a gagné le titre national universitaire du 10 km sur route en 31 minutes 18 secondes en 2024 à Vignoles en Côte-d'Or.



Alice Conrad

- | Étudiante en 3^e année en architecture et ingénierie (parcours topographie)
- | Escrime/épée
- | Elle a participé aux championnats d'Europe d'escrime U23 en 2023 à Budapest et a décroché l'or avec l'équipe de France. En individuel, elle a terminé 5^e à l'épée.

Romain Hypolyte

- | Étudiant en 4^e année de topographie
- | Volley
- | Il joue au volley au niveau national en Nationale 2.



ORDRE DE PASSAGE DES PFE

MERCREDI 18 SEPTEMBRE

JURY 1

(salle topographie, bâtiment C)

Président de jury : **FLACELIÈRE Bernard**

8 h 30 | Scan-vs-BIM¹ : automatisation de la comparaison nuage de points et maquette numérique dans le cadre de chantiers d'infrastructures **p. 17**

| Étudiante : BECKER Florie
| Structure d'accueil : Ferrcad, Montpellier
| Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

9 h 30 | Contrôle dimensionnel des brides d'éoliennes *offshore* par photogrammétrie : étude de précision de méthodes photogrammétriques et d'une solution sans cible **p. 21**

| Étudiant : SEVAL Pierre
| Structure d'accueil : Fugro, Castries
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

10 h 30 | Conception et automatisation d'un système de calibration de caméra **p. 25**

| Étudiante : PIRON Enola
| Structure d'accueil : HEIG-VD, Yverdon-les-Bains (Suisse)
| Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

Président de jury : **FLACELIÈRE Bernard**

13 h 30 | Amélioration des procédés d'implantations et de réglages topographiques appliqués au projet RJH – Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) de Cadarache **p. 29**

| Étudiante : MAROUKEYAN-HARKANE Emma-Paule
| Structure d'accueil : Sites, Aix-en-Provence
| Correcteur : KOEHL Mathieu

14 h 30 | Développement d'une option d'ajustement du modèle stochastique et mise en production du module de compensation de TopTools **p. 33**

| Étudiante : POTONNIER Anaëlle
| Structure d'accueil : TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
| Correcteurs : LANDES Tania, MOISAN Emmanuel

15 h 30 | Étude de l'influence de la température sur les capteurs de type IoT² : les inclinomètres MEMS³ **p. 37**

| Étudiante : BRELEUR Laureen
| Structure d'accueil : SNCF, Saint-Denis
| Correcteur : FERHAT Gilbert

16 h 30 | Qualification et analyse de chroniques GNSS⁴ *low cost* pour l'auscultation de barrages **p. 41**

| Étudiant : MELA Pascal
| Structure d'accueil : EDF, Lyon
| Correcteur : FERHAT Gilbert



MERCREDI 18 SEPTEMBRE

JURY 2 (salle topographie, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

8 h 30 | Actualisation de la base de données du bassin versant du Strengbach. Étude de l'évolution du couvert forestier à partir de nuages de points LiDAR⁵, d'images aériennes et satellitaires **p. 45**

| Étudiant : RICCOBONO Giuseppe
| Structure d'accueil : Ites, Strasbourg
| Correcteur : FERHAT Gilbert

9 h 30 | Méthodes d'apprentissage pour la classification de nuages de points LiDAR HD : application à la détection d'objets géologiques gravitaires **p. 49**

| Étudiant : HOFFMANN Nicolas
| Structure d'accueil : EOST, Strasbourg
| Correcteur : FERHAT Gilbert

10 h 30 | Exploitation des algorithmes d'apprentissage profond sur les données LiDAR HD **p. 53**

| Étudiant : CERETTO Florian
| Structure d'accueil : Archéologie Alsace, Sélestat
| Correcteurs : KOEHL Mathieu, MOISAN Emmanuel

Président de jury : MOREL Laurent

13 h 30 | Relevé d'une unité de liants routiers, étude et mise en place d'un processus de création de maquette numérique industrielle à l'aide de données multicauteurs et comparaisons de solutions logicielles **p. 57**

| Étudiant : MOUDEN Ayoub
| Structure d'accueil : Ahmes, Le Havre
| Correctrice : MACHER Hélène

14 h 30 | Détermination des limites du domaine public fluvial par exploitation de nuages de points LiDAR **p. 61**

| Étudiante : BROCHIER Juliette
| Structure d'accueil : Eurométropole de Strasbourg
| Correcteur : KOEHL Mathieu

15 h 30 | Analyse et optimisation de la chaîne de traitement des données LiDAR de l'entreprise **p. 65**

| Étudiant : PERISSE Gaspard
| Structure d'accueil : Adage géomètres-experts, Roanne
| Correcteur : MOISAN Emmanuel

16 h 30 | Intégration des méthodes d'acquisition de données 3D dans les relevés pour l'établissement de documents fonciers dans un cabinet de géomètres-experts

| Étudiant : GONICHON Matthieu
| Structure d'accueil : Bonnier Vernet Floch géomètres-experts, Deuil-la-Barre
| Correcteur : KOEHL Mathieu



JEUDI 19 SEPTEMBRE

JURY 1 (salle C1.11, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

8 h 30 | Méthodologie de création et d'analyse de maquette thermique temporelle de scènes urbaines **p. 69**

| Étudiant : MARIE Émile
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Strasbourg
| Correctrice : MACHER Hélène

9 h 30 | Estimation de l'évapotranspiration journalière à haute résolution pilotée par la télédétection spatiale **p. 73**

| Étudiante : BARRIEU Emma
| Structure d'accueil : Cesbio, Toulouse
| Correctrice : LANDES Tania

10 h 30 | Apport de données LiDAR aéroporté pour la cartographie de la contamination du sol sur un site réhabilité **p. 77**

| Étudiant : KELLER Arthur
| Structure d'accueil : Onera, Toulouse
| Correctrice : LANDES Tania

JURY 2 (salle C1.16, bâtiment C)

Président de jury : ORTLIEB Hubert

8 h 30 | Modélisation 4D des châteaux du Ramstein et du Hugstein **p. 81**

| Étudiant : KIEHL Théo
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Strasbourg
| Correcteur : MOISAN Emmanuel

9 h 30 | Création des maquettes numériques des châteaux allemands du Landeck, Madenburg et Trifels dans leur état actuel et constitution des supports numériques pour la réalisation de maquettes tactiles **p. 85**

| Étudiant : KOUROUMA Mamady
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Strasbourg
| Correcteur : ALBY Emmanuel

10 h 30 | Valorisation de modèles 3D et restitution 3D photogrammétrique de fouilles archéologiques dans la bande de Gaza **p. 89**

| Étudiante : STUDER Clara
| Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Strasbourg
| Correcteurs : ALBY Emmanuel, GRUSSENMEYER Pierre



PROJETS DE FIN D'ÉTUDES SOUTENUS EN MARS ET JUIN 2024

25/03/24 | Amélioration de la chaîne de détection des surfaces en eau : détection de nuages à l'aide de la synergie avec *global surface water* et analyse de précision

| Étudiante : MANGOLD Émilie
| Structure d'accueil : Sertit, Strasbourg
| Correctrice : LANDES Tania

p. 93

Architecte-ingénieure
Parcours topographie

18/06/24 | *Compensation of ionospheric effects in L-band SAR interferograms in areas with low coherence*

| Étudiante : JENNY Élisa
| Structure d'accueil : KIT, Karlsruhe (Allemagne)
| Correcteur : FERHAT Gilbert

p. 97

Double diplôme
INSA - KIT (Karlsruhe)

-
- 1 - BIM : *Building information modeling*
 - 2 - IoT : *Internet of things*
 - 3 - GNSS : *Global navigation satellite system*
 - 4 - MEMS : *Micro electro-mechanical system*
 - 5 - LiDAR : *Light detection and ranging*



RÉSUMÉS DES PFE



Scan-vs-BIM : automatisation de la comparaison nuage de points et maquette numérique dans le cadre de chantiers d'infrastructures



PFE présenté par : **Florie BECKER**
Société d'accueil : **Ferrcad**
Directeur de PFE : **Yvon KILA**
Correctrice : **Tania LANDES**
Encadrante : **Hélène MACHER**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Une étude réalisée en février 2023 dans 15 pays européens par PlanRadar (plateforme européenne de digitalisation des projets de construction et d'immobilier) montre que les travaux de reprise peuvent représenter plus de **11%** du coût total d'un projet. Les trois causes principales identifiées sont le manque de communication entre les équipes, le manque d'organisation ainsi que la mauvaise gestion des documents de chantier et l'insuffisance des contrôles qualité. Outre la conséquence financière, les reprises entraînent des retards de livraison et un gaspillage de matériaux. Pour pallier ces problèmes, l'utilisation d'outils numériques pourrait faciliter les contrôles et le suivi d'un projet.

Le processus **Scan-vs-BIM** est relativement récent. Il vise à vérifier la correspondance entre le projet prévu et la réalité à l'aide de modèles **BIM** (*Building Information Modeling*) et de nuages de points. Ceci permet différentes analyses comme le suivi de chantier, la vérification des tolérances d'exécution, la mise à jour d'une maquette BIM ou encore l'analyse des déformations d'un ouvrage. Cette chaîne de traitement est composée de plusieurs étapes indispensables (Figure 1).

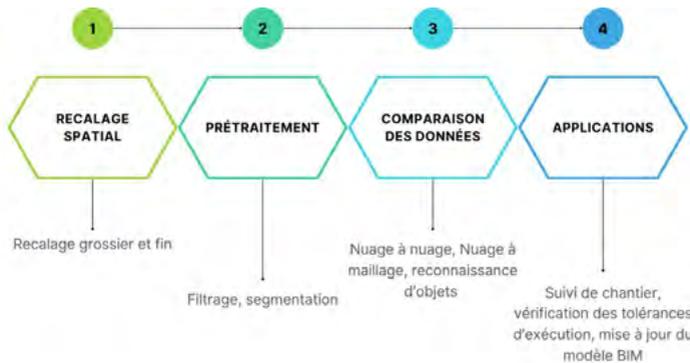


Fig. 1 : chaîne de traitement du processus Scan-vs-BIM

L'entreprise **Ferrcad** est spécialisée dans l'ingénierie et la rétro-ingénierie de système maritime et fluvial. Elle opère en tant que maître d'ouvrage et assistant maître d'ouvrage. Pour gérer au mieux les chantiers, l'entreprise souhaite développer l'utilisation du processus **Scan-vs-BIM**. Il n'existe pas de solution simple et précise qui permet d'effectuer automatiquement le recalage et la comparaison entre



maquette et nuage. L'automatisation est un enjeu important du PFE. Avec les méthodes traditionnelles, les contrôles ne sont réalisés que ponctuellement sur des points de référence et non sur l'entièreté du chantier, ce qui ne permet pas de détecter tous les écarts comme un défaut de verticalité d'un mur. **Ferrcad** souhaite développer l'application **FerrSRO**, dédiée aux opérations de suivi et de réception d'ouvrage.

2. Mise en place de la chaîne de traitement automatisée

2.1 Recalage spatial

La première étape de la chaîne de traitement est le recalage spatial de la maquette BIM et du nuage de points. En effet, aucune comparaison numérique n'est possible si les deux entités ne sont pas dans le même référentiel. Le recalage spatial est divisé en deux parties, le recalage grossier qui permet un premier alignement des données et le recalage fin qui va ajuster plus précisément la position du nuage de points par rapport au modèle **BIM**. Les nuages de points utilisés par l'entreprise sont tous géoréférencés dans le même système de coordonnées que le modèle **BIM**. Le recalage grossier est réalisé par géoréférencement dans le cas de cette étude, il n'est donc pas détaillé.

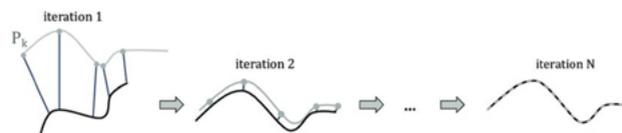


Fig. 2 : schématisation du processus de calcul de l'algorithme ICP (Vlaminck et al., 2016)

Le recalage spatial permet, dans notre cas, d'éliminer ou de minimiser les erreurs induites par le géoréférencement et ainsi d'éviter qu'elles influent sur l'analyse des écarts. Nous avons décidé d'utiliser l'algorithme **ICP** (*Iterative Closest Point*) pour réaliser le recalage fin. L'algorithme **ICP** (Figure 2) est sûrement le plus communément utilisé pour recalcr des données dans de multiples domaines (robotique, vision par ordinateur, géomatique, etc.).

La présence de points aberrants ou de bruit influence la précision du recalage spatial. Depuis quelques années, plusieurs solutions ont été proposées pour améliorer le calcul de l'**ICP** afin de négliger les effets de ces points hors tolérance. Il est possible d'intégrer un noyau robuste dans le calcul du recalage spatial afin de réduire le poids des aberrations (Babin et al. 2018). L'utilisation de filtres est relativement intéressante car même s'il n'y a qu'un seul point hors tolérance avec une grosse erreur, cela influencera négativement le calcul. Il pourrait même avoir une plus grande influence que tous les points justes. Les fonctions de perte les plus connues sont le MLE (*Maximum Likelihood Estimator*) ou la famille des M-estimateurs.

Il existe plusieurs noyaux robustes qui pondèrent différemment les aberrations. Il faut donc choisir le noyau qui s'adapte le mieux aux environnements étudiés. En effet, en fonction de la géométrie des données ainsi que des dynamiques présentes, les noyaux ne réagiront pas de la même manière. Il faut également prendre en compte le paramétrage du noyau qui définit la « dureté » de la pondération des observations. Nous avons donc testé les noyaux les plus courants sur nos données pour voir celui qui serait le plus adapté. La première conclusion possible est, qu'effectivement, les noyaux robustes améliorent l'exactitude du recalage comme illustré

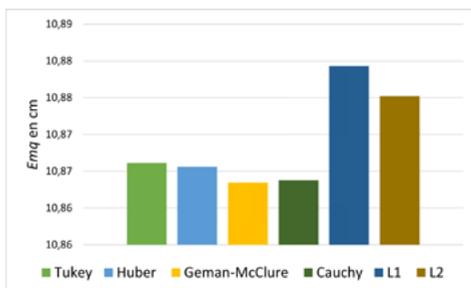


Figure 3 : Comparaison des résultats de l'ICP avec les différents noyaux robustes

Figure 3. Le noyau L2 est considéré comme la version de base de l'algorithme de l'ICP, nous constatons que le recalage est moins exact. La deuxième conclusion possible est le manque de robustesse de L1, bien qu'il fasse partie des M-estimateurs. On peut également remarquer sur cette figure que le noyau de Geman-McClure est celui qui semble donner de meilleurs résultats en terme d'exactitude. Toutefois, selon les travaux de Babin et al. (2018), ce noyau est à utiliser avec précaution car il serait sensible au paramétrage, à la structure des données ainsi qu'aux dynamiques présentes dans le nuage. Pour palier ce problème, un noyau est recommandé par les auteurs, celui de Cauchy. Les tests menés sur nos données confirment en effet son efficacité car il s'agit du deuxième meilleur noyau. Nous avons donc pu implémenter un ICP point à plan combiné au noyau robuste de Cauchy.

2.2 Comparaison des données

Pour comparer deux ensembles de données, il existe plusieurs approches. Le choix est forcément orienté par le type de données à disposition. En effet, lorsque l'on dispose de deux nuages de points et que l'on ne veut pas modéliser le nuage de référence, deux méthodes sont possibles. La première est la méthode **C2C** (*Cloud to Cloud*). Elle consiste à trouver pour chaque point du premier nuage son plus proche voisin dans le deuxième nuage et calculer l'écart entre les deux. La recherche du plus proche voisin est une tâche complexe et relativement longue surtout lorsque l'on considère des nuages de plusieurs millions de points. Il existe une autre méthode, plus robuste qui permet de comparer deux nuages de points appelée **M3C2** (*Multiscale Model to Model Cloud Comparison*) (Lague et al. 2013). Cette méthode fonctionne en utilisant des vecteurs normaux locaux pour calculer des distances orthogonales entre les points, en tenant compte de l'échelle variable pour améliorer la précision des mesures.

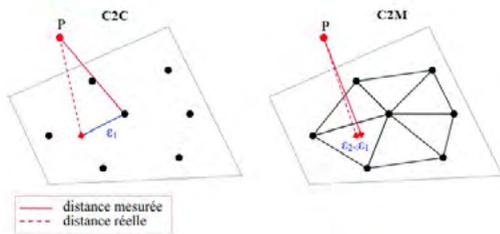


Fig 4 : Différence entre la méthode C2C et C2M (Girardeau-Montaut, 2006, modifié)

Toutefois, comme nous disposons d'une maquette numérique, il est intéressant d'utiliser les propriétés géométriques de cette dernière. La méthode indiquée est donc l'approche **C2M** (*Cloud to Mesh*). L'utilisation de cette méthode permet de s'affranchir de l'erreur induite par la densité du nuage de points et un maillage, d'un point de vue géométrique, il s'agit de calculer la distance entre un point et un triangle. Plus globalement, on peut considérer que c'est la distance d'un point au plan du triangle si sa projection est à l'intérieur du triangle, sinon il s'agit de la distance du point à l'arête la plus proche.

2.3 Applications

Une fois que les écarts sont calculés, plusieurs applications sont possibles : vérification des tolérances d'exécution, suivi de chantier, mise à jour de la maquette BIM ou analyse des déformations d'un ouvrage. La première application est assez directe, en calculant les écarts entre la maquette et le nuage (Figure 5), plusieurs statistiques peuvent être analysées comme la moyenne, la

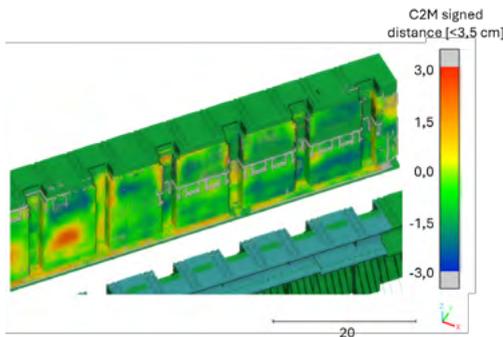


Fig 5 : Colorisation du nuage en fonction des écarts avec la maquette d'un ascenseur à bateau (ATLAS 4300T)

médiane et l'écart-type. Ces indicateurs permettent de déterminer rapidement si les écarts sont très répartis et s'il s'agit d'une répartition égalitaire ou non. Il est donc déjà possible d'avoir une idée quant aux tolérances d'exécution. Un contrôle supplémentaire est possible en calculant les écarts entre le nuage de points et des points de référence spécifiquement choisis sur l'ouvrage.

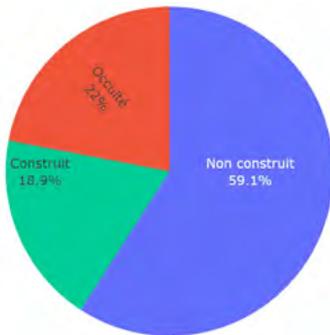


Figure 6 : Répartition des objets par statut de construction

Pour le suivi de chantier, plusieurs méthodes sont possibles comme l'approche volumique (Jiang *et al.*, 2022) ou surfacique (Bosché *et al.*, 2015). Comme leur nom l'indique, dans un premier cas il s'agit de comparer des volumes et dans l'autre des surfaces. Comme le nuage de chaque élément n'est pas forcément complet, l'approche surfacique semblait la plus indiquée. En comparant la surface de l'élément de la maquette **BIM** et la surface de l'objet reconstruit, il est possible de déterminer s'il est construit, occulté ou non construit (Figure 6). En effet, la majorité des éléments sont construits en une fois et non graduellement. Ceci permet de s'affranchir de devoir déterminer si l'objet est en cours de construction ou occulté.

Une fois que les écarts et le suivi de chantier sont déterminés, il est alors possible de définir quels objets doivent être mis à jour dans la maquette. Il faut alors calculer les dimensions de l'objet dans le nuage pour les affecter à l'élément correspondant dans la maquette. Pour cela, il convient de créer une fonction objectif, aussi appelée fonction de coût, qui va décrire la forme géométrique de l'objet. En utilisant une méthode d'optimisation, il est possible de minimiser la fonction objectif et déduire les paramètres de l'objet à mettre à jour (Rausch et Haas, 2021).

3. Conclusion

Grâce à cette étude, nous avons pu évaluer l'influence des noyaux robustes dans le calcul de l'**ICP** et ainsi choisir celui qui convenait le mieux au projet. Pour la comparaison des données, la fonction **C2M** a été implémentée et vérifiée avec des résultats de référence à partir de CloudCompare. Différents tests ont été réalisés pour le suivi de chantier, ce qui a permis de créer une approche simple mais efficace pour l'application **FerrSRO**. Enfin, la mise à jour des objets par rapport au nuage de points a pu être testée. Ceci nous a permis de conclure quant à la faisabilité de cette approche mais aussi sa complexité à mettre en œuvre. Cette partie de la chaîne de traitement pourra nécessiter une étude plus approfondie voire un prochain projet.

4. Références bibliographiques

- Babin, P., Giguère, P. and Pomerleau, F. (2018) 'Analysis of Robust Functions for Registration Algorithms'.
- Bosché, F. *et al.* (2015) 'The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components', *Automation in Construction*, 49, pp. 201–213.
- Girardeau-Montaut, D. (2006) 'Détection de changement sur des données géométriques tridimensionnelles'.
- Jiang, Z. *et al.* (2022) 'Scan-vs-BIM for real-time progress monitoring of bridge construction project', *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4-W3-2022, pp. 97–104.
- Lague, D., Brodu, N. and Leroux, J. (2013) 'Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z)', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, pp. 10–26.
- Rausch, C. and Haas, C. (2021) 'Automated shape and pose updating of building information model elements from 3D point clouds - ScienceDirect', *Automation in Construction*. Volume 124, April.
- Vlaminck, M. *et al.* (2016) '3D Scene Reconstruction Using Omnidirectional Vision and LiDAR: A Hybrid Approach', *Sensors*, 16(11), p. 1923.

Contrôle dimensionnel des brides d'éoliennes *offshore* par photogrammétrie : étude de précision de méthodes photogrammétriques et d'une solution sans cible

PFE présenté par : **Pierre SEVAL**
Société d'accueil : **Fugro Geoid**
Directeur de PFE : **Bertrand CHAZALY**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Bertrand CHAZALY**



1. Introduction

1.1 Définitions clés pour le contrôle dimensionnel des éoliennes *offshore*

Les éoliennes *offshore*, bien que coûteuses à installer et à entretenir en raison des défis posés par le milieu marin, offrent une production d'électricité plus stable et abondante grâce à des vents plus constants en mer. Ces structures, souvent montées sur des fondations monopiles, nécessitent des connexions robustes et résistantes à la corrosion pour garantir leur stabilité et leur durabilité : les brides (Figure 1).

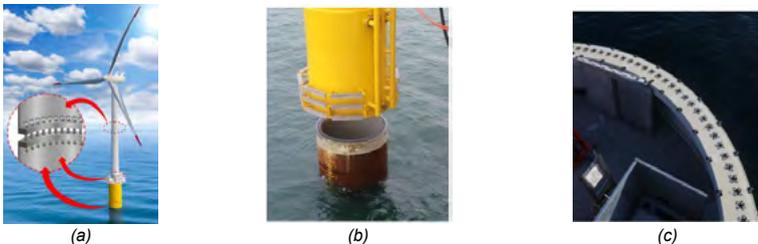


Fig. 1 : (a) Zoom sur le système de fixation des éoliennes *offshore* : la bride, (b) Bride durant l'installation d'une éolienne sur le support, et (c) Bride lors d'un contrôle dimensionnel [Chazaly, 2023]

Ces connexions à boulons doivent être contrôlées de manière précise par un contrôle dimensionnel permettant de vérifier des paramètres tels que la planéité, la rotondité, le diamètre et la position des trous de boulons. Le contrôle dimensionnel est une méthode permettant de vérifier la conformité des caractéristiques physiques d'un objet aux spécifications requises en utilisant des techniques notamment la photogrammétrie. Cette méthode permet de produire un modèle tridimensionnel précis qui permet d'évaluer le respect ou non des tolérances définies. Elle peut être présentée en trois étapes :

- Mesure de précision : utilisation d'appareils photos ou d'instruments tels que des scanners lasers et des trackers optiques. Le choix de la méthode se fait en fonction de la précision demandée par les spécifications du projet.
- Traitement des données : les données brutes sont converties en une représentation numérique détaillée grâce à des logiciels spécialisés (Agisoft Metashape ®), permettant des



comparaisons précises entre l'objet mesuré et ses spécifications théoriques (Polyworks|Inspector®).

- Analyse des résultats : comprend l'inspection des défauts pour identifier leurs causes et garantir que les erreurs de fabrication soient distinguées des erreurs de mesure, optimisant ainsi la qualité.

Cette technique, particulièrement utile en milieu industriel ou *offshore*, garantit l'intégrité et la qualité des processus de fabrication et d'assemblage.

Le contrôle dimensionnel est nécessaire pour l'assemblage précis des éoliennes *offshore*, garantissant une installation et un fonctionnement sûrs. Fugro Geoid SAS développe une solution automatisée pour intégrer ce contrôle dans la fabrication et l'installation afin de gagner en qualité et efficacité. Il est essentiel pour éviter des retards, des surcoûts et assurer la longévité de l'éolienne, en s'appuyant sur des mesures fiables, la gestion des données et l'interprétation des résultats.

1.2 Contexte du projet

Mon stage de fin d'études chez Fugro Geoid SAS s'inscrit dans le contexte de l'usine intelligente, pilier de l'industrie 4.0. Cette révolution industrielle vise à intégrer des technologies avancées telles que l'Intelligence Artificielle, la robotique pour améliorer l'efficacité, la qualité et la productivité des systèmes de production. Fugro Geoid, spécialisée dans le géospatial terrestre et les opérations *offshore*, subaquatiques et *nearshore*, joue un rôle clé dans ces avancées.

Mon travail traite du contrôle dimensionnel des brides d'éoliennes dans le contexte d'un déploiement industriel en pleine expansion.

L'objectif est de garantir la précision nécessaire à la stabilité et à la longévité des installations marines. Fugro utilise des techniques de photogrammétrie pour ces contrôles, nécessitant actuellement une intervention humaine significative telle que la pose manuelle de cibles sur la bride. Cette installation est chronophage, coûteuse en raison des prix élevés des interventions *offshore*, et sujette aux erreurs humaines. Les facteurs environnementaux et les variations dans la qualité des cibles peuvent compromettre la précision des mesures. La dépendance à une prise de vue rigoureuse et les défis liés à l'auto-calibration des caméras soulignent la nécessité d'améliorer et d'automatiser le processus pour garantir une précision et une efficacité accrues. De plus, le traitement des données avec le logiciel "boîte noire" Agisoft Metashape® pose des défis supplémentaires au niveau du calcul et de l'interprétation de la précision en photogrammétrie.

1.3 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est de caractériser la question de la précision en photogrammétrie, dont l'influence de certains paramètres sur la précision finale. Cette étude précèdera ainsi l'examen d'une solution sans cible, visant à optimiser le processus et à réduire les erreurs humaines, tout en améliorant la fiabilité et l'efficacité du contrôle dimensionnel dans l'industrie des éoliennes *offshore*.

Par ailleurs, ce projet permettra de qualifier un nouveau système d'acquisition. En effet, Fugro Geoid SAS a imaginé une nouvelle structure innovante d'acquisition photographique (Figure 2) qui utilise plusieurs appareils photo synchronisés. Cette innovation vise à diminuer le temps nécessaire pour la capture d'images, accroître la précision des mesures photogrammétriques et offrir une flexibilité accrue dans le positionnement de la structure elle-même. Cet équipement moderne pourrait non seulement optimiser le processus de contrôle dimensionnel grâce à la photogrammétrie, mais également garantir une couverture complète et détaillée de la bride, améliorant ainsi la qualité et la fiabilité des analyses dimensionnelles.

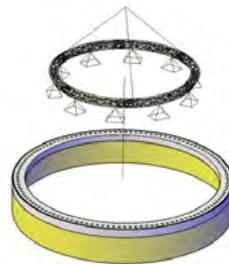


Fig. 2 : Schéma de la structure innovante [Chazaly, 2023]

2. Précision en photogrammétrie

Les sources d'erreur en photogrammétrie sont nombreuses et leurs identifications sont essentielles pour améliorer la qualité des traitements. Les erreurs peuvent être systématiques (imprécisions des paramètres de la caméra) ou aléatoires (bruit de la caméra) [Luhmann et al., 2020]. Elles sont influencées par des facteurs comme la résolution des capteurs et les conditions environnementales. Le logiciel Agisoft Metashape © utilise des techniques avancées comme les détecteurs de points d'intérêt *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT) ou des méthodes d'ajustement de faisceaux (*Bundle Adjustment*), mais dont le manque de documentation complique l'évaluation des résultats.

Pour améliorer la précision, des techniques de traitement d'images préliminaires et des méthodes d'appariement sophistiquées sont utilisées. Les systèmes stéréoscopiques et des configurations optimisées de prises de vue (angles de 60° à 90°) sont également étudiés pour minimiser les erreurs et améliorer la fiabilité des reconstructions 3D.

Afin d'évaluer la précision en photogrammétrie, plusieurs moyens seront mis en œuvre. La mise en œuvre de simulations de Monte Carlo est particulièrement pertinente pour évaluer l'influence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur les incertitudes des paramètres de sortie. Cette méthode permet de modéliser et d'analyser les variations possibles dans les données d'entrée et leurs impacts sur les résultats finaux, offrant ainsi une compréhension plus profonde des sources d'erreur et de leurs effets. Elle nous permettra d'évaluer l'incertitude théorique de la reconstruction des points 3D en fonction des incertitudes des points 2D dans les systèmes images, en utilisant un code *Matlab* basé sur un modèle paramétrique de [Hartley et Zisserman, 2004]. En combinant cette approche avec des techniques de calibration et des configurations optimisées de prises de vue, il est possible d'améliorer significativement la précision et la fiabilité des mesures photogrammétriques. C'est pourquoi une maquette de bride a été conçue pour illustrer l'influence de la position de la caméra et tester différents systèmes d'acquisition de photos par rapport à la méthode initiale utilisée par Fugro.

3. Présentation de la structure et méthode de mesure

La structure de la bride (Figure 3) a été réalisée en taille réelle et relevée au laser tracker (AT402) pour détecter d'éventuelles imperfections. Cette structure et des cibles positionnées à sa surface permettront de comparer les résultats en fonction de la position et du nombre d'appareils photo synchronisés.



Fig. 3 : (a) Structure avec les cibles, et (b) Structure sans cible.

Elle permettra également d'étudier une méthode de relevé et de traitement photogrammétrique sans cible (*targetless*) et d'évaluer certains paramètres environnementaux, comme l'ensoleillement. De plus, les calibrations interne et externe des caméras seront calculées pour chaque jeu de données grâce à des références relevés au laser tracker.



4. Développement de méthodes sans cible pour le contrôle dimensionnel

Pour la deuxième partie du projet, nous avons exploré une approche de contrôle dimensionnel par photogrammétrie sans cible. Cependant, mettre en œuvre cette technique dans un environnement aussi instable que l'*offshore* et sur des structures métalliques homogènes comme les brides est extrêmement complexe et entraîne une précision 2 à 3 fois inférieure par rapport aux méthodes classiques [Kortaberria et al., 2018].

Une ortho-image a été réalisée à partir d'images d'un précédent projet de contrôle dimensionnel, isolant la bride à traiter pour concentrer l'étude sur des techniques de traitement d'images sur cette partie spécifique. La programmation de code *Python* a permis de tester des détecteurs de points d'intérêt ou de *Bundle Adjustment* en fonction des données en entrée. Parallèlement, l'utilisation de la transformée de Hough pour détecter des formes géométriques spécifiques, comme des cercles ou des lignes, dans les images de la bride a permis d'améliorer la précision en identifiant des motifs récurrents et structurés qui peuvent servir de références pour les mesures dimensionnelles.

De plus, plusieurs mouchetis ou motifs projetés sur la structure de la bride ont été expérimentés. Ces motifs permettent de créer des points de référence supplémentaires dans les images, améliorant ainsi la robustesse et la précision des algorithmes de détection et de correspondance des points. En projetant des motifs connus sur la bride, nous pouvons mieux évaluer l'influence de différents paramètres environnementaux, tels que la lumière du soleil, sur la qualité des images et la précision des mesures.

5. Comparaison et tests

Après avoir effectué les traitements photogrammétriques avec Agisoft Metashape ® et les calculs dimensionnels de divers paramètres tels que la planéité, la taille des trous de boulons, et les dimensions des cercles extérieurs et intérieurs avec Polyworks ®, nous procéderons à une comparaison de ces paramètres. Cette comparaison s'appuiera sur différents jeux de photos variant selon la disposition des caméras, la présence ou l'absence de soleil, et l'utilisation ou non de cibles. Ces variables permettront d'évaluer l'impact de ces facteurs sur la précision des calculs photogrammétriques et des analyses dimensionnelles.

6. Conclusion et perspectives

Ce projet novateur a permis d'explorer en profondeur la photogrammétrie, souvent perçue comme une "boîte noire", en se concentrant notamment sur la question de l'évaluation de la précision. Il a également fourni des réponses sur la disposition optimale des caméras, l'avantage de la structure innovante imaginée par Fugro Geoid (Figure 3), et les techniques à appliquer pour réaliser un contrôle dimensionnel via la photogrammétrie sans cible. Toutefois, les nombreux tests ont été effectués sur une maquette dans des conditions d'atelier et non en *offshore*. Il serait donc pertinent de vérifier si les résultats restent constants dans les conditions réelles du chantier et sur une bride complète.

7. Références

- [Chazaly, 2023] Chazaly, B. (2023). Flange Dimensional Control. Présentation, Fugro GEIOD.
- [Hartley and Zisserman, 2004] Hartley, R. and Zisserman, A. (2004). Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, second edition.
- [Kortaberria et al., 2018] Kortaberria, G., Mutilba, U., Gomez-Acedo, E., Tellaeche, A., and Minguez, R. (2018). Accuracy evaluation of dense matching techniques for casting part dimensional verification. *Sensors*, 18 :21.
- [Kortaberria et al., 2017] Kortaberria, G., Olarra, A., Tellaeche, A., and Minguez, R. (2017). Close Range Photogrammetry for Direct Multiple Feature Positioning Measurement without Targets. *Journal of Sensors*, page 10.
- [Luhmann et al., 2020] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., and Harley, I. (2020). Close Range Photogrammetry and 3D Imaging. Walter De Gruyter, Dunbeath, Scotland, third edition.

Conception et automatisation de calibration d'un système de caméra

PFE présenté par : **Enola Piron**
Société d'accueil : **HEIG-VD**
Directeur de PFE : **Adrien Gressin**
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



1. Contexte et objectif de l'étude

En photogrammétrie, pour des mesures précises, il est essentiel de calibrer les caméras utilisées pour corriger les distorsions dans les acquisitions. À la HEIG-VD, la photogrammétrie est utilisée pour des projets de cours ou des projets comme la numérisation des collections de science naturelle (*SwissCollNet*). Se référer aux travaux de Nicolas Marty (PFE 2023).

La calibration des caméras est souvent réalisée avec des logiciels dits "boîte noire", rendant l'interprétation et la validation des résultats plus difficiles. L'objectif de l'étude est de calibrer différentes caméras avec un logiciel créé en interne, basé sur des principes fondamentaux et des recherches antérieures. Le tout en optimisant et automatisant le processus pour le rendre plus efficace et robuste. Cette étude s'appuie sur les enseignements en photogrammétrie dispensés à l'INSA et à l'HEIG-VD.

2. Points importants de l'état de l'art

La détermination des paramètres intrinsèques (focale et point principal), extrinsèques (définis par la rotation (R) et la translation (t)), ainsi que des modèles de distorsion (radiale et tangentielle selon le modèle Brown-Conrady), est essentielle pour le processus de calibration.

Pour obtenir une première estimation de ces paramètres, la Direct Linear Transformation (DLT) est souvent utilisée. Cette méthode permet de déterminer une valeur approchée des paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras, ce qui est nécessaire pour appliquer des techniques d'estimation comme les moindres carrés.

Afin de procéder à la calibration, plusieurs méthodes peuvent être employées, telles que l'utilisation d'objets 2D ou 3D (comme un damier) ou la méthode d'auto-calibration. Dans cette étude, des cibles circulaires, qu'elles soient codées (comme les cibles Agisoft) ou non, ont été retenues. Pour automatiser le processus de calibration avec des cibles, il est nécessaire de détecter automatiquement les cibles et leur centre.

Pour cela, une des méthodes est de seuiller les images RGB acquises afin d'en extraire les contours circulaires puis de générer les cercles à partir de ces contours. Cependant, une forme circulaire en 3D se projette sous forme d'ellipse en raison de la transformation projective, et le centre de l'ellipse ne correspond pas au centre réel de la cible circulaire. *Yan Liu et al. (2021)* ont démontré cela dans leurs travaux, et leurs équations seront utilisées pour calculer le centre des cibles à partir des ellipses.

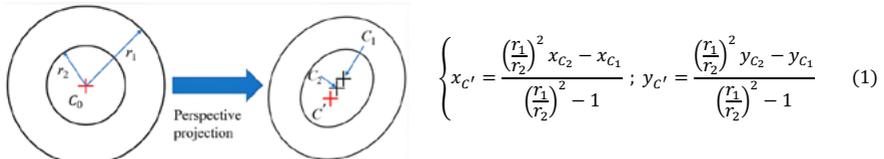


Fig. 1 : Schéma de projection des centres, Yan Liu et al. (2021)



3. Méthodes développées

Création des méthodes de calibration à différentes échelles

Pour les acquisitions terrestres, un polygone d'étalonnage (cf. Fig. 2, a,b) avec une vingtaine de cibles circulaires non codées a été utilisé. Pour les caméras industrielles du projet *SwissCollNet*, une mire de calibration pyramidale en aluminium, avec des cibles codées (Agisoft) a été créée (cf. Fig. 2, c). Dans l'élaboration de ce résumé, la conception de la méthode pour la partie aérienne a été explorée mais n'a pas encore été mise en place. Des cibles circulaires gravées sur des plaques en aluminium seront installées dans un espace vaste (spécifiquement dans le champ derrière l'école). Il est également prévu de calibrer les caméras pour les projets en intérieur en utilisant une installation de calibration située dans un coin d'une salle de l'école.



Fig. 2 : (a) Polygone d'étalonnage, (b) cible utilisée sur le polygone, (c) Mire de calibration

Détection automatique des cibles

Afin de détecter automatiquement les différents types de cibles présentes sur chaque système, l'utilisation de l'intelligence artificielle, en plein essor en photogrammétrie ces dernières années, a été privilégiée. Pour atteindre les objectifs visés, nous avons opté pour l'entraînement de *Detectron2*, un réseau de neurones préentraîné développé par Facebook AI Research et reconnu pour ses performances élevées et sa flexibilité.

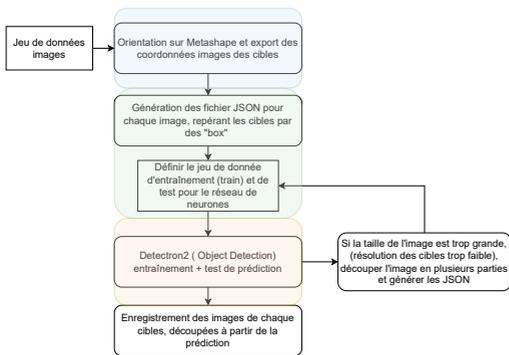


Fig. 3 : Diagramme des étapes de l'entraînement du réseau de neurones

Nous avons choisi le modèle *faster_rcnn_R_101_FPN_3x*, car il combine plusieurs techniques avancées. Le *Faster R-CNN* est adapté pour la détection d'objets, et le *ResNet-101*, avec ses 101 couches, offre une capacité d'apprentissage accrue. La Feature Pyramid Network (*FPN*) améliore la détection d'objets de tailles variées et la configuration 3x assure un entraînement rigoureux pour une meilleure performance.

Pour cette étude, 2 réseaux de neurones différents ont été entraînés afin de reconnaître les 2 types de cibles. Les différentes étapes des entraînements sont montrées à la Fig. 3.

Détection des centres de cibles

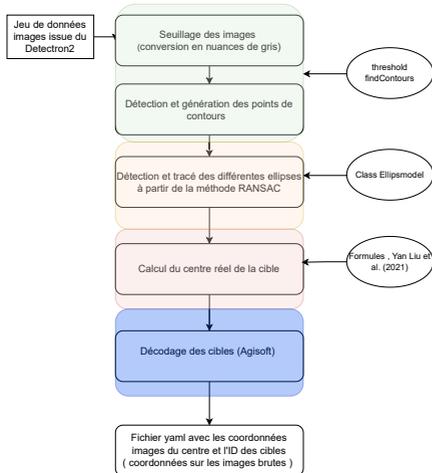


Fig. 4 : Diagramme des étapes du script pour la détection des centres de cibles Agisoft

- Ellipse violette centrale : estimée par RANSAC à partir des points du contour du centre
- Ellipse orange : ellipse extérieure estimée par RANSAC
- Ellipse bleue et jaune : tracées en multipliant par un coefficient 2.5 et 1.5, les paramètres de l'ellipse centrale. Elles permettront le décodage de la cible.
- Croix bleue : centre réel de la cible calculé à partir de la formule de Yan Liu et al. (2021)

Résultats



Fig. 7 : Résultat des détections de centre et du décodages des cibles sur la mire de calibration

Nombre d'images de la mire	Nombre de cibles détectées par Detectron2	Nombre de centres calculés	Moyenne des écarts en x et y des centres par rapport à Metashape	Temps de traitement Detectron2 + détection du centre des cibles/ Metashape
200	780	715	Moy(dx) = 0.74pix Moy(dy) = 0.49pix	13 min. 1min.

- Cibles Agisoft

Pour la détection des centres de cibles « Agisoft », plusieurs aspects ont été abordés pour garantir une précision à un demi-pixel. Les étapes principales du script d'identification de ces centres sont illustrées à la Fig. 4.

Comme vu dans l'état de l'art, le but est ainsi d'estimer la position du centre réel à l'aide de deux ellipses, générées à partir des points des contours de la cible.

Pour traiter et extraire les données des images, plusieurs algorithmes de seuillage et d'extraction des contours sont utilisés. Afin de renforcer la détection des ellipses et de déterminer le centre réel des cibles, la méthode RANSAC (Random Sample Consensus) est appliquée.

La Fig. 5 présente les résultats listés ci-dessous:

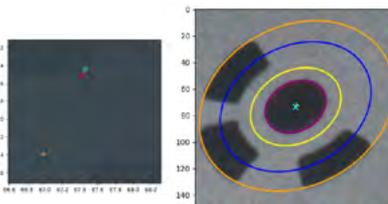


Fig. 5 : a) écarts entre les différents centres ; b) Résultat visuel du tracé des ellipses et du centre de la cible

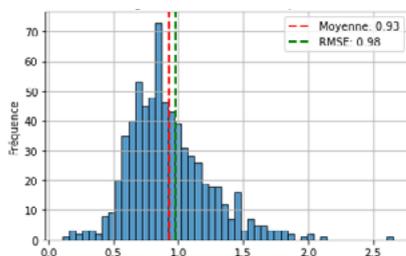


Fig. 6 : Histogramme des écarts

La Fig. 7 montre le résultat visuel de la détection automatique des centres avec l'algorithme développé. La Fig. 6 correspond aux écarts entre le centre calculé avec notre méthode et ceux détecté avec le logiciel Metashape. Pour ce cas précis 1 pixel = 0,02mm.

- Cibles non codées circulaires

Pour ce type de cibles, l'approche a été différente pour la détection du centre notamment en raison de la résolution des cibles et d'un contraste plus faible. La détection de contour est plus complexe. Il a donc été choisi de suivre le processus suivant : étapes de seuillage de l'image, nettoyage des pixels isolés puis calcul du barycentre des pixels noirs.

Étant donné que les cibles ne sont pas codées, il n'est pas possible de les associer directement à des points 3D à partir des points 2D détectés. L'objectif final est de les localiser dans le repère global en utilisant une transformation de Helmert, sans recourir à la détection de numéros de cibles. Les premiers résultats obtenus sont globalement satisfaisants et la suite de l'étude permettra d'évaluer s'ils sont suffisants pour atteindre les objectifs souhaités. Pour évaluer la précision du centre des cibles détecté, une estimation approximative par comparaison des écarts entre les centres calculés et ceux pointés manuellement sur les images brutes a été faite. Cette méthode de marquage manuel est similaire à celle effectuée sur Metashape pour ce type de cibles.



Fig. 8 : Résultat visuel du centre calculé à partir du barycentre d'une cible

Écart moyen en x entre les deux centres	0.56 pixels
Écart moyen en y entre les deux centres	0.63 pixels

Fig. 9 : Tableau des écarts en pixel entre les centres calculés et ceux pointés

4. Conclusion et perspectives

La détection des centres des cibles a été une tâche complexe et chronophage, nécessitant un investissement considérable en temps avant de pouvoir avancer vers la calibration proprement dite. Pour les prochaines étapes, l'objectif est d'améliorer l'efficacité du calcul des centres et d'intégrer au logiciel de l'école la méthode DLT, ainsi que la conversion des paramètres de rotation (r) vers le format opk (ω , ϕ , κ). Cette intégration permettra une estimation précise des paramètres initiaux de chaque caméra. De plus, l'étude sur la calibration automatique des cibles non codées sera poursuivie pour évaluer sa faisabilité.

Les résultats obtenus jusqu'à présent sont très satisfaisants et prometteurs pour la poursuite de cette étude. À ce stade, il est important de souligner qu'en développant une chaîne de traitements robuste et bien établie, il est possible d'obtenir des résultats comparables à ceux des logiciels dits « boîte noire ». Actuellement, le logiciel de l'école prend en charge le calcul de la calibration des caméras par méthode de compensation. Ce projet vise donc à automatiser complètement cette phase du processus dans le logiciel, ce qui améliorera l'efficacité et la robustesse de la calibration des caméras.

Les lecteurs qui souhaitent d'avantages de résultats détaillés sont invités à consulter le mémoire de fin d'études ou à assister à la soutenance liée à ce projet.

5. Référence bibliographique

Liu, Y.; Su, X.; Guo, X.; Suo, T.; Yu, Q. A Novel Concentric Circular Coded Target, and Its Positioning and Identifying Method for Vision Measurement under Challenging Conditions. *Sensors* 2021, 21, 855. <https://doi.org/10.3390/s21030855>

Amélioration des procédés d'implantations et de réglages topographiques appliqués au projet RJH - CEA de Cadarache

PFE présenté par : **Emma-Paule MAROUKEYAN-**

HARKANE

Société d'accueil : **SITES**

Directeur de PFE : **Mathieu HANSEN**

Correcteur : **Mathieu KOEHL**

Encadrante : **Mai-Linh RUIZ**



1. Contexte de l'étude

L'entreprise SITES est une société d'ingénierie spécialisée au service de la performance et de la durée de vie des infrastructures. Le groupe TOP-MIM de l'agence d'Aix-en-Provence intervient notamment sur deux projets tous deux en construction : le projet de recherche mondial sur la fusion nucléaire (ITER) ainsi que le projet Réacteur Jules Horowitz (RJH) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives de Cadarache (CEA). Mon projet de fin d'études est appliqué à ce dernier. Le réacteur Jules Horowitz est un réacteur expérimental. Il est destiné à fournir des données scientifiques sur le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à un flux neutronique intense ainsi qu'à la production de radioéléments pour la médecine nucléaire. À la suite de la récente obtention par SITES de la certification de la norme ISO 19443, ainsi que par l'adhésion de l'entreprise au GIFEN, le groupe se doit de mettre au cœur des processus topographiques la culture de sûreté nucléaire pour toute intervention sur chantier d'une Installation Nucléaire de Base (INB).

2. Objets de l'étude et présentation norme ISO 19443

SITES a depuis quelques mois une forte augmentation de ses activités avec notamment une mission pour le client Clemessy, acteur majeur du milieu industriel. La mission correspond à l'implantation d'environ 8000 platines de supports de câbles électriques. Il s'agit d'une implantation topographique des points constitutifs des platines. La figure n°1 présente plus explicitement les objets à implanter. Pour répondre à cette mission, un processus technique a été mis en place dès le début des opérations.

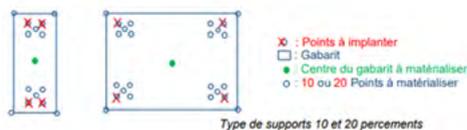


Figure 1: Exemple de types de platines à implanter

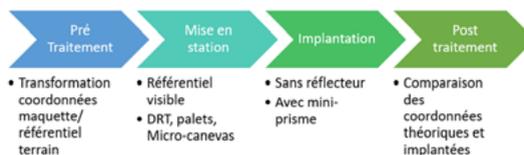


Figure 2: Processus d'implantation



La norme ISO 19443 est une norme de management des systèmes qualité, appliquée aux intervenants du secteur de l'énergie nucléaire. Elle a l'ambition de confirmer la place de la sûreté nucléaire au centre des préoccupations de tout fournisseur de l'industrie nucléaire.

Pour faciliter la déclinaison pratique des exigences de la norme à notre mission, on peut s'appuyer sur la définition proposée en France dans le code de l'environnement (art. L.591-1) : « La sûreté nucléaire est l'ensemble des dispositions techniques et des mesures d'organisation relatives à la conception, [...] des installations nucléaires de base [...], prises en vue de prévenir les accidents ou d'en limiter les effets. »

L'indication des dispositions techniques d'une opération se doit d'être précise, il est nécessaire de fournir un dossier de service, **complet, fiable et robuste**. Pour cela, il faut avoir une connaissance claire des enjeux de sûreté relatifs à la prestation fournie.

Notre activité d'implantation de platines est considérée comme Activité Importante pour la Protection des intérêts communs (AIP), activité pour laquelle des objectifs de sûreté doivent être respectés. En effet, cette activité porte sur un élément important pour la protection des intérêts (EIP) : les platines de support électrique. La position des platines a été étudiée afin que les chemins de câbles électriques maintiennent impérativement la position attribuée face à tout évènement majeur dont le risque sismique.

Les exigences à respecter sont énumérées ci-dessous ainsi que le rappel des points caractérisants cette activité.

- Implantation des 4 coins extérieurs des platines avec une tolérance de +/- 2 mm par rapport à la côte théorique.
- Traçage des 10 ou 20 points de perçage ainsi que du point central de la platine à l'aide d'une annexe (gabarit plexiglass de géométrie identique à la future platine implantée).
- Production d'un procès-verbal d'implantation complet.

Nomenclature AIP (thème)	Fonction de sûreté	EIS associé à l'activité	Risques potentiels liés à l'activité	Conséquences
Conception de l'INB	Maintenir la communication électrique en marche normale mais aussi et surtout lors d'incident ou d'accident	Platines des supports de câbles électriques	Mauvaise implantation de l'EIS entraînant un mauvais dimensionnement et sa dégradation	EIS dégradé par une agression non identifiée dans les études Perte ou dégradation de la fonction de sûreté

Figure 3: Tableau des caractéristiques de l'AIP

Afin de respecter l'ensemble de ces exigences, mon projet de fin d'études a plusieurs objectifs, le premier étant la réalisation d'un bilan des erreurs potentielles sur le processus actuel. Pour cela, celui-ci sera décomposé étape par étape. Dans un second temps, il s'agira d'établir une classification de ces erreurs afin d'apporter des verrous techniques à celles-ci en adéquation avec leur niveau de criticité.

3. Étude des erreurs et présentation des parades mises en place

Afin d'étudier les erreurs, le processus d'implantation est décomposé en trois phases clés, la préparation des données à implanter, la phase d'implantation sur le terrain ainsi que la phase de traitement des données implantées.

Nous avons établi, une classification des erreurs afin de mettre en place des parades techniques cohérentes. Cette classification est basée sur l'impact de l'erreur sur la mesure ainsi que sur sa fréquence d'apparition dans le processus. Celle-ci est présentée ci-dessous à l'aide de la figure n°4.

Le caractère « détectable » ou non de l'erreur lors d'une phase du processus rentre également dans la prise en compte.

IxF	Description	Impact (I)		
		Mineur (< 2mm)	Significatif (< 1 cm)	Majeur (> 1 cm)
Rouge	Risque d'erreurs non acceptables. Ajouter absolument des verrous techniques			
Jaune	Risque tolérable Mettre en place des actions de contrôle			
Vert	Acceptable Actions optionnelles			

Fréquence (F)			
	Impact (I)		
	Mineur (< 2mm)	Significatif (< 1 cm)	Majeur (> 1 cm)
	Peu probable	1	2
Probable	2	4	6
Très probable	3	6	9

Figure 4 : Criticité de l'erreur

Bilan des erreurs :

Il s'agit d'un extrait du bilan réalisé et présenté en détail dans le mémoire. Ce bilan est développé en se basant sur les critères de l'approche graduée qui a été mise en place afin d'accorder un rang de criticité à chaque erreur identifiée.

➤ Phase de préparation des données

- Erreur d'application de la transformation des coordonnées fournies par le client (référentiel maquette) en coordonnées dans le référentiel topographique

Impact significatif ou majeur selon l'ordre de grandeur de l'erreur de transformation

Parade : Création d'un script de transformation automatique des coordonnées.

➤ Phase d'implantation-terrain

- Traçage du mauvais type d'annexe ou oubli de points à implanter.

Impact significatif sur le dimensionnement de la platine.

Erreur détectée lors de la mission de détection des ferrillages autour des zones de traçages des platines

- Mauvaise attribution de la hauteur de réflecteur

Impact majeur : une différence d'élévation de 20 cm peut être présente et dépend de la hauteur de canne utilisée pour la mise en station de l'appareil.

Parades : Réalisation de mesures directes de contrôle. Indication des hauteurs de réflecteurs utilisées sur une feuille de suivi.

- Confusion et échange des étiquettes des platines

Impact majeur, détectable ou non selon s'il s'agit de deux étiquettes du même type de platines ou de types différents.

Parade : Réalisation de photographies avec l'étiquette visible en soutien à la feuille de suivi.

➤ Phase de traitement des acquisitions

- Erreurs développées dans le mémoire de ce projet de fin d'études

Le guide publié par l'organisme Filiance « Clés de lecture de la norme ISO 19443 » propose une bonne pratique à mettre en place afin d'évaluer le respect des exigences définies. Il s'agit de l'instauration d'une matrice de conformité, cette pratique est développée dans le mémoire afin d'avoir un regard critique sur le processus global.

4. Étape de contrôle

Pour donner suite à notre bilan des erreurs du processus de contrôle, une solution de contrôle **complète et générale** des implantations a été imaginée. Cette parade est basée sur l'acquisition de données par lasergammétrie. En effet, ce domaine d'acquisition nous permet d'avoir des données



indépendantes d'un relevé tachéométrique, pour lequel des erreurs citées précédemment sont présentes.

L'enjeu de ce développement informatique est la détection automatique des implantations effectuées (traçage sur voile en béton) afin de comparer via un autre jeu de données, les coordonnées réellement implantées et théoriques.

Une fois le nuage de points recalé dans le bon référentiel topographique, il est nécessaire de nettoyer et de segmenter les plans des voiles constitutifs d'une salle, afin d'en générer des orthophotographies. La majorité des voiles ayant un axe du référentiel qui leur est orthogonal, il est judicieux de travailler en 2 dimensions pour ce développement. Les orthophotographies générées sous Trimble Realworks sont ensuite traitées par le script python développé ; la détection des éléments de traçage se faisant automatiquement par intelligence artificielle avec le réseau de neurone YOLO (Redmon et al. 2016), spécialisé dans la reconnaissance de forme sur des données images 2D.

Le concept général de l'algorithme développé est présenté ci-dessous :

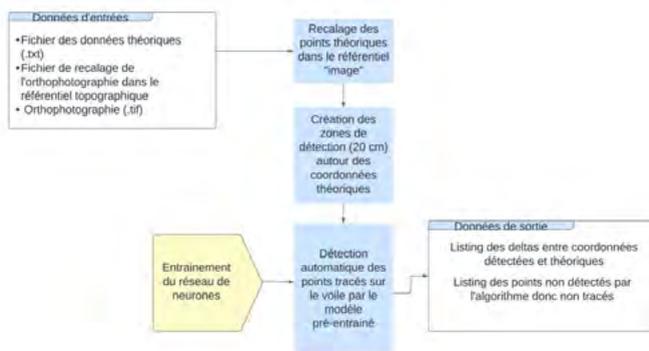


Figure 5: Concept général de l'algorithme développé

5. Conclusion

Ce projet de fin d'études très complet a permis de mettre en place une évaluation approfondie d'un processus topographique dans le cadre d'un chantier d'une installation nucléaire de base, bâtiment pour lequel des exigences bien particulières sont définies.

Ce bilan des erreurs permet d'identifier les points méritant des parades techniques supplémentaires afin d'assurer les exigences de cette AIP.

La création d'un algorithme de détection automatique des implantations constitue la parade technique majeure qui a été mise en place ; celle-ci se positionnant comme une phase de contrôle dans le processus, permettant d'avoir un rendu direct et rapide de l'enjeu principal de l'activité, l'implantation correcte des équipements électriques de l'INB.

Le bilan des erreurs du processus ainsi que l'analyse détaillée du programme développé sont à retrouver dans le mémoire de ce projet de fin d'études.

6. Bibliographie

Filiance (2022), 'Les clés de lecture de l'ISO 19443', Révision (1)

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. & Farhadi, A. (2016), 'You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection'.

Développement d'une option d'ajustement du modèle stochastique et mise en production du module de compensation de TopTools

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



1. Contexte et objectifs de l'étude

TPLM-3D est une entreprise de topographie française fondée en 2004 par David Desbuisson et Stéphane Hopp, ingénieurs géomètres de l'INSA Strasbourg. Elle est spécialisée dans les travaux spéciaux et la mesure 3D que ce soit dans les secteurs de l'industrie, du BTP et de l'architecture. Pour mener à bien ces services, l'entreprise a recours aux techniques de lasergrammétrie, photogrammétrie, topographie classique et métrologie. La métrologie nécessite l'utilisation de matériel adapté et la mise en place de modes opératoires spécifiques. Le choix du logiciel de calcul est également important. Il doit contenir des paramètres de calcul suffisamment fins pour pondérer avec réalisme la précision théorique des différentes mesures ; on parle de modèle stochastique. Ces paramètres ont un impact sur les résultats de la compensation tels que les coordonnées finales et l'analyse des résultats.

TPLM-3D a choisi d'utiliser le logiciel suisse LTOP, développé par SwissTopo, pour ses calculs de compensation de réseaux de points. Ce logiciel dispose de plusieurs fonctionnalités d'ajustement et d'analyse du modèle stochastique, des indicateurs de précision et de fiabilité, ainsi qu'une option d'estimation robuste. C'est un logiciel très complet, performant et bien documenté.

Pour pallier le manque d'intuitivité de LTOP, TPLM-3D a développé le logiciel TopTools, servant d'interface au logiciel suisse. TopTools facilite le paramétrage, le lancement des calculs et l'analyse des résultats.

Cependant, ces dernières années, la pérennité de LTOP n'est plus assurée par SwissTopo. TPLM-3D a donc entrepris, depuis 2021, le développement en interne de son propre module de compensation, appelé « COMP ». Grâce aux projets de fin d'études de Solène Ignaccolo et Youen Delalande, « COMP » est, à ce jour, opérationnel. Seule l'évaluation du modèle stochastique reste à effectuer avant la mise en production du module de compensation.

Le premier objectif de cette étude traite de la révision et l'amélioration du modèle stochastique ainsi que du développement des méthodes d'évaluation de ce dernier. Ces parties seront validées grâce à des tests sur des réseaux existants et des réseaux de synthèse. Ce projet s'inscrit dans la continuité du projet de recherches technologiques réalisé par Juliette Brochier au semestre dernier. Elle a étudié les fonctionnalités et indicateurs nécessaires à une évaluation du modèle stochastique.

La dernière partie du projet touche à la mise en production du module de compensation « COMP » de TopTools, à travers de l'optimisation du code source et l'ajout d'indicateurs. Cette partie sera également soumise à des tests sur des réseaux existants et des réseaux de synthèse. Elle s'achèvera par la rédaction de modes opératoires et fiches de contrôles.

2. Révision et amélioration du modèle stochastique

Lors de son PFE, Solène Ignaccolo a défini le modèle stochastique actuel du module de compensation « COMP ». Elle a implémenté les formules de précisions théoriques des observations (distances, directions horizontales et dénivelées) au plus proche de celles détaillées dans la documentation LTOP. Le logiciel suisse est considéré comme référence dans le développement de « COMP ». Les tests ont



montré que « COMP » et LTOP donnaient des résultats similaires au niveau de la définition du modèle stochastique.

Cette présente étude a pour but de réviser ces formules afin d'améliorer le réalisme du modèle stochastique.

2.1 Modifications

En planimétrie, les erreurs de centrage de la station et de la visée ont été décorrélées. La composante de la précision de l'angle vertical a également été ajoutée à la formule de précision théorique d'une observation de distance horizontale. En effet, la mesure de distance inclinée issue de l'appareil est réduite à l'horizontale grâce à l'angle vertical.

Pour la partie altimétrique, la formule de précision des dénivelées a été modifiée afin de prendre en compte pour chaque observation, l'angle zénithal mesuré et la précision de la distance horizontale calculée à partir de la précision des coordonnées compensées lors du calcul planimétrique. De façon similaire au calcul de compensation planimétrique, les erreurs de hauteur de la station et de la visée ont été décorrélées. Nous avons constaté que la précision des dénivelées était multipliée par $\sqrt{2}$ dans le cas où les mesures possèdent une visée réciproque et par $\sqrt{3}$ dans le cas contraire. Ces multiplications sont issues de la documentation LTOP, mais nous n'avons pas trouvé d'explications mathématiques. Elles ont donc été supprimées.

2.2 Ajout de fonctionnalités

Outre la possibilité d'entrer des valeurs standards d'erreurs de centrage et de hauteur distinctes pour la station et la visée, l'utilisateur pourra également individualiser ces erreurs pour une station ou même une observation, par exemple. Il a aussi la possibilité de créer des groupes de coordonnées planimétriques et altimétriques avec des précisions différentes.

3. Evaluation du modèle stochastique

Après avoir révisé les formules de précisions théoriques, l'étape suivante consiste à évaluer la cohérence du modèle stochastique. Le PRT de Juliette Brochier et l'état de l'art recensent les méthodes d'évaluation du modèle stochastique dans les logiciels de compensation existants. Cette étude a ensuite permis d'approfondir ces méthodes afin de choisir celles à implémenter dans le module de compensation.

3.1 Méthodes d'évaluation

Dans le cadre de l'évaluation du modèle stochastique, deux objectifs ont été retenus.

Le premier objectif est la vérification du réalisme des précisions théoriques des observations grâce au calcul des quotients et tests statistiques du χ^2 globaux et par groupes d'observations. Pour ces premières méthodes d'évaluation du modèle stochastique, nous faisons l'hypothèse que les variances de l'unité de poids *a priori* et *a posteriori* sont égales. Nous avons calculé les quotients de ces variances de façon globale et par groupes d'observations. Un groupe d'observations est défini en fonction de l'appareil utilisé et du type d'observations (distances, angles, dénivelées, etc.). Afin de valider l'hypothèse émise précédemment, ces quotients doivent être proches de 1. La variance de l'unité de poids *a posteriori* est calculée en fonction de la redondance du réseau ou du groupe d'observations. Le test du χ^2 va permettre d'adapter le domaine d'acceptation des quotients en fonction de cette redondance, appelé degré de liberté pour les tests statistiques.

Le second objectif est de vérifier que les observations sont bien entachées d'erreurs accidentelles distribuées selon une loi normale. Le test statistique de normalité de Kolmogorov-Smirnov (KS) va vérifier si les résidus normés (w_i) suivent une distribution normale et/ou une distribution normale centrée réduite. Le test de Shapiro-Wilk (W) est également un test statistique de normalité appliqué aux w_i . Le test W est plus approprié pour des petits échantillons (inf. 50 données), tandis que le test KS peut être utilisé pour des échantillons de toutes tailles, bien qu'il soit moins puissant. Dans le but d'interpréter plus facilement les résultats des tests statistiques, nous avons choisi de représenter l'histogramme et le diagramme quantile-quantile des w_i . Ce sont des tests de normalité dits « graphiques ».

Une fois la théorie développée et les algorithmes mis au point, ces méthodes d'évaluation ont été implémentées en C++, par moi-même, au sein du module de compensation « COMP ».

3.2 Log des résultats

Une fois les éléments liés au modèle stochastique calculés, il est important de les retranscrire dans le log et dans l'interface graphique. L'utilisateur a maintenant accès au résumé des paramètres rentrés pour définir le modèle stochastique, puis aux quotients et tests du χ^2 et finalement aux tests de normalité. L'utilisateur voit apparaître en rouge les tests statistiques (χ^2 , KS et W) rejetés et en vert ceux validés. Il peut également contrôler les histogrammes et diagrammes quantile-quantile en fonction du groupe d'observations.



Fig. 1 : Représentation des résultats des tests de normalité

3.3 Tests

Un premier test a été réalisé sur un réseau existant de 6 stations libres et 267 observations pour 153 inconnues. Il a été choisi, car il représente un réseau « classique » de TPLM-3D. Les méthodes d'évaluation du modèle stochastique ont été calculées avant révision et amélioration du modèle stochastique. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de LTOP, ce qui nous a permis de valider l'implémentation des quotients et test du χ^2 . La justesse des tests de normalité a été vérifiée à partir d'exemples présents dans les documents bibliographiques.

Ce même réseau a été recalculé après modifications du modèle stochastique. Nous avons constaté une nette amélioration des quotients altimétriques, avec des valeurs très proches de 1. Ceci nous a permis de valider les modifications effectuées dans les formules de précision théorique des observations, la décorrélation et l'individualisation des erreurs de centrage et de hauteur.

	Global plani.		Global alti.		Ds	Hz	Dz
	Quotient	Résultat χ^2	Quotient	Résultat χ^2			
LTOP	0,99	Validé	0,36	Rejeté	0,78	1,20	0,36
COMP avant	1,00	Validé	0,36	Rejeté	0,79	1,21	0,36
COMP après	1,00	Validé	1,14	Validé	0,79	1,21	1,14

Tab. 1 : Validation de l'implémentation des méthodes d'évaluation et des modifications du modèle stochastique

Il était également nécessaire de contrôler le bon fonctionnement de toutes les méthodes d'évaluation du modèle stochastique quels que soient la taille, la redondance du réseau, le nombre de groupes d'observations et le réalisme du modèle. Pour cela, nous avons créé quatre réseaux de synthèse de 70 à 1500 observations, de différentes géométries (stations libres, cheminement polygonal encadré, points doubles, etc.). Cette approche par des réseaux de synthèse nous permet de maîtriser le bruit affecté aux observations. Les résultats de ces tests seront analysés plus précisément dans la suite du PFE et exposés dans le mémoire. Néanmoins, nous pouvons d'ores et déjà souligner des résultats cohérents et fidèles à la théorie en planimétrie. En altimétrie, les quotients, bien que plus proches de 1, ne rentrent pas systématiquement dans le domaine d'acceptation et les tests de normalité ne sont pas toujours validés. Une étude approfondie serait nécessaire et pourrait remettre en question l'indépendance des observations. Ce point dépasse le cadre de ce PFE.

4. Mise en production de « COMP »

Cette dernière partie de l'étude traite de la mise en production de « COMP » avec les modifications effectuées, les tests de concordance avec LTOP, et la rédaction des modes opératoires et fiches de contrôles pour les collaborateurs de TPLM-3D.

4.1 Optimisation du code source

Nous avons choisi d'éliminer les changements d'unités qui complexifiaient le code et l'interprétation des résultats intermédiaires. Après modifications, tous les éléments en lien avec des observations métriques sont exprimés en millimètre (« mm ») et les éléments touchant à des observations angulaires en décimilligrade (« dmgon » ou « cc »).

L'harmonisation des unités en « dmgon » est intéressante lorsque l'on veut pondérer les observations sans utiliser la matrice des poids. Ce n'est pas la méthode retenue pour le développement de « COMP ». Un contrôle a été réalisé avant et après élimination de l'harmonisation des unités, les résultats obtenus se sont avérés identiques.

4.2 Ajout d'indicateurs

Comme LTOP, le nombre d'observations planimétriques et altimétriques associées à chaque point nouveau a été déterminé grâce à la matrice jacobienne. Chaque point nouveau (E, N, H) a au minimum besoin de deux observations planimétriques et une observation altimétrique pour être calculé. Chaque orientation des stations (V_0) nécessite une observation planimétrique pour être déterminée. L'utilisateur peut ainsi vérifier l'importance d'une observation avant de l'éliminer.

Dans le cas où l'utilisateur désactiverait une observation, cette dernière n'est plus prise en compte dans le calcul de compensation. Afin de vérifier que la désactivation des observations est justifiée, nous avons recalculé les observations de distances et directions avec les coordonnées finales. Il est alors possible d'obtenir les écarts de ces observations fictives avec les observations mesurées supposées "fausses". L'analyse de ces écarts peut mettre en évidence, dans certains cas, l'origine de la faute, comme une hauteur de prisme par exemple.

4.3 Tests

Les premiers tests consistent à contrôler la cohérence de LTOP et « COMP » par rapport à des réseaux vrais. Pour cela, les réseaux de synthèse créés pour les tests sur le modèle stochastique ont été réutilisés. Cette approche nous permet de calculer des écarts vrais sur les coordonnées finales pour les trois modes de calcul de compensation : libre, libre ajusté et contraint. Pour ne pas fausser les analyses, les paramètres du modèle stochastique étaient similaires.

Nous avons ensuite fait les mêmes comparaisons après l'ajout de bruit sur les observations.

Dans un second temps, nous allons faire la comparaison de résultats entre LTOP et « COMP » sur des réseaux existants. Pour cela, nous allons choisir des réseaux de taille et configuration différentes. Afin d'automatiser les étapes, un module de comparaison a été développé. Il récupère les données des listings de résultats LTOP et calcule des écarts avec les résultats de « COMP ». Les éléments mis en parallèle sont le nombre d'éléments associés aux points nouveaux, les V_0 , les coordonnées finales, les indicateurs de précision et de fiabilité, ainsi que les résidus normés et la fiabilité locale.

L'ensemble des résultats est exposé dans le mémoire de PFE.

4.4 Rédaction des modes opératoires et fiches de contrôles

Ces documents auront pour but, au sien de TPLM-3D, de standardiser le processus de calcul de compensation des réseaux de points, de retracer les actions réalisées, de limiter les erreurs et d'être en mesure de contrôler la qualité.

5. Conclusion

Ce PFE a contribué au développement du module de compensation « COMP » de TopTools, destiné à terme à remplacer LTOP. Nous avons revu la définition du modèle stochastique et ajouté de nouvelles fonctionnalités pour permettre à l'utilisateur d'être au plus proche de la réalité. Les méthodes d'évaluation du modèle stochastique ont été implémentées afin de vérifier le réalisme du modèle stochastique et la distribution normale des erreurs accidentelles des observations. L'optimisation du code source a permis de gagner en clarté dans le code. Il serait également intéressant de réduire le temps de calcul en diminuant le stockage des matrices diagonales et/ou en changeant de méthode d'inversion des matrices. L'ajout d'indicateurs comme le dénombrement des observations en fonction des paramètres inconnus et les écarts aux observations désactivées donne des éléments d'analyse supplémentaires aux utilisateurs.

Les tests sur des réseaux existants et des réseaux de synthèse ont pour objectif de valider les améliorations du modèle stochastique, les méthodes d'évaluation de ce dernier et la concordance des résultats de « COMP » avec ceux de LTOP. Ils ont permis de soulever des interrogations quant à l'hypothèse de non-corrélation des données altimétriques. Des recherches complémentaires peuvent être envisagées.

Pour finir, des éléments supplémentaires peuvent être ajoutés au module de compensation « COMP » de TopTools comme l'intégration d'un système de coordonnées ou encore une option de préanalyse. Cette dernière option existe déjà via le module de réseau parfait mais pourrait être améliorée.



Etude de l'influence de la température sur les capteurs de type IoT :

Les inclinomètres MEMS

PFE présenté par : **Laureen BRELEUR**
Société d'accueil : **SNCF RESEAU**
Directeur de PFE : **Théo SAVOI**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

SNCF RÉSEAU assure la sécurité, la maintenance et la modernisation du réseau ferroviaire français pour le bon fonctionnement du réseau et la sécurité des usagers. Pour cela, des solutions plus ou moins classiques sont utilisées par la division Analyses et Techniques Topographiques (ATT) pour le suivi des ouvrages ferroviaires tels que les tunnels, les murs de soutènements, les talus, etc. À la suite du déraillement d'un TGV sur l'axe Paris – Strasbourg en mars 2020, causé par l'affaissement d'un talus sur la voie, la vigilance a augmenté. Cet événement a mené à l'évolution de la surveillance du réseau ; un contrat d'expérimentation avec SENCEIVE, leader mondial de la technologie de surveillance structurelle et géotechnique sans fil a été signé en août 2020. Cela a permis l'installations de capteurs IoT sur le réseau SNCF. La technologie « Internet of Things », en français l'Internet des Objets constitue un réseau d'objets intelligents permettant l'interopérabilité et la communication intelligente de données stockées dans un cloud avec des services et des applications en utilisant les normes internet. Ces objets sont capables de collecter et de transmettre des données automatiquement par le biais d'une passerelle, « Gateway », améliorant ainsi l'efficacité, la commodité, et la gestion des ressources depuis une plateforme de suivi généralement fournie par les constructeurs. Les capteurs de type IoT sont compacts, facile à installer, ont une alimentation avec une grande autonomie et ont un faible coût, cependant, la correction des erreurs liées à des grandeurs d'influence telle que la température n'est pas encore totalement maîtrisée.

1.2. Objectifs de l'étude

Les fournisseurs de capteurs tels que SENCEIVE, WISEN, A3IP, ne communiquent que très peu d'informations concernant la compensation thermique des inclinaisons et ne proposent que des méthodes d'étalonnage in-situ. Il serait cependant préférable de posséder un modèle correctif avant l'installation des capteurs sur site afin d'éviter l'intégration d'un mouvement déjà présent dans la correction.

Ainsi, le but de ce projet est de comprendre, de quantifier l'influence de la température et de corriger son impact sur les inclinaisons, étant la principale grandeur d'influence des capteurs inertiels Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS). Les inclinomètres au centre de cette étude sont en effet, des capteurs MEMS. L'objectif de ce Projet de Fin d'Etudes (PFE) est de développer un banc d'étalonnage où seules la température et l'inclinaison varient avec le moins de perturbations extérieures. Il sera également judicieux de déterminer s'il s'agit d'une corrélation linéaire ou non linéaire et de calculer par la suite un modèle correctif pour chacun des capteurs.



2. L'inclinomètre MEMS : Un capteur de type IoT

Il existe différents types d'inclinomètres tels que l'inclinomètres à pendule asservi, hydrostatique, etc., cependant, des études ont montré que l'inclinomètre MEMS est la meilleure solution pour la surveillance d'ouvrages. Ce sont des dispositifs miniaturisés qui regroupent des fonctions mécaniques et électriques ; les inclinomètres MEMS étudiés se composent d'un accéléromètre qui permet la mesure des inclinaisons grâce à la seconde loi de Newton. Ces capteurs sont principalement impactés par des erreurs déterministes (erreur de décalage de zéro, erreur de facteur d'échelle, de non-orthogonalité, etc.) et aléatoires dues à la complexité de leur processus de fabrication et aux conditions environnementales.

2.1. La compensation thermique des inclinaisons



Fig. 1 : Capteurs tests : (a) ODS SENCEIVE, (b) Omni Tilt & Distance Node WISEN

Une étude préliminaire a été menée afin d'exposer l'enjeu principal de ce projet, l'influence de la température sur les inclinomètres. Des capteurs tests installés dans les bureaux de la division ATT ont servi lors de cette étalonnage in-situ. Les données ont été exportées depuis les plateformes de suivi fournies par les fournisseurs en veillant à choisir une période avec une variation de température maximale d'environ 10 °C pour une étude significative. Cette première étude a en effet montré que la température impactait les mesures d'inclinaisons avec des coefficients de corrélations supérieurs à 70%. Cette condition étant satisfaite, une correction peut être appliquée. Les modèles correctifs ont été calculés par régression linéaire et/ou polynomiale. Pour ce faire, la mesure initiale a été prise comme référence pour en déduire les inclinaisons relatives, et ensuite calculer le polynôme correctif qui neutralise l'effet de la température.

Les inclinaisons ont été corrigées avec la formule suivante (pour une régression polynomiale) :

$$inc_{corrigée} = inc_{brute} - (aT^3 + bT^2 + cT + d) \quad (1)$$

avec $f(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d$, le polynôme correctif avec T la température

Ci-contre, les graphiques ne montrent pas de différences significatives entre les corrections linéaires et non-linéaires, sur la période choisie l'évolution des inclinaisons était linéaire en fonction de la température, il n'était donc pas nécessaire d'effectuer une correction polynomiale dans ce cas précis.

Les résultats obtenus à l'issue de cet étalonnage in-situ sont satisfaisants, cependant, les capteurs ne se trouvaient pas dans des conditions optimales, c'est-à-dire qu'il se pourrait qu'ils aient été soumis à des perturbations quelconques (vibrations dans le bâtiment, léger mouvement du mur de soutènement, etc.).

Le développement d'un banc d'étalonnage pour gérer un maximum de paramètres est donc nécessaire.

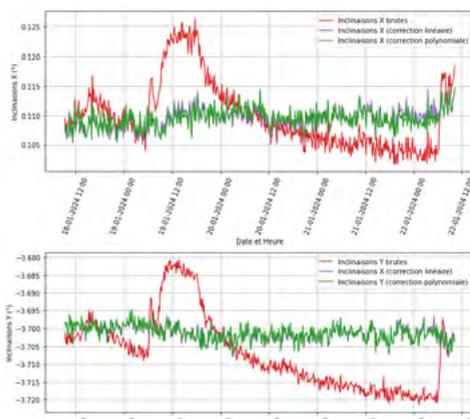


Fig. 2 : Inclinaisons X et Y avant et après compensation (capteur SENCEIVE)

3. La mise en condition environnementale : La conception du banc d'étalonnage

Le banc d'étalonnage développé se compose de deux parties principales : le goniomètre qui permet de faire varier les inclinaisons des capteurs et la chambre climatique qui reproduit des variations de températures. Ce système est monté sur une table optique afin d'assurer la stabilité, la planéité de la surface et de réduire les vibrations externes qui pourraient perturber les mesures d'inclinaisons.

3.1. La plateforme inclinable : le goniomètre



Fig. 3 : Goniomètre MOGO 150-20-204-MISM

Le goniomètre qui compose ce système est un OWIS MOGO 150-20-204-MiSM, il est motorisé dans le but d'avoir un système automatisé. Le goniomètre peut être contrôlé par le logiciel OWISoft, ou par un code python, une librairie étant disponible via un contrôleur PS10-32. La gestion du goniomètre a donc été faite à l'aide d'un code python où la plage des inclinaisons et le pas de déplacement peuvent être modifiés.

D'autre part, pour compléter ce système une plaque de fixation pour les capteurs a été modélisée. Celle-ci permet la fixation de deux capteurs de façon simultanée et ceci pour les trois fournisseurs de capteurs, des filetages étant placés de manière à pouvoir les fixer.



Fig. 4 : Plaque de fixation

3.2. La chambre climatique

Les chambres climatiques, car elles sont en double pour permettre l'étalonnage simultanée de deux capteurs, sont contrôlées depuis une carte électronique Arduino. Elles se constituent des composants suivants :

- Un module à effet Peltier TEC1-12706 qui permet la création de chaleur avec son système de dissipation (dissipateur et ventilateur).
- Une sonde PT100 associée à son amplificateur MAX31865 pour la mesure de la température du boîtier de capteurs.
- Une thermistance associée à sa résistance pour le contrôle de la température générée par le module Peltier faisant l'interface entre le module et le capteur.
- Un driver L298N qui assure le sens du courant transmis au module Peltier correspondant aux cycles (chauffage et refroidissement).
- Une alimentation de laboratoire.

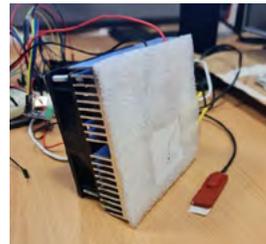


Fig. 5 : Chambre climatique pour un capteur

Le code principal a été développé depuis l'IDE Arduino. La stabilisation de la température se fait grâce au principe du régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). Le code utilise uniquement le régulateur proportionnel afin de moduler la largeur d'impulsion, Pulse Width Modulation (PWM), de la tension.

$$\text{Output} = K_p * \text{Erreur}$$

avec Erreur : la différence entre la température effective et la température ciblée



3.3. Les paramètres choisis pour l'étalonnage

Plage de températures	10°C – 60°C (Pas de 5°C)
Plage d'angles (goniomètre)	Intervalle de 3° à 4° avec des pas de 0,2°

Fig. 6 : Tableau des paramètres choisis pour l'étalonnage

Ces paramètres peuvent évoluer, cependant, l'idée d'avoir des températures négatives a été abandonnée. Malgré les nombreux essais et l'utilisation de dissipateurs plus performants associés à des ventilateurs, l'évacuation de la chaleur du côté de la face chaude du module Peltier semble ne pas être assez efficace.

4. Conclusion

A ce stade du PFE, de dernières calibrations de la chambre climatique et améliorations du programme contrôlant le système entier doivent être effectuées pour un bon étalonnage des inclinomètres. Par la suite, nous pourrons effectuer l'étalonnage des capteurs en récoltant les inclinaisons mesurées en fonction de chaque température. Les données seront traitées de façon similaire à la méthode de compensation thermique des capteurs tests, elles seront analysées, un calcul de corrélation sera fait et la tendance (linéaire ou non-linéaire) pourra être définie. Enfin, les modèles correctifs pourront être calculés en fonction de la tendance en procédant à une régression linéaire ou polynomiale. Les détails et différentes analyses seront présentés dans le mémoire de fin d'études.

Plusieurs améliorations du système sont envisageables pour l'avenir, même si elles ne pourront pas être intégrées d'ici la fin de ce projet de fin d'études (PFE). Premièrement, la chambre climatique actuelle est limitée car elle ne peut atteindre de très basses températures. Il sera donc nécessaire d'améliorer sa capacité à générer des températures négatives importantes. Cela permettrait d'effectuer des étalonnages sur une plage de températures allant de -20°C à 60°C, offrant ainsi une représentation plus fidèle des conditions réelles. Deuxièmement, la plaque de fixation actuelle ne permet l'étude que d'un seul axe. La conception d'une nouvelle plaque qui permettrait l'étalonnage complet des capteurs serait donc une amélioration significative.

En outre, il serait pratique d'uniformiser l'ensemble du programme dans un langage unique, tel que Python. Cela simplifierait la maintenance du système, améliorerait la compréhension du code et faciliterait les modifications futures si nécessaire. Enfin, le développement d'une interface graphique pour le banc d'étalonnage rendrait le système plus convivial et accessible aux utilisateurs.

5. Références bibliographiques

Mercier, M. (2023) *Utilisation des capteurs connectés (IoT) dans un système d'auscultation*. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04412291>.

Ruza, G. *et al.* (2018) 'Thermal Compensation of Low-Cost MEMS Accelerometers for Tilt Measurements', *Sensors*, 18(8), p. 2536. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/s18082536>.

Ruza, G. *et al.* (2019) 'A Low-Cost Chamber Prototype for Automatic Thermal Analysis of MEMS IMU Sensors in Tilt Measurements Perspective', *Sensors*, 19(12), p. 2705. Disponible sur : <https://doi.org/10.3390/s19122705>.

QUALIFICATION ET ANALYSE DE CHRONIQUES GNSS « LOW-COST » POUR L'AUSCULTATION DE BARRAGES

PFE présenté par : **Pascal MELA**
Société d'accueil : **Service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG**
Directeurs de PFE : **Juliette AUTIN et Philippe REBUT**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**



1. Contexte et objectif de l'étude

La surveillance des barrages et ouvrages hydrauliques est essentielle pour garantir la sûreté des biens et des personnes. Elle se décompose selon trois piliers : l'inspection visuelle, l'auscultation ainsi que les contrôles et essais. Le Service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG (Division Technique Générale) intervient dans le volet auscultation lorsque des mesures topographiques sont nécessaires. Généralement, le suivi d'auscultation est réalisé par des capteurs positionnés au cœur même de l'ouvrage : des pendules et fissuromètres 3D pour des déplacements et déformations, des piézomètres pour la pression hydrostatique ou encore des dispositifs de collecte des eaux pour les calculs de débits de fuites. En complément et en fonction du type d'ouvrage, des mesures topographiques de nivellement ou de planimétrie sont effectuées. Malheureusement, ces dernières ne peuvent pas être réalisées à haute fréquence et nécessitent une mobilisation importante de ressources. À ce titre, l'utilisation d'un système de positionnement permanent par GNSS peut donc être une solution intéressante. Toutefois, les antennes géodésiques du marché permettant d'obtenir une précision millimétrique sont encore trop coûteuses pour pouvoir être utilisées en réseau et de manière pérenne sur un site hydraulique.

Depuis 2014, le Service Ingénierie Topographie s'intéresse aux solutions GNSS bas-coûts disponibles sur le marché dans l'objectif de mettre en place des réseaux permettant de surveiller en continu des ouvrages hydrauliques. En 2022, il a été décidé d'acquérir des capteurs Geocubes, conçus et développés par le Laboratoire d'Opto-Électronique, de Métrologie et d'Instrumentation (LOEMI) de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) et commercialisés aujourd'hui par la société Ophelia Sensors. Cette dernière affirme que ses capteurs compacts et peu énergivores peuvent permettre d'atteindre en temps réel une précision planimétrique de ± 2 mm et altimétrique de ± 4 mm grâce à son algorithme de calcul propriétaire.

Ainsi, à l'été 2023, ce dispositif a été mis en œuvre dans le cadre du soutien apporté par le groupe EDF au projet de construction du barrage de Nachtigal au Cameroun, en parallèle du système d'observations officiel. Une seconde installation a été effectuée sur un petit barrage savoyard pour tester la performance dans un environnement avec plus de reliefs. Les données enregistrées sont traitées par Ophelia Sensors et diffusées en ligne au service topographie d'EDF-DTG. Cependant, les résultats indiquent, pour des points réputés stables, des dynamiques de mouvements difficilement explicables. Les objectifs de cette étude consistent alors en une analyse de la qualité des données brutes des Geocubes et une étude des séries temporelles obtenues par les algorithmes d'Ophelia Sensors. Un calcul indépendant à partir des données brutes sera également envisagé.



Figure 1 : Installation d'un Geocube de référence



2. Les capteurs Geocubes

Les Geocubes sont des capteurs GNSS utilisés en réseau pour effectuer une surveillance topographique précise. Le module GNSS de la version industrielle du Geocube est formé par une puce U-Blox monofréquence et une antenne GNSS de type patch (compacte et plane). Sa performance peut être caractérisée par le nombre de constellations, de satellites et de signaux pouvant être réceptionnés et éventuellement utilisés comme observations surabondantes. Toutefois, cela reste limité par le nombre de canaux dont dispose le récepteur puisqu'il détermine le nombre de satellites et de fréquences qu'il peut suivre et traiter simultanément (Manzini, 2020). Ce sont eux qui sont responsables de la poursuite et de la démodulation des signaux ainsi que de l'évaluation de la qualité du signal (SNR : Signal-to-Noise Ratio). Un nombre plus élevé de canaux peut donc améliorer les performances et la précision, mais elles nécessitent également une plus grande puissance de traitement et peut augmenter le coût du récepteur. La présence de bouclier de protection contre les multi-trajets plus ou moins avancé joue aussi un rôle important dans la qualité des signaux GNSS reçus. Le pilotage du Geocube est réalisé grâce à un microcontrôleur assurant la gestion des tâches et de la consommation énergétique de l'ensemble. À cette unité GNSS et gestion est associé un module radio rendant possible la transmission des données et des informations concernant l'état du capteur au Geoport. Le Geoport étant le nœud du réseau ayant un accès à Internet pour envoyer les données rassemblées sur un serveur distant afin qu'elles y soient traitées et transmises à l'utilisateur.

Tableau 1 : Caractéristiques principales du Geocube et schématisation d'un réseau

GENERAL	
Constellation et signaux observables	GPS (L1C/A), GLONASS (L1OF), BeiDou (B1), Galileo (E1)
Pas de mesures	30 secondes
Canaux disponibles	72
Consommation d'énergie	0,200 W
Tension d'alimentation	5 V – 14,6 V
Taille	118 x 106 x 36 mm
Distance avec le Geocube pivot	Jusqu'à 2 km
COMMUNICATION RADIO	
Protocole	Zigbee
Fréquences	2,4 GHz / 868 MHz
Puissance	-7 dBm à +18 dBm
Sensibilité	-100 dBm
CONDITIONS D'EXPLOITATION	
PDOP	5
Angle de coupure	15°
PRECISIONS RTK	
Horizontale	2 mm + 2 ppm (1 mm + 1 ppm avec moyenne sur 24h)
Vertical	4 mm + 2 ppm (2 mm + 1 ppm avec moyenne sur 24h)

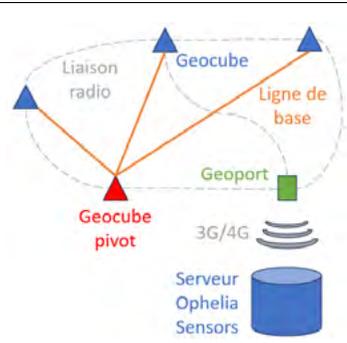


Schéma simplifié d'un réseau de Geocubes

Le système utilise le principe de traitement en temps réel en considérant un des Geocubes du réseau comme point de base. L'algorithme actuel de traitement des données GNSS de Ophelia Sensors est adapté à des mouvements lents et de faibles amplitudes. Celui-ci n'étant pas dévoilé, il a été nécessaire de s'appuyer sur d'anciens travaux pour concevoir la méthode possiblement adoptée (Benoît, 2014) (Lasri, 2018) (Manzini, 2020). Le traitement semble s'appuyer sur une première estimation de la position par triples différences, suivi ensuite par un nouveau calcul par double différence afin de réaliser le suivi des déplacements. La méthode de double différence permet d'éliminer les biais d'horloges des satellites et du récepteur. Les biais atmosphériques sont réduits grâce aux caractéristiques des lignes de bases (longueurs inférieures à 1 km et dénivelées de 200 m maximum sur le réseau savoyard). Les biais résiduels ionosphériques et troposphériques peuvent également être corrigés à partir de modèles (Klobuchar, Saastamoinen). Ces doubles différences sont alors utilisées comme équations d'observations dans un filtre de Kalman pour estimer les positions époque par époque. La principale source d'imprécision restante est alors due aux multi-trajets très



peu rejetés par le Geocube. Une méthode efficace pour réduire leurs effets lorsque des déplacements lents sont observés est un filtrage lissant les mouvements hautes fréquences (filtre passe-bas, moyenne mobile). Cependant, dans un contexte où la dénivellée est autour de 100 mètres, la fidélité de la composante verticale est de 1,5 cm mais celle-ci augmente avec la dénivellée (Lasri, 2018). Les biais troposphériques, et plus particulièrement la partie humide non différenciée, seraient alors la cause de cela. Pour y remédier, l'auteur a modifié l'algorithme en ajoutant dans le vecteur des inconnus à estimer un paramètre pour chacun de ces biais troposphériques indifférenciés. Actuellement, Ophelia Sensors a indiqué que les estimations initiales par triples différences ainsi que les modèles de corrections atmosphériques ont été délaissés.

3. Étude des données des réseaux déployés

L'étude se focalise sur le réseau du barrage savoyard pendant les mois de juin, juillet et août 2023 (92 jours d'observations échantillonnées à 30 secondes). Le barrage est encaissé entre deux montagnes au sud et au nord et est orienté avec l'aval à l'ouest. Le réseau est composé de trois Geocubes de références placées sur des enrochements considérés stables sur le flanc de la montagne au sud et de quatre autres Geocubes fixés au barrage pour sa surveillance. Cependant, des pannes sont successivement survenues sur quatre des capteurs du réseau et ont nécessité une intervention en avril 2024 pour en déterminer les causes (introduction d'humidité, puces radios défectueuses). Trois d'entre eux ont dû être remplacés ; le dernier ayant pu être réparé. La disponibilité des capteurs a alors été le critère principal pour choisir la période considérée pour l'étude.

L'analyse des fichiers RINEX a permis de mettre en évidence quelques anomalies, dont notamment des interruptions d'observations qui surviennent souvent aux mêmes moments pour plusieurs capteurs, mais pendant des durées différentes. Les interruptions majoritaires sont celles de 1 à 2 minutes. Aucune justification n'a pu être donnée avec certitude, mais des difficultés du module de transmission radio reste la piste la plus probable. Malgré la récente couverture mondiale du système BeiDou, celui-ci n'est pas utilisé dans les dispositifs étudiés. En revanche, il a été remarqué sur certains capteurs, en particulier au Cameroun et sur les trois capteurs de remplacement en Savoie, que les constellations russe et/ou européenne ne soient jamais observées. Une exécution incomplète du script de lancement (occasionné par une connexion radio ou cellulaire faible) en serait la cause. Des anomalies ponctuelles sur les constellations peuvent également réduire les nombres de satellites et induire des sauts dans leurs suivis. Ces interruptions touchent principalement le système GPS, mais n'ont malheureusement pas pu être expliquées. Concernant la qualité des signaux reçus, une comparaison des valeurs du SNR et des cartes du ciel a été entreprise avec celles d'une antenne du RGP située à proximité. Une qualité légèrement plus faible a alors été mise en avant pour le réseau de Geocubes (Figure 2).

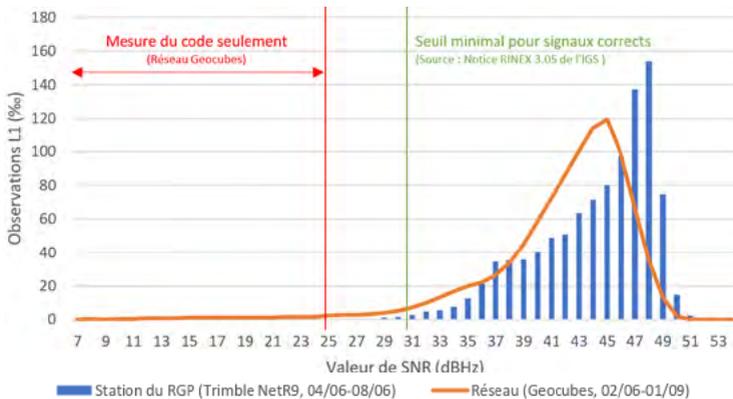


Figure 2 : Comparaison de la répartition des valeurs du SNR (sur L1) entre les Geocubes et la station du RGP située à 20 km



4. Traitements des données et résultats

Pour rester en cohérence avec la chaîne de traitement GNSS en place dans le Service d'Ingénierie Topographie, des calculs indépendants ont été effectués avec Trimble Business Center (V2023.11). Un traitement statique par session de 24h a alors été réalisé. Pour suivre la logique de la méthode d'Ophelia Sensors, le même Geocube pivot est utilisé et seules les lignes de bases provenant de ce dernier sont traitées (calcul en étoile). La position du pivot est déterminée par un calcul préliminaire avec le RGP. Les séries temporelles des déplacements sont comparées avec celles des moyennes journalières fournies par Ophelia Sensors. Peu de différence est observable en planimétrie. En revanche, les variations hautes fréquences (journalières) de la composante verticale issues des traitements TBC présentent des amplitudes largement plus élevées : inférieures à 1 cm chez le fournisseur contre 3 cm pour TBC (Figure 3). Malgré les dénivelées inférieures à 200 m, les distances inférieures à 1 km et les durées de 24h, les biais troposphériques et les multi-trajets ne semblent pas assez réduits lors de traitement sur TBC. L'application de moyennes mobiles permettant de réduire ces effets est donc envisagée. Un second traitement faisant intervenir un autre pivot est proposé pour éventuellement améliorer les résultats. Enfin, une comparaison avec les campagnes mensuelles de nivellement est réalisée pour vérifier l'exactitude des mouvements GNSS verticaux.

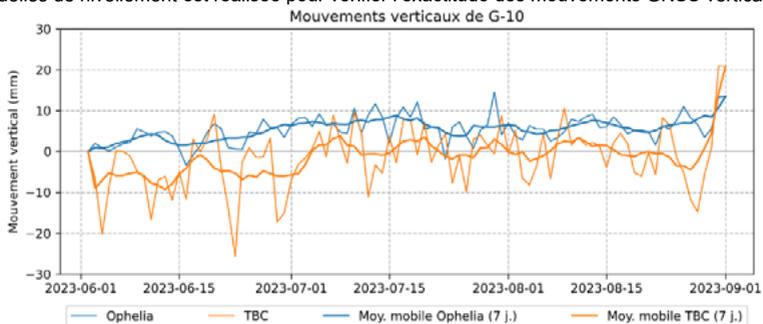


Figure 3 : Exemple de mouvements verticaux obtenus avec les traitements d'Ophelia Sensors et TBC

5. Conclusion et perspectives

À l'heure de la rédaction de ce résumé, la comparaison avec les données de références de nivellement ainsi que le traitement avec le second Geocube pivot n'ont pas encore été effectués. Ces éléments seront inclus dans le mémoire et présentés lors de la soutenance. La qualité des données observées a donc été étudiée pour ce projet. Malgré quelques anomalies et des observations modérément plus bruitées que pour des stations GNSS de classe géodésique, les composants bas-coûts des modules GNSS et radio des Geocubes offrent des données exploitables pour la surveillance de mouvements lents. Toutefois, l'accès pour le traitement à une unique fréquence reste un défi à surmonter pour obtenir une précision infracentimétrique en particulier pour des déplacements verticaux. Aujourd'hui, de nouveaux capteurs GNSS bas-coûts sont développés et offrent la possibilité d'intégrer une deuxième fréquence comme observable. Il serait intéressant de pouvoir tester des récepteurs bi-fréquence de ce type pour la surveillance de barrage afin de réaliser des traitements permettant d'atteindre la précision millimétrique désirée.

Références

- Benoît, L. (2014). Positionnement GPS précis et en temps-réel dans le contexte de réseaux de capteurs sans fils type Geocube : application à des objets géophysiques de taille kilométrique. Thèse de l'École Normale Supérieure.
- Lasri, M. A. (2018). Utilisation des réseaux de capteurs Geocubes pour la mesure de déformation des volcans en temps réel par GNSS. Thèse de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres.
- Manzini, N. (2020). Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites. Thèse de l'Université Paris-Est.



Actualisation de la base de données du bassin versant du Strengbach (site du OHGE). Etude de l'évolution du couvert forestier (surface, structure, caractéristiques) à partir de nuages de points LiDAR, d'images aériennes et satellitaires.



PFE présenté par : **Giuseppe Riccobono**
Société d'accueil : *Institut Terre & Environnement de Strasbourg*
Directrice de PFE : *Marie-Claire PIERRET*
Correcteur : *Gilbert FERHAT*
Encadrante : *Christine HEIMLICH*

1. Introduction

Les écosystèmes forestiers en France et dans le monde subissent des **stress croissants** en raison de la demande accrue de bois, des effets des **changements climatiques** et des attaques de parasites. Il devient ainsi crucial de développer des outils pour surveiller l'**état de santé des forêts**.

L'**Institut Terre et Environnement de Strasbourg (ITES)**, créé en janvier 2021, est une unité mixte de recherche sous les tutelles du CNRS, de l'Université de Strasbourg et qui est rattachée à l'EOST. ITES repose sur quatre disciplines principales : hydrologie, géochimie, géologie et géophysique, et regroupe sept équipes de recherche. Parmi ces équipes, la **Biogéochimie Isotopique et Expérimentale (BISE)** se concentre sur la compréhension et le suivi des processus réactifs dans la **Zone Critique (ZC)** de la Terre, influencés par les changements climatiques et les activités humaines.

Mon travail s'est focalisé sur l'**Observatoire HydroGéochimique de l'Environnement (OHGE)**, qui observe depuis 1986 le bassin versant du Strengbach ; un écosystème forestier de 80 ha dans le massif vosgien. Le site est localisé sur la commune d'Aubure, village le plus haut d'Alsace. Le climat y est tempéré océanique de montagne, avec une température moyenne annuelle de 6°C et une pluviométrie moyenne de 1 400 mm par an. Le site est couvert majoritairement de forêts, dont 80% d'épicéas et 20% de hêtres sur des sols et un substrat granitique acides.

L'OHGE suit et observe sur le long terme l'ensemble des compartiments du milieu : atmosphère, eaux de surface et souterraines, sols, végétation, roche grâce à une instrumentation et un réseau de capteurs et de prélèvements réguliers. Les mesures météorologiques incluent la pluie, la température, l'humidité, la pression, le vent et le rayonnement. Les mesures hydrologiques couvrent les débits en différents points du ruisseau principal et sur diverses sources. Les analyses géochimiques incluent le pH, la conductivité, l'alcalinité, les cations et anions majeurs, la silice, le carbone organique dissout et les éléments traces, avec 400 à 500 échantillons prélevés chaque année.

Le site a été choisi dans les années 80 pour un programme de recherche qui étudiait le lien entre les pluies acides et le dépérissement forestier. Actuellement, l'OHGE se concentre sur la **préservation de l'eau et du sol** ainsi que sur la **durabilité des forêts**. Les objectifs scientifiques incluent l'étude de la dynamique de l'eau et des éléments chimiques aux interfaces atmosphère/eau/sol/plantes, la compréhension des réponses aux perturbations naturelles et anthropiques, ainsi que la modélisation du fonctionnement biohydro-géochimique pour prédire les évolutions futures des écosystèmes. Le suivi du bassin versant est assuré par l'OHGE qui interagit avec la commune d'Aubure, les acteurs du territoire, les habitants et l'ONF via divers projets notamment à l'interface art/sciences/société.



2. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'exploiter les **relevés LiDAR**, les observations **aéroportées** et **satellitaires**, en utilisant des **outils open source**, pour mieux comprendre l'évolution du couvert forestier du bassin versant du Strengbach. Ce projet vise à détecter les zones touchées par la déforestation, évaluer les pertes de biomasse et surveiller la reprise végétale suite à des perturbations dans l'objectif d'une meilleure compréhension de l'évolution du couvert forestier.

Nous avons défini des objectifs clés pour maximiser l'impact de notre étude :

- **Inventaire de toutes les données disponibles sur le bassin versant** : un inventaire exhaustif sera réalisé pour recenser toutes les données spatialisées concernant le bassin versant, incluant les **photos aériennes**, les **images satellitaires** et les **acquisitions LiDAR**. Cette série de données multi temporelles permettra d'obtenir une vision complète des variations historiques et actuelles dans le bassin versant.
- **Inventaire des capteurs présents sur place** : cet objectif consiste à regrouper tous les relevés effectués précédemment afin de créer un fichier unique homogène contenant tous les instruments, capteurs et sites suivis. Cela permettra d'identifier ceux qui doivent être cartographiés et de compléter la base de données.
- **Traitement et analyse approfondie des données** : les données recueillies seront traitées pour extraire des informations clé telles que la variation du couvert forestier et d'autres paramètres écologiques essentiels à l'évaluation de la santé de l'écosystème. Ces analyses nous aideront également à quantifier les variations des surfaces déboisées ou en souffrances afin de déterminer les **tendances de l'évolution forestière** sur plusieurs décennies, fournissant ainsi des renseignements précieux sur les impacts des activités humaines et du changement climatique sur cet écosystème.

3. Données disponibles sur le bassin versant

3.1. Données Terrestres

Les relevés terrestres ont été effectués au fil des années avec des précisions variées, allant de métrique avec des GPS de poche à centimétrique avec des instruments de haute précision comme les stations totales et les récepteurs GNSS. Le système de référence utilisé pour le relevé doit également être pris en compte, car la transformation entre **WGS84** et **RGF93** peut varier en précision de 2 à 5 m.

3.2. Données Aériennes

Les données aériennes comprennent des images et des nuages de points LiDAR.

Données optiques aéroportées :

Les données raster proviennent d'organismes publics, comme l'IGN, et d'entreprises privées mandatées par l'OHGE. Les images de l'IGN sont disponibles depuis les années 1950 et offrent une résolution temporelle variable, mais qui correspond en moyenne à 3 ans. Les images les plus récentes sont disponibles sous forme d'orthophotos et présentent une résolution radiométrique qui inclut les longueurs d'onde du rouge, du vert, du bleu ainsi que du proche infrarouge, avec une résolution spatiale de 20 cm. Les orthophotos mandatées par l'OHGE sont disponibles pour les années 2011, 2018 et 2022, avec une résolution spatiale de 5 cm.

Données LiDAR :

Les données LiDAR incluent des relevés à haute densité de points, comme le LiDAR HD de l'IGN en 2022 avec plus de 10 points par m², et les données LiDAR à très haute densité de points de l'entreprise Helimap (sur commande de l'OHGE) avec des densités de 40 à 80 points par m². La précision annoncée pour les données LiDAR de l'IGN est de 50 cm en planimétrie et de 10 cm en Z. Pour les données LiDAR « Helimap », les précisions annoncées varient entre 10 cm et 5 cm en X, Y et Z.

3.3. Données Satellitaires

Les données satellitaires proviennent de différentes constellations, offrant diverses résolutions spatiales et temporelles. Par exemple, **Sentinel-2** offre une résolution spatiale de 10 m à 60 m, selon la longueur d'onde, avec une résolution temporelle de cinq jours à l'équateur, sur le bassin versant, elle est d'environ 3 jours. Landsat 7 et 8 ont une résolution spatiale de 15 m à 100 m et une résolution temporelle de 16 jours. D'autres satellites, comme **Dove-R (PlanetScope)**, **WorldView-3**, **SPOT 6 et 7**, **Pléiades**, **GeoEye-1**, **RapidEye**, **IKONOS**, **KOMPSAT-2**, et **SkySat**, offrent des résolutions spatiales et temporelles variées, pour plus d'informations, il est recommandé de consulter le mémoire.

4. Mise à jour de la base de données SIG du bassin versant

Le projet a débuté par la **mise à jour** de la base de données pré-existante. Avant de traiter les données, il a été nécessaire d'**identifier les zones** du bassin versant et les types d'instruments et installations présents. Ces zones comprennent différents types de couvert forestiers tels que les **peuplements de hêtres (HP)**, les **vieux peuplements d'épicéas (VP)**, et les **jeunes peuplements d'épicéas (JP)**. Des lieux dit spécifiques telles que **Hilzberg** et **Holly**, ainsi que des points de collecte comme le **Collecteur de 4 sources captées (CR)** et l'**exutoire** du bassin versant sur le Strengbach (**Exutoire RS**), ont également été identifiées.

Les points de la base de données, comprenant des instruments tels que des pluviomètres, des bacs pluviolésivats et des capteurs de neige, à partir des vieux fichiers, ont été transformés en coordonnées RGF93-L93.

Après avoir créé un fichier de synthèse, les données ont été introduites dans QGIS et triées par catégories. Une nouvelle nomenclature a été mise en place pour normaliser les noms des points, évitant ainsi les répétitions et facilitant l'identification des instruments sur la carte. Les coordonnées ont été vérifiées à l'aide d'orthophotos et ajustées en cas de précision insuffisante. Une **vérification sur le terrain** a également été effectuée à l'aide de l'application **QField**, pour localiser tous les points sans avoir préalablement connaissance de leur emplacement sur le site.

Ensuite, une **campagne de mesures** a été organisée au cours de mon stage pour compléter la base de données avec les instruments non géoréférencés ou ajoutés récemment. Les zones à mesurer incluaient principalement les sites VP, JP et la station météorologique de l'Exutoire RS, installée en 2019. Les mesures ont été réalisées en utilisant le **GNSS en mode statique** en post-traitement avec une précision variant de **1 centimètre à 1,5 mètre**, malgré les défis posés par la végétation.

Une fois la base de données finale créée, des fiches signalétiques pour chaque point ont été réalisées systématiquement et avec une nomenclature homogène et validée afin de faciliter la localisation et la compréhension des codes par les intervenants futurs

Calcul du contour du bassin versant

Le logiciel **Cloudcompare** a été utilisé pour transformer le nuage de points en MNT, une résolution optimale des pixels (50cm) a été choisie pour minimiser les erreurs. Des algorithmes spécifiques, tels que « fill sink » et « channel network and drainage basins » de **SAGA**, ont été utilisés pour déterminer la direction de l'écoulement de l'eau et tracer le cours d'eau. Enfin, l'algorithme « Upslope Area » a permis de dessiner le contour définitif du bassin versant, après avoir effectué plusieurs tests sur les différents algorithmes proposés.

5. Application de la détection des changements

5.1. Images Aériennes

Les premières analyses ont été réalisées sur des images anciennes non géoréférencées du site « *Remonter le Temps* » de l'IGN. Ces images ont été rectifiées en utilisant QGIS et une **double transformation projective** pour minimiser les distorsions dues à la perspective et à la topographie. Bien que ces images ne puissent pas être utilisées pour des calculs de surface précis, elles permettent une évaluation visuelle du site et ainsi de l'évolution des coupes.

Pour les images orthorectifiées, des méthodes de détection des changements par **post-classification** ont été utilisées. La méthode **basée sur les pixels**, réalisée avec le plugin SCP de QGIS, a montré des difficultés à distinguer le sol et la végétation. Par conséquent, une méthode **basée sur les objets** a été employée, utilisant le plugin OTB (Orfeo ToolBox) avec des algorithmes de segmentation tels que Mean-shift et Watershed. Mean-shift a donné les meilleurs résultats visuels pour la segmentation. Les statistiques ont été attribuées aux objets, et l'algorithme basé sur un réseau neuronal artificiel (Artificial Neural network – ANN) s'est avéré le plus approprié pour la classification.

5.2. Images Satellitaires

La détection des changements avec les images satellitaires s'est concentrée sur les images **Sentinel 2 L2A** avec une résolution de 10 m par pixel. Une **différence** de l'indice **NDVI** dans le temps a permis d'identifier des changements, tels que la croissance des feuilles et la coupe des arbres, en appliquant des seuils appropriés pour les changements positifs et négatifs.

5.3. Nuages de points LiDAR

La précision des données LiDAR a été évaluée en utilisant des nuages de points de 2011 comme référence. La méthode employée pour évaluer les nuages de points est la **distance nuage-nuage**.

Les résultats révèlent des moyennes variant de **0 à 20 cm** avec des écarts types de **10 à 50 cm**, permettant ainsi de valider la précision annoncée.

Pour la détection des changements dans l'ensemble de la forêt, deux méthodes ont été utilisées :

- **Différence nuage-nuage** : méthode rapide permettant d'identifier les zones de changement sans fournir d'informations sur la surface ou le volume.
- **Différence entre MNT (DoD)** : cette méthode permet d'extrapoler davantage d'informations, ce qui a permis de calculer une perte de **17 hectares** de superficie, correspondant à **28 %** de la superficie totale de végétation en 2011.

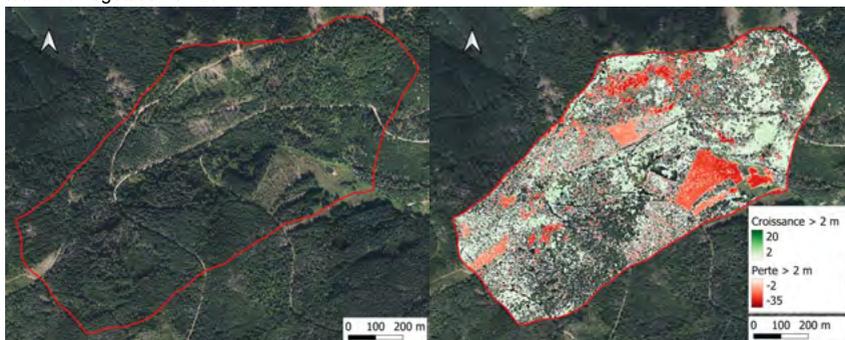


Figure 1 : à gauche, l'orthophoto du bassin versant acquise en 2021 par l'IGN. À droite, le résultat de la méthode DoD entre les données LiDAR de 2022 et celles de 2011, avec en couleur les variations supérieures à 2 mètres. Le contour du bassin versant est indiqué par la ligne rouge.

Enfin, l'étude des **arbres individuels** a été réalisée en utilisant l'algorithme **Pycrown** sur les nuages de points LiDAR. Cet algorithme permet de détecter les arbres dans le nuage de points, ce qui permettrait de détecter les changements en termes de variations de hauteur, de diamètre de la couronne et du tronc, ainsi que la distance entre le sol et la couronne. Ces informations sont actuellement mesurées manuellement par les forestiers.

Pour les évaluations de chaque méthode utilisée pour détecter les changements, il est recommandé au lecteur de se référer au mémoire.

6. Suivi de la sante des arbres à partir du NDVI

Afin de surveiller la santé des arbres, il a été décidé de se concentrer sur **9 parcelles représentatives** des diverses plantations présentes dans le bassin (épicéas vieux, épicéas jeunes et hêtres). Le site web de la mission **Copernicus** (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>) permet de télécharger toutes les images Sentinel-2 depuis 2016. En utilisant un script Python, il est possible de calculer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) pour chaque date disponible.

Cette méthode permet de créer des graphiques pour suivre l'évolution du NDVI pour chacune des 9 parcelles. En analysant ces graphiques, il est possible de **détecter et d'interpréter divers phénomènes** affectant la santé des arbres, tels que la croissance, le dépérissement, ou les impacts des conditions climatiques après suppressions des valeurs invalides (nuages, ombres). Cette partie sera finalisée au cours du dernier mois de stage.

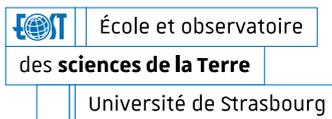
7. Conclusion et perspectives

Le travail a permis d'aborder les différentes méthodes de télédétection pour le suivi du bassin versant du Strengbach. Il a mis en valeur les apports significatifs de ces techniques pour une meilleure compréhension et gestion du couvert forestier, le LiDAR permet des analyses plus précises que les images, malgré le fait que ces dernières soient disponibles régulièrement et gratuitement. Des recommandations ont été formulées pour améliorer la précision et l'efficacité des études futures, tout en soulignant qu'il n'est pas nécessaire de disposer de données de plus en plus précises pour les besoins de l'étude.

Méthodes d'apprentissage pour la classification automatique de nuages de points LiDAR HD : application à la détection d'objets géologiques gravitaires



PFE présenté par : **Nicolas HOFFMANN**
Société d'accueil : **EOST**
Directeur de PFE : **Jean-Philippe MALET**
Correcteur : **Gilbert FERHAT**
Encadrant : **Clément HIBERT**



1. Contexte et objectifs de l'étude

Les mouvements de versant sont la cause de nombreux dégâts humains et matériels à travers le monde. Selon la banque mondiale, on compte presque quatre millions de kilomètres carrés de terre à risque de glissements de terrain parmi lesquels plus de huit cent mille à très haut risque. Plus de trois cents millions de personnes seraient affectées et plusieurs dizaines de milliers y laisseraient leur vie chaque année.

De nombreuses méthodes existent quant à la détection de glissements de terrain, de l'analyse sismologique à la corrélation d'images satellitaires, présentant chacun certains avantages. Les données topographiques très haute résolution comme les données LiDAR aéroportées permettent l'interprétation d'objets géologiques sur de grandes zones parfois inaccessibles. Cependant, l'analyse manuelle de ces données est longue et fastidieuse. Ces dernières années, l'émergence de méthodes d'apprentissage automatique avec des algorithmes issus du Machine Learning et plus récemment du Deep Learning se sont révélés être de puissants outils de classification. Ces techniques ont fait leur preuve dans de nombreux domaines et se révèlent être efficaces sur des modèles de plus en plus complexes.

L'EOST/ITES, à travers des moyens de télédétection et d'écoute sismologique œuvre actuellement sur la détection d'événements gravitaires. L'arrivée et la mise à disposition récente de données issues d'acquisitions LiDAR aéroportées sur de grandes emprises spatiales et à haute densité d'information offrent une opportunité et une voie alternative pour la proposition de modèles de prédiction probabilistes. Cette étude a pour but d'explorer les possibilités que permettent le traitement des données LiDAR par le biais de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond. D'autre part, la chaîne de traitement complète est à réaliser. Dans un premier temps, il sera question du traitement des données LiDAR et des attributs topographiques que l'on peut en extraire. Ensuite, une vérité terrain d'une partie de la zone d'étude est réalisée pour présenter le traitement de ces données par Machine Learning et Deep Learning. L'ensemble de l'étude est réalisée avec le langage de programmation Python afin que le processus soit entièrement automatisé.

2. Présentation des données et de la zone d'étude

Les données utilisées sont les nuages de points 3D issus du programme LiDAR HD de l'IGN, accessibles en open data. La campagne de l'IGN cartographie le sol et le sursol français. Dans le cadre de l'étude, nous utiliserons uniquement le nuage de points représentant le sol. Ces derniers proviennent d'une acquisition aérienne et présentent une densité de 10 impulsions au mètre carré minimum, ce qui est suffisant pour les traitements que nous devons faire. Les avantages des données LiDAR HD fournies par l'IGN sont principalement leur étendue, qui permet la généralisation d'énormément de procédés liés à la précision élevée de ces dernières pour des acquisitions aéroportées.



La zone d'étude se situe dans les Alpes du Sud qui est un secteur géologique complexe de haute montagne caractérisées par des reliefs et des structures géologiques variées. Nous nous intéresserons plus précisément à la vallée de l'Ubaye où de nombreux glissements sont connus et ont été étudiés par le passé.

3. Identification et calcul d'attributs pour l'entraînement de modèles d'apprentissage automatique

Les glissements de terrain se produisent dans des zones spécifiques et sont soumis à une certaine physique, géomorphologie, géomorphométrie et géologie. La géomorphométrie a été développée entre le 18e et le 20e siècle et représente l'étude de l'information de la surface de la Terre à partir d'un modèle numérique d'élévation dit DEM (Digital Elevation Model).

Le LiDAR aéroporté présente certains avantages comme l'acquisition du sol sous le couvert forestier, menant à la génération de modèles numériques de terrain (MNT) ce qui n'est pas le cas pour l'imagerie satellitaire, la photographie aérienne ou l'imagerie radar qui cartographient le sursol. La séparation entre les échos terrain et les échos objets est d'autant plus importante en géomorphologie pour l'obtention d'un sol nu. Les données LiDAR offrent la possibilité de détecter des objets géomorphologiques difficiles d'accès, peu visibles sur le terrain et non-identifiables avec d'autres outils de télédétection.

À l'aide de la bibliothèque *Whiteboxtool* les données LiDAR sont dans un premier temps transformées en grille raster basée sur un réseau triangulaire irrégulier (TIN) de Delaunay ajusté aux points LiDAR. Cette grille est représentée selon l'élévation afin de créer un modèle numérique d'élévation. À partir de ce modèle, un total de 522 attributs tels que la pente, l'aspect, les différentes courbures les reliefs ombrés et des statistiques de variabilité spatiale sont extraits.

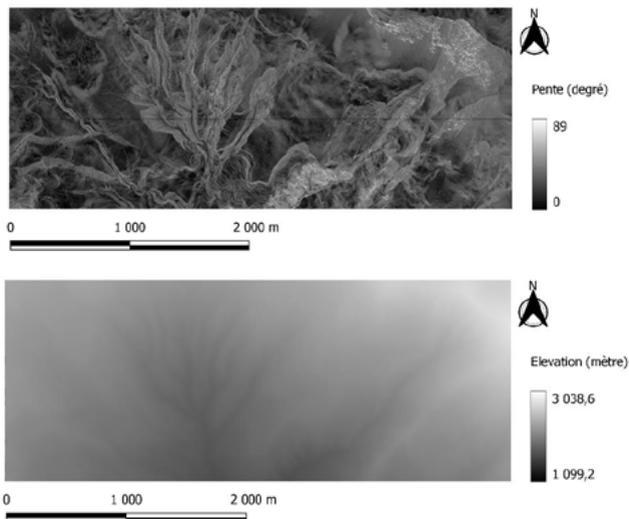


Figure 1 : Illustration respectivement des pentes et du DEM

4. Définition d'une vérité terrain

Lorsque l'on utilise des méthodes d'apprentissage automatique supervisées, une vérité terrain est alors nécessaire. On attribue des labels aux données selon les classes auxquelles elles appartiennent afin que les algorithmes puissent apprendre de celles-ci. La particularité des données que nous avons à traiter réside dans le fait qu'elles sont irrégulières et non ordonnées, à savoir des éléments naturels qui se ressemblent et peuvent se confondre selon les cas. Les glissements de terrain en font partie et une vérité terrain est difficile à déterminer. En effet, les avis varient selon les experts et les résultats obtenus sont partiellement subjectifs. Cette contrainte est assez problématique lorsque s'appliquent par la suite des méthodes de Machine Learning : les modèles se basent sur ces résultats pour s'entraîner et faire les liens avec les attributs calculés précédemment. La vérité terrain retenue est celle présentée partiellement Figure 2. Nous la considérerons comme vraie pour la suite de l'étude.

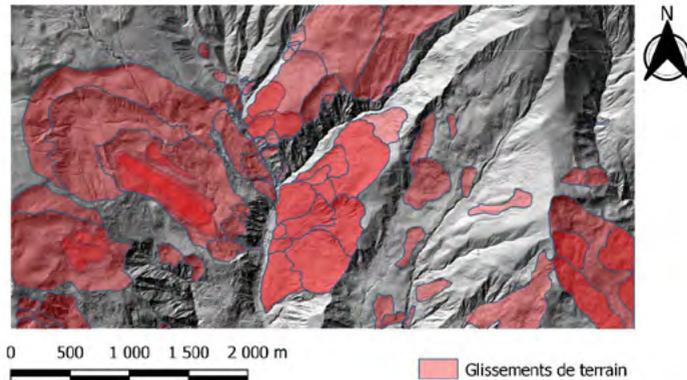


Figure 2 : Représentation d'une partie de la vérité terrain

5. Classification par apprentissage automatique

Parmi les diverses méthodes de Machine Learning existantes, l'algorithme des forêts aléatoires (Breiman, L., 2001) est celle qui offre le plus de compromis entre temps de traitement et résultats. Cette dernière résulte de l'assemblage d'arbres de décisions de faibles performances traitant chacun une partie du problème afin de créer un modèle global plus fort. Dans le cadre de l'étude, un modèle par résolution a été calculé (un mètre, trois mètres et neuf mètres) ce qui permet de traiter différents niveaux de détail. On retrouve Figure 3a l'assemblage des trois modèles à différentes résolutions : ce traitement permet d'avoir des modèles relativement indépendants les uns des autres.

Le méthode d'amplification de gradient (Gradient Boosting, en anglais) est une autre méthode bien connue en Machine Learning. Contrairement aux forêts aléatoires, chaque arbre n'est plus indépendant, mais se base sur les précédents pour ajuster leur poids et corriger leurs erreurs. Le même procédé a été utilisé pour ce modèle qu'avec les forêts aléatoires. Les résultats de celui-ci sont exposés Figure 3b.

6. Classification par apprentissage profond

Les modèles de Deep Learning permettent de traiter des données de manières plus complexes et non linéaires. En segmentation sémantique, une des structures les plus connues et reprise notamment dans la détection de glissements de terrains (Fang et al., 2022, Qi et al. 2020) est la structure U-Net. Des tests sont actuellement effectués, dont les résultats et analyses seront disponibles lors de la soutenance.



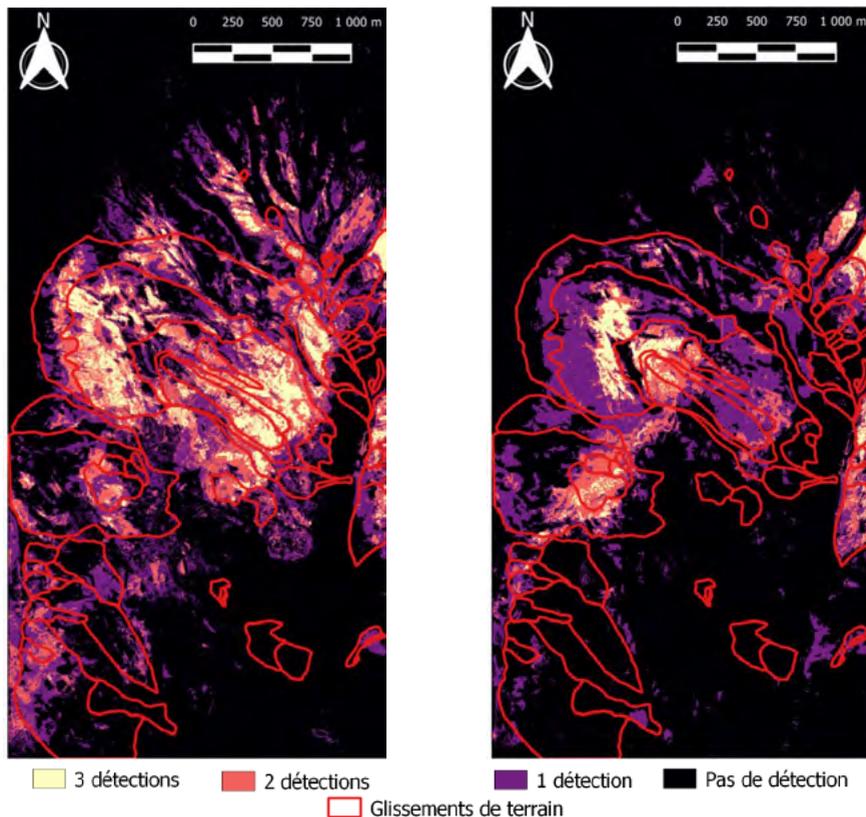


Figure 3 : Représentation respectivement des résultats issus des algorithmes Random Forest et Gradient

6. Conclusion

Lors de ce projet de fin d'études, un démonstrateur de chaîne complète de traitement des données LiDAR pour la détection de glissements de terrain a été réalisé. Plusieurs algorithmes de Machine Learning et de Deep Learning ont été testés. La tendance générale pour tous les résultats (disponibles dans le mémoire du projet de fin d'études) est le sur apprentissage des données, menant à des modèles locaux. La mise en place d'un volume de vérité terrain plus conséquent, plus diversifié et plus complexe est nécessaire. Cependant, les résultats obtenus permettent d'obtenir une carte prévisionnelle des glissements de terrains relativement fiable.

Plusieurs perspectives sont envisageables à la suite de ce stage, dont l'association de différents types de données que l'on pourrait associer au LiDAR comme des ortho-images qui permettraient d'avoir la colorimétrie du nuage de points, donc une source d'information supplémentaire.

6. Références

- Breiman, L., 2001. Random forests. *Machine learning*, 45, pp.5-32.
- Fang, C., Fan, X., Zhong, H., Lombardo, L., Tanyas, H. and Wang, X., 2022. A Novel historical landslide detection approach based on LiDAR and lightweight attention U-Net. *Remote Sensing*, 14(17), p.4357.
- Qi, W., Wei, M., Yang, W., Xu, C. and Ma, C., 2020. Automatic mapping of landslides by the ResU-Net. *Remote Sensing*, 12(15), p.2487.

Exploitation des algorithmes d'apprentissage profond sur les données LiDAR HD

PFE présenté par : **Florian CERETTO**
Société d'accueil : **Archéologie Alsace**
Directeur de PFE : **Florian BASOGE**
Correcteurs : **Emmanuel MOISAN**
Mathieu KOEHL



1. Contexte et objectifs du projet

L'IGN a pour objectif de produire et de mettre à disposition des données LiDAR HD (Haute Densité) couvrant l'intégralité du sol et du sur-sol de la France. Ces données sont sous forme de nuages de points bruts, recalés et classifiés (extraction de sol, bâtiments, végétation, etc.). Cette production s'étale sur 5 ans en fonction des besoins prioritaires exprimés par les commanditaires nationaux et locaux du projet et de leurs usages. L'Alsace et ses alentours ont récemment été cartographiés (levé achevé durant 2022) et disposent ainsi de nouvelles données exploitables : le LiDAR HD. L'établissement public Archéologie Alsace désire exploiter ces données afin d'automatiser la détection d'artefacts archéologiques, tels que des tumulus (monticules de terre élevés au-dessus d'une tombe) illustrés à la figure 1.



Fig. 1 : Exemple de tumulus à Limburg, Pays-Bas (source : <https://www.visitlimburg.be/fr/que-faire/tumuli-gallo-romains>)

L'arrivée de ces nouvelles données représente une opportunité pour appliquer ou développer de nouvelles méthodes de détection, notamment dans le domaine de l'archéologie. Les méthodes traditionnelles de prospection archéologique peuvent être complétées et améliorées grâce au LiDAR HD de l'IGN qui, à terme, recouvrira l'ensemble du sol français. Cette étendue à l'échelle du territoire offrira aux chercheurs et archéologues une vue d'ensemble sans précédent du territoire, ouvrant la voie à de nouvelles découvertes. Avec l'évolution exponentielle de l'intelligence artificielle, la création de modèles sophistiqués d'apprentissage profond (*Deep Learning*) est en pleine croissance, repoussant les limites des outils disponibles dans le domaine de la topographie et de la détection d'objet. C'est dans ces conditions qu'Archéologie Alsace a proposé un sujet de Projet de Fin d'Études lié à ces nouvelles problématiques qui fait suite à un Projet de Recherche Technologique. Le PFE réalisé par Raphaël MOREAU (2022) a permis de mettre en place un modèle d'apprentissage profond permettant la détection de tumulus en transformant les nuages de points en ortho-images. Le PRT que j'ai réalisé a servi à faire la comparaison de l'algorithme de R.MOREAU entre les données LiDAR anciennes, issue d'une campagne antérieure, et les nouvelles données du LiDAR HD. De plus, ce PRT m'a permis d'amorcer les objectifs de sa suite directe, qui est ce PFE, dont l'objectif est



d'explorer les possibilités et méthodes de traitement directement sur le nuage de points en s'affranchissant de la transformation en ortho-image.

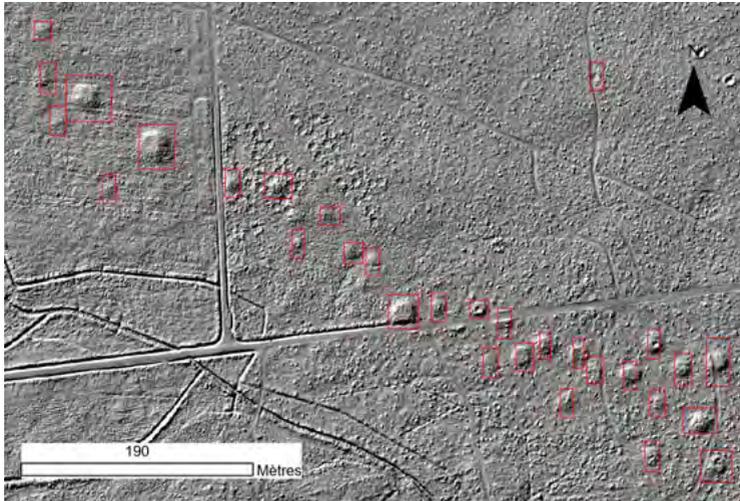


Fig. 2 : Détection des tumulus sur ortho-image à l'aide de l'algorithme de R.MOREAU

2. Méthodes d'apprentissage profond basées sur les nuages de points

De nombreuses méthodes de recherche actuelles se concentrent sur le traitement direct des nuages de points à l'aide de techniques d'apprentissage profond. Une étude a été réalisée par [Zhang et al., 2023] afin de répertorier les différentes méthodes ainsi que les modèles associés. Les méthodes multi-vues et basées sur des voxels ne seront pas utilisées, afin de se concentrer sur les méthodes basées sur le nuage de points. Il ressort de cette étude que l'opérateur d'association de caractéristiques est au cœur du traitement des nuages de points, réalisant le transfert d'informations entre des points discrets. Ces opérateurs d'association de caractéristiques se divisent principalement en deux grandes catégories : l'Association de caractéristiques locales et l'Association de caractéristiques globales. Dans ce projet les principaux modèles utilisés, KPConv et GPointNet, font partie de la famille d'association de caractéristiques locales.

3. Méthodologies employées

Afin de mener à bien ce projet, plusieurs approches ont été mises en œuvre et testées. Les deux principales approches sont la segmentation et la classification.

La première étape pour effectuer un apprentissage profond est la création d'un ou de plusieurs jeux d'entraînement avec des tumulus en trois dimensions, labellisés. Pour ce faire, il faut en plus des coordonnées (xyz), rajouter un attribut de classe qui est souvent un nombre entier. Afin de réaliser cette première étape, les vérités terrains fournies par Archéologie Alsace lors du PFE de 2022 ont été utilisées puis insérées dans ArcGis Pro. De ces entités ponctuelles, des zones tampons ont ainsi été créées (40 mètres de diamètre afin d'être sûr d'avoir l'entièreté des tumulus). Finalement, ces zones sont exportées dans un fichier au format Shape (.shp) et grâce à un script python les dalles LiDAR sont automatiquement labellisées à l'aide de ce fichier. Une autre méthode similaire a été mise en œuvre lors des tests de classification, elle sera décrite plus loin.

La segmentation consiste à fragmenter le nuage de points selon les différentes classes apprises, dans notre cas il n'y a que deux classes (tumulus et sol). Cette méthode est théoriquement la meilleure pour détecter des objets, permettant visuellement de segmenter le nuage pour en extraire les informations, et sera testée avec les données d'entraînement. Un exemple de segmentation de différents objets situés dans un nuage de points représentant des bureaux est présenté à la figure 3 en utilisant KPConv.

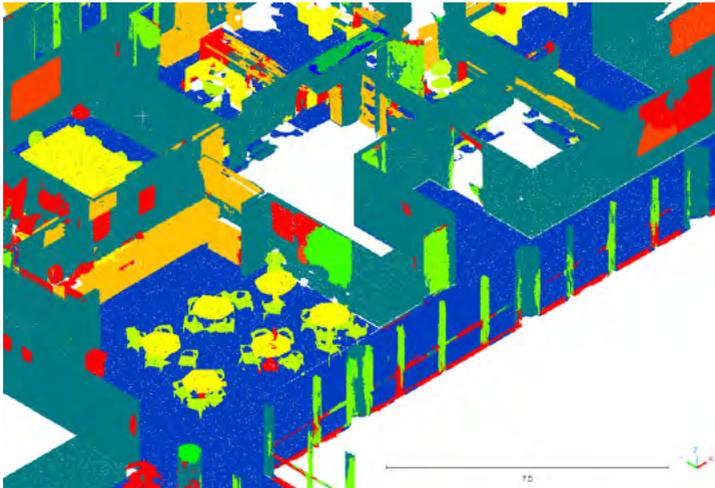


Fig. 3 : Segmentation avec le modèle d'apprentissage profond KPConv dans des bureaux (dataset libre d'accès en ligne S3DIS : <https://goo.gl/forms/4SoGp4KtH1jfRqEj2>)

Bien que cette approche semble convenir à la tâche de ce projet, plusieurs problèmes persistent, dont la sous-représentation de la classe tumulus. En effet dans notre cas, la segmentation va s'appliquer à deux classes : les tumulus et le sol. Ce déséquilibre de classe peut entraîner des biais en faveur de la classe majoritaire et réduire les performances du modèle. De plus, bien que la figure 3 montre de bons résultats sur du mobilier, les tumulus sont bien plus compliqués à détecter dans un champ qu'une chaise dans une pièce dû à leur géométrie variable et à l'aspect discontinue du sol. C'est pour cela qu'une autre approche a été mise en œuvre.

La classification consiste à attribuer une classe à chaque nuage de point. Cette méthode sera utilisée en complément de l'algorithme de détection de 2022 afin de permettre la classification des détections pour ne garder que les vrais positifs (bonnes détections), et essayer de retirer un maximum de faux positif (fausses détections). En effet, l'algorithme de 2022 arrivait à détecter sur chaque zone quasiment tous les tumulus, mais avait également beaucoup de fausses détections. Ici, la création du jeu d'entraînement va non pas se faire sur les vérités terrain, mais sur les détections de l'algorithme de 2022, avec ici aussi deux classes : les vrais positifs (bonnes détections = tumulus) et les faux positifs (fausses détections = sol). De plus, il ne s'agit plus d'une labélisation mais d'une segmentation, on disposera de chaque objet individuellement sous la forme d'un nuage de points, qui sera soit de classe tumulus ou de classe sol (à l'inverse de la labélisation où chaque point va avoir un indice de classe, ici c'est le nuage individuel). Cela va permettre de diminuer le problème de sous-représentations, même s'il reste toujours une classe dominante (dans notre cas, le sol). Plusieurs traitements vont ensuite être appliqués à nos nuages individuels. Chaque nuage va être maillé avec une triangulation de Delaunay, puis un lissage moyenneur va être appliqué. Ensuite, des points vont être projetés sur ce maillage pour recréer un nuage de points. Ce traitement préalable permet ainsi de



retirer le bruit du nuage, mais surtout de choisir un nombre de points par nuages, donc d'augmenter la densité. De plus, chaque nuage doit avoir le même nombre de points pour l'entraînement sur GPointNet qui utilise des fichier h5. L'architecture de ces fichiers correspond à une compression des données (nuage, points, label, etc.) dans un seul fichier.

Les premiers résultats de cette approche sont convaincants et montrent une amélioration significative des métriques, comme illustrée dans le tableau 1.

Zone C	TP	FP	FN	Rappel	Précision	Score F1
ortho-image	44	175	5	89,8%	20,1%	32,8%
ortho-image+ classification	32	53	17	65,3%	37,6%	47,8%
Comparaison	-12	-122	12	-24,5%	17,6%	14,9%

$$\text{Rappel} = \frac{TP}{TP + FN}; \quad \text{Précision} = \frac{TP}{TP + FP}; \quad \text{Score} = 2 * \frac{\text{Rappel} * \text{Précision}}{\text{Rappel} + \text{Précision}}$$

Tab. 1 : Tableau comparatif entre la méthode de détection de 2022 sur ortho-image et la combinaison ortho-image + classification (TP = True Positive, FP = False Positive, FN = False Negative)

Le rappel mesure la capacité du modèle à détecter tous les vrais positifs, la précision évalue à quel point les prédictions du modèle sont exactes et le score permet d'avoir une évaluation globale du modèle. Ces résultats permettent les analyses suivantes :

- **Diminution du rappel** : en effet, le rappel diminue dû au fait que certains tumulus soient très peu visibles en 3D.
- **Augmentation de la précision** : un grand nombre de faux positifs est éliminé à l'aide de la classification 3D, notamment les creux qui ne pouvaient pas être différenciés sur l'ortho-image.
- **Augmentation significative du score** : bien que la capacité à détecter l'ensemble des tumulus a diminué (rappel), en combinant la détection raster et la classification des détections en 3D le modèle donne moins de résultats, mais avec une précision quasi doublée par rapport au modèle raster seul.

4. Conclusion et perspectives

D'autres tests sont à prévoir sur de nouvelles zones afin d'avoir des résultats les plus représentatifs possible. Elles devront être variées avec des densités de tumulus différentes pour voir le comportement de la détection et de la classification dans un maximum de cas. De plus, si le temps le permet, des tests et entraînements sur les modèles d'association de caractéristiques globales pourraient être effectués en comparaison des modèles déjà utilisés, qui appartiennent à la famille d'association de caractéristiques locales. Tester ces modèles permettrait d'analyser les résultats et de faire des comparaisons sur les métriques utilisées plus haut (rappel, précision et score) pour pouvoir déterminer la meilleure option adaptable aux tumulus. Néanmoins, les premiers résultats obtenus sont encourageants et montrent une amélioration dans l'évaluation du modèle.

5. Références bibliographiques

- Zhang, H., Wang, C., Tian, S., Lu, B., Zhang, L., Ning, X., and Bai, X. (2023). 'Deep learning-based 3D point cloud classification : A systematic survey and outlook'. Displays
- Moreau, R. (2022). Utilisation de l'apprentissage profond pour la détection automatique d'artefacts archéologiques dans des données LiDAR (vecteur et raster). Projet de fin d'Etude, Institut National des Sciences Appliquées.
- Thomas, H. (2019). 'Learning new representations for 3D point cloud semantic segmentation'. Thèse, Université Paris sciences et lettres.
- Chen, C., Fragonara, L. Z., and Tsourdos, A. (2021). 'GAPointNet : Graph attention based point neural network for exploiting local feature of point cloud'. Neurocomputing



Relevé d'une unité de liants routiers, étude et mise en place d'un processus de création de maquette numérique industrielle à l'aide de données multi-capteurs et comparaisons de solutions logicielles



PFE présenté par : Ayoub Mouden
Société d'accueil : AHMES
Directeur de PFE : Cyril Mongenoty
Correctrice : Hélène Macher
Encadrant : Cyril Mongenoty

1. Contexte et objectifs du projet

Les sites industriels adoptent de plus en plus les maquettes 3D pour une gestion efficace et une meilleure prise de décision grâce à leur précision et niveau de détail. Dans ce contexte, AHMES a été chargée de numériser une unité de liants routiers, située en Seine-Maritime (cf. Fig.1). Cette numérisation permettra de créer une maquette 3D complète de l'installation, incluant la structure, les réseaux de tuyauteries et les équipements. De plus, le directeur d'exploitation, sur le point de prendre sa retraite, souhaite laisser un patrimoine connu et maîtrisé de l'usine.

Ce Projet de Fin d'Études, premier pas vers l'industrie 4.0, vise à réaliser le relevé de l'unité de liants routiers et à modéliser sa maquette numérique 3D en utilisant des données multi-capteurs et en comparant des solutions logicielles pour la modélisation industrielle.

Les objectifs du projet sont multiples. Tout d'abord, la récolte des données est le premier objectif important. Cette étape consiste au tri des données déjà existantes pour l'unité de liants, mais aussi à l'acquisition sur le terrain de l'usine. Les techniques d'acquisitions utilisées seront diverses afin de profiter de leur complémentarité, mais aussi mettre en lumière quelle technique est plus adéquate à utiliser pour les installations industrielles.



Fig. 1 : vue aérienne du site à numériser et modéliser (Geoportail.fr@2024)

Dans un deuxième temps, l'objectif est de respecter le cahier des charges qui prévoit la création d'une maquette numérique 3D (LoD 250) de l'unité de liants routiers. Ensuite, on vise à améliorer la chaîne de traitements (manuelle) déjà utilisée par AHMES en testant différents logiciels. Ce projet soulève plusieurs problématiques. Premièrement, la nécessité d'étudier les méthodes d'acquisition appropriées et la complémentarité des méthodes pour ce type d'ouvrages, souvent complexes. De plus, la modélisation manuelle est très chronophage et nécessite une optimisation. Par conséquent, la priorité de ce projet est d'établir une chaîne de traitement semi-automatisée pour modéliser des sites industriels comprenant des réseaux de



tuyauterie et de structures métalliques, en mettant en lumière les avantages et les inconvénients des logiciels.

2. Numérisation 3D : Acquisition et traitement des données

2.1 Campagnes d'acquisitions

Nous avons réalisé plusieurs campagnes d'acquisition pour ce projet. Nous avons d'abord utilisé un levé topographique récent pour établir un canevas topographique. Ce canevas a servi de base pour déterminer les emplacements des cibles et géoréférencer le projet. Pour la tachéométrie, nous avons opté pour le Trimble SX10, qui combine les fonctions de scanner et de tachéomètre. En complément des scans réalisés avec le SX10, nous avons effectué des acquisitions par lasergrammétrie avec le scanner laser Trimble X7 (en intérieur et en extérieur). Ce dernier s'est avéré très efficace grâce à sa maniabilité et à son poids léger, ce qui lui permet de s'adapter aux zones difficiles d'accès contrairement à un appareil classique comme le SX10.

La lasergrammétrie mobile avec l'appareil Leica BLK2GO est également apparue comme une des solutions pour la numérisation 3D de l'unité de liants. Notamment pour les parties très enchevêtrées et denses.

Pour enrichir et diversifier les données du site, et après l'obtention d'une dérogation exceptionnelle du Ministère des Armées, des relevés par drone ont été réalisés avec le Drone DJI MATRICE 300 au-dessus de la zone de l'unité de liants classée *vol interdit*. Les capteurs LiDAR et de photogrammétrie ont permis de capturer des données de zones telles que les parties supérieures, offrant ainsi une couverture plus complète.

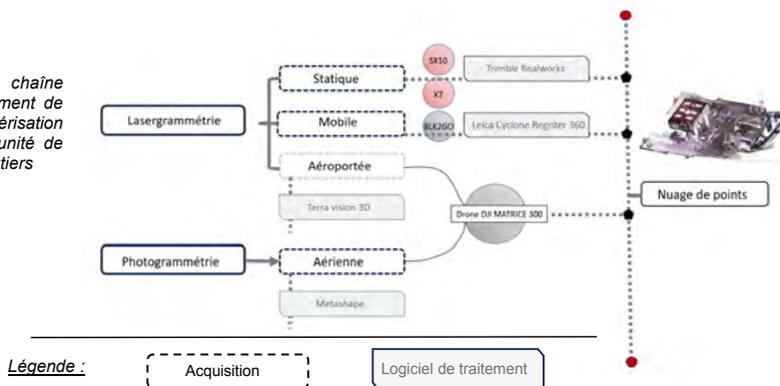
2.2 Traitement des données

À la suite de la campagne d'acquisition, nous disposons de données brutes provenant de diverses méthodes d'acquisition. Notre objectif est de les rendre plus lisibles et exploitables pour notre projet de maquette 3D de l'unité de liants.

Après l'étape de géoréférencement direct pour le nuage de points issu du SX10 et les étapes de consolidation et de géoréférencement indirect pour le scanner X7, nous avons procédé à la segmentation et au nettoyage des nuages avec le logiciel Trimble RealWorks.

Pour les données acquises à l'aide du scanner mobile BLK2GO, le traitement a été réalisé à l'aide du logiciel Cyclone 360 Register. Les données issues de la photogrammétrie aérienne ont été traitées avec le logiciel Metashape. Une palette de logiciels qui viennent enrichir notre chaîne de traitement synthétisée en figure 2.

Fig. 2 : chaîne de traitement de la numérisation 3D de l'unité de liants routiers



3. Comparaison de solutions logicielles de modélisation industrielle

En utilisant un nuage de points de référence, nous procédons dans un premier temps à la modélisation des éléments de tuyauterie, suivie de celle des éléments de structure pour chaque logiciel étudié. Nous avons établi des critères de comparaison comprenant le processus de modélisation, la fidélité par rapport au nuage de points, la durée de modélisation, ainsi que les avantages et inconvénients spécifiques à chaque logiciel.

3.1 Edgewise de ClearEdge 3D

EdgeWise est un logiciel reconnu pour ses capacités de modélisation des éléments de tuyauterie industrielle. Il permet une extraction automatique des éléments tubulaires à partir d'un nuage de points, avec deux modes d'extraction : "Minimize False Positives" pour privilégier la précision et "Maximize Number of Extractions" pour extraire le plus grand nombre de segments possibles. Les utilisateurs peuvent définir des paramètres tels que le pas de rééchantillonnage et l'intervalle de diamètre des tuyaux pour améliorer l'extraction. Le logiciel convertit les nuages de points en format .c3DB et supporte plusieurs formats, qu'ils soient structurés ou non. Après les extractions, un contrôle visuel et un outil de contrôle de qualité (*Quality Assurance*) permettent de vérifier et d'évaluer la précision des tuyauteries modélisées. Des outils supplémentaires, comme *EasyConnect* pour établir des connexions entre les tuyaux (réducteurs, coudes, etc.) et des fonctions d'extraction semi-automatique, aident à finaliser la modélisation des tuyauteries.



Fig. 3 : (a) résultat de la modélisation des tuyauteries et cuves pour le logiciel Edgewise avec le nuage de points référence (b)

	Extraction automatique		Extraction semi-automatique	Modélisation complète de l'extrait
Durée de traitement	24 min	+	1 h 18 min	Environ 1 h 45 min
Longueur des tuyauteries cumulées	142.1 m		65.8 m	207.9 m

Tab. 1 : durée des traitements et longueur des tuyaux extraits avec EdgeWise

EdgeWise offre aussi une modélisation semi-automatique des structures industrielles avec une bibliothèque d'objets tels que des I, des T, des tubes et des rambarde, conformes aux normes japonaises, américaines ou européennes. L'utilisateur sélectionne l'emprise de l'objet à détecter, sa norme (par exemple Européenne ISO ou Américaine AISC), ainsi que la nature de l'objet.

3.2 Trimble RealWorks version Performance

Le logiciel Trimble RealWorks, couramment employé par les cabinets pour l'édition de nuages de points, propose également dans sa version "performance" des fonctionnalités de modélisation.

Ces fonctionnalités sont particulièrement adaptées aux environnements industriels, permettant l'extraction semi-automatique d'éléments tubulaires et de structures. Un atout notable de ce logiciel réside dans la simplification significative de la modélisation des escaliers et des passerelles, des éléments notamment complexes à modéliser avec EdgeWise et encore plus avec Revit. Les résultats de comparaisons seront disponibles dans le mémoire.

3.3 Cyclone 3DR

Le logiciel Cyclone 3DR est un outil également très intéressant, qui dans sa dernière version, intègre une fonctionnalité nommée *scan-to-pipe*. Cette fonctionnalité permet l'extraction semi-automatique des systèmes de tuyauterie, accompagnée d'un contrôle qualité instantané. La modélisation de structure quant à elle n'est pas encore disponible. Si le temps restant du projet de fin d'études le permet, ce logiciel sera également testé avec le nuage de points de référence afin d'évaluer ses avantages et ses limites.

4. Modélisation de la maquette 3D complète de l'unité de liants avec Edgewise et Revit

Après les investigations réalisées lors de cette étude, c'est EdgeWise qui semblerait être la solution la plus avantageuse pour notre type de projet. L'ensemble du site industriel est donc modélisé avec EdgeWise puis finalisé sur Revit pour la modélisation du sol, des murs, des plafonds, des rambardees rondes, des dalles d'escaliers et l'intégration d'éléments spécifiques tels des machines et équipements industriels (pompe, compteur, etc), trouvés sur le site *bimobject.com*, proposant une bibliothèque d'objet libre, rendant ainsi la maquette plus réaliste.

5. Évaluation et visualisation de la maquette 3D de l'unité de liants routiers

Après la modélisation, l'évaluation est essentielle pour assurer la qualité du travail. Deux méthodes seront utilisées : une analyse qualitative par inspection visuelle et une analyse quantitative par mesures statistiques des écarts entre le modèle et le nuage de points avec CloudCompare ou EdgeWise, ainsi que des prises de cotes et la comparaison de coordonnées sur des points remarquables. La phase de visualisation impliquera l'importation de la maquette au format *.ifc* dans une visionneuse BIM gratuite, permettant aux clients de naviguer dans la maquette 3D, de réaliser des coupes, des prises de cotes et des annotations. Pour ce projet, nous avons testé plusieurs visionneuses BIM, notamment Autodesk Viewer Online, BIM Vision, BIMcollab ZOOM et Cesium ion, chacun ayant ses avantages et inconvénients.

Fig. 4 : visualisation de la maquette 3D de l'unité de liants (partie Sud, extérieur) avec Autodesk Viewer Online



Conclusion

En conclusion, ce projet de fin d'études a établi un protocole à travers des tests et des comparaisons, démontrant la complémentarité des techniques d'acquisition. Pour la modélisation, une chaîne de traitement semi-automatisée optimisée utilisant EdgeWise a été développée, réduisant considérablement le temps de traitement. De plus, Revit reste indispensable pour finaliser les maquettes avec fiabilité. Enfin, le choix d'une visionneuse BIM adaptée permettra une visualisation pédagogique et accessible du site industriel pour le client. Ce projet ouvre des perspectives prometteuses, notamment dans l'industrie 4.0, en intégrant les éléments, machines et équipements de l'usine pour une gestion interconnectée via l'internet des objets (IoT) et la domotique pour le contrôle en temps réel des processus de production.

Détermination des limites du domaine public fluvial par exploitation de nuages de points LiDAR



PFE présenté par : **Juliette Brochier**
Société d'accueil : **Eurométropole de Strasbourg**
Directeur de PFE : **Olivier Banaszak**
Correcteur : **Mathieu Koehl**
Encadrant : **Sébastien Wehrle**



1. Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Le Rhin Tortu est intégré au domaine public fluvial (DPF) de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) depuis le 31 décembre 2008. Depuis le transfert de la gestion du Rhin Tortu de l'État à l'Eurométropole, aucune mesure n'a été prise à l'encontre des empiètements sur le DPF, alors même que l'État avait constaté environ 450 occupations illégales. Ainsi, comme tout détenteur d'une parcelle relevant du domaine public est tenu de veiller à sa protection et de remédier aux éventuelles occupations illicites de celle-ci sous peine d'engager sa responsabilité légale, il devient impératif pour la collectivité de redéfinir la limite exacte du DPF avant de pouvoir proposer une stratégie fiable de régularisation des divers empiètements et occupations de celui-ci.

Avec l'avènement des nouvelles technologies, les collectivités sont amenées à repenser les méthodes de délimitation du DPF. Cette étude vise à mettre en place une stratégie de délimitation de ce domaine par exploitation de nuages de points LiDAR technologiquement plus récente par rapport à des méthodes conventionnelles, bien plus chronophages, comme la réalisation de levés in-situ par des géomètres-experts.

1.2 Objectifs et enjeu

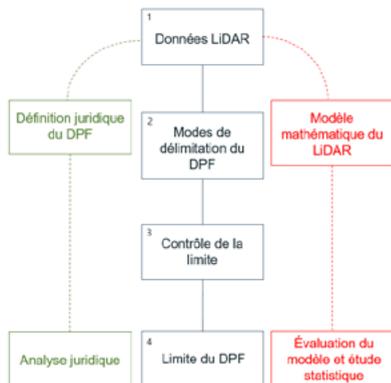


Fig. 1 - Schéma des objectifs de l'étude

L'objectif principal du projet réside dans la mise en place d'une chaîne de traitement semi-automatisée menant à la délimitation du DPF par exploitation de données LiDAR. Dès lors, notre étude permettra de définir la limite topographique à partir des niveaux à pleins bords du chenal en application de la règle du *plenissimum flumen* héritée du droit romain et reprise par l'article L. 2111-9 du Code général de la propriété des personnes publiques (CG3P). Nous chercherons à contrôler les valeurs de *plenissimum flumen* obtenues dans le but de définir la limite du DPF au droit de profils transversaux. D'emblée, un enjeu du projet réside dans la qualité du modèle proposé pour la délimitation du DPF. En effet, les méthodes de contrôle utilisées, ainsi que les méthodes d'évaluation de la qualité des résultats, joueront un rôle essentiel dans la garantie de la fiabilité technique de la limite ainsi proposée de manière semi-automatique.



De plus, une analyse juridique approfondie du projet revêt une grande importance puisqu'elle permettra de poser un cadre légal clair assurant une protection pour la collectivité si un contentieux survenait lors de la régularisation des empiètements. En effet, l'objectif ici est de connaître et de comprendre l'articulation entre le droit local d'Alsace-Moselle et le droit national afin de proposer une méthode de délimitation juridiquement fiable.

2. Délimitation du domaine public fluvial

2.1 Synthèse du cadre légal

L'objectif de cette synthèse du cadre légal est de déterminer s'il sera possible d'utiliser le LiDAR comme méthode d'acquisition pour définir et fixer la limite de cet espace fluvial. Dès lors, nous avons cherché dans un premier temps à définir le périmètre juridique du Rhin Tortu en utilisant la convention de transfert du 31 décembre 2008.

Cette analyse juridique a permis de mettre en lumière la nécessité de faire évoluer le cadre légal en vigueur. Actuellement, la loi en Alsace-Moselle ne permet pas la délimitation du domaine public par exploitation de nuages de points LiDAR. En effet, l'articulation entre le droit local et les lois nationales a révélé des discordances et contradictions en lien avec la procédure obligatoire d'abornement. La complexité d'interprétation des textes de loi a soulevé une réserve juridique quant à la mise en place d'une méthode automatique basée sur l'exploitation de données physiques indirectes (LiDAR), d'où la nécessité d'associer l'Institut du Droit Local Alsacien-Mosellan (IDL) à cette démarche.

2.2 Données

Dans cette étude, nous nous intéressons aux données LiDAR et aux produits dérivés de ces données. Effectivement, nous disposons de la campagne aérienne LiDAR réalisée en 2021 sur le territoire de l'EMS, permettant d'obtenir un nuage de points d'une densité moyenne de 30 points/m² ainsi qu'une précision effective de 3,6 cm en altimétrie. Dans la suite du projet, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT), plutôt que le nuage de points brut, en raison de ses nombreux avantages : une réduction significative du volume de données à traiter, une simplification des calculs et une meilleure compatibilité avec les outils SIG courants.

Lors du cadrage de l'étude, nous avons sélectionné trois tronçons caractéristiques du Rhin Tortu, chacun représentant un archétype de biotope distinct. Cette sélection a été faite dans le but d'analyser et de comparer les résultats de l'algorithme en fonction des différents types de cours d'eau.

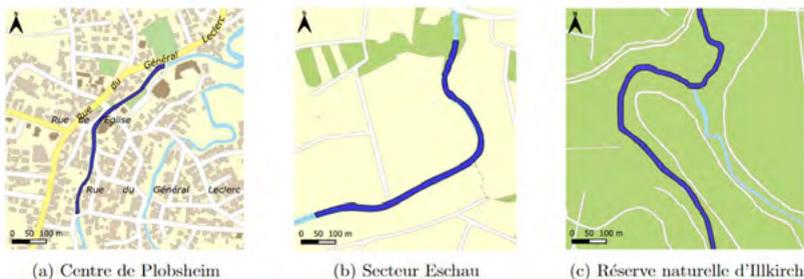


Fig. 2 : Tronçons caractéristiques sélectionnés pour l'étude

Afin de garantir la précision et la fiabilité des MNT de chaque tronçon d'étude, nous avons mis en place une chaîne de traitement permettant d'adapter au mieux chaque MNT aux spécificités du terrain.

Pour cela, nous avons utilisé le logiciel FME et la bibliothèque « Point Data Abstraction Library » (PDAL). Le processus comprend des étapes de segmentation du nuage de points et de correction du bruit associé à celui-ci. En effet, le système LiDAR topographique utilisé dans l'étude est équipé d'un laser dans le proche-infrarouge et n'a donc pas permis de cartographier les zones en eau. Ainsi, l'objectif de ce traitement est de détecter les zones dépourvues d'informations afin de leur attribuer une altitude basée sur des contraintes 3D obtenues sur la base de données hydrographiques de l'EMS. Après affectation des altitudes aux zones sans information, nous avons corrigé le MNT des effets de lignage transversal. Ces effets sont dus au processus de triangulation, où un triangle se forme entre deux points situés sur une berge et un point isolé au milieu de l'eau. Ce bruit peut être interprété comme une avancée des berges au milieu de l'eau. Ainsi l'élimination de celui-ci est indispensable pour une détection robuste du débordement.



Fig. 3 : Effet de lignage transversal

Méthodes retenues pour l'étude

Tout d'abord, il est possible de retenir plusieurs types de méthodes de détermination du niveau à pleins bords (Williams, G. P. 1978) :

- Des méthodes basées sur la reconnaissance des surfaces sédimentaires.
- Des méthodes géomorphiques à partir de levés in-situ réalisés par des experts.
- Des méthodes géométriques qui permettent l'application d'opérateurs mathématiques et statistiques sur des données physiques indirectes (LIDAR)

De nombreux critères entrent en jeu dans le choix des méthodes sur lesquelles porte cette étude. En effet, il faut prendre en compte l'efficacité et la robustesse des méthodes, ainsi que leur capacité à être performantes sur les différents tronçons sélectionnés pour l'étude. Ainsi, nous avons fait le choix de développer deux approches géométriques pour la détermination du niveau de débordement : une méthode automatique basée sur l'indicateur de profondeur hydraulique (De Rosa et al., 2019) ainsi qu'une approche semi-automatique dérivée de travaux sur la courbure minimale du relief (Sofia, G. et al. 2015) (Tarolli, P. et al. 2012). Le développement de deux approches va permettre un contrôle interne lors de la comparaison des résultats obtenus pour chaque méthode.

Ces méthodes se basent sur l'analyse de sections transversales le long du linéaire. Les données en entrée sont un MNT au format raster ainsi qu'une couche polygone représentant le cours d'eau. Les données en sortie sont une succession spatiale de points traduisant le *plenissimum flumen*. La limite ainsi générée est discontinue. Dès lors, en ouverture du projet, nous introduirons une étude statistique visant à définir une enveloppe estimative du DPF en recherchant une cohérence locale altitudinale et spatiale. En effet, cela permettra d'intégrer les relations topologiques entre les points du *plenissimum flumen* afin de proposer une estimation d'une enveloppe continue du DPF.

2.4 Développement de l'extension QGIS

Afin de faciliter le développement du plugin QGIS permettant le calcul de la limite du DPF, une première phase de développement a été réalisée en Python sur Visual Studio Code. Cela a permis de se familiariser avec les bibliothèques Python (Rasterio, Shapely, Geopandas, etc.) et de tester les diverses approches pour le prétraitement des données. Lorsqu'il s'agit de traiter des données spatiales et d'interagir avec un utilisateur en utilisant Python, nous entrons dans un environnement graphique grâce à l'utilisation de la bibliothèque PyQt5, qui offre un accès à l'API de développement d'interfaces graphiques Qt. Ainsi, nous avons créé un plugin à l'aide du « *Plugin Builder 3* » de QGIS et l'interface de celui-ci a été conçue à l'aide du logiciel Qt Designer qui est un outil graphique intégré à Qt permettant de concevoir des interfaces utilisateur à l'aide de divers « *widgets* ». Les différentes fonctionnalités ont ensuite été développées dans l'environnement de travail.

3. Comparaisons et tests



3.1 Évaluation quantitative par comparaison avec une expertise

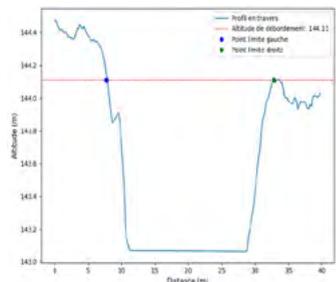


Fig. 4 : Détection des points de la limite avec la méthode basée sur la profondeur

Le projet se termine par une étude comparative des méthodes afin de se rendre compte de l'impact de chacune sur la détermination du niveau de débordement. De plus, un contrôle de la limite a été réalisé avec des levés GNSS et tachéométriques selon le critère morphologique haut de berge (Navratil, O. 2006). Ainsi, en milieu rural nous obtenons des résultats cohérents et encourageants puisque plus de 80 % des écarts entre le niveau de débordement obtenu avec la méthode basée sur la profondeur hydraulique et le GNSS sont inférieurs à 10 cm avec une moyenne des écarts égale à 6 cm. Néanmoins, en milieu urbain on remarque des écarts plus importants. Cela s'explique principalement par une forte artificialisation des berges du cours d'eau.

3.2 Évaluation qualitative

Une évaluation qualitative a été réalisée par l'exploitation et l'analyse des résultats (points de débordement) de l'algorithme, grâce aux représentations graphiques de chaque étape du traitement disponibles dans le plugin. Jusqu'à présent, nous avons constaté que la méthode la plus robuste et fiable était celle basée sur la profondeur hydraulique, en sélectionnant l'amplitude maximale comme point de débordement. En moyenne, pour tous les types de tronçons confondus, plus de 86 % des détections effectuées avec cette méthode fournissent des résultats visuellement cohérents. De plus, ces résultats sont croisés avec des images aériennes et des analyses in situ (levés GNSS/tachéométriques), ce qui nous permet de juger de la cohérence visuelle et de l'homogénéité du critère de débordement. Nous avons également comparé le résultat avec la limite cadastrale actuelle.



Fig. 5 : Exemple de résultat
Rouge : Limite berge droite
Vert : Limite berge gauche
Bleu : Limite cadastrale

3.3 Analyse de précision

Une analyse de précision a été mise en œuvre tout au long du processus de délimitation, nous sommes alors en mesure d'estimer la précision de la limite obtenue en sortie de l'algorithme et ainsi juger de sa fiabilité. Pour cela, nous avons établi un bilan des sources d'imprécision susceptibles de survenir lors de la phase d'acquisition et nous avons calculé l'influence de ces erreurs sur les coordonnées 3D des points LiDAR. (Baltasavias, E. P. 1999) (Schenk, T. 2001) (Yesou, H. 2023). En parallèle, nous avons également calculé l'imprécision du MNT en tenant compte de la densité de points du nuage ainsi que de la pente du terrain (Kraus, K. 2007). La limite étant définie par le niveau de débordement de façon relative pour chaque section transversale, la précision de celle-ci dépend donc uniquement de la précision altimétrique et de la précision du MNT. En réalisant une composition quadratique des erreurs, nous obtenons une estimation de la précision de la limite.

4. Conclusion

Durant ce PFE, nous avons développé une option de calcul de points traduisant le pleinissimum flumen d'un cours d'eau. Ce plugin QGIS est actuellement fonctionnel et il permet la définition de la limite du DPF grâce à la mise en place de méthodes géométriques reproductibles. Le processus de contrôle de la qualité de la limite garantit la précision de celle-ci. Enfin, les contraintes juridiques entravent le processus de délimitation, révélant que le cadre légal n'a pas été mis à jour pour intégrer les nouvelles technologies d'acquisition de données 3D.

Remarque : Les références bibliographiques sont disponibles à la fin du mémoire de PFE.

Analyse et optimisation de la chaîne de traitement des données LiDAR de l'entreprise

PFE présenté par : **Gaspard Perisse**
Société d'accueil : **ADAGE**
Directeur de PFE : **Thibaut Nugue**
Correcteur : **Emmanuel Moisan**
Encadrant : **Thibaut Nugue**



1. Contexte et objectif de l'étude

Afin de suivre le développement technologique et pour répondre aux besoins des clients, le cabinet de Géomètres-Experts ADAGE s'est équipé du capteur LiDAR (Light Detection And Ranging) DJI Zenmuse L1, monté sur un drone DJI Matrice 300.

La technologie LiDAR offre divers intérêts dont le principal est de pouvoir mesurer sous le couvert végétal puisque le capteur détecte jusqu'à 3 retours par signal émis. Cela permet aussi de mesurer de grandes étendues en peu de temps, sans avoir à envoyer une personne au risque de la mettre en danger dans des zones accidentées. À partir du nuage ainsi obtenu, il est possible d'extraire de nombreuses informations telles que des Modèles Numériques de Terrain (MNT) denses et exhaustifs ou tout autres Modèles Numériques de Surfaces (MNS).

Ce projet de fin d'étude prend la suite du projet de recherche technologique durant lequel une première chaîne de traitement a été proposée. L'objectif de ce PFE est donc d'améliorer cette chaîne de traitement des données LiDAR afin de garantir une bonne précision du nuage de points et de fournir divers MNS (MNT, Modèle Numérique de Canopée...) de qualité. Cela commence dans un premier temps par l'optimisation des méthodes de relevé, en fonction du relief et de la nature du terrain, et la mise en place d'une méthode de géoréférencement afin de contrôler et garantir l'exactitude pour chaque projet. Enfin, la seconde partie de l'étude se consacre à la création et à l'optimisation d'une chaîne de traitement en partant des données brutes jusqu'aux rendus finaux (MNT, plans topographiques...). Un contrôle des données sera ensuite réalisé afin de qualifier la précision des nuages LiDAR et des rendus (plans topographiques, MNT) effectués à partir de ces données, comme expérimenté par Kersten, T. et al 2022, Štroner, M. et al 2021, Štroner, M. et al 2023).

2. Optimisation de la méthode d'acquisition

Une méthode d'acquisition adaptée est très importante car c'est ici que la précision des données se joue pour partie. En effet, au-delà des incertitudes liées au système composé du capteur, de la centrale inertielle et du récepteur GNSS, Bretar, 2006 montre que l'environnement joue un rôle important dans la précision des données.

1. Le plan de vol

Le plan de vol correspond à la trajectoire suivie par le drone. Il est constitué de plusieurs bandes de vols parallèles avec un recouvrement entre elles. Contrairement à la photogrammétrie, un recouvrement de 30 à 50% est suffisant, mais nécessaire, entre les bandes de vol comme le préconisent Cramer et al., 2018 ainsi que les recommandations du constructeur (www.dji.com). Ce recouvrement permettra ensuite de recalibrer les bandes entre elles.



Il est également nécessaire de définir et connaître le périmètre d'emprise à relever. Pour cela il est possible d'insérer directement cette emprise dans la télécommande du drone sous forme d'un polygone au format KML. Cependant, l'application du contrôleur n'accepte qu'un format spécifique de KML. C'est pourquoi nous avons développé un premier plugin sur QGIS afin de convertir n'importe quel fichier contenant un polygone d'emprise au bon format, compatible avec la télécommande du drone. Grâce à ce plugin, il est aussi possible de créer une zone tampon de cette emprise car les CCTP demande des éléments autour du périmètre à lever.

Divers tests ont été effectués afin de définir les paramètres de vol optimaux. Nous avons tout d'abord testé de survoler des zones végétalisées par deux vols perpendiculaires afin de voir si cela permet d'augmenter le nombre de points au sol. La Figure 1 montre un contrôle visuel sur lequel le sol est classifié pour chacun des deux vols perpendiculaires. On observe alors que les deux nuages montrent une exhaustivité et une densité très similaires.

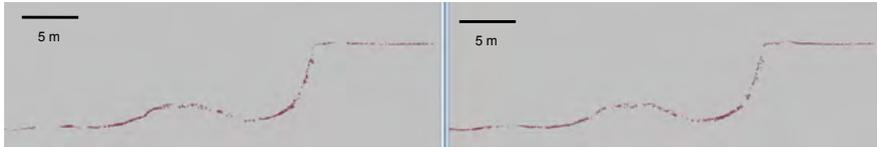


Figure 1 : Coupes du sol classifié issu d'un premier vol à gauche puis d'un second vol perpendiculaire à droite

Ensuite, une étude de cas sur un bâtiment semble montrer que l'incidence du laser sur les façades semble exercer une mauvaise influence sur la géométrie. En effet, malgré plusieurs essais sur le recalage des bandes de vol, des écarts systématiques de 5 cm persistent pour les bandes de vol perpendiculaires aux façades, comme le montre la Figure 2. La comparaison est effectuée avec l'algorithme M3C2 (Lague et al, 2013), avec un nuage issu d'un scanner terrestre. Nous sommes ainsi arrivés à la conclusion que dans ce cas de figure le drone doit effectuer ces vols à 45° des façades plutôt que perpendiculairement

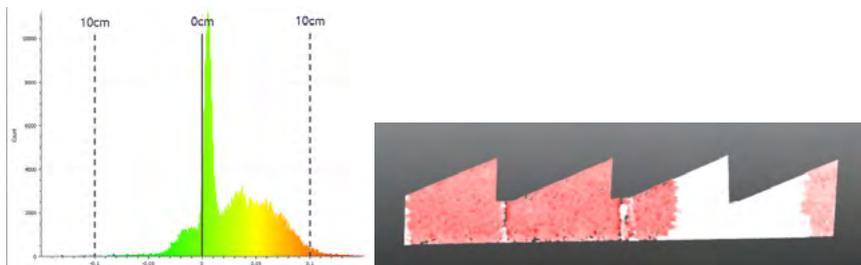


Figure 2 : Mise en évidence d'écarts systématiques sur certaines bandes de vol. à gauche, les écarts systématiques de 5 cm sont en rouge et en blanc, des écarts moyens proches de 0 cm

Une étude sur la capacité de pénétration du laser dans la végétation, en fonction de différents paramètres de vol comme l'inclinaison du capteur ou le mode de balayage, a été menée afin de déterminer les paramètres de vol optimaux pour le survol de végétation dense comme les forêts. Un indicateur pour qualifier cette pénétration est le Laser Penetration Index (LPI) proposé par Barilloti et al, 2006. Un total de neuf vols avec des paramètres différents sur une forêt montrent un LPI ≤ 0.1 et ce quel que soit la configuration. Nous en concluons que l'impact de l'empreinte laser au sol est le principal facteur limitant lors d'un vol au-dessus d'une végétation dense.

2. Le géoréférencement

Pour le géoréférencement, nous utilisons le RTK avec une base déterminée en moyennant sa position deux minutes avec le réseau Teria. Cela permet d'améliorer précision relative du chantier. De plus,

des GCP sont répartis sur la zone. Pour fabriquer ces GCP, nous avons choisi des damiers de 50x50cm en polypropylène renforcé. Cependant, des travaux restent à réaliser pour tester des matériaux réfléchissant, comme le propose Fukuda, M. et al 2014 afin de pouvoir placer les cibles plus efficacement, voire automatiquement, dans le nuage.

3. Le post-traitement du nuage

Le calcul de la trajectographie et du nuage s'effectue avec le logiciel DJI Terra. Ce logiciel fourni un nuage brut au format LAS et un fichier de trajectographie SBET. Ces données sont ensuite post-traitées avec la suite de logiciel TerraSolid sous environnement Spatix selon la chaîne traitement développée par nos soins, illustrée ci-dessous en Figure 3.

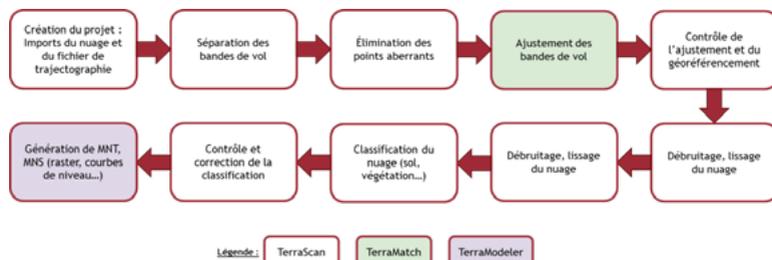


Figure 3 : Chaîne de traitement des données LiDAR sur TerraSolid, de l'import des données brutes à l'export des rendus

Une étape clé de ce traitement est l'ajustement des bandes de vol. Cela permet de corriger les erreurs éventuelles du calcul de trajectoire effectué par DJI. TerraSolid propose deux approches pour le recalage des bandes de vol ; une approche de recalage surface à surface et une approche élément à élément. La première approche nécessite une classification du sol et/ou des murs et toits. Dans la seconde méthode, le logiciel détermine des éléments, les tie lines ou lignes de jonctions, à intervalles réguliers et calcule les corrections à partir de ces observations. Les deux méthodes peuvent permettre d'obtenir un résultat satisfaisant et certains critères ont permis de choisir la seconde méthode. En effet, cette dernière ne nécessite pas de classification préalable du nuage et les temps de calculs sont plus courts que l'autre méthode. Elle est aussi plus intuitive et permet de supprimer les observations fausses présentant des écarts trop importants. Les corrections calculées sont ensuite appliquées aux trajectoires et au nuage de points. Une fois les corrections appliquées, il est nécessaire de contrôler l'ajustement grâce à des coupes. Cela permet d'arriver au résultat illustré Figure 4 ci-dessous.

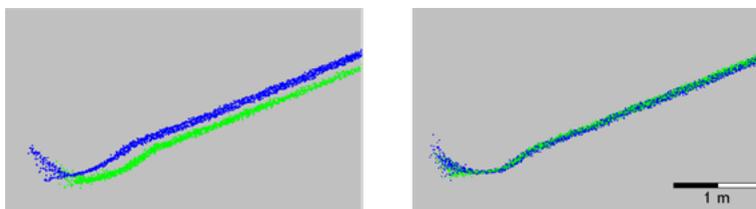


Figure 4 : Coupe d'un nuage de point avant (à gauche) et après (à droite) ajustement des bandes

Pour le géoréférencement avec les GCP, il est possible de calculer une similitude spatiale à 6 paramètres (3 translations, 3 rotations) ou bien 3 translations. Les divers jeux de données acquis au cours de ce PFE montrent que le géoréférencement est de bonne qualité et de simples translations sont nécessaires pour corriger l'erreur de géoréférencement. Cela permet d'obtenir un écart-type de l'ordre de 15 mm en altimétrie et 50 mm en planimétrie.

Le sol est ensuite classifié automatiquement et des corrections peuvent y être apportées manuellement. Le MNT est par la suite généré sous forme de courbes de niveau. Du fait de la densité du nuage LiDAR, les courbes de niveau sont des polygones d'aspect complexe et des artefacts, dû au bruit du nuage ou à la présence de faux positifs dans les points du sol, sont présents sous forme de petits polygones. Afin d'éliminer ces artefacts, qui sont des courbes de niveau de faible longueur, un plugin sur QGIS a été produit. Le critère d'élimination des artefacts choisi est donc la longueur. Le MNT ainsi obtenu est alors plus lisible et exempt de fautes. Des travaux sont réalisés dans le but d'évaluer quantitativement les produits extraits (MNT) à l'aide de références acquises par photogrammétrie et lasergrammétrie terrestre. De premiers résultats montrent une précision 3D de l'ordre de 15 cm, qui sera validée par d'autres tests.

4. Gestion des données

Une question importante lorsque l'on traite d'importants volumes de données est la gestion du stockage et l'organisation des données. En effet le LiDAR peut venir en complément de relevés photogrammétriques ce qui demande une bonne organisation pour limiter le risque que des problèmes surviennent, lorsqu'il faut retrouver un fichier spécifique par exemple. De plus la gestion du stockage pendant et après les traitements LiDAR s'est aussi posée dans la mesure où le même nuage de points existe finalement sous deux voire trois versions, à savoir une version brute au format LAS, une version de travail au format FBI (format binaire pour Spatix), et si besoin une version finale LAS ou LAZ, cela en plus des données brutes de DJI. Il a donc été décidé de conserver toutes les données telles quelles lors des traitements puis de ne garder que le nuage brut et le fichier final, au format LAZ.

DJI Terra ne créant qu'un nuage au format LAS, une application permettant de convertir les nuages de points au format LAZ a été créée afin de réaliser cette étape rapidement, sans avoir besoin d'ouvrir CloudCompare. Cette application peut en plus servir pour rééchantillonner un nuage issu de travaux réalisés par photogrammétrie ou scanner laser terrestre. De cette façon, nous pouvons diviser au moins 3 à 4 fois le volume des données.

5. Conclusion et perspectives

Pour conclure, il convient de préciser que tous les résultats n'ont pas pu être détaillés ou mentionnés ici. Ce PFE a permis d'expérimenter divers enjeux liés à l'acquisition d'une part et au traitement des données d'autre part. Ainsi, nous avons déterminé le plan de vol optimal en fonction du milieu levé (forêt, zone urbaine). Puis, une chaîne de traitement sur le logiciel Terrasolid a été mise en place afin d'obtenir des données de qualité. Cette chaîne de traitement permet d'allier la simplicité et la fiabilité. Chaque étape de ce processus est aussi consignée en détail dans des manuels d'utilisation afin que toute personne amenée à traiter des données LiDAR puisse le faire aisément.

Enfin, ces travaux ouvrent de nouvelles pistes de réflexion, à commencer par la possible utilisation du nuage LiDAR afin de restituer des éléments topographiques tels que les linéaires de voirie ou les talus comme le propose Kleiner, L. et al 2010. Des objets restitués seront ainsi contrôlés par comparaison avec des levés par méthode traditionnelle (tachéomètre). Cela permettra de définir les possibilités et limites de l'interprétation sur le nuage LiDAR.

Références

- Bretar, F. (2006). Couplage de données laser aéroporté et photogrammétriques pour l'analyse de scènes tridimensionnelles. PhD thesis, Télécom ParisTech.
- Kleiner, L., Robra, J. P., Gilliéron, P. Y., Schaer, P., & Mertina, C. (2010). Lever de limites naturelles par scanner laser aérien (LiDAR) Evaluation et perspectives dans le cadre de la mensuration cadastrale. Géomatique Suisse, (4), 136-139.
- Bariolotti, A., Turco, S., Alberti, G., 2006. LAI determination in forestry ecosystem by LiDAR data analysis. Proceedings International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry, pp. 248 - 252, Wien, 14-15 Feb. 2006.
- Laque, D., Brodu, N., and Leroux, J. (2013). Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : Application to the rangitikei canyon (nz). ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 82 :10–26.
- Kersten, T., Wolf, J., and Lindstaedt, M. (2022). Investigations into the accuracy of the uav system dji matrice 300 rtk with the sensors zenmuse p1 and l1 in the hamburg test field. In XXIV ISPRS Congress "Imaging today, foreseeing tomorrow", 6–11 June 2022, Nice, France, pages 339–346. Copernicus.
- Štroner, M., Urban, R., and Linková, L. (2021). A new method for uav lidar precision testing used for the evaluation of an affordable dji zenmuse l1 scanner. Remote Sensing, 13(23) :4811.

Méthodologie de création et d'analyse de maquette thermique temporelle de scènes urbaines

INSA | INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
STRASBOURG



PFE présenté par : **Emile MARIE**
Société d'accueil : **ICube / INSA**
Directrice de PFE : **Tania LANDES**
Correctrice : **Hélène MACHER**
Encadrants : **Vincent LECOMTE et Chaimaa DELASSE**



1. Contexte et objectifs

Dans le contexte actuel de dérèglement climatique auquel nos sociétés tentent de faire face et considérant la concentration majoritaire de la population mondiale au sein des villes, l'étude du confort thermique des habitants est devenue cruciale. La compréhension des zones urbaines et des conditions climatiques qui y règnent représente un enjeu majeur dans le but d'améliorer le confort et l'habitabilité de celles-ci. Ce confort est déjà remis en question en périodes estivales lors de vagues de chaleur, dont l'occurrence devrait s'accroître d'année en année comme l'atteste le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son sixième rapport d'évaluation (2021).

Le projet TIR4sTREEt (financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-21 CE 22 0021)) vise à suivre le comportement d'arbres de rue et leur impact sur le microclimat urbain. Selon les espèces d'arbres, le pouvoir rafraichissant des arbres peut varier. L'influence de cette variabilité interspécifique sur le microclimat urbain est ainsi étudiée à l'aide de mesures réalisées à l'échelle de trois rues, sur trois essences d'arbres, dans un quartier résidentiel de Strasbourg. La ville est une métropole au nord-est de la France, caractérisée par un climat continental. Les saisons connaissent des contrastes marqués, avec des précipitations réparties tout au long de l'année. Ces conditions climatiques peuvent influencer la santé et le comportement des arbres, faisant de cette ville un lieu d'étude pertinent pour le projet TIR4sTREEt. Au travers du projet, il s'agit donc d'étudier les interactions thermiques à l'échelle de la rue dans le but de comprendre et d'analyser les bienfaits des arbres sur leur environnement urbain. Via les phénomènes d'ombre et d'évapotranspiration, les végétaux sont bénéfiques au confort thermique. Ils peuvent notamment être utilisés pour limiter les effets d'îlots de chaleur urbains (ICU) qui se manifestent dans la canopée urbaine et qui se traduisent par des « températures de l'air plus chaudes en ville qu'à la campagne la nuit » (Oke et al. 2017).

La problématique de ce projet de fin d'étude est née du besoin d'analyser et de confronter les données réelles à des simulations microclimatiques issues de LASER/F, un logiciel de simulation microclimatique à l'échelle du quartier. Ainsi il s'agira de coupler les images infrarouges thermiques (IRT) acquises dans la zone d'étude avec un modèle 3D pour produire une maquette 3D thermique. Celle-ci permettra d'une part de valider les températures de surface issues des simulations microclimatiques et d'autre part d'étudier l'interaction entre les arbres et leur environnement urbain (façades, sol) Il sera ainsi nécessaire de traiter les données acquises durant les différentes campagnes de mesures, soit des dizaines de milliers d'images, entre autres, avec le besoin de géoréférencer ces données et de les appliquer sur une maquette 3D de la zone d'étude.



2. Méthodologie de traitement

Une chaîne de traitement a été réalisée pour créer une maquette thermique de référence à partir du modèle 3D de la zone d'étude et des images IRT acquises avec la caméra FLIR T560 (ayant pour particularité d'être munie d'un capteur rouge-vert-bleu (RVB) et d'un capteur IRT) depuis un mât fixe installé dans la rue. Cette maquette de référence permettra dans un premier temps de réaliser des analyses spatiales et thermiques puis dans un second temps de valider les températures de surfaces simulées par LASER/F. Partant d'une série d'images IRT et d'un modèle 3D, nous obtenons une série de maillages 3D avec un champ de température pour chacune des faces (fichier .vtk) permettant une visualisation dynamique des températures de surfaces réelles sur le logiciel Paraview. Un temps non négligeable a été dédié à l'optimisation des temps de traitement, à la simplification et à l'automatisation de la chaîne de traitement. L'aspect d'automatisation est en effet une composante essentielle au vu de la quantité de données à disposition, les campagnes d'acquisition s'étendant sur plusieurs mois avec environ 300 images IRT enregistrées chaque jour. La méthodologie mise en place est présentée dans la Figure 1 :

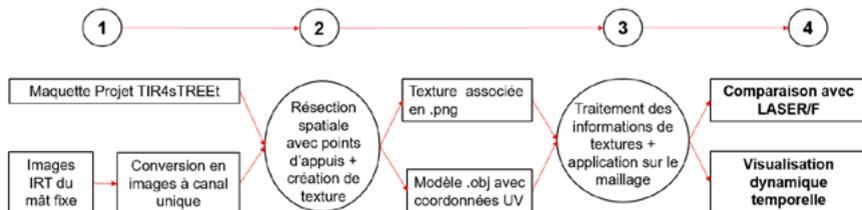


Fig. 1 : Diagramme de flux

2.1 Préparation des données

En amont de tout traitement sur les valeurs de températures à proprement parler, il est nécessaire de traiter les fichiers en sortie de la caméra FLIR T560. Pour les traitements suivants, nous aurons besoin des matrices de températures à partir desquelles nous reconstruirons des images à canal unique afin de faciliter la création et l'exploitation de fichiers de textures thermiques. Pour cela, un programme Python couplé au kit de développement logiciel (SDK) FLIR permet, à partir d'une série de fichiers radiométriques, d'obtenir des matrices de températures de surfaces. De plus, la bibliothèque Python de FLIR nous permet également de modifier les paramètres propres aux images (émissivité entre autres). Autrement, si nous n'avions pas utilisé le SDK, seule la version payante du logiciel FLIR permettait un traitement de séries d'images, la version gratuite ne permettant que cette conversion image par image. Ce traitement est donc une étape essentielle dans l'automatisation de la chaîne de traitement.

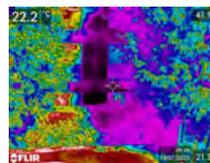


Fig. 2 : JPEG Radiométrique



Fig. 3 : Image à bande unique

2.2 Mise en relation des images avec le modèle 3D

Une fois les images à canal unique obtenues, nous pouvons nous intéresser à mettre en relation les images thermiques avec le modèle 3D via le processus de création de textures. Pour cela, il faut projeter les images sur le modèle 3D à l'aide du logiciel Metashape (Agisoft). Un prérequis est donc de déterminer les paramètres d'orientation interne et externe de la caméra. Comme habituellement fait dans la littérature dans le cadre d'un couple de capteur RVB et IRT à décalage constant (cas de la FLIR T560), il est préférable d'orienter la caméra RVB en premier. Une fois les paramètres d'orientation externes obtenus, il est d'usage d'appliquer un décalage pour obtenir les paramètres extrinsèques de la

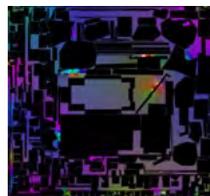


Fig. 4 : Fichier de texture

caméra IRT. Les paramètres extrinsèques de la caméra RVB de la FLIR T560 ont été déterminés approximativement à partir de la position du capteur acquise par lasergrammétrie, puis affinés à partir du pointage de points de référence sur la maquette 3D et de points homologues sur les photos RVB. Enfin, à l'aide d'une calibration réalisée sur MATLAB (LECOMTE, 2022), les paramètres intrinsèques de la caméra IRT ainsi que les paramètres de translation et de rotation entre les deux capteurs ont pu être déterminés. Cette étape a donc permis d'orienter la caméra IRT.

Un programme python a ensuite été codé en utilisant le module Metashape qui permet d'importer le modèle 3D, charger la série d'images IRT géoréférencées à canal unique, appliquer les textures et finalement sauvegarder le modèle 3D texturé et les texture afférentes. Une fois cette étape réalisée, le fichier .obj de la maquette se voit ajouter des coordonnées UV. Ces dernières seront utilisées par la suite pour la création de champs scalaires puisqu'elles permettent de réaliser le lien entre un maillage et une image.

2.3 Ajout de champs scalaires à notre maquette de référence

Une fois en possession de nos fichiers de textures ainsi que d'un modèle 3D comportant des coordonnées UV, l'entièreté des facettes du maillage est parcourue pour associer à chaque facette sa population de pixels correspondants dans les fichiers de texture. De plus, nous ajoutons des champs scalaires pour chaque facette :

```
IRT-20230719-000430.vtk*
Id: 1367
Type: Triangle
triangle_number: 1367
moyenne_temperature_surface: 18.2786
ecart_type: 0.0270743
moyenne_filtree_de_temperature_de_surface: 18.2782
pourcentage_des_valeurs_273.15: 0
nombre_de_pixels: 701
classes: 1003
```

Fig. 5 : Champs de données afférents à chaque facette

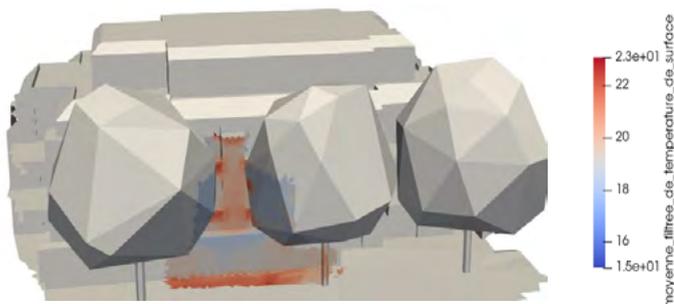
-L'écart type au sein de chaque facette constitue un champ scalaire qui nous permettra d'évaluer la dispersion des valeurs au sein de chaque facette.

-Un deuxième champ se composera de la moyenne des pixels présents dans chaque facette, avec en amont l'élimination des valeurs aberrantes. Cette élimination consiste en la suppression des valeurs supérieures à trois écarts types de la moyenne ainsi que des valeurs nulles (-273.15 K).

- Un troisième champ nous informera du pourcentage de valeurs non attribuées au sein d'une facette. Il faudra par la suite, en fonction des cas de figure, choisir la proportion maximale de valeur nulle acceptable.

2.4 Visualisation temporelle

Des premières expérimentations concluantes de visualisation temporelle ont été réalisées sur Python mais nécessitaient de coder toutes les fonctions nécessaires à l'évaluation du modèle. Ainsi, le choix du logiciel de visualisation Paraview a été retenu, nécessitant alors l'export au format .vtk. Cette approche s'est révélé être la solution technique la plus adaptée pour analyser le modèle et le comparer aux résultats de simulations exportés au format .vtk depuis LASER/F. De plus, les métadonnées extraites lors de la phase de préparation des données permettent la manipulation de la dimension temporelle pour analyser les données sur des plages de temps.



3. Analyse des résultats

Dans un premier temps il a été nécessaire d'établir une évaluation quantitative du recalage spatial de la méthodologie résumée ci-dessus. L'orientation des images IRT se fait par l'intermédiaire d'une méthode de résection spatiale par points d'appuis. Ces points d'appuis se situent sur des angles de fenêtre principalement. Des points de contrôles ont également été choisis de la même manière. Les points sont donc à la fois pointés sur la maquette 3D et sur les images thermiques. Cependant, les images thermiques n'ont pas une résolution importante et présentent des effets de halo dû au rayonnement. Malgré ces limitations techniques, les écarts restent modérés entre la maquette et le réel, avec une moyenne de 2,1 cm.

Dans un second temps, de façon à valider la maquette thermique de référence, il est nécessaire d'effectuer des comparaisons avec des capteurs dit "de référence", jugés plus précis et exacts que la caméra thermique infrarouge. Ainsi, la température de surface d'une face de la maquette de référence a été comparée à celle acquise par un thermobouton. Ce capteur de petite taille a été fixé sur la façade, dans le champ de vision de la caméra et mesure une température de surface. Nous avons pu constater que les variations de température sont similaires avec un écart-type de 0,9 °C. On constate que le thermobouton est systématiquement plus chaud que l'information issue de la caméra avec une valeur moyenne respectivement de 23,6 °C et de 22,9°C. De plus, en ajoutant la courbe issue d'une zone d'intérêt réalisé directement sur les images IRT (Marie, 2024)), nous pouvons constater que cette dernière se superpose à la courbe de température de surface issue du fichier VTK. L'écart-type des différences entre ces deux séries de données est de 0,03 °C. Cela montre l'intérêt de la méthode par rapport aux articles de la littérature, qui ont pour usage de comparer manuellement quelques zones d'intérêts (ROI) sur les images IRT. Ainsi, nous pouvons considérer chaque facette de la maquette comme une zone d'intérêt (ROI). La maquette utilise l'ensemble de l'image thermique et permet une comparaison automatisée avec les résultats de simulation.

4. Conclusion

En conclusion, une chaîne de traitement a été mis au point, automatisée et optimisée afin d'être en capacité de traiter les données d'imagerie thermique de la campagne TIR4sTREEt. De plus, la méthode se généralise à d'autre type d'acquisition, comme des acquisitions mobiles (avec différents points de vue) entre autres. Suite aux différentes analyses menées, nous pouvons assurer que le passage du domaine 2D à une représentation 3D via notre méthodologie ne vient pas affecter la qualité des données de températures tant sur le plan spatial (recalage) que sur les tendances d'évolution des températures de surface. Par la suite, cette méthodologie permettra de comparer les données de températures de surface du réel avec des températures de surface simulées sur la même maquette avec le logiciel LASER/F.

5. Références bibliographiques

[Lecomte, 2022] Lecomte, V. (2022). Méthodologie de couplage de la géométrie 3D de scènes urbaines avec des mesures dans l'infrarouge thermique. Rapport de projet de fin d'étude, INSA Strasbourg.

[Macher and Landes, 2022] Macher, H. and Landes, T. (2022). Combining tir images and point clouds for urban scene modeling. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B2-2022 :425–431.

[Marie, 2024] Marie, E. (2024). Analyse d'images thermiques pour le suivi des échanges thermiques entre bâtiments et arbres urbains. Rapport de projet de recherche technologique, INSA Strasbourg.

[Oke et al., 2017] Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., and Voogt, J. A. (2017). Urban Climates. Cambridge University Press, 1 édition.

Estimation de l'évapotranspiration journalière à haute résolution pilotée par télédétection spatiale

PFE présenté par :	Emma Barrieu
Société d'accueil :	Laboratoire CESBIO
Directeur de PFE :	Vincent Rivalland
Correcteur :	Tania Landes
Encadrants :	Vincent Rivalland, Jérémy Auclair



1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le domaine en constante évolution de la télédétection, mon Projet de Fin d'Études, intitulé « *Estimation de l'évapotranspiration journalière à haute résolution pilotée par télédétection spatiale* », consiste en l'application et le développement des technologies de l'observation de la Terre liées à l'agriculture durable et à la gestion des ressources en eau.

Ce projet s'inscrit dans le cadre de la mission TRISHNA, menée en collaboration entre les agences spatiales du CNES en France et de l'ISRO en Inde. Cette mission aura la spécificité de proposer des mesures dans l'optique et le thermique infra-rouge à haute résolution spatiale (60 m) et haute répétitivité temporelle (3 jours). Elle proposera donc des mesures de température de surface terrestre autour de midi selon une couverture globale. L'un des objectifs est d'améliorer la surveillance environnementale au travers, en partie, de l'estimation cartographique de l'évapotranspiration et du stress hydrique de la végétation. Cette mission est réalisée dans la continuité des travaux pour augmenter la précision des modèles climatiques et hydrologiques utilisés à travers le monde et viendra compléter les données de la constellation des satellites LANDSAT portés par la NASA et l'USGS dont la revisite est au mieux de 8 jours et la résolution similaire à TRISHNA.



Fig 1. Logo de la mission spatiale TRISHNA

Sous la supervision de Vincent Rivalland et Jérémy Auclair, Ingénieurs de recherche au sein du laboratoire CESBIO, ce stage a pour but de comparer deux outils et approches d'estimation de l'évapotranspiration (ETR) pilotés par la télédétection que sont EVASPA choisi comme prototype pour la future chaîne de traitement des données de la mission, et ModSpa qui s'appuie sur la méthode dite FAO56.

EVASPA est une méthode contextuelle ayant été utilisée majoritairement avec des satellites basse résolution (1 km), mon étude est l'une des premières qui l'applique sur des données satellites haute résolution (30 m). Ainsi, l'objectif principal de mon étude est de comparer les deux modèles : ModSpa, piloté par l'optique (l'indice de végétation NDVI) et EVASPA, par le thermique (température de surface, LST), d'identifier par la comparaison à des observations *in-situ*, quelle est la méthode la plus pertinente et comment les deux approches peuvent se compléter dans l'objectif de proposer une estimation de l'ETR spatiale et temporelle (journalière) la plus réaliste possible dans une optique de future chaîne de traitement opérationnelle impliquant l'imagerie optique et thermique.

En plus de cet objectif principal, l'objectif secondaire consistant en l'évaluation de l'approche EVASPA avec des données de type Landsat (7 et 8), en l'identification des adaptations nécessaires à l'utilisation d'images de haute résolution par rapport à la basse résolution en proposant des pistes de consolidation des algorithmes, a été ajouté. Ce nouvel objectif a entraîné une prolongation de la durée d'étude de l'approche thermique EVASPA par rapport au planning initial. Cependant, il s'inscrit dans les recherches menées par les groupes d'études travaillant sur les adaptations du modèle EVASPA (HydroScience Montpellier et l'INRAe Avignon) et joue un rôle important dans l'avancée des recherches du groupe mission.



2. Préparation

2.1. Période et zone d'étude

Le choix de la période d'étude ainsi que de la zone a été influencé par différents paramètres, notamment la nécessité d'avoir des données de mesure terrain d'évapotranspiration pour valider les estimations issues de la télédétection, une zone d'étude sans trop de reliefs (exclusion des effets topographiques) ainsi que la présence assurée de contrastes thermiques dans la zone (une partie irriguée et une partie sèche). Parce qu'elle remplissait ces conditions, la région de Lérida, en Espagne, a été sélectionnée. Cette zone bénéficie des mesures des sites instrumentés des campagnes LIAISE et IDEWA (financements ANR), menées en 2021, période également retenue, et seront ainsi utiles pour valider les sorties des modèles utilisés.

2.2. Entrées d'EVASPA

Les images Landsat 7 et 8 ont été utilisées pour leur haute résolution (30m). Sur l'ensemble de l'année 2021, ce sont 11 dates qui ont une couverture nuageuse inférieure à 20% et qui se trouvent sur la période d'acquisition LIAISE qui ont été retenues. Parmi les bandes Landsat, nous avons utilisé la bande thermique d'où est estimée la température de surface (LST, Bande TIR) et les bandes optiques utilisées pour calculer les paramètres que sont l'albédo (formule de Liang, 2001), le NDVI (formule de Huete & Liu, 1994) et l'émissivité (formule de Mira et al., 2016). A cela, il faut ajouter les données de réanalyse du centre Européen (ECMWF) ERA5-Land utilisées pour l'estimation du rayonnement global et du rayonnement atmosphérique.

2.3. Entrées de ModSpa

Différentes sources de données ont été utilisées pour définir les paramètres d'entrée de ModSpa. L'indice de végétation NDVI est dérivé d'images satellites Sentinel-2 sélectionnés pour sa haute résolution (10m). La carte d'occupation du sol a été construite en croisant plusieurs données de différentes sources : le CORINE Land Cover (européen), le SIGPAC espagnol, qui délimite nettement les parcelles agricoles, ainsi qu'une analyse de l'évolution du NDVI pour affiner la classification des cultures. Ces mêmes données ont permis de construire un masque d'irrigation (en fonction du type de culture et des chroniques de NDVI). Les cartes de capacité au champ et de point de flétrissement encadrant l'eau disponible pour les plantes ont été déterminées à partir des données SoilGrids. Enfin, les précipitations et l'ETR de référence ET_0 sont issues de ERA5-Land.

2.4. Données de validation

La campagne LIAISE visait à caractériser les flux turbulents de surface dans un contexte de paysage contrasté avec des zones irriguées et non irriguées en climat Méditerranéennes, pour cela plusieurs stations micro-météorologiques mesurant à haute fréquence ont été réparties sur la zone d'étude. Nous avons profité des données pour en extraire le flux d'ETR (ou de chaleur latente [LE]) au temps des passages Landsat ainsi que les données du bilan énergétique (rayonnement net [Rn], flux de chaleur au sol [G] et le flux de chaleur sensible [H]). Ces données ont été utilisées pour comparer les estimations obtenues par EVASPA de la fraction évaporative (EF) et de l'ETR instantanée puis journalière.

3. Méthodologie

3.1. Principe général d'EVASPA

L'outil EVASPA a été créé dans le but de cartographier l'évapotranspiration à partir de données de télédétection. Le principe général repose sur la détermination de EF en calculant la distance entre la valeur de température d'un pixel donné et les températures extrêmes chaudes et froides de l'image. Cet outil a été développé en collaboration entre l'INRAe et le CESBIO, par Gallego-Elvira et al. (2013) ainsi que par Oliosio et al. (2014). Le programme EVASPA utilise différentes méthodes ensemblistes d'estimations de l'ETR, parmi lesquelles les plus couramment utilisées sont S-SEBI et l'approche des triangles. Le modèle utilisé dans le stage EVASPA E3S (EVASPA S-SEBI Sahel) est une adaptation de la méthode EVASPA, développée par Allies et al. (2020). Cette version fonctionne avec 18 méthodes de détermination de EF utilisant des procédés de

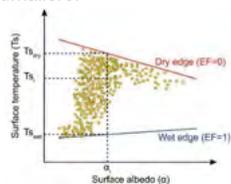


Fig 2. Localisation des bords sec et humide (Allier et al. 2020)

calcul des bords sec (EF=0) et humide (EF=1) lié aux variables employées et méthodes de calcul (certaines méthodes déterminent les deux bords, d'autres ne déterminent que le bord sec ou le bord humide).

3.2. Principe général de ModSpa

L'outil ModSpa, développé au CESBIO, qui fonctionne selon l'approche FAO-56 (Allen 2000, Simonneau et al. 2009) est basé sur le calcul d'une évaporation journalière de référence (ET₀), représentative de l'ETR d'un gazon normé, pondérée par un coefficient cultural de transpiration (K_{cb}), un coefficient de stress hydrique (K_s) et un coefficient d'évaporation (K_e) déterminé par l'occupation des sols et piloté par l'indice de végétation NDVI (traduisant l'activité photosynthétique) obtenu par imagerie optique. La particularité de ModSpa est l'intégration d'une irrigation simulée par des règles de décision en complément de la pluie permettant de faire correspondre les réactions des agriculteurs aux besoins en eau des plantes. Le modèle simule également un bilan d'eau sur 3 compartiments de sol.

$$ETR = (K_{cb} * K_s + K_e) * ET_0$$

K_{cb}: coefficient cultural déterminant la transpiration de sol couvert par la végétation,
 K_s: coefficient de stress hydrique,
 K_e: coefficient déterminant l'évaporation de la fraction de sol nu,
 ET₀: évapotranspiration de référence.

4. Résultats

4.1. Analyse de sensibilité d'EVASPA

■ Détermination des intervalles de données

Une étude a été menée sur l'influence du choix des intervalles pour la détermination des points sélectionnés pour identifier les droites sèches et humides, elles-mêmes déterminant le calcul de EF. En effet, ces intervalles ont été déterminés sur la base de données basses résolution, alors que nous appliquons les algorithmes sur des données haute résolution (30m) constituées de 1000 fois plus de pixels à emprise égale. Il est ressorti d'une courte analyse, qu'en augmentant le nombre de points utilisés pour déterminer les bords sec et humide du nuage, la position des droites n'était pas influencée significativement. Ainsi, le nombre d'intervalles utilisés par défaut dans chacune des méthodes de détermination de EF.

■ Détermination des quantiles

De la même façon, une étude a été menée sur l'influence du choix des quantiles dans la détermination de EF. Pour chacune des méthodes de détermination, différents quantiles ont été appliqués afin de diminuer le nombre de pixels utilisés pour le calcul des bords. Il en est ressorti que suivant le quantile choisi, le nombre de pixels utilisés pour la détermination des bords réduisait entraînant ainsi un déplacement de ces bords vers l'extérieur du nuage de points induisant une variation de l'estimation de EF des pixels proche des extrêmes. Cette étude a pour but d'affiner le choix des quantiles utilisés dans la version définitive d'EVASPA. En effet, d'autres études sont menées en parallèle sur l'outil EVASPA dans d'autres régions (Sahel et sud de la France) par HSM et l'INRAe, elles seront par la suite mises en commun. Finalement, un choix de quantiles, lié à la méthode de calcul (différente en fonction des modèles) de EF a été arrêté, optimisant le positionnement des deux bords en prenant un nombre minimum de points.

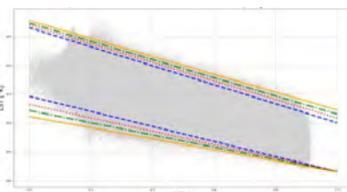


Fig 3. Représentation des bords sec et humide pour le modèle EF_01 en fonction des différents quantiles

Modèles EF	Paramétrage initial	Paramétrage final
1, 8, 12	0,05	0,001
9, 13	5	5
4, 10, 16	0,05	0,013
17, 18, 19, 20, 21, 22	0,05	0,001

Fig 4 : Paramétrages initiaux et définitifs

4.2. Validation EVASPA avec les données d'observation LIAISE

■ Fraction évaporative (EF)

La fraction évaporative est la proportion d'énergie disponible pour l'évapotranspiration à la surface terrestre. Elle est estimée dans notre cas par la détermination des bords secs et humides du nuage de point dans un espace défini par la LST vs NDVI de chaque pixel de l'image satellite.

Une comparaison des valeurs de EF entre les sorties EVASPA et les stations LIAISE est un premier point de contrôle permettant de vérifier la cohérence des résultats et de visualiser les variations entre les deux sources de données. Pour chaque date et chaque modèle de EF utilisé, un graphique est créé. Avec les droites des différentes valeurs de EF (de 0 à 1) et les stations d'observation LIAISE. De plus, combinés aux statistiques, ils permettent d'approfondir le contrôle des méthodes les plus optimales utilisées dans EVASPA pour aider à la validation du modèle.

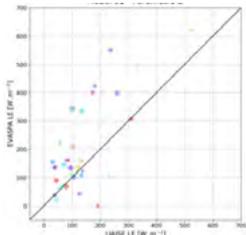


Fig 6. Comparaison des valeurs de LE_01

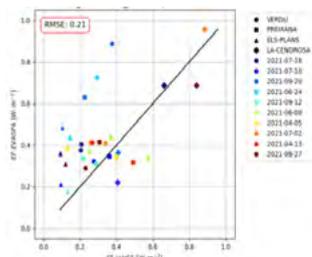


Fig 5. Comparaison des valeurs de EF_01

Évapotranspiration instantanée (LE)

L'évapotranspiration instantanée ou flux de chaleur latent (LE) est la valeur de l'ETR à la date d'acquisition. Comme pour EF il est possible de comparer les sorties issues du traitement des images satellites avec les observations terrain. Ces comparaisons, graphiques et statistiques permettent de contrôler, après intégration du R_n et du G dans le calcul, la cohérence des données. Une estimation de l'évapotranspiration un instant donné est ainsi extraite permettant d'analyser la cohérence des sorties.

4.3. Comparaison avec ModSpa

La comparaison des estimations d'ETR simulées par EVASPA et ModSpa se fait sur les valeurs journalières dans la mesure où ModSpa fonctionne à ce pas de temps. Il est donc indispensable de convertir les valeurs instantanées d'ETR estimées par EVASPA au passage du satellite à des valeurs journalières. Pour cela, il est fait l'hypothèse que le rapport de proportion entre l'évaporation journalière et instantanée est le même que celui du rayonnement global. Ce qui se traduit par la formule suivante :

$$ET_d = \frac{ET_i \cdot Rg_d}{Rg_i}$$

ET_d : l'ETR journalière,
 ET_i : l'ETR instantanée (LE précédemment),
 Rg_d : rayonnement global sur la journée,
 Rg_i : rayonnement global à l'heure de l'acquisition.

Par la suite, il est possible de réaliser des comparaisons d'ETR journalier entre les estimations d'EVASPA et de ModSpa.

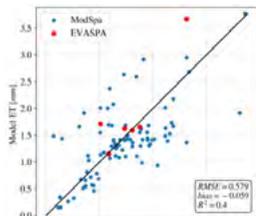


Fig 7. Comparaison des valeurs d'ETR journalier EVASPA, ModSpa et les données in situ (LIAISE)

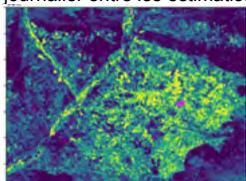


Fig 8. Carte d'ETR journalier EVASPA

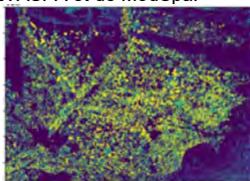


Fig 9. Carte d'ETR journalier ModSpa

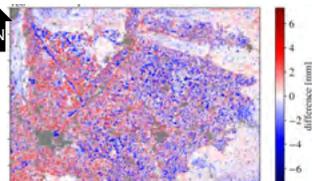


Fig 10. Carte de comparaisons d'ETR journalier entre ModSpa - EVASPA

5. Conclusion et perspectives

Cette étude a pour objet d'analyser les estimations de l'évapotranspiration instantanée et journalière à haute résolution en comparant les résultats issues de l'outil EVASPA à des données terrain ainsi qu'à un autre modèle de calcul ModSpa. Ce projet s'inscrit dans la mise en place de la chaîne de traitement des données pour l'obtention d'un produit final d'ETR pour la mission TRISHNA.



Apport de données LiDAR aéroporté pour la cartographie de la contamination du sol sur un site réhabilité

PFE présenté par : **Arthur Keller**
Société d'accueil : **ONERA Toulouse**
Directrice de PFE : **Sophie Fabre**
Correctrice : **Tania Landes**
Encadrante : **Sophie Fabre**



I. Introduction

Depuis la fin du 19^{ème} siècle, l'activité humaine, en particulier les industries minières, métallurgiques et chimiques, a entraîné le relâchement de grandes quantités d'éléments toxiques (comme le plomb, le mercure ou l'arsenic) dans l'environnement. Ces éléments toxiques nuisent au développement de la biodiversité et représentent un danger pour les populations humaines. Le département DOTA de l'ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales) travaille sur la détection et la caractérisation de la contamination des sols via des données de télédétection optique multimodale et multi-échelle (in-situ, drone, avion, satellite). Le projet de fin d'études a pour objectif de cartographier la contamination des sols d'un ancien site de traitement de minerais en combinant des images hyperspectrales haute résolution et des données LiDAR3D.

II. Etat de l'art

1) Application de l'imagerie hyperspectrale pour la détection de la contamination des sols aux éléments traces métalliques (ETM)

L'imagerie hyperspectrale est une technique de télédétection optique passive qui utilise la lumière solaire pour acquérir des mesures spectrales détaillées, offrant ainsi des profils spectraux continus pour chaque pixel de l'image. Cette technologie se distingue de l'imagerie multispectrale par son plus grand nombre de bandes spectrales et sa résolution plus étroite. À l'ONERA, la caméra AISA Fenix est utilisée pour capturer ces images en mode push-broom, suivies de corrections radiométriques, géométriques et atmosphériques pour garantir la fiabilité des données. Les signatures spectrales obtenues sont utilisées pour estimer les propriétés bio-physico-chimiques des surfaces observées, telles que l'humidité, les concentrations pigmentaires et les niveaux de contamination en ETM [1] [2] [3]. La contamination par les ETMs affecte la végétation en réduisant la biomasse et les concentrations en chlorophylles, ce qui modifie les signatures spectrales des feuilles, notamment par une augmentation de la réflectance dans le rouge, phénomène connu sous le nom de "blue shift". Classifier les espèces végétales est essentiel dans ce contexte car chaque espèce a une sensibilité spécifique aux ETMs, et les techniques d'apprentissage automatique appliquées aux données hyperspectrales ont montré une haute précision dans la classification des niveaux de contamination.

2) Métriques LiDAR des végétaux en milieu contaminé

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technique de télédétection active qui mesure les distances en utilisant un faisceau lumineux, permettant ainsi de créer un nuage de points en 3D représentant la structure de la canopée et du sol. Les systèmes LiDAR peuvent être terrestres ou aéroportés, avec des applications variées en cartographie détaillée de la végétation et du terrain. Les métriques LiDAR permettent d'évaluer la structure de la végétation en termes de hauteur, surface et volume, par exemple, les modèles numériques de canopée (MNC) utilisés pour calculer des métriques comme la hauteur moyenne de la canopée et l'indice de complexité verticale (VCI). Des études ont



démonstré l'efficacité des métriques LiDAR pour évaluer la santé de la végétation [4] [5] [6] [7]. Les indicateurs de santé forestière dérivés des données LiDAR, tels que le paramètre Weibull α et l'indice de complexité verticale, permettent de quantifier la structure de la canopée, révélant les différences entre les plantes en milieu contaminé et non contaminé. Les métriques LiDAR les plus pertinentes pour analyser la santé de la végétation incluent la hauteur, la surface, la couverture et la profondeur de la canopée. La liste des métriques se trouve dans le rapport complet.

Au cours du stage, les objectifs du projet ont évolué pour qu'au final ce stage ne se concentre qu'autour de l'aspect d'apport de données LiDAR3D pour la cartographie de la contamination du sol sur un site réhabilité.

III. Méthodologie

Afin de pouvoir identifier des traits structuraux de la végétation sensibles à la contamination aux ETMs nous allons d'abord procéder à une délimitation individuelle des arbres étudiés dans un MNC ensuite nous allons calculer des métriques structurels en nous basant sur ces délimitations, puis nous allons effectuer une corrélation entre les métriques et les mesures de métaux effectués sur le terrain, enfin nous analyseront et interpréterons les traits structuraux sensibles à la contamination aux ETMs.

IV. Résultats expérimentaux

1) Zone d'étude et données

Cette étude porte sur un ancien site de traitement de minerais fermé depuis 2004 d'une superficie d'environ 120 ha se situant dans le sud de la France. Les activités menées sur ce site ont mené à une contamination du sol par de nombreux ETMs tel que Al, As, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, Mo, Pb, Zn. Certaines zones de ce site ont été partiellement phyto-stabilisé en 2006, une zone a subi une plantation de pins en 2016, et de la végétation naturelle apparaît sur d'autres zones.

Nous avons à notre disposition de nombreuses données. Tout d'abord, nous avons des données de l'IGN. En effet, nous possédons un nuage de point issue du LiDAR HD, et nous possédons également le MNT et le MNS de l'IGN. A l'aide de ces données, nous allons créer deux modèles numériques de canopée (MNC). Le premier MNC a été créé en exploitant le LiDAR HD, le nuage de point a été nettoyé et les hauteurs ont été normalisées. Le second MNC a été créé en faisant la différence entre le MNS et le MNT, puis les hauteurs ont été également normalisé. Ensuite, nous avons des données terrains sur 35 arbres présents sur le site. Nous avons des données structurelles sur ces arbres tels que leur hauteur maximale ou leur diamètre de tronc. Enfin, nous possédons des mesures de contamination en ETM du sol au pied de chaque arbre étudié en zone contaminé, mais également en zone de contrôle où les arbres se développent dans un sol non contaminé en ETM.

2) Délimitation des arbres

La première étape est de délimiter individuellement les arbres nous intéressant lors de notre étude. Pour ce faire, nous avons d'abord comparé la hauteur maximale des arbres mesurés sur le terrain à la hauteur maximale mesuré sur les deux MNC créé précédemment. Le MNC créé à l'aide du LiDAR HD est le plus semblable aux mesures terrains, nous allons donc effectuer les délimitations sur ce MNC.

Ensuite, nous avons créé une couche .shp de polygone sur QGIS où chaque polygone englobe un arbre étudié, puis nous avons délimiter chacun des arbres dans le MNC sur Cloudcompare. Chaque nuage de point d'arbre a ensuite été nettoyé sur Cloudcompare et Python afin que les seuls points restants correspondent à un arbre, comme sur la figure 1. Les hauteurs des arbres délimités ont pu être contrôlées en les comparant aux hauteurs mesurés sur le terrain.

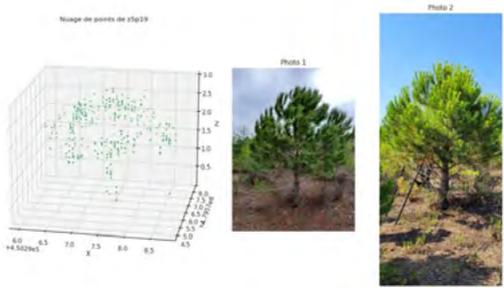


Figure 1 - Arbre délinéé

3) Calcul des métriques

Les métriques que nous utiliserons par la suite ont été calculées sur la base des nuages de point d'arbre individuel que nous avons délinéé précédemment. Les métriques en question ont été sélectionnées à la fin de l'état de l'art. Nous avons utilisé le langage de programmation R pour le calcul des métriques ainsi que le plugin LidR sur Rstudio. Le plugin LidR est très utile pour notre étude, car il est spécialisé dans l'étude forestière par LiDAR, ainsi de nombreuses métriques sélectionnées dans l'état de l'art sont déjà codé dans ce plugin sur la base d'articles scientifiques. Nous avons ensuite développé nous-même les métriques n'étant pas dans le plugin en nous basant sur les articles étudiés.

4) Corrélation entre les métriques et les mesures de métaux

Ainsi, il nous a été possible de corréler les métriques calculées précédemment aux données de contaminations des sols relevés sur le terrain. Pour effectuer cette corrélation, nous avons utilisé le coefficient de Pearson. Ainsi, nous obtenons les résultats de la figure 2 pour chacune des deux espèces de pins étudiées. Chaque case contient la valeur absolue du coefficient de Pearson entre une métrique et un élément contaminant.

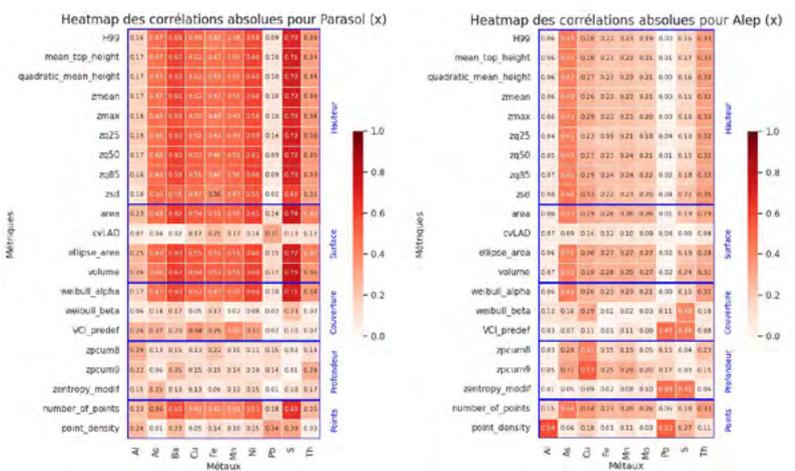


Figure 2 - Résultat de corrélations entre les métriques et les éléments contaminants pour les espèces Parosol et Alep

5) Analyse et interprétation

Tout d'abord, nous pouvons voir que les corrélations sont plus élevées pour l'espèce Parasol que pour l'espèce Alep, cela traduit ainsi le fait que les traits structuraux de l'espèce Parasol sont particulièrement influencés par la contamination du sol aux ETMs. Pour les deux espèces, les métriques sensibles à la contamination sont les métriques relatives à la hauteur des arbres, à l'aire et le volume des couronnes, à la couverture des arbres et aux points des nuages de points. Pour l'espèce Parasol, les corrélations les plus élevées ($r > 0,6$) entre les métriques et les contaminants sont celles avec le soufre, le nickel et le baryum, ensuite il y a des corrélations moyennes ($0,45 < r < 0,6$) avec l'arsenic, le cuivre, le fer et le manganèse, il y a également de faibles corrélations ($r < 0,45$) avec l'aluminium et le thorium. Pour l'espèce Alep, il y a une corrélation moyenne avec l'arsenic et des corrélations faibles avec le cuivre, le fer, le manganèse, le molybdène, le soufre et le thorium.

V. Conclusion

Lors de ce stage, en nous basant sur des études portant sur le sujet nous avons pu créer une méthode exploitant des données LiDAR3D nous permettant d'analyser les effets de la contamination des sols aux ETMs sur le développement structurel des arbres étudiés. Nous avons pu observer le fait que les traits structuraux des pins de l'espèce Parasol sont sensibles à la contamination des sols en ETMs. La prochaine étape du stage est d'analyser plus précisément les corrélations obtenues entre les métriques calculées et les éléments contaminants relevés dans le sol.

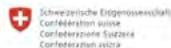
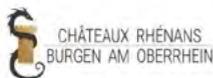
VI. Bibliographie

- [1] Béraud, L., Elger, A., Rivière, T., Berseille, O., Dèliot, P., Silvestre, J., Larue, C., Poutier, L., & Fabre, S. (2023). Impact of potentially toxic elements on pines in a former ore processing mine: Exploitation of hyperspectral response from needle and canopy scales. *Environmental Research*, 227, 115747. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115747>
- [2] Erudel, T., Fabre, S., Houet, T., Mazier, F. & Briottet, X. (2017). Criteria Comparison for Classifying Peatland Vegetation Types Using In Situ Hyperspectral Measurements. *Remote Sensing*, 9(7), 748. <https://doi.org/10.3390/rs9070748>
- [3] Gimenez, R., Lassalle, G., Elger, A., Dubucq, D., Credoz, A., & Fabre, S. (2022). Mapping Plant Species in a Former Industrial Site Using Airborne Hyperspectral and Time Series of Sentinel-2 Data Sets. *Remote Sensing*, 14(15), 3633. <https://doi.org/10.3390/rs14153633>
- [4] Meng, P., Wang, H., Qin, S., Li, X., Song, Z., Wang, Y., Yang, Y., & Gao, J. (2022) 'Health assessment of plantations based on LiDAR canopy spatial structure parameters', *International Journal of Digital Earth*, 15(1), pp. 712-729. <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2059114>
- [5] Borsah, A.A., Nazeer, M., and Wong, M.S. (2023) 'LiDAR-Based Forest Biomass Remote Sensing: A Review of Metrics Methods and Assessment Criteria for the Selection of Allometric Equations', *Forests*, 14(2095). <https://doi.org/10.3390/f14102095>
- [6] Queinnec, M., Coops, N.C., White, J.C., Griess, V.C., Schwartz, N.B., and McCartney, G. (2023) 'Mapping Dominant Boreal Tree Species Groups by Combining Area-Based and Individual Tree Crown LiDAR Metrics with Sentinel-2 Data', *Canadian Journal of Remote Sensing*, 49(1), pp. 1-16. <https://doi.org/10.1080/07038992.2022.2130742>.
- [7] Szostak, M. & Pająk, M. (2023). LiDAR Point Clouds Usage for Mapping the Vegetation Cover of the "Fryderyk" Mine Repository. *Remote Sensing*, 15(201). <https://doi.org/10.3390/rs15010201>



Modélisation 4D des châteaux du Ramstein et du Hugstein

PFE présenté par : **Théo Kiehl**
Société d'accueil : **Laboratoire ICube, INSA STRASBOURG**
Directeur de PFE : **Mathieu Koehl**
Correcteur : **Emmanuel Moisan**
Encadrant : **Mathieu Koehl**



www.chateaux-rhenans.eu

1. Contexte et objectifs du projet

Ce Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans le cadre du projet INTERREG "Châteaux Rhénans – Burgen am Oberrhein" qui a pour but de promouvoir et valoriser les châteaux forts du Rhin Supérieur. L'INSA Strasbourg est intégré à ce projet depuis 2023 et a déjà permis la mise en valeur de plusieurs châteaux au travers de différents PFE l'année passée. De plus, l'INSA est porteur de l'action 4.6 du projet, qui a pour but de valoriser les sites à travers des modèles en trois dimensions.

Cette mise en valeur passe par une restitution dite en 4 dimensions des châteaux ainsi que l'intégration des modèles finaux à des outils de communication tels que la réalité virtuelle, la réalité augmentée ou encore des vidéos de présentations, le tout accessible au grand public. Ainsi, des ruines de châteaux forts telles que l'Oedenbourg, (67 – Orschwiller), la Wasenbourg, (67 – Niederbronn-les-Bains) ou encore le Lichtenberg (67 – Lichtenberg) ont déjà pu être restituées et présentées au grand public.

A noter qu'un modèle en 4D est un modèle 3D combiné à la dimension du temps. La notion de 4D intervient ici car les châteaux ont évolué dans le temps à différentes périodes remarquables. La 4D comprend donc plusieurs modèles 3D à des époques distinctes.

L'objectif principal de cette étude est de proposer une restitution 4D du château du Ramstein (cf. Figure 1) et une restitution 4D du château du Hugstein (cf. Figure 2). Les autres objectifs sont les suivants : étudier et proposer une complémentation et une automatisation du processus de modélisation 4D déjà en place, proposer une structuration des données dans les différentes versions des modèles et intégrer les modèles à des moyens de communication grand public (vidéo, réalité virtuelle ...).



Fig. 1 : château du Ramstein



Fig. 2 : château du Hugstein



2. Acquisitions et traitements des données

Dans un premier temps, une campagne d'acquisition des données sur le terrain est nécessaire. En effet, pour pouvoir restituer les états passés d'un monument, il faut pouvoir en premier lieu fixer son état actuel. De ce fait, c'est une acquisition dite hybride ou multi-capteurs qui a été réalisée sur site, à savoir :

- Une campagne de lasergrammétrie terrestre, qui permet de mesurer et de fixer les ruines actuelles (bâtiments, murs d'enceinte, environnement ...).
- Une campagne de photogrammétrie terrestre, permettant l'acquisition de la texture des bâtiments en ruine.
- Une campagne de photogrammétrie aérienne, qui offre des vues sur des zones non visibles depuis le sol.
- Une campagne topographique mêlant tachéométrie et GNSS, qui permet le géoréférencement du projet dans le système de coordonnées légal, le RGF93 CC 9 zones.

Toutes ces méthodes d'acquisitions sont complémentaires et permettent une collecte de données riche et variée, qui est essentielle pour une modélisation efficace.

Une fois les données acquises, il faut les traiter avant de pouvoir pleinement les exploiter et débiter la création des modèles. Effectivement, les données brutes comme des fichiers et nuages de points non traités ne permettent pas une manipulation efficace et ont un volume de stockage trop important pour les manipuler. Les étapes générales de traitement sont données en Figure 3.



Fig. 3 : chaîne de traitement générale des données après acquisition

La première étape de ce traitement est de consolider les nuages de points. Pour ce faire, des sphères sont mises en place sur le terrain et servent de repères afin de consolider les nuages entre eux. Il est nécessaire qu'à minima trois sphères soient communément visibles depuis deux stations successives.

Vient ensuite l'étape de géoréférencement, et donc par la même occasion, ces sphères sont mesurées au tachéomètre et utilisées pour géoréférencer les nuages de points. Celles-ci étant connues en coordonnées, il est possible de calculer les coordonnées de tout le projet.

Puis, l'étape de segmentation est essentielle car elle permet de nettoyer le nuage de points. Des outils de segmentation automatique, comme l'extraction du sol, sont utilisés pour débiter grossièrement le nuage, puis la segmentation fine est réalisée manuellement. Celle-ci contribue à pouvoir classifier le nuage et éliminer les points aberrants.

Les techniques de lasergrammétrie et de photogrammétrie sont des techniques non sélectives, la segmentation permet donc de conserver les zones d'intérêt au sein des nuages de points, comme illustré en Figure 4 et en Figure 5.



Fig. 4 : nuage de points brut



Fig. 5 : nuage de points après traitement

Enfin vient l'étape de classification, qui participe à la bonne gestion du projet. Plusieurs classes sont définies préalablement et tous les points y sont classés. Ensuite, celles-ci peuvent être rééchantillonnées selon leurs besoins de manière à réduire la taille des fichiers. Par exemple, la classe sol ne nécessite pas une densité de points aussi élevée que la classe bâtiment.

3. Modélisation 4D d'un château

La modélisation 4D est définie comme plusieurs modèles 3D à différentes époques. Cette étape implique donc la création d'un modèle géométrique, basée sur des mesures réalisées sur le terrain. A noter que la modélisation des châteaux du Ramstein et du Hugstein se fait sur le logiciel Blender.

Tout comme l'acquisition, la modélisation peut également être hybride, ce qui est le cas dans ce projet. Une modélisation hybride est donc la combinaison de différentes méthodologies pour obtenir un modèle 3D. Les méthodes principales sont le maillage triangulaire (cf. Figure 6) et les primitives géométriques (cf. Figure 7).

La base du modèle est constituée du maillage triangulaire obtenu à l'aide du nuage de points, ce qui permet d'obtenir des détails comme les roches. Ensuite, à partir de ce maillage, les bâtiments sont modélisés par primitives géométriques. Pour ce faire, le logiciel Blender permet de modéliser et modifier des objets selon trois éléments qui sont des sommets, des arêtes et des faces.

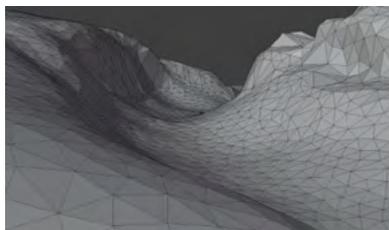


Fig. 6 : maillage triangulaire



Fig. 7 : primitives géométriques

D'autres paramètres entrent en jeu dans ce processus, tels que la topologie, la géométrie ou encore la texture, mais surtout la cohérence historique de la restitution. En effet, l'objectif est de produire un modèle historiquement et architecturalement correct au regard de l'expertise de l'archéologue en charge du projet.

Le modèle doit avoir une topologie correcte pour être exploitable. La topologie étant l'organisation et la cohérence des propriétés géométriques d'un objet, il est essentiel que cet objet soit correctement organisé pour que toutes manipulations, modifications ou transferts de l'objet soient possibles.

Enfin, la cohérence historique passe par des échanges avec l'archéologue missionné pour le projet. Des dessins anciens, photographies anciennes, plans, tout ce qui est exploitable en lien avec le château est discuté et analysé avec l'archéologue qui nous fournit ses hypothèses de restitution.

C'est dans cette optique de qualification des résultats de modélisation qu'une évaluation du niveau d'incertitude est réalisée sur tous les modèles. Celle-ci se fait au travers d'une échelle colorimétrique qui varie en fonction du niveau de connaissance que l'on possède sur un élément restitué.

4. Mise en valeur d'un modèle numérique

L'objectif principal de ce projet est de promouvoir et mettre en valeur les restitutions. Il existe de nombreux moyens de communication et de valorisation d'un modèle 3D.

Cependant, pour mettre en valeur un modèle numérique, la première étape obligatoire est le texturage. En effet, c'est l'étape permettant d'apporter du réalisme et des détails au modèle. Celui-ci consiste en l'ajout de caractéristiques visuelles au modèle, telles que des couleurs et des détails comme la rugosité, le relief ou encore la réflectance, afin d'obtenir un aspect réaliste de l'objet modélisé.

Pour texturer les objets, Blender propose des textures dites procédurales, qui sont créées par l'utilisateur. Cette méthode procédurale permet notamment d'avoir le contrôle permanent sur le rendu de la texture. Il est possible de modifier en tout temps tous les paramètres de cette dernière (couleur, motif, rugosité etc.). De plus, la répartition des éléments est aléatoire, ce qui permet d'éviter leur répétition.

En outre, le logiciel permet d'éditer des images en mode rendu, c'est-à-dire avec un choix d'éclairage, de matériaux, végétation etc. Ces images de rendu permettent de valoriser le travail effectué en donnant un aspect réel au modèle 3D, des aperçus sont donnés en Figure 8 et en Figure 9 sur le château du Ramstein.

Autrement, pour communiquer avec le grand public, le rendu vidéo est la solution la plus accessible pour tous. Ainsi, la création d'une vidéo où l'on peut apercevoir le château dans ses différentes phases est essentielle.



Fig. 8 : aperçu du mode rendu au sud du château



Fig. 9 : aperçu du mode rendu au nord du château

Néanmoins, la réalité virtuelle se développe rapidement au sein du projet. C'est pourquoi l'intégration des modèles dans un système de réalité virtuelle est également un des objectifs de ce projet. A ce jour, le casque de réalité virtuelle est le moyen le plus efficace car il est transportable et facile d'utilisation.

Toutes ces méthodes et moyens de communication sont parties intégrantes du projet et permettent de valoriser les châteaux et de promouvoir le patrimoine historique et culturel.

5. Conclusion et perspectives

Ce Projet de Fin d'Etudes permet de mettre en commun un vaste panel de compétences topographiques, allant de l'acquisition des données au rendu 4D des modèles. La continuité et la concrétisation des objectifs rend ce projet très attrayant. De plus, la prise en compte de l'aspect historique et culturel ainsi que de la conservation du patrimoine Alsacien est enrichissant.

Finalement, ce projet permet l'utilisation et la complémentation d'une chaîne de traitement évoluant d'années en années. Les tests réalisés et les résultats obtenus vont servir aux prochains projets similaires en leur faisant gagner du temps et être davantage efficaces dans la création de leur maquette.

Pour voir plus loin, les perspectives d'évolution sont nombreuses. Cependant, l'automatisation du processus de modélisation est la principale. Blender permet la création d'objets paramétrés, qui sont modifiables en tout temps, ce qui est un gain de temps considérable lors des discussions et des modifications avec les archéologues par exemple.

De plus, le passage de la 2D à la 3D tend à s'automatiser, l'idée étant de pouvoir obtenir un modèle 3D paramétrable en intégrant en entrée un plan 2D numérisé.

Création des maquettes numériques des châteaux allemands du Landeck, Madenburg et Trifels dans leur état actuel et constitution des supports numériques pour la réalisation de maquettes tactiles

PFE présenté par : **Mamady KOUROUMA**

Société d'accueil : **Laboratoire ICube, Equipe TRIO, INSA Strasbourg PAGE**

Directeur de PFE : **Mathieu Koehl**

Correcteur : **Emmanuel ALBY**

Encadrant : **Mathieu Koehl**

INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES STRASBOURG



Interreg



Rhin Supérieur | Oberrhein

CHÂTEAUX RHÉNANS
BURGEN AM OBERRHEIN



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

1. Introduction générale : Définition des objectifs et mise en contexte historique du château

La modélisation 3D joue un rôle essentiel dans un monde en perpétuelle évolution technologique, devenant un élément transversal et attractif pour différents domaines scientifiques, tels que la topographie, l'archéologie et tant d'autres. La préservation et la valorisation des patrimoines culturels et historiques sont au centre de cette révolution, des enjeux essentiels pour la communauté européenne, exprimés par des programmes comme INTERREG. L'objectif de ces programmes transfrontaliers est de favoriser la création de solutions communes entre les régions européennes. Leur point de convergence concerne la valorisation des patrimoines historiques, notamment des châteaux rhénans français, allemands et Suisses.

Dans cette situation, les avancées technologiques présentent des opportunités attrayantes pour étudier, conserver et partager ces monuments historiques de manière immersive et accessible. Le projet de fin d'étude actuel vise à réaliser dans un premier temps les maquettes 3D des châteaux allemands de Landeck, Trifels et Madenburg dans leur état actuel.

Dans un second temps, il s'agit de rendre les différentes maquettes tactiles pour les malvoyants et aveugles en inscrivant sur la maquette, des écritures en braille, reconnues en 2005 par l'Unesco comme un langage vital de communication aussi légitime que toutes les autres langues des aveugles ou malvoyants.

Nous avons été accueillis au laboratoire ICUBE-TRIO, dans le cadre du projet Interreg Châteaux rhénans au sein de l'INSA Strasbourg, afin de mener à bien ce projet.

Le château de Landeck domine l'ancienne abbaye de Klingenmunster, un établissement très ancien dont la protection avait suscité la reconstruction du château vers 1200.

Le château Trifels au haut moyen-âge, le château de Trifels protégeait les terres d'Empire s'étendant autour d'Annweiler.

Le château Madenburg est l'un des plus grands châteaux du Palatinat. Il a été construit au XI^{ème} siècle.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 : (a) Château Landeck ; (b) Château Trifels ; (c) Château Madenburg / <https://madenburg-pfalz.de/historie/>

Concernant ce projet de fin d'études, l'objectif de ce PFE est de produire des maquettes 3D pouvant être imprimées pour les rendre tactiles pour les personnes présentant des déficiences visuelles. Donc, ce rapport examinera des problématiques suivantes :



- Les diverses étapes de la modélisation 3D de ces châteaux,
- Comment rendre ces maquettes tactiles pour les malvoyants en particulier et du public en général (touristes, archéologues et étudiants).

Ce résumé présentera les différentes étapes de la modélisation 3D, de la phase d'acquisition jusqu'à l'obtention de la maquette tactile, ainsi que de l'impression 3D.

2. Acquisition des données terrain :

Les différentes acquisitions des données images par drone ont été effectuées par l'entreprise allemande aeroDCS qui a suivi des plans de vol spécialement élaborés pour ce type d'acquisition et fournis par l'INSA. Le type de drone utilisé est le drone DJI Matrice série 300 RTK.

Suite aux acquisitions et traitements des données drones, nous avons détectés des données manquantes dans le nuage de points. L'objectif était donc de retourner sur le terrain et de scanner ces zones manquantes. Pour ce faire, nous avons utilisé un scanner laser Faro Focus Premium, une station totale M3 et le GNSS PYX. Cette opération a concerné deux des châteaux, Landeck et Madenburg.

Sur le site de Landeck environ vingt scans ont été effectués principalement dans les zones présentant des ouvertures et des données manquantes.

Les nuages de points ont été géoréférencés en utilisant des méthodes topographiques classiques, des cibles et des sphères.

Pour le château de Madenburg, nous avons réalisé plus d'une vingtaine de scans, principalement dans les zones où se trouvaient les ouvertures des bâtiments (entrées, fenêtres, etc.). Des scans à haute résolution ont également été effectués partout où des blasons étaient visibles, dans le but de les afficher de manière plus détaillée dans le maillage final. Pour ce château, nous avons exclusivement utilisé le GNSS PYX pour relever les coordonnées des sphères, ce qui facilitera la consolidation et le géoréférencement des différents nuages de points.

Pour le château Trifels, nous nous sommes limités aux images drone qui suffisaient largement, donc il n'y avait pas besoin de lasergrammétrie terrestre.

Après ces différentes acquisitions, la phase suivante consistait à traiter les données brutes obtenues par lasergrammétrie terrestre afin d'obtenir des données exploitables et nécessaires pour les phases suivantes du projet (cf.figure.2). Dans un premier temps, nous avons généré des nuages de points, puis les avons consolidés et géoréférencés. Par la suite, nous les avons segmentés puis classifiés afin de rééchantillonner les différentes parties en fonction des niveaux de détails attendus.

Ces nuages de points lasergrammétriques ont été complétés par un nuage de points photogrammétrique issu de la campagne drone dans le but de représenter les parties sommitales des murs des châteaux.



Fig. 2 : Nuage de points du château Trifels

3. Modélisation 3D des trois châteaux :

Définition : En se basant sur la définition de modélisation donnée par Franck Varenne (2016) il fait la distinction entre la modélisation et un modèle. Pour lui la modélisation ne désigne pas un modèle mais désigne toute la procédure ou toute la pratique individuelle ou collective au cours de laquelle on

recourt à un ou le plus souvent à plusieurs modèles, cela de manière systématique et éventuellement itérative, en s'orientant selon une certaine perspective et selon certains objectifs d'enquête bien définis au départ. Franck Varenne (2016).

Dans cette étape, nous aborderons les différentes étapes qui nous ont conduits à obtenir un modèle 3D de l'état actuel des châteaux. Ce processus a été réalisé à l'aide du logiciel Metashape. Tout d'abord, nous procéderons à la classification des points au sol pour les extraire et générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Par la suite, nous réaliserons un maillage sur la base du nuage de points obtenu dans l'étape précédente. Une fois ce maillage obtenu nous veillerons à bien le nettoyer afin d'obtenir un maillage prêt pour l'impression et pour la texture. Le logiciel utilisé pour ce travail est 3DReshaper, et les différentes corrections apportées au maillage sont entre autres :

La suppression des artefacts et du bruit en filtrant les points bruyants ou isolés à l'aide du filtre de vérification de 3DReshaper, le lissage Laplacien pour réduire les irrégularités des surfaces, le comblement des trous, l'optimisation du nombre de triangles en fonction de la résolution du modèle final, et la correction de la topologie. Tous ces éléments sont essentiels pour préparer correctement le modèle 3D en vue de son impression, car une impression 3D réussie exige une préparation minutieuse en vérifiant à chaque fois la topologie et des corrections adéquates citées ci-dessus.

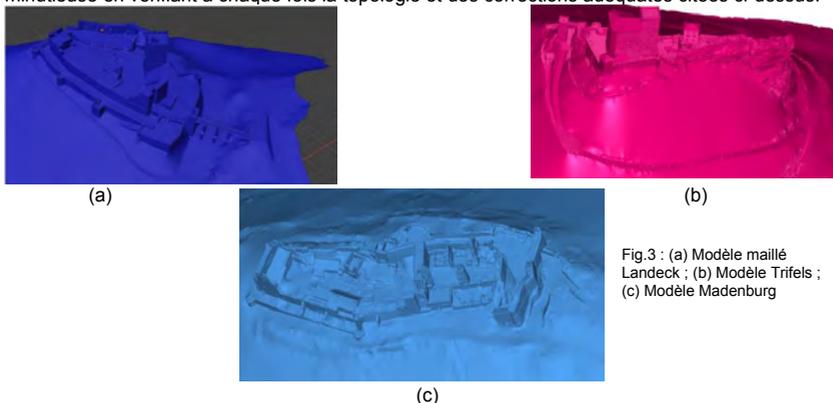


Fig.3 : (a) Modèle maillé Landeck ; (b) Modèle Trifels ; (c) Modèle Madenburg

4. Modélisation 3D sur Blender :

Lors du processus de maillage sur Metashape, nous avons remarqué que certains éléments tels que les escaliers, les ponts et les rampardes des balcons étaient mal modélisés. Pour remédier à cela, nous les avons segmentés lors du nettoyage du nuage de points afin de les modéliser séparément sur Blender. Ainsi, nous avons réalisé une modélisation hybride en combinant le maillage pour une partie et l'utilisation de primitives géométriques pour une autre partie. Cette approche a été appliquée à l'ensemble des trois châteaux. L'illustration de la figure 4 ci-dessous présente des exemples de cette modélisation, notamment le pont et les escaliers pour le château de Landeck.

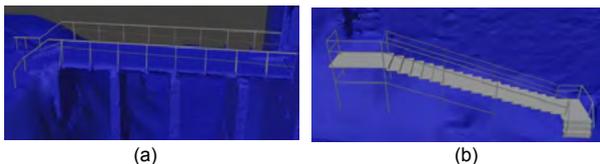


Fig.4 : (a) modélisation par primitive géométrique du pont du château Landeck ; (b) modélisation par primitive géométrique des escaliers du château Landeck sur Blender

5. L'ajout du braille pour le côté tactile :

La partie ultime de ce PFE consistera à produire une maquette tactile incluant des écritures en braille, système inventé par le Français Louis Braille. Cette innovation révolutionnaire a permis aux aveugles d'accéder à la culture écrite, marquant ainsi une avancée majeure dans leur qualité de vie. En

général, le mot braille est synonyme d'aveugle. Le principe du braille est d'utiliser le sens du toucher pour l'écriture et la lecture au moyen de points en relief.

En 1950, l'UNESCO a effectivement universalisé l'alphabet braille et, en 2005, elle a reconnu le système braille comme un langage vital de communication, aussi légitime que toutes les autres langues du monde.(Javier Jiménez MD,2009).

Les différents textes à inscrire sur la maquette seront définis dans les prochains jours par nos collègues allemands et seront ajoutés sur la maquette sous forme d'un second jeu de données.



Traduction en français : Château Landeck

Fig.5 : Exemple de l'écriture en braille à ajouter sur la maquette finale

6. Impression 3D des Châteaux :

Quelles sont les raisons de recourir à l'impression 3D pour des modèles architecturaux ?

De nos jours, les maquettes 3D physiques deviennent de plus en plus attrayantes non seulement pour l'architecture, mais également pour plusieurs autres disciplines d'ingénierie ou de conception, permettant de matérialiser leurs conceptions graphiques de manière réaliste. Cette impression 3D permet également de passer du monde numérique vers le monde physique, offrant à tous les modélistes la possibilité de produire des modèles réels à partir de dessins numériques. Nous avons terminé les différentes modélisations de l'état actuel des trois châteaux et nous avons imprimé les différentes maquettes en résine afin de voir et d'analyser de près les différents manquements constatés. Sachant que l'impression finale en bronze sera plus grande.



(a)



(b)

Fig.6 : (a) Impression 3D en résine des trois châteaux pour d'éventuelles analyses ; (b) peinture des maquettes 3D

7. Conclusion et perspectives

En conclusion, ce projet de fin d'études sur la création des maquettes tactiles pour les personnes présentant des déficiences visuelles a été une expérience captivante et instructive. Depuis les étapes initiales de l'acquisition des données terrestres par campagne drone ou par lasergrammétrie terrestre jusqu'à la mise en œuvre des modèles 3D, nous avons exploré des multiples facettes de la modélisation 3D. Les défis, tels que les traitements de nuages constitués de plusieurs dizaines de millions de points, la création de modèles maillés des trois châteaux ont été relevés avec succès grâce à l'utilisation de différents logiciels, notamment Metashape, 3DReshaper, Trimble Real Work(pour la modélisation des blasons), cloud compare et blender.

L'inscription des écritures en braille sur les maquette 3D pour le côté tactile des malvoyants et aveugles sont en cours de réalisation. Tous ces éléments vont permettre d'avoir des modèles 3D prêt pour l'impression.

Nous suggérons comme perspective la mise en place de modèles 4D de ces différents châteaux en se basant sur des modèles 3D existants afin d'appréhender de façon exhaustive l'état historique de ces derniers pour permettre d'éventuelles comparaisons entre les deux époques.

8. Bibliographie :

Franck Varenne.(2016). Histoire de la modélisation : quelques jalons. CNRS; Académie des Technologies, version 1. Disponible sur : <https://hal.science/hal-02495473>. Consulté le 14/02/2024.

Javier, J. MD et al. (2009). Biography of Louis Braille and Invention of the Braille Alphabet, Volume 54,pages 142-149. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.survophthal.2008.10.006> [Accédé : 14/02/2024]

Patrick baudrand guide officiel (1999). Le temps du voyage dans le temps - à la découverte des plus beaux châteaux, jardins, monastères et constructions romaines d'Allemagne. Disponible sur : <https://fr.shopping.rakuten.com/offer/buy/82706496/baudrand-patrick-le-temps-du-voyage-dans-le-temps-a-la-decouverte-des-plus-beaux-chateaux-jardins-monasteres-et-constructions-romaines-d-allemanne-lyvre.html>.

Madenburg(2023).histoire. Disponible sur le site : <https://madenburg-pfalz.de/historie/>. Consulté le 30/06/2024.

Valorisation de modèles 3D et restitution 3D photogrammétrique de fouilles archéologiques dans la bande de Gaza

PFE présenté par : **Clara STUDER**
Société d'accueil : **Première Urgence Internationale**
ICube – Equipe TRIO
Directeur de PFE : **René ELTER**
Correcteur : **Pierre GRUSSENMEYER**
Encadrant : **Emmanuel ALBY**



1. Contexte et objectifs de l'étude

L'archéologie est un domaine apportant des connaissances approfondies sur les moyens que possédaient les différentes populations à travers le temps. La photogrammétrie peut permettre la restitution, la rénovation, ou encore la documentation de sites et d'artefacts archéologiques. Les programmes archéologiques gérés par René Elter ont pour vocation la préservation du patrimoine. Ils sont la mémoire des sites. Ce qui est d'autant plus important au vu du contexte géopolitique instable de la bande de Gaza. La conservation de ces différents sites est donc un enjeu majeur pour l'archéologie. De plus, envoyer une équipe de topographes et photogrammètres étrangère confirmés ainsi que leur matériel n'est pas envisageable. Les données ont donc été acquises par une équipe locale, formée à distance par l'INSA. Au travers de ce projet, le monastère de Saint-Hilarion, situé à Tell Umm el-'Amr, est mis en valeur à l'aide d'une vidéo générée sur la base de modèles 3D réalisés au sein du Projet de Fin d'Etudes de Toma Dellarovere.



Fig. 1 : Situation géographique de la bande de Gaza



Fig. 2 : Modèle 3D de référence du monastère de Saint-Hilarion (PFE de Toma Dellarovere)

De plus, lors de ce projet, seront traitées les données disponibles du cimetière romain situé à Ard Moarbin, afin de fournir un plan de restitution des fouilles. Ce site est la plus grande nécropole fouillée découverte dans la bande de Gaza. Il est daté de la période romaine ; comprise entre le 1er siècle avant Jésus-Christ et le 2ème siècle après Jésus-Christ. Ce cimetière est une source importante d'informations sur cette période dans la bande de Gaza, que ce soit en termes de richesse matérielle ou sanitaire. Ce site est composé de 151 tombes dont 138 ont pu être fouillées à ce jour. Ces recherches offrent des renseignements sur les pathologies existantes ainsi que les conditions médicales dans lesquelles se trouvaient la population.

Les divers objectifs associés à ce projet sont :

- Mettre en avant le monastère de Saint-Hilarion, en le valorisant à l'aide d'une vidéo se basant sur les modèles 3D du monastère.

- Fournir des orthophotos de référence pour chaque état du cimetière romain, en appuyant sur l'automatisation des calculs et des orthophotos résultantes de chaque état de chaque tombe.

2. Gestion des données

Dans le cadre de la réalisation de la vidéo du monastère de Saint-Hilarion, le choix du logiciel se portera sur Blender, qui est un logiciel open source et relativement simple d'utilisation. La contrainte fondamentale de ce projet est également l'utilisation de l'outil réalisé par Toma Dellarovere, qui est un modèle 3D de taille conséquente. L'enjeu principal est la gestion de données aussi volumineuses.

De même que pour le monastère, un des enjeux fondamentaux lors de l'étude du cimetière, est la gestion d'un grand nombre de données.

Le cimetière romain a été divisé en trois secteurs déterminés suivant la priorité des zones à fouiller et relever par drone. Pour chaque tombe, les états ont été désignés de la manière suivante :

- V0 : état original
- V1 : état nettoyé montrant la structure de la tombe
- V2 : La tombe sans le couvercle
- V3 : le squelette.

Les données ont été acquises à l'aide d'un drone de la marque DJI ainsi que d'une caméra terrestre. Le format d'image utilisé lors de ce projet est le JPG. Les données du cimetière représentant environ 180 000 images, équivalent à deux téraoctets, une des principales contraintes et problématiques de ce projet est la gestion de ces informations. Afin de mettre en place une gestion efficace de ses données, une nomenclature précise a été déterminée par l'équipe locale. Un inventaire a été généré afin d'optimiser l'utilisation de ces dossiers. Deux projets drone géoréférencés ont été réalisés pour ce projet, celui de janvier 2023 recouvrant toute la zone ainsi que celui de juin 2023 relevant les deux secteurs sur les trois. Ils comportent respectivement 4 341 et 1 888 photos. Sur chacune des tombes a été placé des étiquettes d'identification avec le numéro de la tombe afin de permettre une distinction rapide. Ces étiquettes ont pu être déplacées entre les différentes étapes de fouilles archéologiques.

Afin de réaliser cet inventaire ainsi que d'autres structurations de données pour faire face aux soucis de stockage du serveur, il a été utilisé des scripts PowerShell. Ils ont permis une organisation efficace de toutes les images. De plus, lors de cette étude, il a principalement été choisi d'utiliser le logiciel Métashape, proposant de nombreuses fonctions nécessaires à la réalisation des objectifs de ce projet. Ce logiciel est notamment avantageux car il possède une API Python. Cela a pour avantage de rendre possible l'automatisation à l'aide de scripts adaptés directement exécutables dans les différents projets Métashape.

3. Chaîne de traitement des données du cimetière romain

Lorsque la mise en place de la gestion des données a pu être effectuée, il était nécessaire d'établir une chaîne de traitement pour la génération des orthophotos par état et par tombe. Afin de par la suite pouvoir automatiser au maximum le processus.

Le géoréférencement des tombes a été réalisé pour 60% des tombes avec une méthode validée par comparaison des résultats obtenus lorsque l'on utilise les deux projets drone de manière distincte. Les deux nuages de points résultants ont été comparés à l'aide du logiciel CloudCompare et on obtient une différence de distance moyenne de 3,5 centimètres. Cela semble

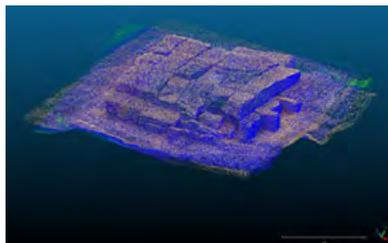


Fig. 3 : Comparaison de deux nuages de points avec le logiciel CloudCompare

convenable au vu de la précision du géoréférencement des cibles utilisées. Cette méthode se base sur l'alignement avec une précision élevée de certaines images drone recouvrant la zone d'intérêt ainsi que les images terrestres acquises de la tombe étudiée. L'ajout des paramètres d'orientation externes des caméras déterminés préalablement permet le géoréférencement des images terrestres et donc de la tombe. En moyenne, un projet comprenant environ 3 000 images avait un temps de calcul d'environ 1h40. Cela implique le besoin d'optimiser la génération des résultats, pour ce faire, il a été produit plusieurs scripts Python permettant de lancer plusieurs géoréférencements à la suite.

Il a ensuite été nécessaire de trouver une autre méthode de géoréférencement pour les 40% des tombes restantes. Les échanges avec l'archéologue René Elter qui connaît les lieux sont précieux pour pouvoir définir et comprendre les différents cas et particularités de certaines tombes ou amas d'ossements. Pour cette autre méthode, une étude de précision a également été effectuée.

Une fois les tombes géoréférencées, l'objectif est de générer chaque orthophoto par état et par tombe, lors de ce projet il y a approximativement 400 orthophotos à produire, c'est la raison pour laquelle l'enjeu majeur est l'automatisation. Lors de l'étape du géoréférencement, le recouvrement des images drone utilisées par projet est conséquent car ne recouvrait pas uniquement la zone d'intérêt. Pour une optimisation du temps de calculs, redéfinir la taille de la zone étudiée est nécessaire. Dans cet intérêt a été réalisé un script permettant la détection des étiquettes. Par la suite, il a été possible de calculer des orthophotos d'une taille approximative de 36m². Cette réduction de données est nécessaire afin de générer les résultats plus rapidement et éviter le surplus de temps de calculs.

La chaîne de traitement de la génération des orthophotos par état et par tombe est simplifiée à l'aide de la figure 4.

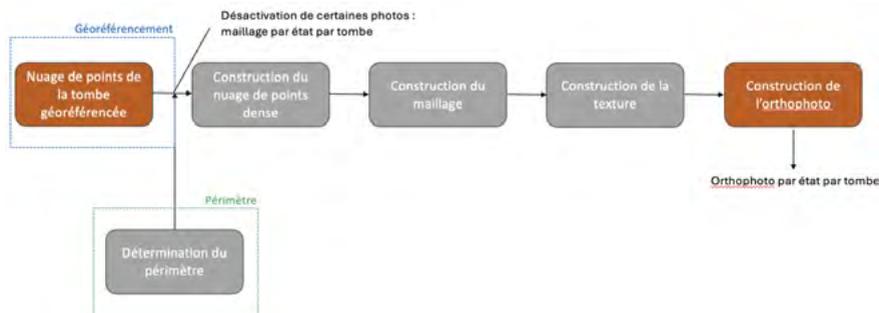


Fig. 4 : Chaîne de traitement de la génération des orthophotos du cimetière romain

Cette chaîne de traitement permet d'obtenir une orthophoto par état et par tombe. Cependant, par la suite une étape de mise en page est nécessaire afin d'uniformiser les résultats. Pour ce faire, notre choix a été de réaliser un périmètre adapté autour de chaque tombe, en laissant des marges de 65 cm de chaque côté ainsi que 50 cm en haut et 75 cm en bas. Avant la détermination des marges, il est nécessaire d'établir un premier périmètre correspondant au contour de la tombe. Pour ce faire, un modèle numérique d'élévation a été produit avec les V2 et V3 de chaque tombe uniquement. Un script Python permet de réaliser une segmentation en fonction de l'élévation, et permet de créer un rectangle englobant la tombe à l'aide d'algorithmes de traitements d'images. Une fois les coordonnées planimétriques des quatre coins déterminées, il est tenu de prendre en compte l'orientation du rectangle pour agrandir notre périmètre selon les marges évoquées précédemment.

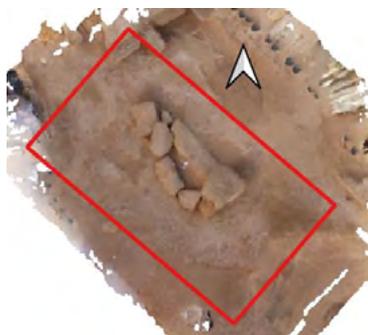


Fig. 5 : Mise en évidence du périmètre final (en rouge) d'une orthophoto

En résultante nous souhaitons des images rectangulaires verticales avec le nord pointant vers le bas de l'image, afin de pouvoir mettre en évidence les particularités des orientations des différents squelettes. Ce rectangle est utilisé une fois l'orthophoto générée, à l'aide du logiciel QGIS, afin de couper l'image selon la taille finale souhaitée.

À l'aide d'un script Python, l'orthophoto peut ensuite être découpée selon le périmètre. Ensuite, l'inclinaison du rectangle est déterminée afin d'être vertical, un cartouche est ensuite appliqué à chacune des orthophotos. L'objectif étant que la mise en page se fasse de manière automatisée, avec une intervention de l'utilisateur uniquement pour préciser le numéro de la tombe ainsi que l'état, et réaliser une vérification visuelle.



Fig. 6 : Orthophoto de la tombe 32 Version 1



Fig. 6 : Orthophoto de la tombe 32 Version 2



Fig. 6 : Orthophoto de la tombe 32 Version 3

À la suite de la génération des différentes orthophotos par état et par tombe, il sera restitué des plans de références permettant d'avoir une vue globale de la nécropole à chaque état de fouille. Pour cela, il est utilisé le logiciel QGIS à l'aide de diverses requêtes.

4. Conclusions et perspectives

La gestion de deux projets : le monastère de Saint-Hilarion et le cimetière romain ; possédant un nombre de données importantes, nous ont conduit à mettre en avant un enjeu fondamental qui est l'optimisation de données. Le site de la nécropole nous a permis d'élaborer une chaîne de traitement partiellement automatisée. À travers les multiples essais d'amélioration d'optimisation des données, nous avons pu observer les différents besoins de temps de calculs pour chacune des étapes. À l'issue de ce PFE, les nombreuses orthophotos résultantes ainsi que les différents plans de références répondront aux besoins de l'archéologue en charge des projets, René Elter. De plus, la vidéo concernant le monastère de Saint-Hilarion permettra de mettre en avant ce monument en aspirant à ce que ce site puisse entrer dans le patrimoine mondial de l'UNESCO.

Enfin, la suite de ce PFE aura une utilité de conservation et préservation du patrimoine archéologique.

5. Référence

Dellarovere T, (2022). Mise en œuvre du modèle 3D de référence à partir de données photogrammétriques pour le site du monastère de Saint-Hilarion, bande de Gaza. Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Institut National des Sciences Appliquées, spécialité Topographie.

Amélioration de la chaîne de traitement des surfaces en eau : identifications de nuages par synergie avec Global Surface Water et analyse de précision

PFE présenté par : **Emilie Mangold**
Société d'accueil : **Icube - SERTIT**
Directeur de PFE : **Hervé Yésou**
Correctrice : **Tania Landes**
Encadrants : **Hervé Yésou, Alessandro Caretto**



1. Contexte et objectifs

Dans le contexte du dérèglement climatique, les lacs sont des sentinelles du climat : ils peuvent témoigner de sécheresses, de la montée des eaux, et des variations de température, et ont en parallèle un rôle important dans la régulation du climat. Dans ce contexte, l'ESA mène le projet CCI (*Climate Change Initiative*) Lakes, qui porte sur la compréhension du comportement des lacs afin d'améliorer la gestion des ressources en eau. Cette étude consiste en le suivi sur le long terme de variables climatiques (*Lakes Essential Climate Variable*, ECV) sur plus de 2000 lacs répartis monde entier. Six variables climatiques sont observées sur de longues périodes temporelles (entre 1992 et 2020 selon la disponibilité des données), à l'aide d'observations satellitaires. Ces variables sont :

- La hauteur d'eau (*Lake Water Level*, LWL), qui permet d'observer l'évolution des apports et pertes d'eau.
- La superficie du lac (*Lake Water Extent*, LWE), qui témoigne de l'expansion des lacs (en régions glaciaires) et des sécheresses (en milieu aride). Les masses d'eau ont un effet rafraichissant sur le climat local, qui dépend de la superficie d'eau.
- La température de surface de l'eau.
- La couverture de glace et l'épaisseur de glace.
- La réflectance de la surface d'eau.

Le travail du SERTIT concerne la détermination du LWE à partir d'images satellitaires, et le calcul de la corrélation entre le LWE et le LWL afin d'obtenir une équation $LWE = f(LWL)$. Cette équation, appelée hypsométrie, permet d'estimer des LWE à partir des LWL ou inversement, lorsque ces paramètres ne sont pas directement observables, afin de produire une série de données à haute résolution temporelle, et d'évaluer la variation de volume du lac.

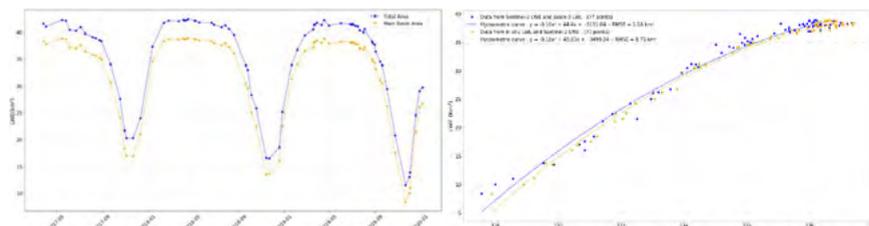


Fig. 1 : a) Série temporelle du Lake Water Extent, b) Courbe hypsométrique (LWE en fonction du LWL)



Le calcul du LWE s'appuie sur l'analyse d'images haute résolution nécessitant un traitement complexe. Plusieurs dizaines d'images sont téléchargées et traitées pour chaque lac. Les résultats sont filtrés pour ne garder que ceux dont la couverture nuageuse est inférieure à 5%. Dans de nombreux cas, moins d'une dizaine d'observations ne possèdent pas de nuages et sont exploitables, ce qui est insuffisant pour l'étude. Face à ce problème, le SERTIT souhaite développer une méthode de correction des masques d'eau nuageux de lacs, afin de pouvoir déterminer leurs LWE et les intégrer à l'hypsométrie. Les objectifs de ce stage sont de proposer une méthode permettant de compléter les masques d'eau d'observations nuageuses, et d'appliquer celle-ci aux lacs étudiés dans le cadre du projet CCI Lakes, puis d'évaluer la précision des résultats obtenus, puis d'évaluer la précision des résultats obtenus.

2. Développement de la méthode

Les masques d'eau se présentent sous la forme de vecteurs, qui englobent tous les pixels identifiés comme de l'eau. La présence de nuages entraîne des omissions (trous) dans le masque. Afin de compléter ces trous, nous avons besoin d'une base de données contenant un grand nombre d'observations à différents niveaux de remplissage du lac étudié. Pour cela, nous utilisons les occurrences issues du projet *Global Surface Water* (Pekel, 2016). Cette base de données recense l'évolution des surfaces en eau mondiales à partir de l'intégralité des archives Landsat 5, 7 et 8 depuis leur lancement en 1984 jusqu'en 2022, avec une résolution spatiale de 30m. Ces masques d'occurrences fournissent une cartographie de la fréquence de présence d'eau sur toute la planète. Ils répertorient la période (en %) pendant laquelle chaque pixel est détecté comme de l'eau. Ainsi, les parties du lac masquées par les nuages seront complétées à partir des occurrences GSW.

Une méthode d'identification des nuages à partir de la comparaison entre le masque nuageux et les occurrences a été développée sur ArcGIS Pro, puis convertie en script python. Celle-ci consiste à comparer le masque d'eau aux occurrences, afin de sélectionner l'occurrence qui décrit mieux le lac au moment de l'observation. Un critère de sélection est utilisé pour sélectionner les nuages parmi les écarts entre observation et occurrence. Ce critère distingue les entités selon leur géométrie et leur taille, à l'aide du rapport aire/périmètre.

Le projet a porté sur 7 lacs situés dans le monde entier à partir d'observations satellitaires issues de Sentinel-2 acquises entre 2017 et 2022. Dans un premier temps, 4 lacs situés au Canada, en Côte d'Ivoire, aux Etats-Unis, en Italie et au Nicaragua ont été traités. Ces lacs sont étudiés dans le cadre de CCI Lakes, et des nuages sont présents la plupart des images disponibles, empêchant la détermination d'une courbe hypsométrique. Au total, 23 observations nuageuses ont été corrigées sur l'ensemble de ces lacs.

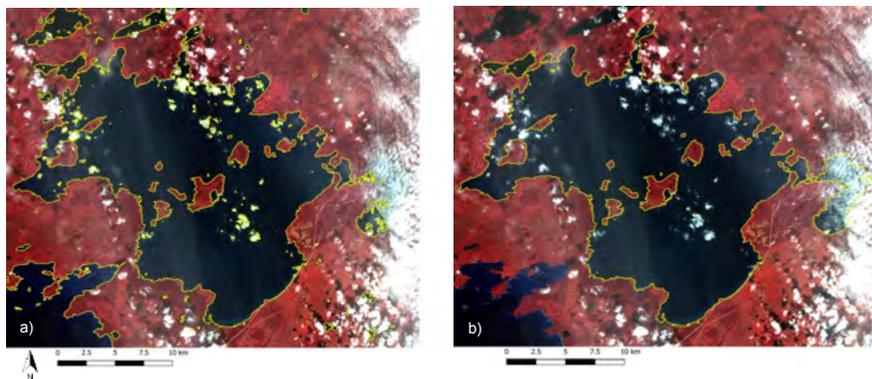


Fig. 2 : Masque d'eau initial (a) et corrigé (b) du lac Cormorant (Canada) et image Sentinel-2 associée (fausses couleurs)

3. Validation de la méthode

Les lacs étudiés dans cette partie ne possèdent pas d'assez de données pour permettre de valider la méthode proposée. Ainsi, deux lacs pour lesquels les observations ont été validées et pour lesquels le SERTIT dispose de courbes hypsométriques de référence ont été sélectionnés : il s'agit du lac du Der et du lac d'Orient, situés dans le Grand-Est. Ce sont des lacs à forte dynamique : la surface du lac du Der a un LWE qui varie entre 15 et 40 km² au cours d'une année, et celle du lac d'Orient varie entre 5 et 25 km². Pour ces 2 lacs, des occurrences issues des extractions Sentinel 2 ont été réalisées par le SERTIT, avec une résolution de 10m. Les observations nuageuses ont été corrigées à partir de ces deux masques d'occurrences afin de comparer les résultats. Celles-ci décrivent les lacs lors des périodes de vidange qui ne sont pas disponible avec les occurrences GSW. Pour chaque lac, 34 observations à différents niveaux de remplissages ont été corrigées. Cette correction a permis d'ajouter entre 4 et 55% de la surface du lac. La figure 5 représente quelques exemples de masques d'eau observé et des nuages identifiés.

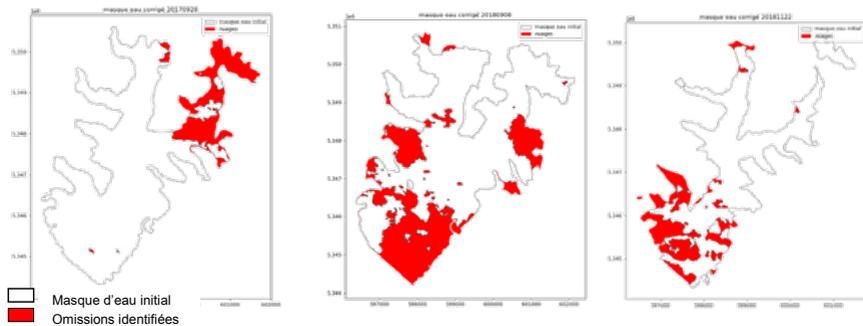


Fig. 3 : Masques d'eau bruts et nuages ajoutées pour le lac d'Orient (à partir des occurrences Sertit)

Une fois les masques corrigés, les valeurs des LWE de chaque observation sont calculées et superposés à la courbe hypsométrique validée du lac. La figure 6 montre que les résultats obtenus sont cohérents avec la courbe hypsométrique. Le calcul des emq entre les LWE corrigés et la courbe hypsométrique de référence permet de quantifier cette observation. Pour le lac d'Orient, les données corrigées à partir des occurrences GSW ont un emq de 2%, et celles corrigées avec SERTIT ont un emq de 1%.

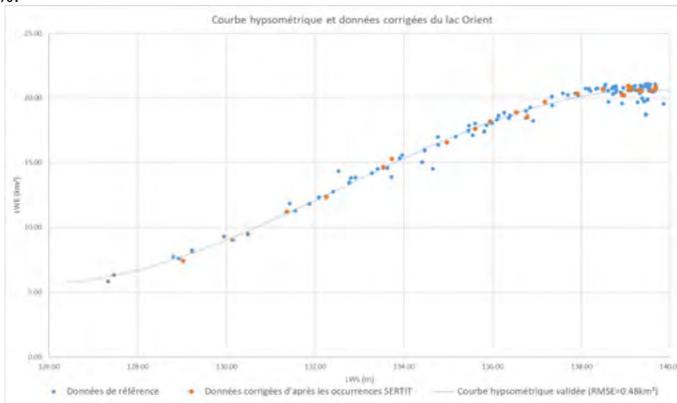


Fig. 3 : Courbe hypsométrique du lac d'Orient et données nuageuses ajoutées

4. Evaluation de la méthode

Dans l'étape précédente, l'exactitude des résultats est déterminée par rapport à la valeur théorique fournie par la courbe hypsométrique, mais on ne connaît pas l'étendue d'eau réelle des masques corrigés. Une seconde méthode d'évaluation a donc consisté à créer un jeu de données de masques nuageux par la combinaison de masque d'eau non nuageux et de masques de nuages. Dans le cas du lac du Der, 4 masques d'eau à différents niveaux de remplissage et 6 masques de nuages ont été combinés pour obtenir un jeu de 24 masques à corriger. Pour le lac d'Orient, 4 masques d'eau et 4 masques de nuages ont été sélectionnés.

Ces 40 masques ont été corrigés à partir des deux occurrences. Pour tous les cas, les emq, qui sont déterminés à partir des écarts entre le LWE corrigé et le LWE du masque initial sont de 1%. La principale différence entre les deux occurrences est le nombre de données traitées. Les occurrences SERTIT ont été capables de corriger tous les masques, alors que GSW n'ont pu corriger que la moitié.

	Erreur moyenne quadratique			
	Occurrences GSW		Occurrences SERTIT	
Lac du Der	0.34 km ²	1%	0.21 km ²	1%
Lac Orient	0.15 km ²	1%	0.11 km ²	1%

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des erreurs moyennes quadratiques totales

5. Conclusion

Au cours de ces 4 mois de stage, nous avons défini, implémenté puis validé une méthode de correction des masques d'eau nuageux. Celle-ci s'appuie sur la comparaison avec des masques d'occurrences. La méthode a tout d'abord été définie sous ArcGIS Pro, puis transférée en script python ce qui a permis un gain de temps et une simplicité d'utilisation. Enfin, un protocole de test de la méthode a été développé. Celui-ci nous a permis de remarquer que l'exactitude des résultats dépend des occurrences sélectionnées et de l'extraction du masque d'eau initial. La présence d'erreurs dans une de ces deux données est susceptible de fausser les résultats obtenus.

Plusieurs pistes de poursuite du projet se présentent à l'issue de ce stage. Tout d'abord, afin de pouvoir intégrer cette méthode dans la chaîne de traitement du SERTIT, il faudra rechercher un moyen d'automatiser la sélection des omissions, afin d'obtenir un outil entièrement automatisé. Ensuite, il serait intéressant de déterminer la couverture nuageuse maximale que cet outil est en mesure de traiter.

6. Bibliographie

CCI Lakes. (s. d.). ESA Climate Office. Consulté 25 janvier 2024, à l'adresse

<https://climate.esa.int/en/projects/lakes/>

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), Article 7633.

<https://doi.org/10.1038/nature20584>



Compensation of Ionospheric Effects in L-band SAR Interferograms in areas with low coherence



PFE présenté par : **Elisa JENNY**
Société d'accueil : **Geodätisches Institut Karlsruhe**
Directeur de PFE : **Malte Westerhaus**
Correcteur : **Gilbert Ferhat, Hansjörg Kutterer, Malte Westerhaus**
Encadrant : **Markus Even**

1. Introduction

Le projet DAMAST (DAMs And induced Seismicity Technologies for risk reduction) est une coopération entre l'Allemagne, la Géorgie et l'Arménie. Ses recherches se concentrent sur le barrage Enguri, situé dans le Caucase, à l'est de la mer Noire, en Géorgie. Il a une hauteur de 271 mètres et une largeur de 750 mètres. Il produit environ 40% des besoins en électricité du pays. De plus, le barrage est situé dans une zone à forte sismicité, ce qui explique sa surveillance.

Les deux instituts de recherche de Karlsruhe, GIK et IPF, sont impliqués dans le projet. Alors que l'IPF utilise un dispositif SAR au sol (GB-SAR) pour entreprendre l'analyse de la déformation, le GIK effectue l'analyse à l'aide de données SAR provenant de satellites. Ce projet existant depuis 2019, certaines mesures SAR ont déjà été réalisées et étudiées, mais seules les bande X et C ont été utilisées. Le barrage étant situé dans une zone avec une végétation importante, des acquisitions en bande L seraient utiles : les bandes L fournissent des informations supplémentaires dans les zones forestières. Cependant, ces mesures sont entachées d'une distorsion ionosphérique en raison de la grande longueur d'onde des bandes L. L'objectif de ce PFE est d'analyser le bruit contenu dans les données de ce projet et de corriger autant que possible les erreurs contenues dans les phases.



Fig. 1 : Vue du barrage

2. Split-spectrum method

Différentes méthodes ont été développées pour estimer les effets ionosphériques et corriger les interférogrammes. L'une d'entre elles, la plus utilisée en interférométrie SAR, est la méthode du spectre divisé, ou split-spectrum method en anglais (abrégée SSM). Cette méthode est décrite dans Gomba et al. (2016).

Une phase interférométrique est une somme de plusieurs composantes : topographique, planimétrique et de déformation. Ces composantes composent une phase dite non dispersive, c'est-à-dire que l'atmosphère entre le satellite et le sol ne disperse pas ce signal. Cette composante non dispersive est décrite comme suit :

$$\Delta \phi_{non-disp} = \frac{4 * \pi * f_0}{c} * (\Delta r_{topo} + \Delta r_{mov} + \Delta r_{tropo})$$

Cependant, en bande L, l'ionosphère ajoute une nouvelle composante à cette somme, qui est dispersive. Ceci est dû aux propriétés de l'ionosphère. Cette composante est :

$$\Delta \phi_{iono} = \frac{-4 * \pi * K}{c * f_0} * \Delta TEC$$



La phase totale observée est donc la somme de la phase dispersive et de la phase non dispersive.

$$\Delta \phi = \Delta \phi_{non-disp} + \Delta \phi_{iono}$$

Comme expliqué dans Gomba et al. (2016), une propriété intéressante de ces contributions est la suivante : la contribution dispersive ionosphérique est inversement proportionnelle à la fréquence, alors que la contribution non dispersive est directement proportionnelle à la fréquence. Cette caractéristique est à la base de la méthode du spectre divisé : le signal original est divisé en deux sous-bandes à l'aide d'un filtre passe-bande. La comparaison de ces deux sous-bandes facilite la détermination de la composante ionosphérique.

La figure 2 est une représentation schématique de la mise en œuvre de la méthode du spectre divisé. Les calculs ont été réalisés sur le logiciel SNAP, conçu par l'ESA. Voici les étapes appliquées dans SNAP pour appliquer cette méthode aux données SAR du projet.

Trois jeux de données sont utilisés : les scènes sans filtre passe-bande, les scènes avec un filtre passe-haut et les scènes avec un filtre passe-bas. Dans chacun des trois cas, les scènes subissent une coregistration puis sont utilisées pour calculer les interférogrammes. Ces derniers sont corrigés avec un filtre de Goldstein, puis les phases sont dépliées (unwrapped phase). La composante ionosphérique des interférogrammes peut donc être déterminée en comparant les informations de chacune des trois phases déroulées.

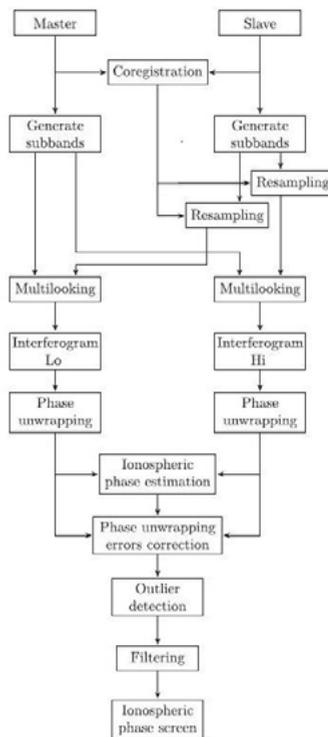


Figure 2 : Représentation schématique de la méthode du spectre divisé

3. Ajustement des paramètres

La chaîne de traitement nécessite un multilooking.

Cependant la position précise de cette étape n'est pas précisée dans Gomba et al. (2016), il est seulement mentionné qu'elle est exécutée avant le déballage de phase (unwrapping). Deux protocoles seront donc testés : dans le premier, le multilooking est réalisé avant le filtrage de Goldstein, dans le deuxième il est réalisé après le filtrage.

Quatre étapes de la chaîne de traitement permettant d'obtenir la phase corrigée ont été étudiées. Les paramètres cités sont ceux requis par le logiciel SNAP.

- 1) **Le multilooking** : Cette étape consiste à redimensionner l'image SAR afin de corriger des distorsions liées à la résolution. Les valeurs testées ont le format « range x azimut », seules les fenêtres permettant d'obtenir des pixels carrés sont considérées.
- 2) **Le filtrage de Goldstein** : Ce filtre est basé sur une Transformée de Fourier Rapide (FFT). Il nécessite quatre paramètres : un exposant permettant de choisir la force de filtrage ; la taille de la FFT qui détermine la quantité de données qui sera considérée durant la FFT ; la taille de la fenêtre qui contrôle le lissage de la FFT. Le dernier paramètre est la possibilité ou non d'utiliser un masque de cohérence : ce dernier permet de retirer du filtrage les pixels ayant une cohérence trop basse.
- 3) **L'unwrapping** : La correction se calcule avec la phase déroulée. L'algorithme SNAPHU utilisé pour cela requiert quatre paramètres. Le premier, nommé « statistical cost mode », détermine la fonction de densité de probabilité (Probability Density Function or PDF) nécessaire à l'algorithme. Le deuxième, nommé « initial method » permet d'initialiser l'algorithme. La phase



est généralement déroulée en plusieurs morceaux pour ne pas excéder les capacités de l'ordinateur : le nombre de tuiles (tile) utilisées et la superposition (overlapping) de ces tuiles doivent également être précisés.

- 4) **La correction ionosphérique** : Cette correction nécessite un sigma pour initialiser l'algorithme ainsi qu'une limite de cohérence à partir de laquelle la cohérence des pixels est considérée comme suffisamment élevée pour que les pixels soient utilisés dans la correction.

Lors des expérimentations, un problème de stabilité temporelle est apparu : lorsqu'une correction est efficace pour un interférogramme, elle fonctionne pour très peu d'autres interférogrammes. En particulier, plus les scènes master et slave de l'interférogramme sont éloignées temporellement, moins la correction est efficace. Pour tenter de réduire ce problème de décorrélation temporelle, un pré-traitement est appliqué aux données. Ce pré-traitement est basé sur la détection de diffuseurs distribués (Distributed Scatterer, DS). Les DS sont caractérisées par une cohérence moyenne ou faible, contrairement aux Persistent Scatterer (PS). Cependant, si un voisinage de pixels ayant la même cohérence est suffisamment grand, il est possible d'appliquer une correction basée sur les propriétés statistiques des pixels à l'ensemble du voisinage. Ceci réduit le bruit contenu dans ces pixels. Les étapes du pré-traitement DS utilisé lors du PFE sont les suivantes :

- 1) Une recherche du voisinage est réalisée grâce aux valeurs d'amplitude des pixels.
- 2) La matrice de covariance du voisinage est calculée.
- 3) Le signal corrigé est obtenu grâce à la matrice de covariance et une triangulation.
- 4) La qualité de la nouvelle phase est estimée et, si besoin, des corrections supplémentaires peuvent être ajoutées.

Mr. Even a conçu un programme permettant d'appliquer ce pré-traitement à des scènes ou des interférogrammes. Les paramètres cités précédemment sont à nouveau testés avec les données pré-traitées pour adapter les paramètres au pré-traitement.

Finalement, pour chacun des deux jeux de données, deux protocoles optimisés sont retenus pour chaque jeu de données. Ils sont détaillés dans le Tableau 1.

Parameter		Protocole 1 (avec et sans pré-traitement)	Protocole 2 avec pré-traitement	Protocole 2 sans pré-traitement
Ordre des étapes		Multilooking avant l'interférogramme	Multilooking après le filtre de Goldstein	Multilooking après le filtre de Goldstein
Multilooking		1x2	3x6	5x9
Goldstein filter	Adaptative filter exponent	1.0	1.0	1.0
	FFT size	256	256	256
	Window size	7	7	7
	Use coherence mask	Non utilisé	Non utilisé	Non utilisé
Unwrapping	Statistical cost mode	Smooth	Topo	Smooth
	Initial method	MCF	MCF	MCF
	Tile size	1x1	1x1	10x20
	overlapping	200x200	200x200	100x100
Ionospheric correction	sigma	81	41	81
	Cohérence limite	0.6	0.6	0.7

Tableau. 1 : Détail des protocoles optimisés

Tous les tests ont été réalisés avec un seul interférogramme, l'idée étant d'extrapoler les conclusions à l'ensemble du jeu de données. Cependant, l'application des corrections à l'ensemble des interférogramme mets en évidence le problème de décorrélation temporelle décrit plus haut : le nombre de phases suffisamment bien corrigées pour être utilisées est très faible. Nous pouvons toutefois noter que le pré-traitement améliore les résultats. Pour les données sans pré-traitement, 12 interférogrammes sont composés uniquement de bruit après les corrections, et ce avec les deux



protocoles. Seuls 4 et 6 interférogrammes (pour les protocoles 1 et 2 respectivement) sont utilisables dans une analyse temporelle. Avec un prétraitement, seuls 3 interférogrammes sont composés uniquement de bruit et le nombre d'entre eux utilisables dans une analyse temporelle s'élève à 10 et 9 (pour les protocoles 1 et 2 respectivement).

Malgré l'amélioration de la correction induite par le pré-traitement, aucun des protocoles de correction ne permet de corriger l'intégralité des interférogrammes.

4. Analyse du bruit

Jusqu'à présent, seules des estimations visuelles des phases obtenues permettaient de choisir les paramètres. Une analyse du bruit contenu dans les phases est réalisée afin d'avoir une information quantitative concernant les corrections. La donnée utilisée est la cohérence des interférogrammes. Cette cohérence est calculée grâce aux Persistent Scatterer (PS) détectés dans les interférogrammes ainsi qu'avec un modèle de phase ; les paramètres de ce modèle est basé sur des doubles différences (les paires de points utilisées sont choisies grâce à une triangulation de Delaunay) à l'aide d'un estimateur de périodogramme. La détection des PS et l'estimation des paramètres du modèle ont déjà été programmées par Mr. Even, seul le calcul de la cohérence a été programmé.

Les résultats de cette analyse sont présentés en figure 3. L'impact positif du pré-traitement y est visible : les cohérences sont globalement plus élevées pour les données ayant subies le pré-traitement. Cependant, l'écart entre les données avec une correction ionosphériques et celles sans la correction est peu important, un plus grand écart était attendu. Il n'est pour l'instant pas possible de dire si cela est dû à la qualité de la correction ou si l'analyse temporelle doit encore être améliorée.

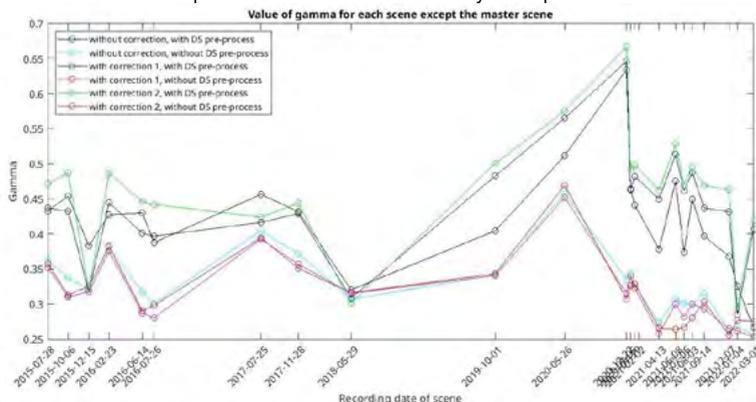


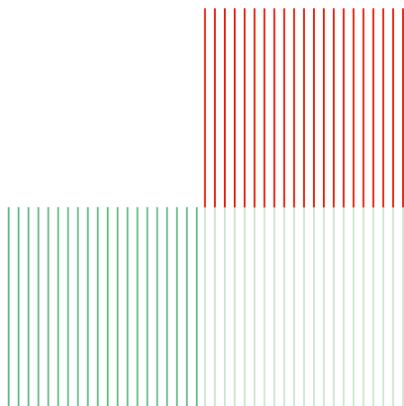
Fig. 3 : Valeurs de la cohérence calculées pour chaque interférogramme pour les données sans correction et les données avec les corrections optimisées déterminées dans le paragraphe 3

5. Conclusion et perspectives

L'étude des paramètres de calcul réalisée durant le PFE a permis d'optimiser la chaîne de traitement et d'isoler les protocoles de calcul les plus efficaces. De plus, l'utilisation d'un prétraitement basé sur les DS a permis de réduire significativement la décorrélation temporelle dans notre jeu de données, ce qui permet de corriger plus d'interférogrammes. Cependant, à l'issue du PFE, il n'a pas été possible de corriger l'intégralité des interférogrammes, ce qui empêche la réalisation d'une analyse temporelle avec ces données.

Une perspective d'amélioration serait l'étude approfondie de la coregistration des scènes : bien qu'elle n'ait pas été étudiée, cette étape est citée dans Gomba et al. (2016) comme l'une des étapes les plus importantes.





Plus d'infos

<https://topographie.insa-strasbourg.fr>

Contact : Hélène Macher

Maître de conférences

INSA Strasbourg

helene.macher@insa-strasbourg.fr

tél. 03 88 14 49 16

INSA Strasbourg

Spécialité topographie

24, boulevard de la Victoire

67084 Strasbourg Cedex

tél. 03 88 14 47 00

www.insa-strasbourg.fr

