

**22<sup>e</sup> JOURNÉES  
DE LA TOPOGRAPHIE**

→ DU 24 AU 26/09/2025

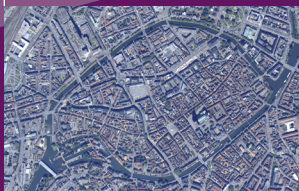
**150 ANS DE CARTOGRAPHIE  
ET D'EXPLORATION SPATIALE :  
DE LA TERRE À L'ESPACE**



Carte d'état-major  
de Strasbourg, 1866  
Collection Cartothèque IGN

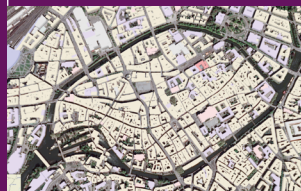


Photo aérienne  
de Strasbourg, 2011  
IGN



Agrégation d'images acquises  
par les satellites Pléiades en 2022  
et bâtiments en 3D

Géoportail : Airbus defence and space  
+ IGN



# SOMMAIRE

Mot du directeur.....	p.	5
Programme .....	p.	6
Salon des exposants.....	p.	7
Conférence: « 150 ans de cartographie et d'exploration spatiale: de la Terre à l'Espace » ....	p.	8
Ordre de passage des PFE.....	p.	9
Résumés des PFE .....	p.	17



## MOT DU DIRECTEUR

C'est avec un plaisir renouvelé que l'INSA Strasbourg organise cette année la 22<sup>e</sup> édition des Journées de la topographie (JDT). Entrée dans sa troisième décennie, cette manifestation est un temps fort de la rentrée pour toutes les parties prenantes de la spécialité topographie.

Les JDT marquent l'aboutissement du parcours des étudiantes et étudiants ingénieurs en topographie, avec la présentation de leurs projets de fin d'études (PFE), étape décisive pour l'obtention du diplôme. Elles sont également un moment privilégié d'échanges et de rencontres lors du salon des exposants, où les professionnels du secteur viennent à la rencontre des futures générations d'ingénieurs. C'est l'occasion pour les étudiants, quel que soit leur niveau, de découvrir la diversité des métiers de la topographie et les opportunités professionnelles qu'elle offre.

Le thème de la conférence de cette année, « 150 ans de cartographie et d'exploration spatiale : de la Terre à l'Espace », s'inscrit dans une double perspective historique et technologique. Il célèbre non seulement les 150 ans de notre école — qui a su se transformer à de nombreuses reprises depuis sa création en 1875 pour devenir en 2003 l'INSA Strasbourg — mais met aussi en lumière les progrès majeurs réalisés dans le domaine de la topographie et de la cartographie, depuis les mesures terrestres jusqu'aux observations satellitaires. Ce voyage dans le temps illustre l'évolution des outils et des méthodes qui façonnent aujourd'hui notre compréhension du territoire, et plus largement, de notre planète.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les enseignants, les personnels techniques et administratifs, les étudiantes et étudiants, ainsi que nos partenaires de longue date — l'Association francophone de topographie (AFT) et l'Ordre des géomètres-experts (OGE) — pour leur engagement dans la réussite de cet événement. Je souhaite également remercier chaleureusement les professionnels présents sur le salon des exposants, ainsi que toutes celles et ceux qui assistent à cet événement, contribuant ainsi à sa richesse et à son dynamisme.

En tant que directeur de l'INSA Strasbourg, je suis fier de voir cet événement perdurer et continuer à faire rayonner la profession de topographe, à la croisée de la recherche, de l'innovation et des enjeux contemporains.

# PROGRAMME

	MERCREDI 24 SEPTEMBRE	JEUDI 25 SEPTEMBRE	VENDREDI 26 SEPTEMBRE
8 h	Accueil - salle topographie		
9 h	<b>Soutenances de Projets de fin d'études (PFE)</b> Jury 1, Jury 2 salle topographie, bâtiment C	<b>Soutenances de PFE</b> Jury 1 salle C1.11, bâtiment C Jury 2 salle C1.15, bâtiment C Jury 3 salle C1.16, bâtiment C	<b>Soutenances de PFE</b> Jury 1, Jury 2 salle topographie, bâtiment C Jury 3 salle C1.16, bâtiment C
10 h	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C
11 h			
12 h	<b>Délibération et annonce des résultats</b> salle topographie, bâtiment C	<b>Délibération et annonce des résultats</b> salle topographie, bâtiment C	<b>Délibération et annonce des résultats</b> salle topographie, bât. C
13 h			
14 h	<b>Soutenances de PFE</b> Jury 1, Jury 2 salle topographie, bâtiment C	<b>Présentation du métier de géomètre-expert</b> 13 h 30 - 14 h 30 amphi de Dietrich	<b>Conférence : « 150 ans de cartographie et d'exploration spatiale : de la Terre à l'Espace »</b> 14 h - 16 h amphi de Dietrich
15 h	Jury 3 salle C1.16, bâtiment C	<b>Salon des exposants</b> 13 h 30 - 17 h 30 salle topographie, bâtiment C	
16 h		<b>Présentation de l'association Topo solidaire</b> 16 h 30 - 17 h 30 amphi de Dietrich	<b>Cérémonie de clôture et verre de l'amitié</b> 16 h 15 - 18 h salle topographie, bâtiment C
17 h			
18 h	<b>Délibération et annonce des résultats</b> salle topographie, bâtiment C	<b>Conseil de l'Association francophone de topographie (AFT)</b> (Réservé aux membres) 17 h - 20 h salle C1.16, bâtiment C	
19 h			

# SALON DES EXPOSANTS

JEUDI 25 SEPTEMBRE  
DE 13 H 30 À 17 H 30

Comme chaque année, lors du salon des exposants, rendez-vous incontournable des Journées de la topographie, nous sommes heureux d'accueillir des entreprises spécialisées en topographie, venues présenter leurs équipements, technologies et solutions logicielles.

Ce salon constitue une occasion précieuse pour les étudiants de rencontrer des professionnels, d'échanger sur les métiers et les innovations du secteur, et de consulter les offres de stages ou d'emplois proposées par les entreprises.

Faisant partie intégrante du programme des Journées, le salon s'inscrit dans le thème de cette édition : « 150 ans de cartographie et d'exploration spatiale : de la Terre à l'Espace ». À cette occasion, une animation ludique sera proposée. Les participants pourront tester leur sens de l'observation ainsi que leurs connaissances en cartographie, espace et topographie. Un moment convivial, ouvert à tous, pour apprendre en s'amusant !

## Entreprises du salon des exposants

	ComNav Technology		Leica geosystems
	Europe Srl		Ministère des Armées
	Delta Métronia		Sertit
	EDF		SFS topo
	Eiffage route		Sites
	Faro France		Sogelink
	Faynot industrie		STTL
	Geofit		Teria
	Geotopo		Topo solidaire
	Gexpertise		TPLM-3D
	Hamel GE		AFT
	Kadran/Datageo		OGE

Invités  
d'honneur

# CONFÉRENCE :

## « 150 ANS DE CARTOGRAPHIE ET D'EXPLORATION SPATIALE : DE LA TERRE À L'ESPACE »

**VENDREDI 26 SEPTEMBRE**  
**DE 14 H À 16 H**

Il y a 150 ans, cartographier le monde, c'était arpenter le terrain, viser des points d'intérêt avec un théodolite, et tracer patiemment les contours d'un relief sur papier. Aujourd'hui, c'est depuis l'espace que nous observons la Terre, avec une précision inimaginable à l'époque. En un siècle et demi, la cartographie a quitté les sommets des montagnes pour atteindre les orbites terrestres. Ce basculement technologique et méthodologique, porté par l'évolution des outils de mesure et l'arrivée des satellites, raconte l'histoire d'un progrès constant — de la Terre à l'Espace.

Cette conférence revient sur cette aventure humaine et scientifique. Elle mettra en lumière le rôle des satellites dans la production de données géographiques (modèles numériques de terrain, images ortho-rectifiées, cartes de référence...), mais aussi dans l'étude de l'évolution de notre planète par l'analyse directe des images satellitaires. Des experts du CNES, de la Direction générale de l'armement et du Sertit interviendront pour partager leur expérience : de l'observation spatiale à très haute résolution avec le programme CO3D, à la supervision de programmes de Défense, en passant par la cartographie d'urgence.

À l'occasion des 150 ans de l'école, nous vous invitons à ce voyage à travers le temps et l'espace, où chaque pixel compte et chaque point de mesure raconte une histoire.

### **Intervenants**

#### **Stéphanie Battiston**

Responsable du service de cartographie rapide,  
Service régional de traitement d'image et de télédétection (Sertit)

#### **Jean-Baptiste Henry**

Responsable des programmes aval d'observation de la Terre  
pour la défense, Centre national d'études spatiales (CNES)

#### **Victor Martin**

Architecte en acquisition de données géoréférencées,  
Direction générale de l'armement (DGA)

# ORDRE DE PASSAGE DES PFE

MERCREDI 24 SEPTEMBRE

## JURY 1

(salle topographie, bâtiment C)

Présidente de jury : DUQUENNE Françoise

**8 h 30** | Vers une production automatisée des plans d'intérieurs à partir de nuages de points. Application aux EDD<sup>1</sup> et EDDV<sup>2</sup>. **p. 19**

- Étudiante : FIORE Mathilde
- Structure d'accueil : Opsia, La Valette-du-Var
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

**9 h 30** | Intégration d'outils automatiques ou semi-automatiques pour la vectorisation et le calcul de surfaces à partir d'un nuage de points 3D. **p. 23**

- Étudiante : BRILLAC Aurore
- Structure d'accueil : Cabinet Siragusa, Montpellier
- Correcteur : ALBY Emmanuel

**10 h 30** | Automatisation du processus de dessin de plans de façades à partir de nuages de points et d'ortho-images : vers une digitalisation intelligente. **p. 27**

- Étudiant : LACROIX Arthur
- Structure d'accueil : Elligeo, Molsheim
- Correctrice : MACHER Hélène

Président de jury : MINOT Olivier

**13 h 30** | Optimisation de la chaîne de traitement de l'acquisition de nuages de points par scanner laser statique à la production de plans 2D de bâtiments. **p. 31**

- Étudiant : BERANGER Simon
- Structure d'accueil : Küpfer géomètres SA, Genève (Suisse)
- Correcteur : ALBY Emmanuel

**14 h 30** | Mise en place d'un processus BIM<sup>3</sup> pour les appels d'offres VRD<sup>4</sup> : une modélisation 3D semi-automatique au service de l'estimation des quantités, des coûts et des délais. **p. 35**

- Étudiant : DURGETTO Nicolas
- Structure d'accueil : Colas, Champsigny-sur-Marne
- Correctrice : MACHER Hélène

**15 h 30** | Développement d'outils et mise en place de processus permettant la conversion, de manière semi-automatique, d'un levé topographique en une maquette numérique Revit et exports IFC<sup>5</sup>. **p. 39**

- Étudiante : DAHLEM Clarisse
- Structure d'accueil : HKD géomatique, Onex (Suisse)
- Correcteur : ALBY Emmanuel

**16 h 30** | Analyse des limites et rédaction des procédures du scanner Orbis de Faro. **p. 43**

- Étudiant : POTTIN Antoine
- Structure d'accueil : Kadran, Orange
- Correcteurs : KOEHL Mathieu, LANDES Tania

## JURY 2

### (salle topographie, bâtiment C)

**Président de jury : FLACELIÈRE Bernard**

**8 h 30** | Modélisation de produits 3D maillés de sites intérieurs complexes, par photogrammétrie ou LiDAR<sup>6</sup>. **p. 47**

- Étudiante : FOURE Mélisande
- Structure d'accueil : 28<sup>e</sup> groupe géographique, Haguenau
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

**9 h 30** | Création des maquettes numériques des châteaux du Pflixbourg et du Schrankenfels dans leur état actuel et dans le cadre d'une reconstitution historique. **p. 51**

- Étudiant : HYPOLYTE Romain
- Structure d'accueil : Laboratoire ICube, équipe Trio, Strasbourg
- Correcteur : MOISAN Emmanuel

**10 h 30** | Modélisation et simulation 3D de convois exceptionnels pour la détection automatique de collisions dans des environnements complexes. **p. 55**

- Étudiant : LEGAL Marceau
- Structure d'accueil : TES, Horbourg-Wihr
- Correcteurs : KOEHL Mathieu, MOISAN Emmanuel

---

**Président de jury : FLACELIÈRE Bernard**

**13 h 30** | Cheminement topographique en environnement industriel contraint : étude de précision, de méthodologie, de matériel, pour le relevé et l'implantation de points à travers des voiles et dalles. **p. 59**

- Étudiant : BARBIEUX Pierre
- Structure d'accueil : VCSP génie civil France délégation Centre Est, Villeurbanne
- Correcteurs : KOEHL Mathieu, MOISAN Emmanuel

**14 h 30** | Mise en compatibilité de nouvelles stations totales dernière génération de la société Happysurvey avec un logiciel de monitoring propriétaire HYP-ARC. **p. 63**

- Étudiant : DUBOZ Théophile
- Structure d'accueil : HYP-ARC SAS, Archamps
- Correcteur : FERHAT Gilbert

**15 h 30** | Définition d'un nouveau processus pour l'implantation topographique au Cern à l'aide d'une solution de traçage robotisé. **p. 67**

- Étudiante : MEZZATESTA Anna-Sarah
- Structure d'accueil : Cern, Genève (Suisse)
- Correcteur : FERHAT Gilbert

## **JURY 3** **(salle C1.16, bâtiment C)**

**Président de jury : BANASZAK Olivier**

**8 h 30** | Développement d'une plateforme de réalité virtuelle pour le traitement de scènes de crime : optimisation dynamique des données 3D pour la visualisation. **p. 71**

- Étudiante : GENDRAUD Mélanie
- Structure d'accueil : Pôle judiciaire de la gendarmerie nationale, Pontoise
- Correcteur : KOEHL Mathieu

**9 h 30** | Vers une exploitation Lean BIM des bâtiments : couplage de la maquette numérique avec les images 360° et création d'une visite virtuelle *open source*. **p. 75**

- Étudiant : WAYDELICH Eliot
- Structure d'accueil : Dgema, Montpellier
- Correctrice : MACHER Hélène

**10 h 30** | Solutions de restitution immersive au service de la conservation numérique et de la médiation scientifique. Cas du centre de commande de la LGV<sup>7</sup> Paris-Lyon. **p. 79**

- Étudiant : BALLAND Charles
- Structure d'accueil : SNCF Réseau, La Plaine Saint-Denis
- Correcteurs : LANDES Tania, GRUSSENMEYER Pierre

---

**Président de jury : BANASZAK Olivier**

**13 h 30** | Estimation des précisions GNSS<sup>8</sup> pour le calcul de trajectoire d'un mobile : comparaison de logiciels et de scénarii GNSS. **p. 83**

- Étudiante : MUSQ Ilona
- Structure d'accueil : Fugro geoid, Castries
- Correcteur : FERHAT Gilbert

**14 h 30** | Structuration de l'offre TPLM-3D et des méthodes de mesures géométriques à bord de navires, avec une étude comparative de déformations structurelles. **p. 87**

- Étudiant : LOINGEVILLE Julien
- Structure d'accueil : TPLM-3D, Chasse-sur-Rhône
- Correcteurs : LANDES Tania, Emmanuel MOISAN

**15 h 30** | Mise en place et configuration du logiciel Limit Addict dans un cabinet de géomètres-experts. **p. 91**

- Étudiant : ODDOS Armand
- Structure d'accueil : GeoSiapp, Aubenas
- Correcteur : KOEHL Mathieu

## JEUDI 25 SEPTEMBRE

### JURY 1

(salle C1.11, bâtiment C)

**Président de jury : MINOT Olivier**

**8 h 30** | Étude de solutions *low-cost* pour l'acquisition et le traitement de nuages de points 3D dans le cadre de suivi et de gestion d'infrastructures.

**p. 95**

- Étudiant : BRIANT Nicolas
- Structure d'accueil : Ferrcad, Montpellier
- Correcteurs : MACHER Hélène, MÜRTIYOSO Arnadi

**9 h 30** | Étude des caméras Arducam haute résolution et mise en œuvre de plusieurs capteurs synchronisés pour la modélisation 3D et le contrôle dimensionnel.

**résumé non rendu**

- Étudiant : LAURENT Luc
- Structure d'accueil : Fugro geoid, Castries
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

**10 h 30** | Mise en place de technologies non destructives de géoréférencement des réseaux existants dans le but d'améliorer les études de projets d'infrastructures.

**p. 99**

- Étudiante : MROUE Joëlle
- Structure d'accueil : Eiffage route, Reguisheim
- Correcteur : FERHAT Gilbert

### JURY 2

(salle C1.15, bâtiment C)

**Président de jury : MOREL Laurent**

**8 h 30** | Optimisation des méthodes d'exploitation des données LiDAR pour les reports topographiques en milieu ferroviaire.

**p. 103**

- Étudiant : PAILLAT Martin
- Structure d'accueil : Kadran, Saint-Sébastien-sur-Loire
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre, MOISAN Emmanuel

**9 h 30** | Mise en place et optimisation d'une chaîne de traitement des nuages de points et des images issues d'acquisitions par scanner dynamique dans des milieux présentant une réception GNSS dégradée.

**p. 107**

- Étudiant : GUILHEMAT Nicolas
- Structure d'accueil : Geofit, Schiltigheim
- Correcteur : MOISAN Emmanuel

**10 h 30** | Dataexplor : vers une solution intégrée pour le récolement des tranchées et l'optimisation des *workflows*.

**p. 111**

- Étudiant : CHARQAOUI Ahmed (IRIV)
- Structure d'accueil : Datageo, Ligné
- Correcteurs : GRUSSENMEYER Pierre, MOISAN Emmanuel

**JURY 3**  
**(salle C1.16, bâtiment C)**

**Présidente de jury : DUQUENNE Françoise**

**8 h 30** | Le scanner 3D. Faisabilité et potentiel dans le cadre de suivis observationnels et d'auscultation. **p. 115**

- Étudiant : SAINT-ANDRE Thomas
- Structure d'accueil : Monaco topo, Monaco
- Correctrice : LANDES Tania

**9 h 30** | Optimisation des méthodes de traitement des données LiDAR issues d'un système hélicopté RIEGL VPX-1. **p. 119**

- Étudiant : BOUYER Ivan
- Structure d'accueil : Kadran, Saint-Sébastien-sur-Loire
- Correcteurs : FERHAT Gilbert, MACHER Hélène

## JURY 1

### (salle topographie, bâtiment C)

**Président de jury : FLACELIÈRE Bernard**

**8 h 30** | Mise en place d'un processus innovant de classification de nuages de points LiDAR aérien, permettant de répondre aux normes RTE<sup>9</sup>. **p. 123**

- Étudiant : NAEGELIN Yoan
- Structure d'accueil : Futurmap, Antananarivo (Madagascar)
- Correcteurs : KOEHL Mathieu, MACHER Hélène

**9 h 30** | Extraction sémantique et reconstruction 3D du bâti et de la végétation à partir de données LiDAR HD par modèle d'apprentissage. **p. 127**

- Étudiante : MARONI Fiona
- Structure d'accueil : OTE ingénierie, Illkirch-Graffenstaden
- Correcteur : KOEHL Mathieu

**10 h 30** | Extension du jeu d'apprentissage IA<sup>10</sup> Flair sur les thématiques agricoles et détection d'objets. **p. 131**

- Étudiant : JOSEPH Luca
- Structure d'accueil : IGN, Saint-Mandé
- Correcteur : KOEHL Mathieu

## JURY 2

### (salle topographie, bâtiment C)

**Présidente de jury : DUQUENNE Françoise**

**9 h 30** | Intégration de l'intelligence artificielle dans le processus *scan-to-BIM*: automatisation de la segmentation sémantique des nuages de points pour la reconstruction BIM. **p. 135**

- Étudiant : BOUDARBALA Saad (IRIV)
- Structure d'accueil : Futurmap, Lyon
- Correctrices : LANDES Tania, MACHER Hélène

**10 h 30** | DeepChoice: fusion multivues par *deep learning* pour la classification automatisée des nuages de points 3D. **p. 139**

- Étudiant : FRINDE Digre (IRIV)
- Structure d'accueil : HEIG-VD, Yverdon-les-Bains
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

## JURY 3

(salle C1.16, bâtiment C)

Président de jury : MOREL Laurent

**8 h 30** | Traitement *open source* de nuages de points diachroniques : application à l'auscultation de précision de falaises. **p. 143**

- Étudiante : COATANLEM Emeline
- Structure d'accueil : Cerema, Strasbourg
- Correcteur : GRUSSENMEYER Pierre

**9 h 30** | Développement des solutions de capteurs virtuels sur Ori système. **p. 147**

- Étudiante : DRAUSSIN Lara
- Structure d'accueil : Novatlas, Ivry-sur-Seine
- Correcteur : FERHAT Gilbert

**10 h 30** | Développement d'un outil basé sur l'intelligence artificielle pour le contrôle automatique du respect des règles de l'art par les géomètres-experts : application aux plans et procès-verbaux de bornage. **p. 151**

- Étudiant : MAGNEVILLE Louis
- Structure d'accueil : Dgema, Marseille
- Correcteur : ALBY Emmanuel

## PROJETS DE FIN D'ÉTUDES SOUTENUS LE 22/04/25

Architectes-ingénieurs  
Parcours topographie

| Automatisation de la modélisation 3D de galeries souterraines et de leurs équipements, à partir de levés lasergrammétiques. **p. 155**

- Étudiant : CARIAT Tom
- Structure d'accueil : Fugro geoid, Castries
- Correctrice : MACHER Hélène

| Mise en place de processus de modélisation de maquettes BIM orientées structure métallique, à partir de nuages de points. **p. 159**

- Étudiante : CLERC Apolline
- Structure d'accueil : Futurmap, Lyon
- Correcteurs : ALBY Emmanuel, LANDES Tania

| Réalisation du jumeau numérique d'un groupe scolaire pour préconiser des usages économes et des bouquets de travaux de rénovation. **p. 163**

- Étudiant : STRAUMANN Lucas
- Structure d'accueil : Pôle Build and connect, Illkirch-Graffenstaden/Imag'ing, Lixhausen
- Correctrice : MACHER Hélène

| Développement d'un outil de calcul de l'exposition à la végétation en milieu urbain, par application de la règle 3-30-300. **p. 167**

- Étudiante : LEMONNIER Elodie
- Structure d'accueil : Virtual city systems, Berlin (Allemagne)
- Correcteur : KOEHL Mathieu

1. EDD : État descriptif de division

2. EDDV : État descriptif de division en volumes

3. BIM : *Building information modeling*

4. VRD : Voirie et réseaux divers

5. IFC : *Industry foundation classes*

6. LiDAR : *Light detection and ranging*

7. LGV : Ligne à grande vitesse

8. GNSS : *Global navigation satellite system*

9. RTE : Réseau de transport d'électricité

10. IA : Intelligence artificielle



## RÉSUMÉS DES PFE



# Vers une production automatisée des plans d'intérieur à partir de nuages de points. Application aux EDD et EDDV.

PFE présenté par : **Mathilde Fiore**  
Société d'accueil : **OPSIA**  
Directeur de PFE : **Mazen Ayoubi**  
Correctrices : **Hélène Macher – Tania Landes**  
Encadrant : **Freddy Kreiss**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

La démocratisation de la lasergrammétrie terrestre a radicalement transformé les pratiques de relevé architectural. Chez OPSIA, 100 % des relevés d'intérieurs sont désormais réalisés au scanner laser 3D, avec le Trimble X7 ou X9 pour les relevés statiques, et le NavVis VLX2 ou 3 pour les relevés mobiles. Ces outils permettent d'atteindre des précisions de l'ordre de 3 mm à 50 m et de couvrir jusqu'à 3 000 m<sup>2</sup> en une seule journée dans le cas des systèmes mobiles.

Cependant, malgré cette efficacité d'acquisition, la phase de traitement des données reste largement manuelle, longue et sujette à erreurs, notamment pour la production des documents fonciers tels que l'EDD (État Descriptif de Division) ou l'EDDV (en Volumes). Ce décalage constitue le point de départ de ce projet de fin d'études, dont l'objectif est d'optimiser cette chaîne de production, en particulier la phase de vectorisation graphique, par l'introduction de solutions semi-automatisées ou automatisées.

L'EDD est un document réglementaire fondamental dans les actes de copropriété. Il comprend notamment :

- une désignation précise de l'assiette et de l'immeuble ;
- l'identification, la numérotation et la désignation des lots ;
- le calcul des quotes-parts des parties communes ;
- les plans de répartition au 1/100<sup>e</sup> conformes aux réalités du terrain.

Chez OPSIA, la chaîne de production repose sur un processus bien établi, basé sur la vectorisation sous MicroStation à partir de tranches extraites du nuage de points consolidé. Ce traitement, bien qu'efficace, reste difficile à adapter à des flux de production importants. Il est également peu compatible avec l'évolution du métier vers des pratiques plus automatisées, notamment pour répondre aux attentes des clients en matière de délais.

Ce projet vise ainsi à explorer des outils logiciels permettant de limiter l'intervention humaine, particulièrement dans la phase de vectorisation des plans 2D et la constitution du dossier littéral d'EDD.

## 2. Revue des approches et sélection des outils

La littérature spécialisée souligne que le nuage de points est une donnée brute, non structurée, difficilement exploitable sans traitement intermédiaire (Landes, 2020). Des méthodes de segmentation (Grilli et al., 2017 ; Macher et al., 2015) sont couramment utilisées pour structurer ces données, qu'il s'agisse d'analyses géométriques, de détection de plans, ou d'apprentissage automatique.

Cependant, la tendance récente va dans le sens d'un allègement, voire d'un contournement, de ces étapes. D'après Rocha et al. (2024), 64,5 % des professionnels ne segmentent plus les nuages par élément, 48,9 % ne les segmentent pas par étage, et 22 % ne procèdent à aucun nettoyage préalable.

Cette évolution vers des *workflows* directs, centrés sur la productivité, a motivé la décision d'exclure les traitements de segmentation et de classification dans le cadre de ce projet.

L'étude bibliographique a permis d'identifier deux grandes familles d'approches. D'une part, les méthodes dites scan-to-plan, orientées 2D (vectorisation sur ortho-images ou tranches horizontales du nuage de points). D'autre part, les méthodes dites scan-to-BIM, orientées 3D, centrées sur la reconstruction d'objets paramétriques dans des logiciels comme Revit.

Les critères de sélection des outils testés ont été :

- leurs **performances** : gérer des jeux de données volumineux et être assez polyvalent ;
- leur **accessibilité** et **ergonomie** : disposer d'une interface conviviale et de documentation ;
- leur **compatibilité** : s'intégrer dans un *workflow* tenant compte des moyens de l'entreprise ;
- leur **flexibilité** et  **pérennité** : présenter un support stable avec une évolutivité maîtrisée ;
- leur **coût**.

	PERFORMANCES	ACCESSIBILITÉ	COMPATIBILITÉ	FLEXIBILITÉ	COÛT annuel HT
PointCab	++	+++	+++	+	5 580,00 €
PointCloudWIZ (plugin AutoCAD)	+++	+++	+	++	600,00 €
Cloud2BIM (pipeline open source) [Zbrovský et al. 2025]	+	+	+++	++	0,00 €
Scripts Dynamo (Revit) [Rocha et al. 2024]	++	++	+	++	2 735,00 €
As-Built (plugin Revit)	+++	+++	+	+	1 975,00 €

Tab. 1 : Comparatif et choix des logiciels

Trois outils ont ainsi été retenus :

- **PointCab Origins 3D** : génération d'ortho-images et vectorisation automatisée sur plan 2D ;
- **PointCloudWIZ** : plugin AutoCAD développé par GEOSPACE, permettant une vectorisation semi-automatique via des tranches dynamiques dans le nuage de points ;
- **As-Built for Revit** : plugin FARO pour modélisation 3D semi-automatique, intégré à Revit.

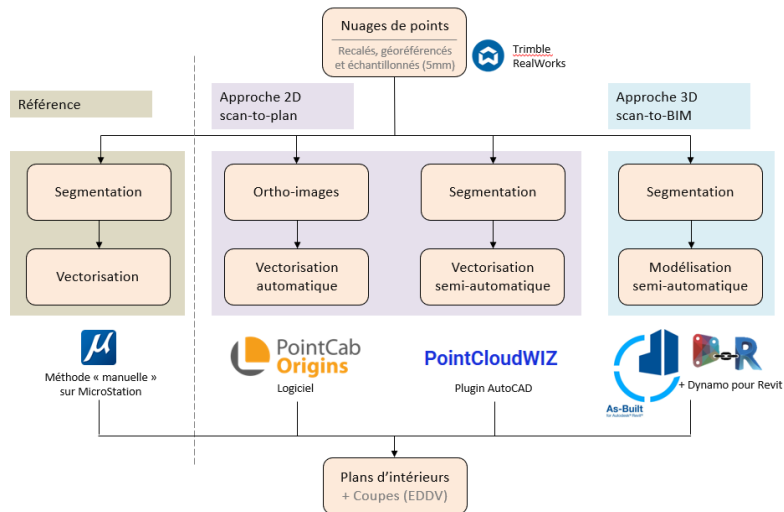


Fig. 1 : Outils retenus pour la phase d'expérimentation

### 3. Expérimentation

#### Protocole

Un dossier test a été sélectionné : un bâtiment à mettre en copropriété, scanné avec un Trimble X9 (121 stations), générant un nuage consolidé d'environ 9 Go, géoréférencé sous RealWorks avec une erreur moyenne de recalage de 0,6 mm. Chaque solution a été utilisée pour produire les plans de ce bâtiment, puis comparée au workflow de référence OPSIA et au nuage de points afin d'évaluer la fidélité géométrique des plans obtenus.

#### Résultats

L'expérimentation a permis de mettre en évidence les forces et les limites spécifiques à chacun des trois outils testés, aussi bien en termes de productivité que de qualité des livrables.

PointCab, tout d'abord, s'est révélé simple à prendre en main, avec une interface intuitive et agréable. L'outil permet de générer rapidement des ortho-images horizontales à des hauteurs prédéfinies, sur lesquelles une vectorisation automatique peut être lancée. Cependant, cette solution s'est avérée limitée en termes de paramétrisation de la vectorisation proposée, notamment concernant les contraintes de parallélisme des murs. Par ailleurs, elle ne permet pas de filtrer efficacement le mobilier ou les objets encombrants présents dans le nuage. Les plans générés nécessitent donc de nombreuses reprises manuelles pour obtenir le livrable, ce qui réduit fortement l'intérêt d'une vectorisation automatisée. De plus, le coût de la licence, relativement élevé, rend cet outil peu adapté à un usage ponctuel ou ciblé.

PointCloudWIZ, intégré à AutoCAD, a offert des résultats nettement plus convaincants. La manipulation est fluide, les tranches dynamiques facilement paramétrables, et l'environnement de travail – directement dans AutoCAD – est familier. L'outil permet de tracer les éléments en suivant précisément les contours de pièces dans les tranches extraites du nuage de points, avec une paramétrisation possible en fonction de la qualité du nuage de points (plus ou moins bruité) et des tolérances définies (angulaires et linéaires). Il représente une solution robuste et productive pour la vectorisation. La principale réserve concerne le fait que le plugin repose exclusivement sur l'import de fichiers au format RCP (ReCap), ce qui peut poser des problèmes d'interopérabilité.

Enfin, As-Built for Revit propose une approche semi-automatique de modélisation 3D qui s'intègre pleinement dans un environnement BIM. Le plugin permet la détection semi-automatique de murs, de planchers, de plafonds et d'ouvertures, à partir du nuage de points préparé, c'est-à-dire le jeu de données 3D allégé et filtré, et mieux organisé pour une modélisation directe en 3D dans Revit. L'outil s'est montré particulièrement performant dans les zones géométriquement simples et peu encombrées. En revanche, dans les pièces plus complexes, fortement encombrées ou irrégulières, la détection devient plus incertaine, et des ajustements manuels restent nécessaires. L'un des grands atouts d'As-Built réside dans sa capacité à produire des vues 3D ou des coupes supplémentaires très facilement, ce qui en fait une solution particulièrement intéressante dans le cadre des EDDV, où la représentation spatiale des volumes prend une importance particulière.

#### Post-traitement et intégration des livrables

Les fichiers DWG produits par les différentes solutions ont été harmonisés via une routine FME permettant de préparer les données pour le module "copropriété" de GeoGexFR. Ce dernier a ensuite permis d'automatiser la désignation des lots et le calcul des tantièmes de copropriété, enrichissant considérablement la partie descriptive du dossier EDD.

## 4. Conclusion et perspectives

L'approche testée, fondée sur l'exploitation directe du nuage de points consolidé sans recourir à des prétraitements (segmentation et classification), a permis d'atteindre un compromis efficace entre gain de temps et qualité des livrables. Les outils expérimentés se sont révélés complémentaires : PointCloudWIZ s'impose comme une solution immédiatement opérationnelle pour la vectorisation 2D, tandis qu'As-Built for Revit ouvre des perspectives intéressantes en 3D, notamment pour les cas complexes de type EDDV.

Les résultats obtenus montrent une réduction significative du temps de traitement, avec un écart de surface moyen de seulement 0,3 % par rapport à la méthode manuelle, ce qui reste largement dans les tolérances admises pour les applications foncières. Le traitement automatisé du volet littéral de l'EDD via GeoGexFR a également montré un fort potentiel de normalisation et de gain de temps.

Pour une lecture plus détaillée des résultats, notamment l'analyse des écarts géométriques et le bilan comparatif complet des méthodes testées, le lecteur est invité à consulter le mémoire complet ou à assister à la soutenance de ce projet.

## Bibliographie

Grilli, E., Menna, F., Remondino, F. (2017). A REVIEW OF POINT CLOUDS SEGMENTATION AND CLASSIFICATION ALGORITHMS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* Vol. XLII-2/W3, pp339–344. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-339-2017>

Landes, T. (2020). Contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points. Habilitation à diriger les recherches - Université de Strasbourg.

Macher, H. (2017). Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment: reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants. Thèse pour obtenir le grade de docteur délivré par l'Université de Strasbourg.

Rocha, G., Mateus, L., 2024. Using Dynamo for Automatic Reconstruction of BIM Elements from Point Clouds. *Applied Sciences*. Vol. 14, No. 10, p4078. <https://doi.org/10.3390/app14104078>

Zbirovský, S., Nežerka, V. (2025). Cloud2BIM: An open-source automatic pipeline for efficient conversion of large-scale point clouds into IFC format. Preprint submitted to *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11498>

# Intégration d'outils automatiques ou semi-automatiques pour la vectorisation et le calcul de surface à partir d'un nuage de points 3D.



*PFE présenté par :* **Aurore BRILLAC**  
*Société d'accueil :* **Cabinet Siragusa**  
*Directeur de PFE :* **Nicolas MIDONNET**  
*Correcteur :* **Emmanuel ALBY**  
*Encadrant :* **Victor ALTEIRAC**



---

## 1. Définition et objectifs de l'étude

L'évolution des technologies a progressivement transformé les outils utilisés par les géomètres-experts. Les premiers relevés étaient réalisés à l'aide de théodolites, qui ont été remplacés par les stations totales. Dès les années 1960, l'introduction de la technologie laser a marqué un tournant majeur. Ces innovations apportent un avantage considérable en permettant une collecte de données rapide et efficace. Toutefois, elles compliquent également le traitement des nuages de points, en raison du volume important des données générées, nécessitant des processeurs puissants et une grande capacité de ressources informatiques. Lorsqu'un levé est effectué à l'aide d'un scanner 3D, les données collectées sont généralement très volumineuses, ce qui entraîne une augmentation significative du temps de traitement. Cette contrainte représente un défi de taille pour les entreprises utilisant ce type de technologie, car la gestion et l'analyse de telles données requièrent des ressources informatiques conséquentes, notamment un processeur puissant et une grande capacité de mémoire vive (RAM) pour assurer le traitement efficace des nuages de points.

L'objectif de ce PFE est de proposer un programme utile à l'entreprise, capable de faciliter le traitement des nuages de points et de faire gagner du temps lors des relevés d'intérieur. À l'aide du langage de programmation Python, nous allons réaliser une vectorisation d'un nuage de points issu d'un relevé d'intérieur puis effectuer un calcul de surface pour chaque pièce présente dans ce relevé.

La notion de surface pour les Géomètres-Experts est essentielle, car elle permet de réaliser des missions variées comme les missions foncières, juridiques et techniques. Leur expertise pour les copropriétés, les divisions en volume et les surfaces de ventes va permettre de connaître le type du bien et sa valeur, mais aussi les droits et les obligations des parties. Il est donc important de connaître et de maîtriser ces notions au moment des missions de calcul de surface. De plus, la loi Carrez requiert, lors de la vente de lots en copropriété, l'indication exacte de la surface privative du bien, calculée selon des critères définis. Cette obligation souligne l'importance d'une acquisition et d'un traitement rigoureux des données provenant des relevés d'intérieurs.

## 2. Étude bibliographique

La lasergrammétrie terrestre est devenue une méthode incontournable pour la modélisation 3D précise des environnements bâtis ou naturels. Grâce aux scanners laser (LiDAR), elle permet de capturer des millions de points avec une précision millimétrique en quelques minutes. On distingue principalement trois types de scanners : à impulsions (portée jusqu'à 2 km), à différence de phase (80 à 150 m, adaptés aux relevés intérieurs), et hybrides qui vont combiner les deux méthodes précédentes. Des systèmes dynamiques embarqués (véhicules, sacs à dos...) permettent aussi d'accélérer les relevés avec une précision généralement comprise entre 2 et 5 cm, suffisante pour de nombreuses applications architecturales ou topographiques.

Le traitement des nuages de points repose sur des techniques de segmentation et de reconnaissance de forme.

L'algorithme de RANSAC (*Random Sample Consensus*), illustré en Figure 1, est la méthode la plus utilisée pour détecter des primitives géométriques dans des données bruitées. Il ajuste de façon itérative des modèles à partir d'échantillons aléatoires et sélectionne celui comportant le plus d'*inliers*.

En parallèle, la transformée de Hough, qu'on peut appliquer en 2D ou en 3D, est particulièrement efficace pour détecter des structures rectilignes dans des environnements simples et bien ordonnés (Figure 2).

Elle repose sur la détection d'alignements dans l'espace paramétrique. Toutefois, comme le souligne Barçon (2021), ses performances diminuent lorsque les géométries deviennent complexes et irrégulières rendant l'algorithme moins pertinent dans des scènes réelles hétérogènes.

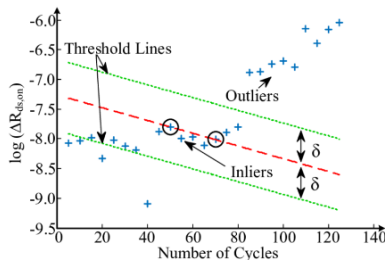


Figure 1: Illustration de l'algorithme de RANSAC [Heydarzadeh et al., (2017)]

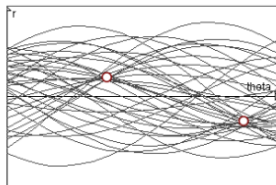
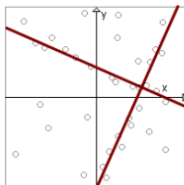


Figure 2: Principe des transformées de Hough appliqué à la détection de lignes en 2D [Hullo, (2013)]

La croissance de région est une méthode couramment utilisée pour segmenter des zones homogènes du nuage de points, comme les murs, sols ou plafonds. Bien qu'efficace, elle reste coûteuse en temps de calcul et nécessite un réglage précis. En amont de la vectorisation ou de la modélisation, une classification du nuage est indispensable pour identifier les

différentes composantes du site. Elle peut reposer sur des approches supervisées (*Random Forest*, réseaux de neurones) offrant une grande précision, ou non supervisées (*k-means*, DBSCAN), plus rapides mais parfois moins fiables. Les progrès récents en machine learning ont permis d'atteindre une précision de classification supérieure à 94% (Mouko, 2024).

Pour la génération automatique de plans 2D, les méthodes combinent RANSAC, contraintes géométriques (parallélisme, alignement), fusion et prolongement des segments détectés. L'algorithme de Douglas-Peucker et ses variantes permettent de simplifier les contours tout en maintenant leur précision. Des outils comme CloudCompare (via le plugin qRansacSD) facilitent ces traitements. D'autres approches, comme l'utilisation d'alpha-formes (Aitelkadi et al., 2015), permettent l'extraction de formes complexes.

Enfin, des travaux récents (Kong et al., 2023 ; Kobena, 2023) proposent des pipelines rapides et robustes mêlant RANSAC, croissance de région et clustering spatial (regroupement automatique des points, segments proches dans l'espace), atteignant des performances élevées (IoU > 98 %) en moins d'une minute pour la vectorisation automatique des murs, notamment sur les structures orthogonales.

### 3. Base de données et procédé élaboré

Dans l'entreprise Siragusa, les relevés intérieurs sont réalisés avec le scanner 3D Leica RTC360, couplé au logiciel Cyclone FIELD 360 pour un préassemblage sur le terrain via la tablette. Le système de coordonnées est généralement local pour un plan d'intérieur, mais un géoréférencement est possible à l'aide de cibles relevées dans un second temps avec le tachéomètre et du GPS. Une fois au bureau, les données sont importées dans Cyclone Register 360 pour vérification, amélioration de l'assemblage et intégration éventuelle d'un géoréférencement. Les nuages de points sont le plus souvent exportés au format « .las » ou « .lgs » pour une interopérabilité avec Cyclone 3DR. Dans ce projet, seuls les éléments structurels (murs, sol et plafond) sont conservés via la classification fournie par Register 360.

### 3.1 – Calcul de surface d'un nuage de points 3D

Nous pouvons segmenter automatiquement les pièces d'un bâtiment à partir d'un nuage de points 3D acquis par scanner laser terrestre, au format « .las ». Le fichier est chargé via une interface (Tkinter), puis les coordonnées (X, Y, Z) sont extraites et échantillonnées avec un voxel de 0,005 m afin de réduire la densité sans perdre la structure générale.



Figure 3: Calcul de surface d'un appartement obtenu avec un scanner laser

Un histogramme des hauteurs permet à l'utilisateur de sélectionner les seuils correspondant au sol et au plafond. Les points situés entre ces seuils sont projetés au sol (plan XY) et regroupés dans une grille de 3 cm, formant une image binaire de l'occupation intérieure.

Une analyse d'étiquetage identifie les régions connectées, représentant les différentes pièces. Les zones trop petites sont supprimées, et une dilatation va permettre de combler les discontinuités. Chaque région reçoit un identifiant unique qui sera ensuite reprojété sur le nuage 3D pour affecter chaque point à une pièce.

La hauteur sous plafond de chaque pièce est estimée à partir de pourcentages des altitudes (nous ne prenons pas en compte que les 2 % des points les plus bas et plus hauts), pour éliminer les valeurs aberrantes. Enfin, la surface au sol de chaque pièce est calculée à partir de son empreinte, en utilisant une enveloppe concave avec la fonction alphashape comme nous pouvons le constater sur la Figure 3.

### 3.2 – Vectorisation des murs dans un nuage de points 3D

Le processus débute par une interface utilisateur permettant de sélectionner un fichier « .las » via une boîte de dialogue. Une fois le fichier choisi, le nuage de points est chargé en mémoire. Dès ce stade, un filtrage par classes est appliqué : seuls les points appartenant aux classes pertinentes pour la reconstruction du plan sont conservés. Dans le cas présent, il s'agit principalement des murs et du plafond, ces éléments étant essentiels pour la délimitation spatiale des pièces.

Une analyse statistique verticale est effectuée, la hauteur moyenne du plafond est estimée à partir des points de la classe plafond, ce qui permet de définir une plage de coupe horizontale centrée autour de cette hauteur. Une bande de  $\pm 0,20$  m autour de cette hauteur moyenne est extraite. Ce filtrage permet d'éliminer les éléments situés en dehors de la zone utile, comme les objets au sol ou les éléments de toiture.

Les points issus de cette coupe sont ensuite projetés sur le plan XY. Cette projection 2D est rasterisée avec une résolution de 7 mm. L'orthophoto va servir non seulement de base pour les analyses visuelles et géométriques, mais aussi comme fond de plan dans le fichier DXF final.

À partir de l'image binaire, les contours muraux sont extraits à l'aide de la transformée de Hough (détection de droites dans les images numériques). Cette méthode détecte les segments droits présents dans l'image en analysant la distribution locale des pixels, ce qui est particulièrement efficace pour extraire les formes linéaires caractéristiques des murs. Une fois les segments détectés, un filtrage géométrique est appliqué. Les critères utilisés incluent notamment la longueur minimale, pour ignorer les traits trop courts, ainsi que l'orientation, permettant

de ne conserver que les lignes alignées avec les directions architecturales dominantes. Cette étape améliore considérablement la clarté du plan vectoriel final en supprimant les artefacts parasites et en renforçant la structure géométrique du bâtiment. Les lignes conservées sont ensuite soumises à un processus de fusion. L'objectif est de regrouper les segments proches et quasi parallèles en une seule entité géométrique. Pour cela, des tests de proximité spatiale et d'angle sont réalisés.

Vient ensuite une étape clé du processus : le prolongement automatique des lignes. Chaque segment est étendu dans ses deux directions de manière perpendiculaire, à la recherche de possibles intersections avec d'autres segments voisins. Ce prolongement est contraint par un seuil d'angle ( $\leq 10^\circ$ ) afin de maintenir une cohérence géométrique. Une fois l'ensemble des lignes traitées, une représentation finale vectorielle du plan est générée (Figure 4). Pour en faciliter la lecture et l'interprétation (en cas d'ambiguïtés dans la vectorisation), l'orthophoto est insérée dans le fichier DXF produit, en tant qu'image. L'insertion respecte l'orientation du nuage de points, garantissant une superposition entre les éléments vectorisés et l'image d'arrière-plan.



Figure 4: Vectorisation des murs d'un appartement

## 4. Conclusion et perspectives

Ce PFE constitue une première étape vers la vectorisation automatisée d'un appartement et le calcul de surface pièce par pièce. Il a montré l'efficacité d'une chaîne de traitements à partir d'un nuage de points 3D pour générer un plan d'intérieur au format « .dwg ». Grâce à un ensemble de méthodes – filtrage, coupe horizontale, rasterisation, détection et fusion de segments – une partie des structures murales a pu être extraite, amorçant la fermeture des contours. L'insertion d'une orthophoto géoréférencée dans le fichier .dxf améliore la lisibilité et l'alignement du plan vectorisé.

Une suite logique consisterait à exporter chaque pièce sous forme de polygone fermé, enrichi d'attributs (surface, hauteur sous plafond), dans un format structuré tel que .dwg, en vue d'une intégration directe dans des logiciels de CAO ou de modélisation BIM tels qu'AutoCAD ou Revit.

Malgré les résultats positifs en matière d'extraction et de vectorisation des murs, un des principaux défis reste la fermeture complète et robuste des contours. Les prolongements de segments améliorent la connectivité et, lorsque les segments prolongés se rencontrent, cela crée automatiquement une polygône fermée. Cependant, cette méthode ne garantit pas encore la fermeture automatique des polygones fermés dans tous les cas.

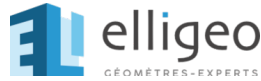
## 5. Références

- AITELKADI, K. (2015), 'Extraction des éléments de façade de bâtiments patrimoniaux à partir de données issues de scanner laser terrestre.', *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* pp. 39–49.
- BARÇON, E. (2021), 'Détection et vectorisation automatique d'objets linéaires dans des nuages de points de voirie.', *Revue XYZ N°167- 2ème trimestre 2021* pp. 55–60.
- KOBENA, M.-E. (2024), 'Du cadre juridique de la prise de mesure au scanner 3d à l'automatisation de la production de plans 2d sur nuage de points au sein d'un cabinet de géomètre-expert.'
- KONG, Q., LIAO, L. & YUAN, C. (2023), 'Rapid generation of editable engineering drawings from 3d point cloud reconstruction for large-scale buildings.', *Journal of Building Engineering* 63 p. 105486.
- MOUKO, A., (2024). *Détection d'objets 3D par intelligence artificielle sur nuages de points pour un suivi d'ouvrages de protection côtières*. Mémoire pour le diplôme d'ingénieur CNAM. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04806503v1>

# Automatisation du processus de dessin de plans de façades à partir de nuages de points et d'orthoimages : vers une digitalisation intelligente



PFE présenté par : **Arthur Lacroix**  
Société d'accueil : **Elligeo**  
Directeur de PFE : **Vincent Frey**  
Correctrice : **Hélène Macher**  
Encadrante : **Julie Thierry Legrand**



## 1. Contexte et objectifs

L'établissement de plans de façades, notamment à destination des architectes et maîtres d'œuvre, figure aujourd'hui parmi les prestations standards d'un cabinet de géomètre-expert. Le protocole couramment employé repose sur l'acquisition conjointe, via scanner laser terrestre, d'un nuage de points 3D et d'images sphériques permettant sa colorisation. À partir de ces données, des orthoimages sont générées, puis utilisées comme fond de plan sur lequel l'opérateur vient dessiner manuellement, ligne par ligne, les éléments de la façade (murs, ouvertures, corniches, etc.) à l'aide d'un logiciel de DAO<sup>1</sup>. Si le scanner laser terrestre permet un relevé exhaustif et rapide de la façade, le dessin vectoriel reste une tâche manuelle répétitive et chronophage.

C'est de ce déséquilibre entre acquisition rapide et traitement lent qu'émerge le potentiel de ce projet de fin d'études pour l'entreprise. Mais, bien du constat, « ce qui est répétitif est, par nature, automatisable », que ressort la problématique : comment automatiser le processus de dessin de plans de façades à partir des données acquises au scanner laser statique ?

Les principaux défis résident dans l'hétérogénéité des façades en termes de complexité architecturale, de dimensions, de formes ou de compositions, ainsi que dans la gestion des occlusions et formes géométriques irrégulières. Cette diversité rend l'automatisation complète difficilement généralisable : certaines opérations relèvent de choix de représentation du dessinateur, en particulier lorsqu'il s'agit de simplifier des éléments.

Ainsi, il s'agira à partir d'un nuage de points acquis au scanner laser terrestre, et des orthoimages associées, de générer, de manière semi-automatique, c'est-à-dire avec des retours de l'utilisateur, un plan de façade dans un format standard d'échange dwg/dxf. Ce plan devra être produit de la manière la plus fidèle, détaillée et géométriquement correcte.

La méthodologie retenue décompose le processus de dessin en quatre phases successives (Voir Fig. 1) reflétant les étapes manuelles réalisées : classification, segmentation, extraction de contours, vectorisation.

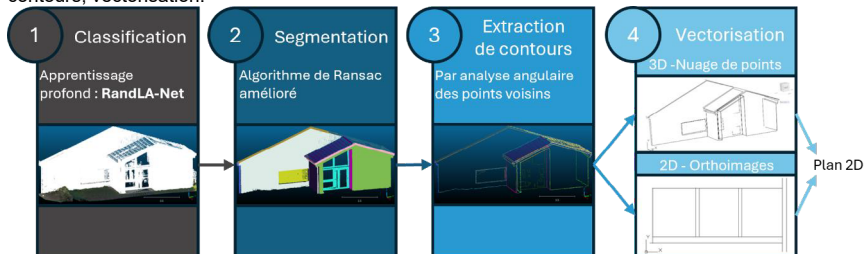


Fig 1 : Etapes principales du processus de génération semi-automatique de plans de façade

<sup>1</sup> Dessin Assisté par Ordinateur

## 2. Méthodologie de traitement

### 2.1 Classification du nuage de points

La classification vise à isoler la classe « bâtiment » dans le nuage de points original (Voir Fig. 2) : pour cela, nous avons choisi RandLA-Net, un modèle de segmentation sémantique de nuages de points par apprentissage profond. Il est destiné à des nuages de points à grande échelle, ce qui le rend efficace et peu gourmand en mémoire. Implémenté sous TensorFlow<sup>2</sup> (Abadi et al., 2016) et pré-entraîné sur Semantic3D (Hackel et al., 2017), le réseau atteint un IoU<sup>3</sup> de 95,7 % sur la classe « bâtiment » de ce jeu de données couvrant un large éventail de scènes urbaines (églises, rues, places, châteaux, etc.) et offrant des façades variées. En post-traitement, un algorithme combinant RANSAC (Fischler et al., 1981) et une croissance de région restreinte aux normales est appliqué pour réaffecter aux bâtiments les points mal classés : on détecte d'abord les plans verticaux dominants, puis on propage l'étiquette « bâtiment » aux voisins candidats (Résultat en Fig. 3).



Fig. 2 : Nuage de points brut



Fig. 3 : Résultat de la classification - Classe « bâtiment » représentée en blanc

### 2.2 Segmentation du nuage de points

La structure d'une façade par sa nature artificielle, structurée et répétitive peut être modélisée comme un assemblage d'éléments géométriques réguliers, tels que des plans, des cylindres, des sphères ou des cônes. La segmentation par reconnaissance de formes s'appuie sur ce principe : l'algorithme RANSAC sélectionne itérativement un sous-échantillon minimal de points pour estimer un modèle de plan robuste dans des données bruitées, puis retient tous les points dont la distance au plan reste inférieure à un seuil défini avant de choisir la solution offrant le plus grand consensus. Les points ainsi identifiés sont ensuite regroupés par densité via DBSCAN (Ester et al., 1996) afin de distinguer plusieurs plans coplanaires issus d'une même hypothèse. Avant de passer à l'itération suivante, un module de fusion interactif présente ensuite les surfaces proches et de même orientation à l'utilisateur, qui peut décider de les fusionner ou de les maintenir distinctes, bénéficiant ainsi de l'expertise de l'utilisateur pour garantir une segmentation cohérente et sans redondance. Cette procédure se répète jusqu'à épuisement des plans ou jusqu'à atteinte d'un nombre maximal de surfaces extraites. Cette détection est illustrée en Fig. 4 & Fig. 5.



Fig. 4 : Résultat de la segmentation - Une couleur aléatoire par plan



Fig. 5 : Visualisation en couleurs réalistes du résultat de segmentation

### 2.3 Extraction de contours

Dans un plan de façade, seules les arêtes et ruptures de surfaces sont représentées, celles-ci correspondent aux bords des plans détectés, ce qui fait de l'identification précise des contours un enjeu important. Pour cela, (Su et al., 2021) ont implémenté un algorithme en analysant localement la géométrie autour de chaque point dans un nuage 3D. Pour chaque point, la normale locale est calculée à partir de ses voisins, lesquels sont projetés sur le plan tangent défini par cette normale. Dans ce plan, les angles formés par



Fig. 6 : Visualisation du résultat d'extraction des points de contours

<sup>2</sup> TensorFlow est une bibliothèque logicielle open-source pour le calcul numérique et le machine learning.

<sup>3</sup> IoU (Intersection over Union) : métrique pour évaluer la qualité d'une segmentation. Elle se calcule comme le rapport de la surface d'intersection entre la prédiction et la vérité-terrain sur la surface de leur union, et varie de 0 (pas de recouvrement) à 1 (recouvrement parfait).

les vecteurs reliant le point central à chacun de ses voisins sont évalués : si l'écart angulaire maximal dépasse un seuil prédéfini, le point est classé comme contour, sinon comme point d'intérieur. Pour déterminer ce seuil, on compile l'ensemble des angles maximaux dans un histogramme. La valeur de  $\pi/2$  retenue empiriquement, offre un bon compromis entre sensibilité aux véritables arêtes et rejet des points intérieurs que ce soit pour les détails (gouttières, fenêtres, etc.) ou les éléments plus importants (Résultat en Fig. 6).

## 2.4 Vectorisation

À ce stade, seuls les points d'intérêt sont conservés et les autres supprimés, sans qu'aucune transformation géométrique n'ait été appliquée au nuage. Si la précision du plan final paraît reposer exclusivement sur la vectorisation, c'est-à-dire la conversion des données discrètes (images raster ou nuages de points 3D) en entités géométriques (points, lignes et polygones), la qualité des contours issus des prétraitements reste déterminante, car des contours denses, nets et débarrassés du bruit conditionnent directement la fidélité des vecteurs générés.

### 2.4.1 Approche basée sur les nuages de points

La vectorisation à partir de nuages de points s'articule en trois phases. La première consiste à extraire les nœuds, c'est-à-dire les points caractéristiques se trouvant au croisement de deux contours ou un changement marqué de direction. La seconde porte ensuite sur l'extraction des segments par un algorithme RANSAC itératif : à chaque étape, RANSAC identifie dans l'espace 3D les points alignés selon un modèle de droite, puis DBSCAN sépare les sous-ensembles distincts. Un segment est ensuite ajusté à chacun de ces ensembles et les points nouvellement vectorisés sont éliminés avant de passer à l'itération suivante. Enfin, les segments colinéaires et proches sont fusionnés et les nœuds adjacents sont mis en correspondance avec les segments voisins, en tenant compte des intersections projetées (Voir résultat en Fig. 7).

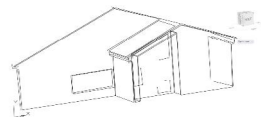


Fig. 7 : Visualisation Autocad des contours vectorisés

### 2.4.2 Approche basée sur les Orthoimages

Chaque orthoimage est prétraitée par un flou gaussien, qui recalcule chaque pixel comme la moyenne de ses voisins pour réduire le bruit et uniformiser les contrastes tout en gardant les contours nets. Puis, les contours sont extraits via l'opérateur de Canny (Canny, 1986). La transformée de Hough probabiliste (Kiryati et al., 1991) détecte ensuite les segments linéaires caractéristiques. Enfin, le post-traitement inclut la fusion des segments colinéaires, le prolongement de leurs extrémités vers les intersections projetées et le raccordement des fragments dans des tolérances angulaires et spatiales, aboutissant à un tracé vectoriel continu exploitable en DAO.



Fig. 8 : Orthoimage de la fenêtre du bâtiment

Cependant, appliqués à l'ensemble d'une façade, ces traitements ne donnent pas de résultats satisfaisants : la scène est trop vaste, avec des éléments fortement marqués et des détails variés (reliefs, ornements, ombres), ce qui rend difficile le choix des paramètres. Néanmoins, la segmentation du nuage de points par plans permet d'isoler l'emprise de chaque fenêtre et d'en extraire les contours. À partir de ces délimitations, une orthoimage localisée peut être générée (Voir Fig. 8).



Fig. 9 : Visualisation Autocad des contours vectorisés

De plus, en ajoutant un traitement par intensité sur le nuage de points, il devient possible de filtrer les surfaces vitrées pour ne conserver que les cadres de fenêtres : renforçant ainsi le contraste entre huisseries et vitrage et facilite l'extraction précise des arêtes. Le résultat est visible en Fig. 9.

### 3. Analyse des résultats

#### 3.1 Approche qualitative

L'évaluation qualitative repose sur l'analyse visuelle des résultats produits par l'algorithme, cette méthode, bien que subjective, reste incontournable, l'œil entraîné de l'opérateur détecte immédiatement les incohérences et oublis. Elle comprend :

- la cohérence géométrique des objets détectés (rectitude, longueur des arêtes, alignements)
- la validité topologique (fermeture des polygones, absence de croisements ou segments indésirables)
- la cohérence de segmentation et de la classification

Dans cette approche semi-automatique, elle est particulièrement importante. L'utilisateur est amené à modifier dynamiquement des seuils et critères pour améliorer les résultats, ou valider des étapes de fusion de plans et segments. L'évaluation se fait donc en temps réel.

#### 3.2 Approche quantitative

L'évaluation quantitative, plus objective, associe une donnée chiffrée à l'analyse visuelle en comparant ses résultats à la vérité terrain. Elle repose sur la construction d'une matrice de confusion et le calcul d'indicateurs pour la classification. Pour la vectorisation, la comparaison avec le plan livré au client permettra d'établir des écarts métriques sur des éléments de références. Notamment, l'intersection entre polygones, la longueur des segments et les écarts en position entre sommets. Le temps de réalisation d'un plan définitif livrable au client est également un élément intéressant à comparer pour l'entreprise. L'auteur vous invite à venir assister à sa soutenance pour vous présenter ses résultats définitifs.

### 4. Conclusion

Pour conclure, ce projet d'étude s'ancre dans le concret répondant aux besoins réels d'un cabinet de géomètre-expert, et plus largement de l'ensemble de la profession, qui partage les mêmes méthodes pour la production de plans de façades.

L'un de ces points forts est de proposer une chaîne de traitement complète, allant du nuage de points assemblé et des orthoimages jusqu'à la production d'un plan vectoriel structuré, contrairement à la plupart des travaux, qui se concentrent uniquement sur la segmentation ou la classification.

Le programme ne permet certes pas en un seul clic de réaliser un plan de façade de qualité suffisante pour être livré directement au client, mais l'objectif reste de faire gagner du temps à l'utilisateur. En ce sens, il permet d'exporter un fichier DXF structuré en calques avec pour chaque plans, le nuage de points de contours et vecteurs superposés, de sorte que seules quelques retouches et une mise en page deviennent nécessaires pour obtenir un plan exploitable.

### 5. Bibliographie

- [Abadi et al., 2016] Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., ... & Zheng, X. (2016). TensorFlow: a system for Large-Scale machine learning. In 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '16) (pp. 265–283).
- [Canny, 1986] Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6), 679–698.
- [Ester et al., 1996] Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., & Xu, X. (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '96) (pp. 226–231). AAAI Press.
- [Fischler et al., 1981] Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, 24(6), 381–395
- [Hackel et al., 2017] Hackel, T., Savinov, N., Ladicky, L., Wegner, J. D., Schindler, K., & Pollefeys, M. (2017). Semantic3D.net: A new large-scale point cloud classification benchmark. arXiv preprint arXiv:1704.03847.
- [Hu et al., 2020] Hu, Q., Yang, B., Xie, L., Rosa, S., Guo, Y., Wang, Z., ... & Markham, A. (2020). RandLA-Net: Efficient semantic segmentation of large-scale point clouds. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 11108–11117).
- [Kiryati et al., 1991] Kiryati, N., Eldar, Y., & Bruckstein, A. M. (1991). A probabilistic Hough transform. Pattern Recognition, 24(4), 303–316.
- [Su et al., 2021] Su, Z.; Gao, Z.; Zhou, G.; Li, S.; Song, L.; Lu, X.; Kang, N. Building Plane Segmentation Based on Point Clouds. Remote Sens. 2021, 14, 95.

# Optimisation de la chaîne de traitement de l'acquisition de nuages de points par scanner laser statique à la production de plans 2D de bâtiments

*PFE présenté par :* **Simon Béranger**  
*Société d'accueil :* **Küpfer Géomètres SA**  
*Directrice de PFE :* **Rachel Aure**  
*Correcteur :* **Emmanuel Alby**  
*Encadrante :* **Rachel Aure**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'évolution rapide des technologies de numérisation 3D dans les domaines de la construction, de l'architecture et de la gestion du patrimoine a profondément transformé les pratiques professionnelles. Dans ce contexte, les entreprises spécialisées dans la mesure et la représentation du bâti sont de plus en plus sollicitées pour fournir des documents précis, fiables et standardisés. Le recours au scanner laser terrestre, en particulier, permet aujourd'hui d'acquérir des données tridimensionnelles d'une grande précision, offrant une base solide pour produire divers types de livrables techniques. Encore faut-il que les chaînes de traitement de ces données soient maîtrisées, homogènes et efficaces, afin de répondre aux exigences des clients.

L'étude présentée dans le cadre de ce projet de fin d'études s'inscrit dans une problématique concrète rencontrée par l'entreprise Küpfer Géomètres SA, basée à Genève. Depuis plusieurs années, cette entreprise fait face à une demande croissante de prestations liées à la modélisation du bâti existant. Ces demandes concernent notamment la réalisation d'états des lieux de bâtiments anciens ou en cours de réhabilitation, la production de plans de base destinés à des projets de construction ou d'extension, ainsi que la constitution de dossiers de mise en propriété par étage (PPE). Dans tous ces cas, la précision des relevés, la clarté des livrables et la rapidité d'exécution sont des attentes essentielles de la part des clients et des partenaires du bureau.

Pour répondre à ces enjeux, il est apparu nécessaire de mettre en place une méthodologie claire et reproductible, capable d'encadrer l'ensemble des étapes allant du relevé 3D sur le terrain jusqu'à la livraison de plans 2D exploitables. L'objectif de ce projet est donc de formaliser une chaîne de traitement complète, adaptée aux besoins spécifiques de l'entreprise, et permettant d'optimiser à la fois la qualité technique des documents produits et les délais de réalisation. Cette chaîne comprend notamment l'acquisition des données par scanner laser terrestre, l'assemblage et le nettoyage des nuages de points, ainsi que la création de plans de niveaux, de façades et de coupes verticales à partir de ces données.

Les objectifs poursuivis dans cette étude sont multiples. Il s'agit d'abord de documenter avec rigueur chaque étape de la chaîne de traitement, en tenant compte des contraintes techniques réelles et des outils utilisés au sein du bureau. Le projet vise aussi à proposer une méthodologie standardisée, capable d'être déployée sur différents projets de nature similaire. L'enjeu est également de garantir la reproductibilité des résultats, tout en veillant à la souplesse d'adaptation aux cas particuliers. Enfin, l'optimisation des temps de traitement, sans compromis sur la précision et l'exactitude des livrables, constitue un objectif central de cette démarche.

Ce projet s'inscrit ainsi dans une logique d'amélioration continue des pratiques internes de l'entreprise Kùpfer Géomètre, et ambitionne de fournir un cadre méthodologique solide pour accompagner sa croissance dans le domaine du relevé 3D et de la production de plans techniques. Il répond à un besoin réel et identifié, en croisant les exigences du terrain avec une approche structurée et technologique du traitement des données spatiales.

## 2. Méthodologie mise en place

Dans la continuité de cette démarche d'amélioration interne, la mise en place d'une chaîne de traitement standardisée repose sur une organisation rigoureuse des différentes étapes techniques, depuis l'acquisition des données jusqu'à la livraison des livrables. Il ne s'agit pas seulement de maîtriser individuellement les outils ou les logiciels utilisés, mais bien de structurer un enchaînement cohérent et reproductible, capable d'être appliqué à l'ensemble des projets traités par le bureau.

La méthodologie présentée ci-après a ainsi été construite à partir des pratiques existantes au sein de l'entreprise, tout en intégrant des ajustements et optimisations identifiés au fil de l'expérimentation. Chaque étape, depuis le relevé terrain jusqu'à la production des plans 2D, a été analysée, testée et documentée afin de constituer une base solide, directement exploitable pour les futurs projets.

Le processus débute par la réalisation de relevés 3D sur le terrain à l'aide d'un scanner laser terrestre Faro Focus S150. Pour chaque station de scan, des cibles de référence sont placées de manière stratégique afin de faciliter l'assemblage ultérieur. Deux types de cibles sont utilisés : les sphères, positionnées au sol ou en hauteur à l'aide d'aimants, et les cibles damier, en version rigide ou papier, qui peuvent être fixées aux parois ou montées sur trépieds. Dans les environnements contraints, zones en chantier ou encore lieux occupés, des cibles rigides sont parfois ancrées de façon permanente à l'aide de goujons, assurant la stabilité des repères. Un recouvrement d'environ 30 % est systématiquement respecté entre deux positions successives, garantissant un assemblage fiable des nuages de points.

Les stations ainsi collectées sont ensuite assemblées à l'aide du logiciel FARO Scene version 7.1.1.81, qui permet un premier calage automatique fondé sur la reconnaissance des cibles. Ce premier assemblage est ensuite affiné par une méthode de recalage nuage-à-nuage (cloud-to-cloud), qui consiste à minimiser les écarts résiduels entre les différents nuages de points partiels. Lorsque certaines zones présentent des difficultés particulières (manque de points communs, perturbations locales), un recalage visuel manuel peut être réalisé afin d'ajuster finement l'alignement et d'assurer la continuité géométrique du nuage global. Cette double approche, automatique puis manuelle si besoin, garantit à la fois rapidité d'assemblage et fiabilité des résultats.

Une fois le nuage global reconstitué, un prétraitement est engagé pour en alléger la densité tout en conservant l'essentiel de l'information géométrique. Ce travail, réalisé dans FARO Scene, repose sur la création d'un nuage de point en appliquant un filtre de distance par numérisation ainsi qu'un sous-échantillonnage spatial visant à homogénéiser la distribution des points dans le nuage. Concrètement, un seuil minimal de distance entre deux points est défini selon le niveau de détail recherché : plus le seuil est faible, plus le nuage conserve de densité, notamment dans les zones fines ou détaillées. À l'inverse, un seuil plus élevé permet d'éliminer les redondances dans les zones planes ou peu informatives. La figure 1 nous montre un nuage à l'issue de cette étape sous échantillonné à 5mm.

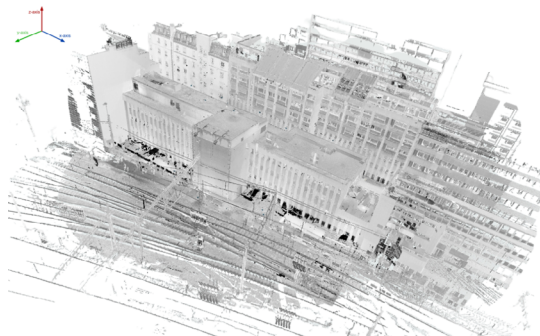


Figure 1 : Nuage de points sous échantillonné à 5mm sur FARO Scène, rue de Lausanne à Genève.

Le nuage prétraité est ensuite exporté vers CloudCompare, où il fait l'objet d'un nettoyage approfondi. Ce traitement s'effectue en mode ligne de commande, sans interface graphique, grâce à des scripts automatisés permettant d'appliquer des filtres de manière répétable. Les outils mobilisés incluent notamment le filtre statistique SOR (Statistical Outlier Removal), qui élimine les points isolés ou aberrants, ainsi que des seuils de distance visant à supprimer les artefacts liés aux reflets ou aux objets en mouvement. Cette automatisation garantit un traitement homogène d'un projet à l'autre et réduit considérablement les interventions manuelles. Le nuage ainsi nettoyé devient alors un support fiable pour la phase d'interprétation et de dessin.

La dernière étape consiste à produire les plans 2D à partir du nuage final. Ce travail est mené sous AutoCAD, à l'aide de l'extension FARO As-Built for AutoCAD. Le nuage est d'abord découpé en tranches horizontales correspondant aux niveaux d'intérêt du bâtiment, comme les étages ou les sous-sols. Sur chaque tranche, les contours des murs, cloisons et éléments structuraux sont extraits de manière semi-automatique à l'aide des outils de reconnaissance intégrés. L'opérateur intervient ensuite pour ajuster et corriger les vecteurs générés, en appliquant des contraintes géométriques simples (orthogonalité, parallélisme, continuité) afin d'obtenir des plans cohérents et exploitables comme l'illustre la figure 2.

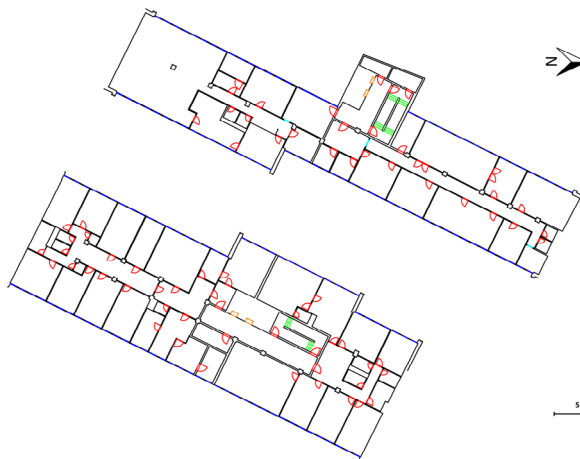


Figure 2 : Plan du niveau 2 du bâtiment situé au 45-47 rue de Lausanne à Genève.

### 3. Résultats et apports

L'application concrète de la chaîne de traitement formalisée dans le cadre de ce projet a permis de mesurer des résultats tangibles, tant sur le plan technique qu'organisationnel. Mise en œuvre sur plusieurs cas réels, la méthodologie a démontré sa pertinence et son efficacité à chaque étape du flux de production.

L'un des apports majeurs réside dans la standardisation du processus de travail, qui permet désormais à l'ensemble des collaborateurs de s'appuyer sur une base commune. Grâce à cette formalisation rigoureuse, chaque étape, du relevé sur site à la génération du plan 2D, est clairement définie et reproductible. Cette uniformisation des pratiques facilite non seulement la formation des nouveaux utilisateurs, mais aussi la collaboration entre opérateurs, chacun partageant un langage et des outils communs. Le traitement des dossiers gagne ainsi en lisibilité, en efficacité et en qualité.

Sur le plan technique, l'assemblage du nuage de points, basé sur la détection automatique de cibles puis optimisé par recalage nuage-à-nuage, a permis de réduire sensiblement les écarts de distance entre stations. En moyenne, les erreurs de superposition ont diminué par rapport aux méthodes antérieures, tant en termes de distance moyenne que d'écart maximal. Cette amélioration de la précision contribue à la fiabilité globale des plans produits, en particulier dans les projets nécessitant une grande exigence.

L'étape de nettoyage et d'intégration dans CloudCompare s'est révélée également essentielle. En éliminant efficacement les points aberrants, elle conditionne la qualité du nuage utilisé pour la vectorisation. C'est ce traitement qui permet au plugin FARO As-Built for AutoCAD une meilleure détection des contours des éléments structuraux.

De manière globale, l'application de cette chaîne de traitement, depuis l'acquisition 3D jusqu'à la production des plans 2D, permet de dégager un gain de temps significatif, sans compromettre la qualité des résultats.

### 4. Perspective et conclusion

Ce projet a permis de structurer une chaîne de traitement cohérente pour transformer un relevé 3D en livrables 2D précis, répondant aux besoins de l'entreprise Küpfer Géomètres SA.

Parmi les perspectives envisagées, il est prévu de comparer un plan 2D produit sans le plugin FARO As-Built à un plan généré avec celui-ci, en analysant la précision, la fidélité au nuage de points (exactitude), et le temps de traitement. Cela permettra d'évaluer objectivement les gains apportés par la solution semi-automatisée.

Une autre étape importante consistera à formaliser la chaîne de traitement sous forme de protocole détaillé, pour ensuite la mettre en parallèle avec la chaîne de production interne existante. L'optimisation conjointe des deux chaînes facilitera l'identification des écarts, mais permettra aussi de mettre en lumière les solutions concrètes mises en place pour améliorer la fluidité, la qualité et l'efficacité du processus global.

Enfin, pour découvrir les résultats de ces comparaisons et les enseignements finaux du projet, je vous invite à assister à la soutenance de ce travail.

# Mise en place d'un processus BIM pour des appels d'offres VRD : une modélisation 3D semi-automatique au service de l'estimation des quantités, des coûts et des délais.

PFE présenté par : **Nicolas Durgetto**  
Société d'accueil : **Colas**  
Directeur de PFE : **Nathanaël Lapeyronnie**  
Correctrice : **Hélène Macher**



## Introduction

Dans un contexte où les exigences en termes de transparence, de rigueur budgétaire et de délais sont de plus en plus fortes, les entreprises de travaux publics sont amenées à revoir leurs pratiques, notamment lors des appels d'offres. Le Building Information Modeling (BIM) constitue une réponse à ces enjeux, en proposant un processus collaboratif basé sur un modèle 3D enrichi de données techniques, temporelles et économiques. Si son usage se démocratise dans les grands projets, son intégration dans les projets courants de VRD (Voirie et Réseaux Divers) reste marginale.

Ce projet de fin d'études, mené au sein de l'agence Colas de Champigny-sur-Marne, explore la faisabilité d'un processus BIM simplifié, semi-automatisé, capable d'être mis en œuvre dès la phase d'appel d'offres, par des équipes non spécialistes du BIM. L'objectif est double : démontrer la pertinence d'une modélisation 3D légère pour mieux visualiser les projets traités habituellement en 2D, et favoriser une estimation plus fiable des quantités, des coûts et des délais.

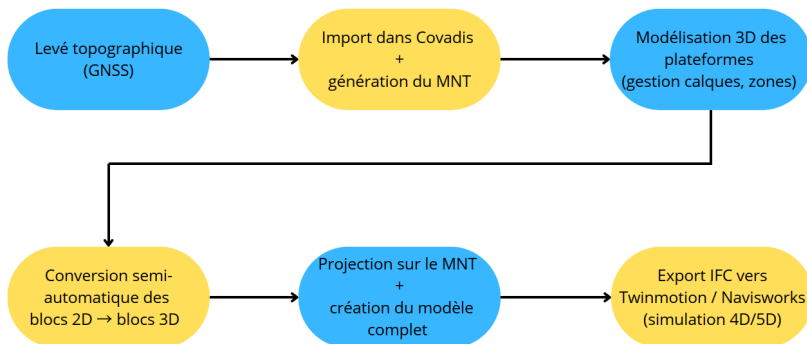


Fig. 1 : Chaîne de traitement BIM simplifiée développée dans le cadre du projet, du levé sur le terrain jusqu'à la simulation 4D/5D.

## 1. Contexte et enjeux

Colas est un acteur majeur de la construction d'infrastructures de transport, intervenant notamment sur des projets de voirie urbaine. L'agence d'accueil du projet ne déploie pas systématiquement le BIM, sauf sur demande particulière du client. Or, l'utilisation du BIM dès l'appel d'offres peut devenir un levier de différenciation. La méthode actuelle, basée sur des plans Autocad 2D, reste robuste mais peu lisible pour des interlocuteurs non techniques, et source d'erreurs (superposition de réseaux, difficultés de coordination).

L'expérimentation s'est concentrée sur un chantier test à Issy-les-Moulineaux, comportant plusieurs zones à réhabiliter d'une surface totale d'environ 1 hectare. Après un levé GNSS et une analyse du site, un plan de phasage a d'abord été établi avec la méthode classique pour une demande d'un client. Cette première version permettra une comparaison des deux méthodes une fois le projet fini. Ce chantier typique représentait un excellent cas d'étude pour tester la reproductibilité d'un processus BIM léger.

## 2. Objectifs du projet

Le projet s'articule autour des objectifs suivants :

- Mettre en œuvre une modélisation 3D pertinente à partir d'un levé terrain.
- Intégrer des objets de phasage (barrières, signalisation, etc.) en 3D.
- Démontrer la valeur ajoutée du BIM en termes de lecture visuelle et d'estimation.
- Explorer l'usage d'outils de visualisation dynamique (4D) et d'estimation prévisionnelle (5D).
- Rédiger un guide de procédures permettant à l'équipe Colas de reproduire ce processus.

## 3. Méthodologie

### 3.1. Logiciels utilisés

Le choix des logiciels a été guidé par plusieurs critères découlant de l'étude bibliographique mais surtout de leur accessibilité et de leur compatibilité avec les pratiques internes de Colas.

- Covadis est utilisé pour créer le modèle 3D à partir du levé terrain, et pour insérer les objets BIM (blocs 3D).
- Navisworks permet de simuler les phases du chantier en intégrant la dimension temporelle (4D) et de préparer l'estimation des coûts liée à chaque étape du projet (5D). Twinmotion permet de générer des vues immersives du chantier modélisé en ajoutant également des éléments visuels et éventuellement générer des animations.

### 3.2. Création semi-automatique d'objets 3D à partir de blocs 2D

Un flux de travail de conversion a été conçu pour transformer les blocs 2D du phasage classique en objets 3D adaptés, projetés sur le MNT.

Cela comprend :

La conversion en blocs 3D (type panneau, barrière, etc...), leur remplacement automatique dans le plan et leur projection sur le terrain via le MNT généré.

### 3.3. Création de la maquette 3D du site d'étude

Les surfaces, emprises, bordures, revêtements et entrées de parkings ont été dessinées à partir d'un levé GNSS. Les objets dessinés en 2D ont ensuite été répartis selon les phases, sur des calques distincts. En suivant le flux de travail de la partie Covadis (figure 1), on obtient une première version simplifiée du site (fig. 2).

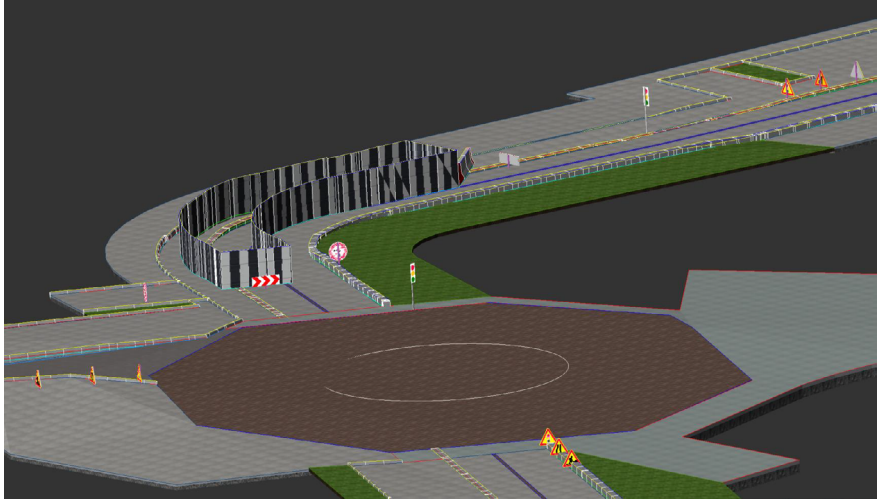


Fig. 2 : Exemple préliminaire de modélisation 3D de la zone test avec objets de phasage avec Covadis.

## 4. Résultats

Le modèle obtenu présente plusieurs atouts :

- Visualisation claire des emprises et de la logistique chantier.
- Détection de conflits ou d'incohérences potentielles.
- Préparation à la simulation temporelle (phasage 4D).
- Support pour l'implémentation d'objets supplémentaires et pour la création de vidéos d'animation via Twinmotion.

L'export vers Navisworks permet d'amorcer l'estimation automatisée des quantités. Bien que certaines fonctionnalités restent à approfondir, l'intégration des informations de coûts confirme le potentiel d'un usage 5D du modèle.

## 5. Analyse et retour d'expérience

Ce projet démontre qu'un processus BIM simplifié, reproductible et maîtrisable peut s'appliquer aux appels d'offres VRD. La modélisation 3D avec objets BIM intégrés améliore la lisibilité, la communication et l'estimation dynamique. Une automatisation accrue et l'usage de plateformes collaboratives (exemple avec BIM 360) constitueraient les prochaines évolutions logiques.

Plusieurs obstacles sont intervenus lors du développement du processus, notamment liés à l'adaptation du BIM aux projets VRD courants et à la prise en main des outils. En résumé on retient un manque de documentation spécifique pour les VRD standards. De plus, la courbe d'apprentissage sur certains outils, notamment Twinmotion et Navisworks est longue. Finalement, il est nécessaire de structurer rigoureusement les fichiers (calques, nomenclature, propriétés BIM...).

Concernant les perspectives, on peut à ce stade dire que :

- Le processus reste actuellement partiellement manuel (notamment la phase d'estimation).
- L'intégration automatique des coûts nécessite une base de prix consolidée.
- L'usage reste limité par les compétences internes et le temps disponible en phase appel d'offres.

## 6. Conclusion et perspectives

Ce projet démontre qu'un processus BIM simplifié, reproductible et maîtrisable peut être applicable aux appels d'offres VRD classiques. La production d'un modèle 3D avec objets BIM intégrés améliore à la fois la lisibilité du projet, la communication avec les parties prenantes, et la capacité à estimer de façon dynamique.

À l'avenir, une automatisation plus poussée (via scripts ou plugins) et l'intégration à une plateforme collaborative (type BIM 360) permettraient de franchir une nouvelle étape. Ce projet constitue ainsi un socle de transition vers un usage élargi du BIM, même hors des grands projets complexes.

## 7. Références utilisées dans le résumé

Sunil, K., Pathirage, C., & Underwood, J. (2015). *The importance of integrating cost management with building information modeling (BIM)*.

Hasan, A. N., & Rasheed, S. M. (2019). *The benefits of and challenges to implement 5D BIM in construction industry*. *Civil Engineering Journal*, 5(2), 412.

Žigo, T., & Gong, L. (2017). *Vico Workflow-5D BIM Case Study from Estimator's Perspective*. Autodesk University.

Liu, Z., 2024. *Comparison and analysis of advantages and disadvantages between BIM and CAD in civil drafting software*. *Applied and Computational Engineering*, 62, pp.192-197.

Whitlock, K., Abanda, F.H., Manjia, M.B., Pettang, C. and Nkeng, G.E., 2018. *BIM for construction site logistics management*. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 8(1), p.47.

# Développement d'outils et mise en place de processus permettant la conversion, de manière semi-automatique, d'un levé topographique en une maquette numérique Revit et exports IFC



*PFE présenté par :* **Clarisse Dahlem**  
*Société d'accueil :* **HKD Géomatique**  
*Directeur de PFE :* **Mathieu Petitjean**  
*Correcteur :* **Emmanuel Alby**  
*Encadrant :* **Maël Gonnon**



## 1. Introduction

A l'ère de la transition numérique dans le secteur de la construction, l'intégration des données topographiques dans les environnements du BIM représente un défi majeur pour les bureaux de géomètres. Comment optimiser le passage des points topographiques aux maquettes numériques ? Cette question est au cœur des préoccupations actuelles. Ainsi, la problématique suivante s'est imposée à nous : **« Comment les bureaux de géomètres s'adaptent aux usages du BIM, en intégrant leurs méthodes de travail et plans topographiques dans Revit ? »**

L'objectif de ce projet était donc de penser une chaîne de traitement semi-automatisée. Son but était de transformer les données topographiques brutes en maquette structurée sur le logiciel Revit. Il nous fallait aussi inclure les exports IFC des instances créées. Par ailleurs, nous souhaitions que cela induise un minimum de changement lors des levés topographiques. Notre vœu étant de conserver un maximum le fonctionnement traditionnel d'une codification.

## 2. Résumé de la bibliographie

Actuellement, la création d'éléments BIM est majoritairement manuelle. Si des méthodes semi-automatiques voire automatiques commencent à voir le jour, elles restent, pour la plupart, très théoriques. Ainsi, de nombreux sujets de recherches portent sur l'automatisation, partielle ou totale, d'une telle conversion. Si les données de sortie sont identiques, les données initiales, elles, varient. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes uniquement concentrés sur les données acquises grâce aux outils traditionnels du géomètre : les tachéomètres. Cependant, notre état de l'art nous a démontré que la grande majorité des recherches se basaient sur les nuages de points (Yu et al., 2014). Acquises par LiDAR ou scanner laser terrestre, ces données sont le point de départ de la majorité des automatisations, comme dans l'article de Macher et al., (2017) ou encore de Brilakis et al., (2010).

Nous avons ainsi réalisé que la tâche CAO-BIM, nom donné à notre objectif, n'était pas un sujet de prédilection dans la recherche. Cependant, dans leur article de 2020, Lu et al., proposent une solution semi-automatique utilisant un fichier au format DWG. Pour cela, un algorithme de reconnaissance optique de caractères est mis en place afin d'extraire les informations géométriques du bâtiment. Par ailleurs, en 2024, Park et al., ont présenté une approche automatisée, employant le logiciel Dynamo. Le logiciel récupérerait les informations de position des éléments à partir du dessin sous format DWG. Si les solutions proposées par les différents auteurs répondent en partie à la problématique, elles peuvent s'avérer complexes à mettre en place dans le cadre de nos structures.

### 3. Méthode utilisée

Notre volonté était donc de conserver au maximum les méthodes de levés topographiques utilisées par l'entreprise. Celles-ci sont au nombre de deux. La première adopte la traditionnelle codification utilisée par le logiciel Covadis. La seconde repose sur le recours à une tablette numérique, sur laquelle est installée le logiciel TopoCalc. Développé par Sogelink, il permet de générer les plans en temps réel. Chacun de ces deux logiciels propose d'exporter les levés au format TXT, lu par Revit. Ainsi, utiliser ce procédé nous permettait de garantir un maximum la conservation de méthodes maîtrisées par tous, tout en nous donnant l'opportunité de les utiliser à d'autres fins.

Mais si l'utilisation des fichiers textes sur Revit nous semblait intuitive, le choix de l'interface de programmation le fut moins. En effet, le logiciel propose deux options afin d'automatiser certaines tâches. La première nécessite l'utilisation de la plateforme Dynamo BIM. La seconde, RevitAPI, possède une approche de programmation traditionnelle. La Figure 1 regroupe leurs caractéristiques principales.

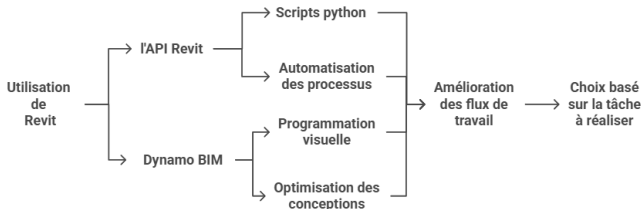


Fig. 1 : Différences entre l'API Revit et Dynamo BIM

L'API Revit assure donc une programmation classique, où plusieurs langages de programmation sont compatibles. Elle permet une approche plus avancée et plus robuste. Dynamo BIM est une plateforme de programmation visuelle, plus adaptée à l'optimisation qu'au développement à proprement parler. Notre choix se porta sur l'API, celle-ci étant la plus complète.

### 4. Résultats de l'étude

Lors de notre étude, nous avons catégorisé les instances à créer de la façon suivante : le ponctuel, le linéaire et le surfacique. Les résultats des exports IFC ne seront pas évoqués dans le cadre de ce paragraphe. C'est un sujet qui sera pleinement abordé lors de la soutenance. Ce résumé se concentre donc sur le cas d'instances marquantes, appartenant à l'une de ces trois classes, dont la création fut délicate.

#### La végétation

La préservation des arbres est, à Genève, un véritable sujet. Cette protection pouvant parfois complexifier un chantier, voire, le rendre irréalisable. Les arbres ainsi que leur couronne, doivent donc être levés avec précision, les informations demandées les concernant étant nombreuses. Cette attention particulière se retrouve dans un script gérant à la fois un positionnement ponctuel et une création linéaire.

Trois familles importées furent utilisées dans le cadre de cette automatisation. Deux d'entre elles permettent de représenter l'arbre dans son entièreté. La troisième famille symbolise seulement le tronc. La couronne détaillée, elle, devait être adaptée au cas par cas. Nous avons donc automatisé la création d'une extrusion in situ à partir de splines cubiques d'Hermite. Les Figures 2 droite et 2 gauche nous donne un aperçu des résultats obtenus. Celle de gauche, vue de haut en 2D, permet de visualiser la position de l'arbre ainsi que la forme de la couronne. Cependant, la vue 3D permet de mieux apprécier le rendu, comme le montre la Figure 2 droite.

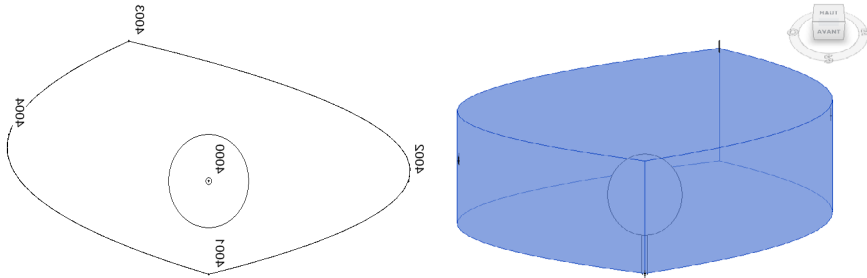


Fig 2 gauche et 2 droite : Arbre et sa couronne vus de haut en 2D puis vus de côtés en 3D

### Le cas particulier des murs

Dans la catégorie des instances linéaires, l'automatisation de la création des murs fait office de cas particulier. Cette différence ne se situe pas tant dans le processus de création, mais dans la méthode appliquée lors de la modification.

La modélisation des murs s'effectue en deux étapes. La première permet de créer et de positionner le mur au bon endroit. La seconde ajuste le profil mural. En effet, par essence, le logiciel construit les murs parfaitement rectangulaires et parallèlement au niveau de référence. Ainsi, nous avons fait le choix de créer une seconde automatisation ayant pour but d'adapter les murs à notre réalité, en modifiant leur profil. Les Figures 2a et 2b nous permettent d'apprécier le résultat d'un tel processus.

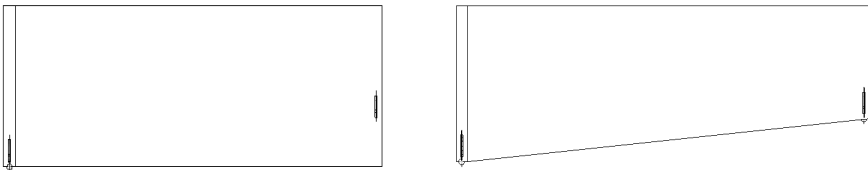


Fig. 3 gauche et 3 droite : Profil du mur 3D une fois créé puis profil du mur 3D une fois modifié

### Les surfaces

Les surfaces possèdent ici un aspect remarquable. Effectivement, lors de descriptions planes, les points au sol ne sont représentés que parce que nous souhaitons notifier leur altitude. Dans le cadre de ce projet, les sols représentaient une entité à part entière, qu'il nous fallait matérialiser. Pour cela, Revit met à notre disposition deux familles systèmes différentes : le sol et la surface topographique. Cependant, l'utilisation de l'une ou de l'autre n'est régie par aucune directive. Ainsi, chaque projet voit ces zones être modélisées différemment. Afin de répondre au mieux à ce problème, nous avons pensé un programme permettant de choisir la famille système à utiliser. Ainsi, chaque surface identifiée est représentée par la famille adaptée. Cette méthode assurerait le traitement des zones surfaciques indépendamment des exigences propres à chaque étude.

Aussi, la question de la triangulation de ces zones fut abordée. Il est connu que Revit triangule les sols et surfaces topographiques. Cette triangulation, basée sur la méthode des plus proches voisins tridimensionnels, peut donner des résultats plus qu'inattendus. Nous avons donc essayé de contourner celle-ci en imaginant une méthode alternative. Si cette tentative s'est avérée infructueuse, son approche mérite d'être abordée.

## 5. Discussions et conclusion

### Limites de l'étude

Avec plus de 7000 lignes de codes, cette étude fut assez poussée, et cela grâce à l'API Revit. Cette dernière, très puissante, garantit la mise en place de nombreuses automatisations. Cependant, aussi considérables que soient ses méthodes, elles n'étendent pas les capacités du logiciel au-delà de ce qu'il offre lors d'une utilisation manuelle. Un exemple concret est notre échec à contourner l'algorithme de triangulation du logiciel. Si l'API a légitimé notre approche, elle ne l'a pas rendue possible pour autant.

Aussi, de nombreuses automatisations ont été mises en place lors de ce projet. Elles ont été rendues possibles grâce à l'API Revit 2023 et organisées pour Revit 2023. Cependant, en analysant l'API Revit 2024, nous avons remarqué certaines différences dans le fonctionnement de cette version. Si la majorité de nos automatisations fonctionnent sur les versions ultérieures, nous pouvons légitimement supposer que ce ne sera plus le cas à terme. Par exemple, à partir de la version 2025 du logiciel, les surfaces topographiques ont été remplacées par les solides topographiques. Les automatisations concernant cette famille ne seront plus utilisables dans cette version et devront donc être mises à jour pour rester opérationnelles. Ainsi, une maintenance suivant les évolutions du logiciel sera nécessaire pour assurer la pérennité du projet.

### Perspectives d'évolutions

Une amélioration majeure de ces automatisations serait d'utiliser ce que nous appelons le « multi-codes ». Actuellement, si un point représente à la fois un changement de surface, mais aussi le début d'un mur, il devra être relevé autant de fois qu'il représente d'instance. Dans le cas présent, trois fois. Une fois pour le début du mur et deux fois pour chaque surface. Le but de cette évolution serait donc de ne relever le point qu'une fois et de noter les codes une fois, à l'aide d'un séparateur identifié. Cela suggérerait de modifier les fonctions concernées dans les scripts. Cette méthode fut mise en place pour la modélisation de la végétation, des murs et des sols, mais nous ne l'avons pas étendue. Ce processus permettrait de limiter le nombre d'automatisations. Il faudrait cependant rendre le script plus robuste, afin d'éviter les erreurs.

Par ailleurs, il serait pertinent de créer un rendu PDF de celles-ci, vues de haut. Pour cela, il faudrait penser, pour chaque famille, un rendu 2D, lui aussi vu de haut. Il faudrait aussi qu'ils soient explicites, afin qu'aucun doute sur la nature de l'objet ne subsiste.

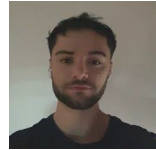
De même, les familles créées dans le cadre de ce projet ne sont pas très élaborées. Elles ne possèdent aucun matériau, ni couleur. Le but n'était alors pas de produire des maquettes esthétiques mais d'automatiser un maximum leur création. Cela étant fait, il serait satisfaisant d'obtenir un rendu harmonieux. Nous connaissons tous l'importance de l'esthétisme des livrables.

### Conclusion

L'objectif de ce projet était d'inclure au mieux les données topographiques lors de la création de maquettes sur Revit. Nous avons donc fait le choix de conserver les codifications utilisées lors des levés topographiques et les utiliser directement lors de la création des instances. Si certains codes ont été modifiés et que l'absence de « multi-codes » peut parfois rendre les relevés chronophages et fastidieux, l'objectif de conservation a été atteint.

Finalement, ce projet nous a permis d'en apprendre plus sur le fonctionnement du logiciel Revit, son utilisation, durant ce stage, venant compléter celle étudiée en cours. La prise en main de l'API, très dense et peu intuitive, nous a permis de créer toutes les automatisations dont l'entreprise estimait avoir besoin. Si la plupart peuvent être améliorées via le « multi-codes », elles ont le mérite d'être fonctionnelles et efficaces.

# Analyse des limites et rédaction des procédures du scanner Orbis de FARO



PFE présenté par : **Antoine POTTIN**  
Société d'accueil : **Kadran Ingénierie**  
Directeur de PFE : **Daniel RIOU**  
Correcteurs : **Tania LANDES**  
**Mathieu KOEHL**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Le développement des scanners mobiles utilisant la technologie SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) a considérablement amélioré l'efficacité de capture des données topographiques, offrant une rapidité supérieure aux scanners terrestres statiques. Cependant, cette amélioration soulève des défis majeurs en termes de qualité et de précision des nuages de points générés. Le scanner FARO Orbis, récemment introduit par FARO, utilise une approche hybride combinant des acquisitions mobiles (SLAM) et des scans statiques ponctuels (station Flash), il permet aussi de se positionner directement lors du levé sur des points de calage, ce qui entraîne la possibilité d'une transformation du nuage à partir de la déformation de la trajectoire.

Ce projet vise à définir un protocole d'utilisation du FARO Orbis en s'appuyant sur des tests terrain dans quatre environnements distincts : ferroviaire, urbain dense, industriel et intérieur. L'objectif est de vérifier sa fiabilité, ses limites, et d'identifier les paramètres clés à maîtriser pour garantir des livrables exploitables en fonction des besoins et des livrables pour chacun des domaines.



Fig. 1 : Système FARO Orbis monté sur poignée et monopod

## 2. Méthodologie

L'étude s'articule autour de tests comparatifs menés sur différents sites représentatifs de chaque environnement comportant chacun ses propres contraintes, avec des relevés réalisés à la fois avec le scanner mobile Orbis et un scanner statique FARO Focus comme référence. Des analyses précises des écarts obtenus entre ces deux scanners ont été réalisées avec l'algorithme M3C2 sous CloudCompare. Des analyses complémentaires spécifiques à chaque domaine ont également été effectuées : plans topographiques pour les environnements urbains, analyses visuelles via orthoimages pour les bâtiments, analyses du bruit local pour les milieux industriels, et vérification détaillée des éléments au sol, coupes verticales et horizontales sur des éléments d'ouvrage, observation de la dérive SLAM sur des linéaires, pour les environnements ferroviaires. Le projet a également inclus une optimisation des paramètres de traitement via les logiciels FARO Connect et FARO SCENE.

En parallèle, une analyse du système Orbis lui-même a été menée, incluant notamment l'étude du rayon d'action optimal des stations Flash en extérieur et l'évaluation de leur valeur ajoutée grâce à des analyses M3C2 spécifiques. Cette analyse visait à déterminer les meilleures pratiques d'utilisation des stations Flash lors de l'acquisition pour améliorer localement la précision et la qualité des relevés.

### 3. Tests principaux

#### 3.1 Linéaire ferroviaire

**Besoin :** Évaluer la dérive du scanner Orbis sur un linéaire ferroviaire étendu, déterminer la précision réalisable sur une grande distance et vérifier l'intégration possible du scanner Orbis en parallèle de relevés tachéométrique pour des relevés annexes de mobilier ferroviaire tout en assurant un gain de temps considérable.

**Tests effectués :** Une boucle Orbis d'environ 400 mètres a été réalisée sur une géométrie répétitive caractérisée par des caténaires et une faible présence de mobilier ferroviaire alentour. La comparaison avec le scanner Focus fragmenté au niveau de chaque catenaire (tous les 50 m) permet d'observer à partir de quelle distance l'Orbis commence à avoir une dérive significative. Des points de contrôle géoréférencés ont été placés à environ 50 mètres d'intervalle, et des transformations rigides puis non rigides ont été appliquées pour analyser l'efficacité de ces corrections.

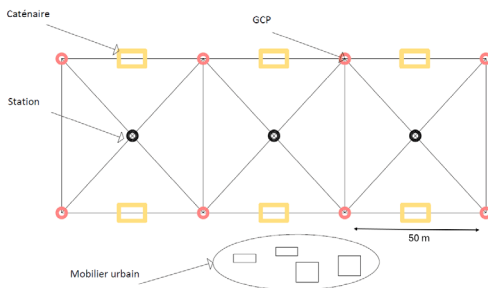


Fig. 2 : Schéma contextuel du positionnement des stations tachéométriques, des points de contrôle et des caténaires.

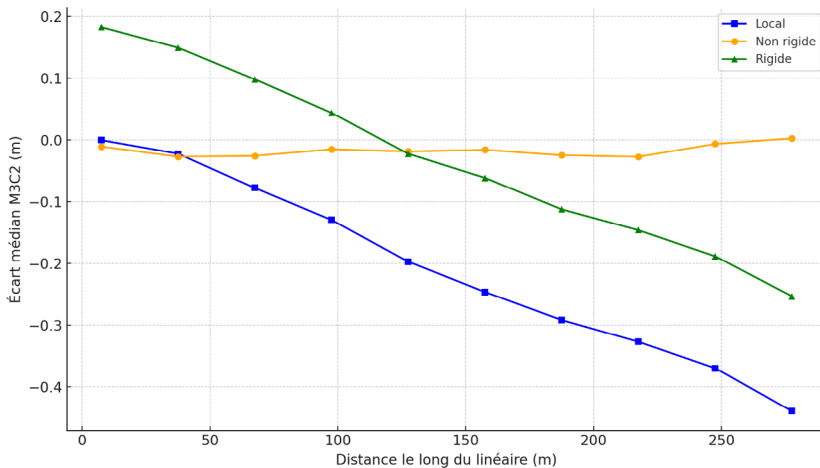


Fig. 3 : Comparaison de la dérive mesurée le long du linéaire (Orbis vs Focus)

**Résultats :** Une dérive significative du scanner Orbis a été observée à partir de 100 mètres avec des paramétrages SLAM spécifiques, mais cette dérive a pu être notablement réduite grâce à l'application de transformations non rigides. Les précisions obtenues répondent aux attentes opérationnelles ( $\pm 2$  cm en relatif,  $\pm 5$  cm en absolu), validant ainsi la possibilité d'intégration aux relevés tachéométriques existants pour un contrôle précis des caténaires.

### 3.2 Milieu urbain dense

**Besoin** : Valider la pertinence du scanner Orbis en hypercentre urbain dense, notamment pour la création de plans topographiques précis au 1/200.

**Tests effectués** : Des relevés urbains ont été réalisés dans des environnements denses et complexes (hypercentre urbain) en se rattachant à des points de cheminement polygonal existants. Les données Orbis ont été comparées avec des relevés statiques FARO Focus mais aussi avec un plan topographique existant datant de 2024.

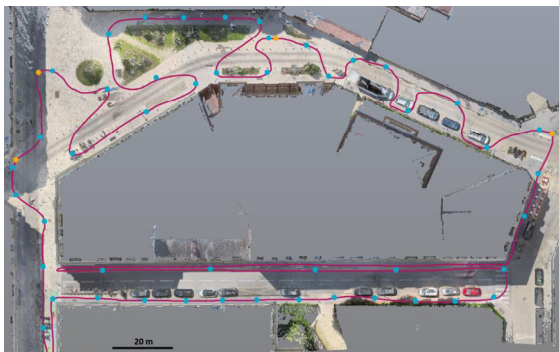


Fig. 4 : Schéma de la trajectoire sur site (rouge), avec emplacement des stations flash (bleu), et des points de contrôle (orange)

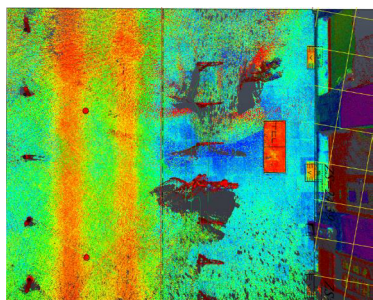


Fig. 5 : Superposition de l'orthoimage en intensité issue de l'Orbis avec le plan topographique.

**Résultats** : Une analyse plus poussée a été réalisée pour vérifier la précision et l'exhaustivité des éléments capturés en générant des orthoimages en intensité. Le scanner Orbis a permis de capturer avec une précision adéquate l'ensemble des éléments nécessaires à l'établissement de plans topographiques au 1/200. L'utilisation optimale de stations Flash et la distribution homogène des points de contrôle se sont avérées essentielles pour obtenir des résultats fiables. On observe cependant des zones d'ombre derrière certains éléments comme le mobilier ou encore certaines zones sur lesquelles notre trajet ne passe pas, il est donc également impératif de scanner directement chaque zone utile à l'élaboration du plan topographique.

## 4. Etude de la fonction flash

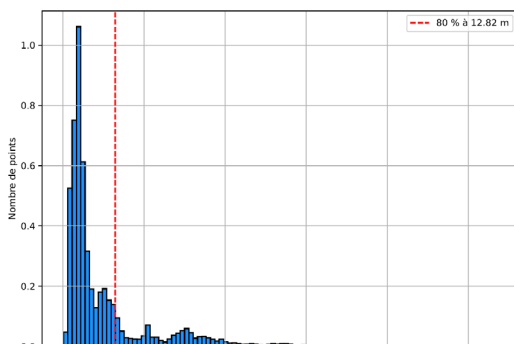


Fig. 6 : Histogramme de densité des points en fonction de la distance au centre de la station Flash.

L'analyse de la station Flash révèle une efficacité maximale dans un rayon d'environ 10 à 15 mètres autour du scanner en milieu ouvert, où elle concentre environ 80 % des points. Sa densité permet d'améliorer localement la qualité du nuage, notamment dans les zones de rupture géométrique comme les angles ou les intersections. Les tests montrent qu'une planification réfléchie des stations Flash améliore nettement la cohérence interne des données, ce qui justifie leur intégration dans les protocoles terrain. Cependant, le Flash ne garantit pas systématiquement une amélioration visible : son efficacité dépend fortement

du contexte local, notamment de l'espace libre autour de la station, de la présence de cloisons ou de mobilier, et de la stratégie de déplacement adoptée. En bâtiment cloisonné, le SLAM seul peut suffire à générer un nuage cohérent, tandis qu'en espace ouvert, le Flash devient souvent indispensable. Pour des besoins localisés très précis, il peut également être utilisé de manière ciblée. Dans la pratique, les stations Flash doivent être positionnées tous les 10 à 15 mètres, en particulier dans les environnements dégagés, et selon une logique similaire à celle d'un scanner statique, en se plaçant notamment aux changements de géométrie. Le Flash joue alors un rôle d'ancrage fort pour le recalcul SLAM, en apportant des données de haute densité et de haute confiance qui permettent de verrouiller certaines positions du graphe de poses.

## 5. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de déterminer les limites du scanner FARO Orbis en s'appuyant sur les tendances observées pour chacun des environnements testés, ainsi que les conditions optimales pour son utilisation dans différents contextes. Le protocole établi permettra à KADRAN Ingénierie d'intégrer efficacement cette technologie à ses missions tout en assurant une qualité et une précision satisfaisantes des livrables finaux.

Globalement, l'Orbis offre de bonnes performances dans des environnements bien structurés, notamment en bâtiment, où il permet l'établissement de plans au 1/200. La dérive SLAM reste maîtrisable via boucles fermées avec l'application de transformations non rigides, sous condition d'une bonne répartition géométrique des points de contrôle, notamment en milieu ouvert comme le ferroviaire ou l'urbain. La précision du levé dépendra également de la qualité des points de contrôle et de la configuration du parcours. En contexte industriel, le niveau de bruit plus élevé limite les usages fins, mais reste acceptable pour des levés complémentaires ou la modélisation nécessite moins de finesse.

Un tableau synthétique présenté ci-après récapitule les performances de l'Orbis en fonction des environnements testés, croisant les exigences formulées par Kadran avec les résultats effectifs obtenus.

Domaine	Préc. rel.	Préc. abs.	Plan	Maquette	Modélisation
Ferroviaire : voies	✗	–	✓	∅	∅
Ferroviaire : gare	✓	✓	✓	∅	∅
Ferroviaire : ouvrage	✓	–	✓	✓	✓
Industriel	✗	✗	–	✗	✗
Urbain : centre dense	–	✓	–	∅	∅
Urbain : périphérie	–	✓	–	∅	∅
Bâtiment : hall	✓	✓	✓	✓	✓
Bâtiment : cloisonné	✓	✗	✓	✓	✓

**Légende :** ✓ critère validé ; – partiellement rempli ou dépend du protocole ; ✗ non rempli ; ∅ non concerné

Fig. 7 : Validation des capacités de l'Orbis selon les domaines d'application

# Modélisation de produits 3D maillés de sites intérieurs complexes, par photogrammétrie ou LiDAR



*PFE présenté par :* **Mélanie Fouré**

*Société d'accueil :* **28<sup>ème</sup> Groupe Géographique Quartier Estienne**

*Directeur de PFE :* **CDT Delord**

*Correcteur :* **Pierre Grussenmeyer**

*Encadrant :* **CDT Delord**

---

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Le 28e groupe géographique, implanté à Oberhoffen, est un régiment du commandement du renseignement chargé de mettre en œuvre une spécialité unique et indispensable au sein de l'armée de Terre : le recueil et l'exploitation de l'information géographique. Son action porte notamment sur l'amélioration de la cartographie de référence, la mise à jour et la densification de bases de données cartographiques, mais également le développement de la cartographie par modélisation 3D terrestre et aérienne. Cette cellule est en recherche constante de nouvelles techniques et technologies, dans cette optique ils interviennent dans des projets de modélisation Photogrammétrie et LiDAR complexes. Ce PFE regroupe 3 projets distincts de modélisation photogrammétrie et/ou LiDAR.

## 2. Les souterrains

Le premier projet porte sur la modélisation d'anciens souterrains de l'armée maintenant abandonnés. Le scan 3D de tunnels constitue un enjeu technologique central, ces espaces confinés, longs et complexes posent des défis importants en matière de cartographie :

- Faible accessibilité
- Géométrie irrégulière
- Absence de signal GNSS
- Luminosité réduite voire absente

Dans ce contexte, les systèmes de cartographie mobile intégrant des capteurs LiDAR couplés à des algorithmes SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) sont une solution prometteuse. Récemment, une étude comparative sur plusieurs systèmes SLAM portables a été effectuée dans un tunnel d'essai simulant des conditions réelles [Trybala et Remondino, 2023] avec comme

critères d'évaluations la précision géométrique, la densité du nuage de point et la complétude de la reconstruction. Les résultats mettent en évidence des performances variables selon le système, mais confirment la pertinence du SLAM LiDAR dans ces environnements.

Pour cette partie du projet l'équipe s'est rendue sur une base militaire située hors de Strasbourg durant 9 jours durant lesquels ont été effectués plusieurs scans consolidés sur le logiciel AURA. Le Scanner SLAM utilisé pour ces relevés est l'Hovermap Emesent ; il permet de mesurer 600,000 points/sec avec une précision de  $\pm 15$  mm en intérieur, pour une précision attendue sur ce type de projet inférieure à 10cm. L'Hovermap a été transporté en mode « sac à dos » et les scans ont été effectués dans un ordre précis permettant suffisamment de recouvrement entre chaque acquisition tout en respectant un itinéraire et des mouvements précis, ainsi qu'une vitesse modérée.



Fig. 1 : Fragment du nuage Hovermap après consolidation des acquisitions

Afin de géo-référencer le projet un cheminement polygonal a été réalisé dans les tunnels squelette du souterrain, nous permettant ainsi de relever des points de détails utiles pour consolider les nuages entre eux (Figure 1) avec une précision globale inférieure à 5cm. Ce projet avait également pour but de tester l'Hovermap et de se familiariser avec le logiciel et la méthode de consolidation du logiciel associé AURA.

La finalité de ces relevés a été la création d'orthophotos après import du nuage consolidé dans le logiciel Agisoft Métashape, puis le dessin de plan 2D du site sur le logiciel QGIS. Ces acquisitions permettront également de calculer les volumes et d'avoir une meilleure connaissance du site.

### 3. La Cathédrale Notre-Dame de Strasbourg

La cathédrale Notre-Dame de Strasbourg, chef-d'œuvre de l'art gothique, est l'un des monuments les plus emblématiques d'Europe et de nombreuses parties du bâtiment présentent aujourd'hui des signes de fragilité. Dans ce contexte, il est devenu essentiel de disposer de plans précis et actualisés de l'édifice. C'est pourquoi une campagne de modélisation 3D

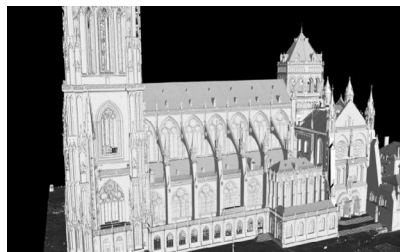


Fig. 2 : Maillage Cathédrale de Strasbourg face Sud-ouest

a été lancée, fruit d'une collaboration entre la Direction Régionale des Affaires Culturelles (DRAC), la Direction des Affaires Culturelles (DAC), la Direction Départementale des Territoires (DDT) et le 28<sup>ème</sup> Groupe Géographique de l'Armée de Terre. Cette association a vu le jour dans

une optique de mise en commun des compétences et du matériel de numérisation. Elle permettra de documenter avec une grande précision géométrique l'état actuel de la cathédrale.

Cette campagne de numérisation comporte deux parties principales, la numérisation extérieure (Figure 2), qui sera détaillée dans ce PFE, et la numérisation intérieure qui sera réalisée dans un second temps ; la technique de numérisation choisie est la photogrammétrie car elle permet de produire un rendu suffisamment détaillé pour mettre en évidence toutes les détériorations.

Un peu plus de 10.000 photos ont été prises au Canon EOS 6D Mark 2, avec objectif SIGMA 24mm, en mode manuel, et 20.000 au drone Drone DJI Mavic 3<sup>E</sup> pour les parties non accessibles. Un réseau Topographique a été créé sur et autour de la cathédrale afin de géoréférencer le projet et de contrôler l'exactitude de la modélisation réalisée.

La complexité de la modélisation de cet ouvrage est principalement due à son envergure et son architecture très détaillée en relief, du fait de la technique de modélisation choisie, le volume de données à traiter, en plus du temps d'acquisition, est considérable. Le taux de recouvrement entre chaque cliché couplé à une distance à l'objet faible oblige à multiplier les photos. Des stratégies doivent être trouvées afin de réussir à traiter correctement toutes les données. Une difficulté supplémentaire a été la haute fréquentation du lieu, qui a demandé des adaptations tant sur la partie photogrammétrique que sur la partie topographique.

#### 4. L'escalier en colimaçon de la Flèche

Toujours dans l'optique de restauration de la Cathédrale, les prochains travaux seront réalisés sur un escalier en colimaçon particulièrement dégradé de la Flèche. Il a donc été demandé une photogrammétrie intérieure et extérieure de celui-ci afin de planifier au mieux les travaux. Cet escalier d'une hauteur de 32m compte 146 marches qui s'enroulent autour d'un pilier central laissant un passage d'une largeur d'1m.

Le relevé 3D d'un escalier de ce type pose des défis techniques en raison de la géométrie hélicoïdale, des espaces confinés et de la luminosité. Il faut alors appliquer une photogrammétrie



Fig.3 : Exemple d'images fisheye orientées vers l'avant et l'arrière acquises avec le Samsung 360, Perfetti et al., 2018

spécifique à ce type d'environnement. Il est possible d'utiliser un objectif fisheye (Figure 3) comme cela a été fait pour l'escalier Minguzzi de la cathédrale de Milan [Perfetti et al., 2018].

La seconde méthode consiste à utiliser un appareil photo classique avec un objectif grand angle. Il s'agit alors de photographier chaque section de l'escalier en spirale, en couvrant toutes les surfaces (marches, mur, colonne centrale, plafond), cette méthode engendre un volume élevé de photos, et est plus exigeante en terme de temps de prise et de traitement mais permet une documentation très fine et fidèle de l'architecture en utilisant des Ground Contrôle Point (GCP) pour contrôler la géométrie de la modélisation. La deuxième option a été mise en œuvre à l'aide du Canon EOS 6D Mark 2, avec objectif SIGMA 24mm, et 14mm (Figure 4).



*Fig.4 : Test de texture d'une première modélisation intérieure sur 2 paliers*

Ces conditions rendent impossible un cheminement topographique, et impliquent pour la photogrammétrie un nombre de photos important. Une solution a été trouvée grâce aux larges fenêtres qui permettent des visées de points intérieurs depuis l'extérieur, un réseau de point de contrôles photogrammétriques a donc été placé à l'intérieur et à l'extérieur de l'escalier bien que leur disposition dans l'espace soit non idéale et limitée.

La solution adoptée pour assurer la cohérence géométrique malgré la répartition des points a été la fusion de données LiDAR avec les données photogrammétriques. Une partie de mon projet adonc été de réaliser la combinaison des données photogrammétriques aux données LiDAR pour créer un nuage de point dense hybride qui puisse par la suite être maillé puis texturé à partir des données photogrammétriques.

## 5. Conclusion

Les relevés réalisés au cours de ce projet illustrent la complémentarité entre photogrammétrie et LiDAR pour documenter des environnements complexes tels que les tunnels, escaliers hélicoïdaux et édifices patrimoniaux de grande envergure. Chaque technique, selon le contexte spatial, présente des avantages spécifiques en termes de précision, rapidité et recouvrement.

## 6. Références

[Trybala et Remondino, 2023] Trybała.P, Kasza.D, Wajs.J, Remondino.F, (2023), Comparison of low-cost handheld LiDAR-based SLAM systems for mapping underground tunnels, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLVIII-1/W1-2023 12th International Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT 2023), 24–26 May 2023, Padua, Italy

[Perfetti et al., 2018] Perfetti, L.; Polari, C.; Fassi, F.; et al. Fisheye Photogrammetry to Survey Narrow Spaces in Architecture and a Hypogea Environment. In *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modelling*; Remondino, F., Georgopoulos, A., González-Aguilera, D., Agrafiotis, P., Eds.; MDPI: Basel, Switzerland, 2018; pp. 3–28.

# Création des maquettes numériques des châteaux du Pflixbourg et du Schrankenfels dans leur état actuel et dans le cadre d'une reconstitution historique



*PFE présenté par :* **Romain Hypolyte**  
*Société d'accueil :* **Laboratoire ICube, INSA Strasbourg**  
*Directeur de PFE :* **Mathieu Koehl**  
*Correcteur :* **Emmanuel Moisan**  
*Encadrant :* **Mathieu Koehl**



## 1. Introduction du contexte et des objectifs du projet

Depuis le début de l'année 2023, l'équipe TRIO du laboratoire ICube de Strasbourg est impliquée dans le projet INTERREG VI – *Châteaux rhénans / Burgen am Oberrhein*. Ce projet transfrontalier vise à faire connaître, valoriser et promouvoir les châteaux forts situés dans la région du Rhin supérieur.

L'un des objectifs principaux du projet est de mettre en valeur ces monuments historiques à travers divers supports numériques, tels que des maquettes 3D virtuelles, des vidéos immersives ou encore l'usage de technologies émergentes. Ces outils permettent non seulement de documenter l'état actuel des édifices, mais également de reconstituer leurs états passés, offrant ainsi au public la possibilité de se projeter dans le temps et de mieux comprendre l'histoire des lieux. Cette dimension temporelle, combinée à la modélisation spatiale, donne naissance à une approche en quatre dimensions (4D), enrichissant significativement l'expérience de médiation patrimoniale.

Dans ce cadre, les sites du Pflixbourg (cf. Figure 1), situé à Wintzenheim (68), et du Schrankenfels (cf. Figure 2), à Soultzbach-les-Bains (68), font aujourd'hui partie intégrante du projet. Plusieurs études antérieures ont d'ailleurs été menées par des étudiants de l'INSA Strasbourg dans le contexte de leurs projets de fin d'études, portant notamment sur les ruines des châteaux du Ramstein (67 – Scherwiller), du Hugstein (68 – Buhl), de l'Oedenbourg (67 – Orschwiller), ainsi que sur d'autres sites fortifiés de la région.



Fig. 1 : Château du Pflixbourg

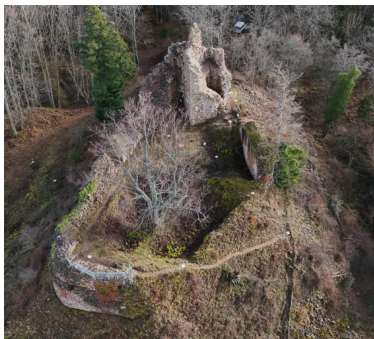


Fig. 2 : Château du Schrankenfels

Ce projet de fin d'études poursuit plusieurs objectifs complémentaires autour de la représentation numérique du patrimoine bâti. Il débute par l'élaboration d'un état de l'art approfondi, visant à identifier les outils théoriques, techniques et méthodologiques nécessaires à la modélisation 3D et 4D du patrimoine architectural.

S'appuyant sur ces fondements, le travail se concentre ensuite sur la mise en œuvre de méthodes de relevé, de traitement et de modélisation, en vue de produire des maquettes numériques précises des châteaux dans leur état actuel. Parallèlement, des modélisations 4D représentant leur état historique sont réalisées, permettant in fine de générer une vidéo immersive destinée à la valorisation du patrimoine auprès du grand public.

Dans cette perspective, et dans une logique alliant optimisation des données et amélioration de la qualité des rendus, plusieurs méthodes ont été explorées au cours de ce projet. Des analyses comparatives seront menées afin de mettre en évidence les performances, les avantages et les limites des différentes approches, dans le but d'orienter les choix méthodologiques futurs en matière de modélisation 3D et 4D du patrimoine.

## 2. Acquisition et traitement des données

Dans cette étude, deux approches principales sont employées : la photogrammétrie, basée sur un ensemble de photographies prises sous différents angles, et la lasergrammétrie, qui utilise un scanner laser 3D terrestre.

Ces méthodes permettent d'obtenir un nuage de points dense. Le nuage du château du Pflixbourg a été généré à partir d'une acquisition mixte, associant ces deux techniques. Quant au site du Schrankenfels, une acquisition entièrement photogrammétrique, combinant prises de vues terrestres et aériennes, a été réalisée.

Le projet détaille les différentes étapes de traitements (cf. Figure 3) et propose des analyses comparatives. Les données issues du scanner laser ont été traitées avec le logiciel *FARO Scene*, tandis que le traitement photogrammétrique a été effectué avec le logiciel *Agisoft Metashape*.

Avant d'aborder l'étape de maillage, qui consiste à convertir le nuage de points en une maquette 3D, il est essentiel de nettoyer et d'optimiser le nuage dense. Le logiciel open source *CloudCompare* a été utilisé pour réaliser diverses opérations, telles que la segmentation manuelle, le filtrage du bruit (notamment via les méthodes *Statistical Outlier Removal* et *Delete Noise*), le recalage des nuages à l'aide de l'algorithme *ICP (Iterative Closest Point)*, ainsi que le rééchantillonnage.

Ces traitements permettent ensuite de procéder au maillage et au texturage des modèles.

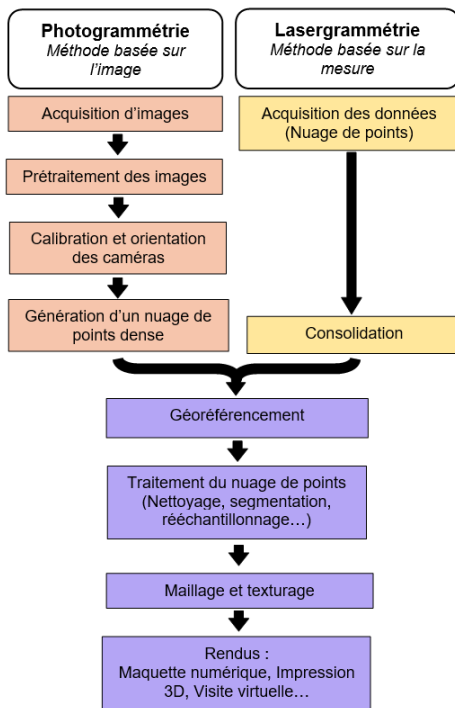


Fig. 3 : Chaîne de traitement : Photogrammétrie et Lasergrammétrie

Dans le but de mener une étude comparative, plusieurs modèles ont été générés en faisant varier certains paramètres du nuage de points. Le maillage via la carte de profondeur a également été étudié et intégré à cette analyse. La comparaison, basée sur la qualité visuelle, le temps de calcul et le poids des fichiers générés, a permis d'identifier la solution offrant le meilleur compromis entre légèreté et niveau de détail.

En raison de la végétation dense, un nettoyage fin du maillage demeure nécessaire. Le logiciel Blender, qui offre plusieurs outils adaptés, a été utilisé pour cette étape. Le protocole ainsi que les commandes employées sont détaillés dans ce projet.

Enfin, pour accroître le réalisme, une étape de texturage a été réalisée à partir des images acquises sur le terrain.

### 3. Modélisation 4D de l'état historique des châteaux

Afin de reconstituer les châteaux dans leur état d'origine, une collaboration étroite avec un spécialiste du patrimoine bâti s'est avérée indispensable. Ce travail conjoint garantit la cohérence historique et architecturale des modèles numériques produits. Dans le cadre de ce projet, l'archéologue Jacky Koch a accompagné l'ensemble du processus afin d'assurer la validité scientifique des reconstitutions.

La modélisation repose sur l'analyse de plans restitués, de dessins d'archives ainsi que de documents écrits (articles, thèses, journaux anciens, etc.). Ces sources constituent une base documentaire essentielle pour obtenir une reconstitution géométrique fidèle des édifices.

La reconstitution des châteaux du Pflixbourg (cf. Figure 4) et de Schrankenfels (cf. Figure 5) a été réalisée à l'aide de Blender, un logiciel libre et open source largement reconnu dans le domaine de la modélisation 3D. Bien qu'il puisse être complexe à prendre en main, il offre de nombreuses possibilités, notamment la création d'objets à partir de formes paramétriques, ainsi que la manipulation directe des maillages. Les modèles de l'état actuel ont d'ailleurs servi de base pour garantir la cohérence des proportions, comme les hauteurs de murs ou certains éléments architecturaux tels que les ouvertures, archères ou fentes d'éclairage.

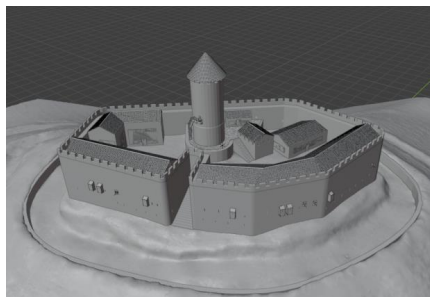


Fig. 4 : Reconstitution du château du Pflixbourg

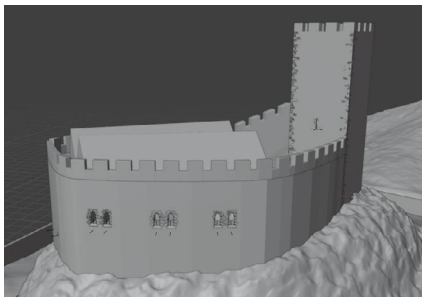


Fig. 5 : Reconstitution du château du Schrankenfels

L'un des atouts majeurs de Blender réside dans son système de *modifiers*, des outils non destructifs qui facilitent l'optimisation et la structuration des modèles. Plusieurs *modifiers* ont été utilisés dans le cadre de ce travail, notamment :

- **Boolean** : pour combiner ou soustraire des volumes ;
- **Array** : pour dupliquer des éléments selon un motif régulier ;
- **Displacement** : pour modifier la géométrie à partir d'une image d'entrée.

En complément, Blender propose des chaînes de traitement appelées *Geometry Nodes* (cf. Figure 6), fonctionnant comme des programmes visuels organisés en nœuds interconnectés. Ce système offre une grande souplesse de création et reste relativement facile à modifier. Plusieurs *Geometry Nodes* développés par Étienne Sommer dans le cadre de sa thèse ont été réutilisés, notamment pour fusionner des modèles de terrain de résolutions différentes (zones proches et lointaines), ou pour générer automatiquement des toitures.

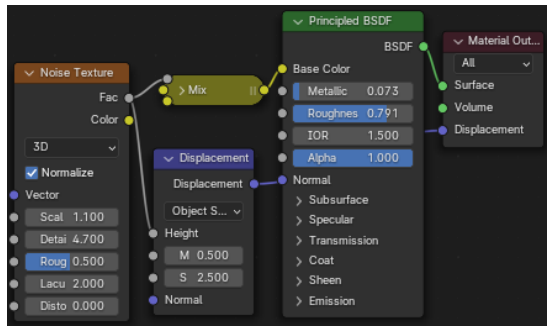


Fig. 6 : *Geometry Nodes* pour la création de textures procédurales

La gestion des textures a également été assurée dans Blender. Le dépliage UV, indispensable pour appliquer correctement une texture sur une surface 3D, a été réalisé manuellement ou à l'aide des outils automatiques pour les formes simples. Certaines textures ont été créées à partir d'images. Toutefois, afin d'éviter certaines limitations liées au réalisme, à la résolution ou à la répétitivité, des textures procédurales ont également été générées via les *Geometry Nodes*. Celles-ci présentent l'avantage d'être paramétrables, réutilisables et facilement adaptables à d'autres projets.

En complément des modèles de l'état actuel et des reconstitutions historiques, un modèle d'incertitude a été élaboré pour chaque château. L'application d'un code couleur aux différents éléments permet de visualiser le degré de fiabilité des hypothèses de restitution.

Enfin, une vidéo immersive, entièrement réalisée avec Blender, offre une exploration dynamique des sites modélisés. Cette démarche contribue à démocratiser l'accès au patrimoine culturel auprès d'un public plus large, favorisant ainsi sa valorisation.

## 5. Conclusion et perspectives

Ce projet met en lumière les apports techniques et méthodologiques de la numérisation du patrimoine, tout en soulignant son importance dans la préservation et la valorisation de notre héritage culturel. La démarche menée ici a mobilisé un large éventail de compétences en topographie, en combinant différentes méthodes d'acquisition comme la photogrammétrie (terrestre et aérienne) et la lasergrammétrie.

Ce travail a également permis d'explorer des étapes clés du traitement des données : la génération, le nettoyage et l'optimisation des nuages de points, la création de maillages, puis l'application de textures. La modélisation des états historiques des châteaux a été réalisée avec Blender, en s'appuyant notamment sur des outils avancés comme les *Geometry Nodes*, qui ont permis d'ajouter du réalisme tout en facilitant certaines tâches complexes. Enfin, une animation 3D immersive est également venue compléter ce projet, en offrant une représentation dynamique et accessible des différents sites étudiés.

L'ensemble de ces travaux s'inscrit dans un domaine en plein développement. Les progrès en matière d'automatisation des traitements, en particulier dans des logiciels comme Blender, ouvrent des pistes intéressantes pour les projets futurs. Par ailleurs, l'optimisation des données reste un enjeu important, afin de proposer des modèles à la fois détaillés, légers et facilement diffusables auprès d'un public plus large.

# Modélisation et simulation 3D de convois exceptionnels pour la détection automatique de collisions dans des environnements complexes

PFE présenté par : **Marceau LEGAL**  
Société d'accueil : *Transports Europe Services*  
Directeur de PFE : *Hervé KAUTZMANN*  
Correcteurs : *Mathieu KOEHL*  
*Emmanuel MOISAN*



## 1. Introduction : vers une simulation réaliste du transport exceptionnel

Chaque semaine, des convois exceptionnels parcourent les routes européennes. Leur itinéraire ne pose pas seulement des questions administratives, mais surtout des contraintes liées au terrain : virages serrés, giratoires étroits, routes bordées d'arbres, tunnels, ponts, zones en pente... Ce sont ces réalités qui rendent chaque trajet complexe et demandent une préparation rigoureuse. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de fin d'études, en partenariat avec le bureau d'étude TES (Transports Europe Services), spécialisé dans la planification de ce type de transports.

Aujourd'hui, pour préparer un itinéraire, on utilise surtout des cartes, des photos aériennes, des schémas 2D et des visites sur le terrain. Ces méthodes, même si elles sont utilisées depuis longtemps, atteignent leurs limites face aux gabarits de plus en plus importants des convois. Il devient donc nécessaire d'utiliser des outils plus visuels et plus précis pour anticiper les points de contact entre le véhicule et son environnement.

L'une des solutions est d'utiliser une représentation en 3D, qui permet de mieux comprendre l'espace et de vérifier plus facilement si le convoi risque de toucher un obstacle. Grâce aux outils de modélisation comme Blender et à l'utilisation de nuages de points, il est possible de simuler le passage du convoi et de repérer automatiquement les zones problématiques.

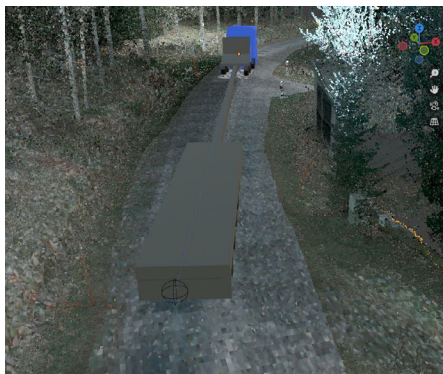
Ce PFE suit cette approche : modéliser un convoi en 3D, l'animer le long d'un trajet, le faire évoluer dans un nuage de points représentant un environnement réel, et détecter automatiquement les collisions. Ce travail s'inscrit dans la continuité d'autres projets menés au sein du laboratoire ICube de l'INSA Strasbourg, comme celui de Thomas Delacourt (2016), qui utilisait une méthode en 2D enrichie dans QGIS. Ici, l'objectif est d'aller plus loin en développant une méthodologie complète dans Blender. L'ensemble repose sur l'utilisation du logiciel open-source Blender et sur l'extension Point Cloud Visualizer, développée par Jakub Uhlík, qui permet de visualiser et filtrer des nuages de points directement dans la scène. Sans ces outils, ce projet n'aurait pas été réalisable dans ce format.



*Ima.1: Vue schématique d'un transport d'éolienne confronté à plusieurs types de contraintes*

## 2. Objectifs techniques et scientifiques

L'objectif principal de ce projet est de répondre à une question concrète : un convoi exceptionnel peut-il réellement passer par un itinéraire donné, en tenant compte de sa taille, de sa trajectoire et de l'environnement réel qu'il traverse ? Il faut alors s'appuyer sur trois points clés : une bonne représentation 3D du terrain, une géométrie réaliste du convoi, et un outil automatique capable d'analyser les éventuels contacts entre les deux, tout au long du trajet.



*Ima.2 : Vue d'un tracteur et de sa remorque suivant une trajectoire importée dans un environnement reconstruit par scanner mobile.*

Le cœur du travail a donc été de construire une méthode simple et reproductible, capable d'animer un convoi articulé dans un nuage de points, et de détecter automatiquement s'il touche quelque chose pendant le déplacement. Tout le système est basé sur Blender et Python, avec l'objectif qu'il soit flexible, facilement modifiable, et utilisable sur d'autres projets dans le futur.

Ce projet s'appuie aussi sur plusieurs articles scientifiques récents. Tönneman (2021) a montré que des volumes simples pouvaient suffire à tester si un véhicule entre en conflit avec son environnement. Xie et Niu (2020) ont proposé une méthode de détection dans des scènes complexes en s'appuyant sur la comparaison de volumes triangulés. Ces travaux ont orienté certaines parties du projet, notamment l'usage de bounding boxes animées pour tester les collisions dans Blender.

Le travail de Delacourt (2016), mené à l'INSA, a également servi de point de départ, en montrant

l'intérêt d'automatiser ce type d'analyse à partir de données 2D enrichies. Ici, la démarche est poursuivie en allant plus loin : les surfaces modélisées sont remplacées par un nuage de points brut, visualisé et traité directement dans Blender grâce à l'add-on de Jakub Uhlík. Les exemples proposés par Balzer (2016), portant sur la simulation d'encombrements, ont aussi renforcé l'idée qu'un environnement open-source pouvait convenir pour des analyses de ce type.

En résumé, le projet ne se limite pas à un outil technique : il s'inscrit aussi dans une démarche de recherche appliquée, qui cherche à valider la faisabilité d'un protocole simple, automatique et libre pour détecter des collisions en 3D dans un contexte de transport exceptionnel.

### 3. Méthodologie : un protocole complet dans Blender

Le développement de l'outil s'est appuyé sur une méthode en plusieurs étapes, pensée pour être claire, adaptable et facilement réutilisable. Tout a été conçu dans Blender, un logiciel open-source qui permet à la fois de travailler en 3D, de gérer des animations, et de créer des scripts en Python. L'add-on Point Cloud Visualizer (PCV), développé par Jakub Uhlík, a joué un rôle essentiel dans le projet : il permet d'importer et manipuler des nuages de points directement dans la scène Blender, ce qui évite de passer par des logiciels externes ou des conversions en maillage.

#### 3.1 Mise en place de la scène 3D

Tout commence par la préparation de la scène. Un nuage de points au format .las est importé via PCV. Il correspond à l'environnement dans lequel évolue le convoi (route, talus, arbres, bâtiments,...). Ce nuage est ensuite repositionné et orienté dans Blender pour correspondre à la réalité terrain. On s'inspire ici des méthodes décrites par Balzer (2016) et Xie & Niu (2020), qui expliquent comment ajuster les repères spatiaux pour garantir la cohérence de l'analyse.

Le convoi est modélisé à partir de volumes simples : un pavé pour le tracteur, un autre pour la remorque. Les deux objets, nommés Truck\_Tractor et Truck\_Trailer, sont animés séparément, avec un système de contraintes et de parentés qui leur permet de suivre un itinéraire tout en conservant leur articulation.

#### 3.2 Animation sur la trajectoire

La trajectoire est en général produite dans un logiciel comme AutoTURN, puis exportée au format .dxf. Elle est importée dans Blender sous forme de courbe, et projetée sur le maillage de la chaussée. Un objet "plan" est ensuite animé le long de cette trajectoire à l'aide du modifier Shrinkwrap, ce qui permet d'adapter automatiquement la hauteur au relief. Le tracteur suit ce plan via des contraintes (Copy Location, Copy Rotation), et la remorque suit par attelage.

Cette manière d'animer le convoi s'inspire des travaux de Tönnehan (2021), qui propose une simulation basée sur des fichiers STL ou CAD et une animation contrainte le long d'un axe défini. Ici, tout se passe dans Blender.

### 3.3 Détection automatique de collisions

Une fois le convoi animé, on cherche à repérer les contacts entre le véhicule et l'environnement. Cette étape est entièrement automatisée grâce à un script Python basé sur PCV. À chaque image de l'animation :

- le nuage est d'abord sauvegardé (archivist\_store),
- puis filtré autour du convoi (filter\_crop\_outside),
- l'état initial est restauré (archivist\_restore),
- et le nombre de points "touchés" est compté.

Ce test est réalisé deux fois à chaque image : une fois pour le tracteur, une fois pour la remorque. S'il reste des points à l'intérieur du volume, c'est qu'il y a eu une collision. Cette méthode rejoint celle proposée par Balzer (2016), qui recommande l'usage de bounding boxes dynamiques pour identifier les conflits spatiaux. Ici, ces volumes suivent le convoi image par image, ce qui permet un test très précis dans le temps et dans l'espace.

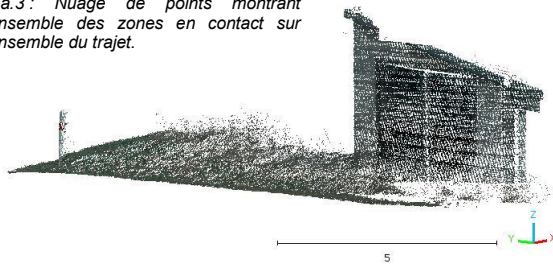
### 3.4 Visualisation et export des résultats

Une fois le traitement terminé, les collisions détectées sont visibles directement dans Blender : les points impactés apparaissent en rouge ou dans une autre couleur selon le choix de l'utilisateur. Ces points peuvent aussi être exportés sous forme de nuages filtrés, analysés ensuite dans des outils comme CloudCompare, ou intégrés à un SIG. Le script peut aussi produire automatiquement un tableau .csv avec le nombre de points touchés à chaque image, ce qui permet d'identifier les zones critiques et de tracer l'évolution du risque sur tout le trajet.

## 4. Résultats obtenus et validation du protocole

Une fois le système mis en place, plusieurs scènes ont été testées pour voir s'il permettait bien de repérer les zones où le convoi entre en contact avec l'environnement. Les cas choisis correspondaient à des situations réalistes rencontrées par TES, comme des routes étroites, des passages en forêt, des giratoires urbains ou encore des tunnels.

*Ima.3 : Nuage de points montrant l'ensemble des zones en contact sur l'ensemble du trajet.*



La première scène testée représentait un tronçon en zone boisée. Le nuage de points venait d'un relevé scanner mobile. Il permettait de visualiser les talus, fossés, et arbres avec assez de détails pour simuler un passage de convoi. Lors de l'animation, plusieurs collisions ont été repérées entre l'arrière de la remorque et des éléments végétaux en hauteur. Ce type de conflit n'aurait pas été visible sur un plan 2D, ce qui montre

l'intérêt d'une simulation dynamique en 3D. Les points détectés ont été exportés dans un fichier .las, ce qui a permis de localiser précisément les zones à risque.

Un autre test a été mené sur un giratoire étroit en ville. Le décor était plus complexe : bordures hautes, îlots, panneaux et trottoirs. Là aussi, le système a détecté plusieurs contacts entre la remorque et les rebords extérieurs, notamment au moment des franchissements. Les collisions se sont produites à des images précises, ce qui a permis d'exporter les données et de les analyser plus finement dans CloudCompare.

Le script a aussi été utilisé dans un cas plus délicat : le passage d'un tunnel. Ce scénario demandait une attention particulière à la hauteur. Le nuage incluait la voûte du tunnel et les équipements

accrochés en hauteur. Malgré un nuage un peu bruité, le test a permis d'identifier des zones où le sommet du chargement frôlait la structure, parfois à moins de 10 cm. Ces contacts ont été visualisés en rouge dans Blender, puis exportés comme un nuage séparé. Là encore, le test a montré qu'une épure 2D ne suffisait pas à valider ce genre de passage.

Au-delà des collisions elles-mêmes, les résultats ont aussi été pensés pour être facilement exploitables. Le script génère des commentaires dans l'invite de commandes qui liste, pour chaque image, le nombre de points détectés en contact. On peut ainsi tracer des graphiques pour identifier les moments critiques sur le trajet. Les exports visuels (captures Blender ou nuages colorisés) permettent de communiquer plus facilement avec des personnes non techniques, comme des élus ou des gestionnaires d'infrastructures. Cette combinaison de données rend l'outil utile aussi bien en phase d'étude qu'en appui à une demande d'autorisation.

Enfin, les résultats ont été comparés à une simulation classique faite sous AutoTURN, avec la même trajectoire. Si la simulation 2D validait globalement le passage en plan, la version 3D a mis en évidence des conflits liés à la hauteur ou à la pente, qui n'étaient pas visibles autrement. Cela confirme l'intérêt de compléter les outils classiques par une simulation 3D automatique, plus proche de la réalité du terrain.

## 5. Limites, perspectives et conclusion

Ce type d'outil, encore en développement, présente forcément quelques limites.

La première limite concerne directement la qualité du nuage de points utilisé. Même en utilisant uniquement des relevés au scanner mobile, la densité et la précision peuvent varier selon la vitesse de passage, les conditions de capture ou l'environnement scanné (zones sombres, végétation, surfaces brillantes, etc.). Certaines zones peuvent être moins bien couvertes, notamment en hauteur ou sur les parties latérales. Ces différences influencent directement la fiabilité du test de collision, surtout quand les marges de manœuvre sont faibles. Il est donc important, avant toute simulation, de s'assurer que les données sont complètes et bien adaptées à l'analyse attendue.

Une autre limite peut être la modélisation du convoi. Pour simplifier les calculs, j'ai utilisé des volumes de type boîte (bounding box) pour représenter le tracteur et la remorque. C'est suffisant pour repérer les contacts principaux, mais ça ne prend pas en compte les petits éléments comme des crochets ou certains détails de la charge. De plus, les mouvements complexes de certaines remorques multi-essieux ne sont pas encore modélisés de façon réaliste.

Concernant l'animation, le suivi se base sur une trajectoire extraite d'AutoTURN, suivie dans Blender avec des contraintes simples. Ce système fonctionne bien pour la position et l'orientation, mais il ne prend pas en compte des effets dynamiques comme le freinage, l'inertie ou les mouvements de suspension. À terme, il serait intéressant de connecter l'outil à un simulateur plus poussé pour intégrer ces aspects.

Malgré ces points à améliorer, plusieurs pistes intéressantes peuvent être envisagées pour la suite. La première serait de créer une interface graphique intégrée à Blender. L'idée serait de permettre à un utilisateur non initié au codage de charger son nuage, d'ajouter un convoi, de lancer la détection, et de visualiser les collisions sans passer par les scripts. Blender permet ce type d'interface avec Python, ce qui rend cette option accessible.

On pourrait aussi imaginer d'étendre le système à plusieurs convois ou à plusieurs itinéraires, pour comparer différents scénarios automatiquement. Cela permettrait de choisir l'option la plus sûre ou la plus rapide selon les contraintes du projet.

En résumé, ce projet a permis de construire un outil simple, automatisé, et efficace pour détecter les collisions entre un convoi exceptionnel et un environnement représenté en 3D. En s'appuyant sur Blender, Python et l'add-on PCV, et en reprenant les idées de travaux existants comme ceux de Tönnehan, Xie et Niu, Delacourt ou Balzer, il montre qu'on peut faire de la simulation utile avec des outils libres. Ce travail ouvre des perspectives pour enrichir les pratiques topographiques et mieux anticiper les risques lors des trajets exceptionnels.

## 6. Bibliographie

- Tönnehan, L. (2021). *3D simulation of special transports on complex routes using CAD and STL-based geometry*. In: Proceedings of the ISMART Conference.
- Xie, H., & Niu, X. (2020). *Collision detection of vehicles in 3D scenes using point cloud data*. *Sensors*, 20(18), 5102.

# **Cheminement topographique en environnement industriel contraint : étude de précision, de méthodologie, de matériel, pour le relevé et l'implantation de points à travers des voiles et dalles.**



*PFE présenté par :* **Pierre Barbieux**  
*Société d'accueil :* **Campenon Bernard Topographie**  
*Directeur de PFE :* **Céline Mataja**  
*Correcteurs :* **Mathieu Koehl et Emmanuel Moisan**  
*Encadrant :* **Cédric PETITJEAN**



---

## **1. Contexte et objectifs du projet**

Dans un environnement industriel contraint, tel que les centrales nucléaires ou d'autres installations complexes, la précision du positionnement des repères de carottage est essentielle pour garantir la sécurité et la conformité des travaux. Ces repères, placés de part et d'autre d'un voile ou d'une dalle, doivent être implantés avec une précision millimétrique afin d'assurer un alignement parfait pour les opérations de détection du ferrailage à l'intérieur du voile puis le forage. Cependant, réaliser un cheminement polygonal classique à l'aide d'une station totale se révèle particulièrement difficile dans ces milieux : les escaliers, passerelles métalliques, caillebotis et autres obstacles rendent l'accès complexe et altèrent la précision des mesures.

Face à cette problématique concrète de topographie en milieu contraint, ce projet a pour objectif principal d'identifier les méthodes de cheminement les plus adaptées à ces conditions, en mettant en balance la précision attendue, les contraintes techniques et logistiques, ainsi que la faisabilité de mise en œuvre sur le terrain. L'étude explore et compare plusieurs approches de relevé et d'implantation, afin de proposer une solution fiable répondant aux exigences spécifiques de ces environnements.

Avec l'évolution des technologies de mesure, telles que la lasergrammétrie (statique ou mobile), de nouvelles opportunités émergent pour améliorer la productivité et la sécurité. Ces outils permettent de réaliser des relevés tout en limitant l'exposition des opérateurs à des environnements dangereux, ainsi d'acquérir des données fiables et précises. Ces avancées, combinées à des considérations économiques comme les coûts et le temps de mise en œuvre, constituent un atout majeur dans la sélection des méthodes.

Cette étude vise à répertorier et comparer différentes méthodes de cheminement, en tenant compte de critères comme la précision, la faisabilité technique, le temps d'exécution et les coûts associés, afin d'identifier la solution optimale pour l'implantation des repères de carottage. Un protocole de test ainsi qu'une étude théorique ont été élaborés afin de garantir une solution fiable et adaptée aux contraintes réelles. Ces éléments sont synthétisés dans une fiche technique opérationnelle permettant de guider le choix de la méthode selon les configurations rencontrées sur le terrain.

## **2. État de l'art des méthodes disponibles**

### **2.1 Station totale : cheminement en centrage forcé et par relèvements consécutifs avec cible**

Le cheminement en centrage forcé est une méthode de relevé topographique qui repose sur l'utilisation de trois trépieds, trois embases, deux prismes et une station totale. Cette technique consiste à installer un prisme sur une station initiale, à effectuer une visée, puis à échanger le prisme et la station totale sans déplacer le trépied ni l'embase. Cette procédure permet d'éliminer les erreurs liées au centrage de l'appareil, ce qui améliore la précision du cheminement. En comparaison avec une méthode classique de stationnement successif au-dessus de points fixes, le cheminement en centrage forcé offre

une précision accrue grâce à la réduction des incertitudes de centrage de l'appareil. Cependant, cette méthode présente des limites notables. Elle nécessite une quantité importante de matériel et implique de nombreux déplacements pour effectuer les échanges entre les prismes et la station totale, ce qui la rend relativement lourde et peu pratique à mettre en œuvre sur le terrain.

Une deuxième méthode envisageable consiste à utiliser une succession de stations libres avec relèvements successifs à l'aide de cibles. Chaque station est positionnée par visées vers au moins trois prismes communs avec la précédente. Cette méthode, plus légère sur le plan logistique (un seul trépied), est adaptée aux milieux contraints. Elle est toutefois exigeante en termes de gestion du matériel (prismes) et peut entraîner une perte de précision cumulative. Elle constitue un compromis pertinent entre souplesse d'exécution et précision acceptable pour des implantations indirectes à travers un voile ou une dalle.

## 2.2 Scanner laser statique

Le scanner laser statique permet un relevé plus rapide, précis et très dense, sans nécessité de mise en station classique. Il fonctionne par balayage de l'environnement depuis des positions fixes, capturant une grande quantité de données 3D sous forme de nuages de points. Le recalage entre les stations de scan peut être réalisé par des cibles géoréférencées, ou bien par des algorithmes d'assemblage automatique tels que ICP (Iterative Closest Point) ou RANSAC. Le scanner laser statique est particulièrement adapté aux environnements complexes ou dangereux, car il réduit l'exposition des opérateurs et permet une documentation complète de l'espace. Sa principale limite réside dans l'absence de fonctionnalité intégrée pour l'implantation de points. Cela rend le processus moins direct et potentiellement moins précis qu'une implantation classique réalisée avec une station totale. Une fois le cheminement terminé de l'autre côté du voile, il n'est pas possible d'implanter immédiatement un point comme on le ferait avec une station classique. Il est nécessaire, par exemple, d'avoir placé au préalable des cibles dans la dernière pièce lors du relevé, afin de pouvoir s'y repositionner ensuite avec une station totale et réaliser l'implantation. Une autre solution consiste à reporter manuellement les cotes obtenues à partir du nuage de points, en utilisant un mètre ruban. Cette méthode implique un traitement intermédiaire : le nuage doit être consolidé et les coordonnées des points à implanter calculées avec précision avant toute intervention physique.

## 2.3 Scanner laser mobile

En combinant LiDAR, IMU et caméras, ces systèmes permettent une acquisition continue en déplacement. Le Faro Orbis, par exemple, exploite ces capteurs pour produire des nuages de points en temps réel, grâce à la technologie SLAM. Par rapport aux scanners statiques, il présente plusieurs avantages : une grande rapidité d'acquisition, la possibilité de capturer des environnements complexes sans interruption, et une réduction notable du temps d'intervention sur site. Il est particulièrement efficace pour les zones difficiles d'accès ou les parcours étroits comme les escaliers ou passerelles. Cependant, cette mobilité accrue implique aussi certaines limites. Le système est sensible aux erreurs cumulées lors du recalage SLAM, ce qui peut entraîner une dérive, notamment sur de longues distances ou en l'absence de géométries structurées. De plus, la précision obtenue est généralement inférieure à celle d'un scanner statique, surtout en l'absence de points de contrôle ou de cibles de recalage.

## 2.5 Outils alternatifs

Le transpointeur Hilti PX10 est un outil d'implantation basé sur un système de localisation électromagnétique, conçu pour transférer des points à travers un mur ou un voile. Il fonctionne à l'aide de deux modules, un émetteur et un récepteur, qui permettent de localiser un point précis de part et d'autre d'un obstacle, avec une précision annoncée à  $\pm 3$  mm. Il est conçu pour traverser des murs d'une épaisseur allant jusqu'à 1,35 mètre. Cet outil se révèle particulièrement utile pour les opérations de carottage ou d'ancrage nécessitant un alignement exact à travers un voile. Sa fiabilité est fortement dégradée par la présence de ferrailage dans les voiles, ce qui provoque des interférences électromagnétiques et rend l'appareil parfois inutilisable. Malgré ces limites, il pourrait être intéressant de réaliser des essais spécifiques pour évaluer son potentiel en contexte réel et ainsi mieux cerner ses conditions d'emploi optimales.

### 3. Étude expérimentale

Afin de rapprocher les essais des conditions réelles rencontrées dans une centrale nucléaire, deux sites de test ont été sélectionnés au sein des locaux de l'entreprise. Le premier site se situe dans le parking souterrain, où un cheminement a été réalisé de part et d'autre d'un pilier. Ce parcours a permis d'alterner entre des grandes visées, un escalier étroit, de nouveau une grande visée, un second escalier symétrique, et enfin une dernière grande visée. Ce scénario reproduit une succession de configurations contraignantes typiques des installations industrielles complexes.

Le second site se situe dans une cage d'escalier, depuis le rez-de-chaussée jusqu'au niveau 4. Contrairement au premier cas, ici les visées sont courtes mais répétitives, avec un environnement géométrique similaire à chaque étage. Cette configuration permet d'évaluer la stabilité et la dérive des mesures sur une grande hauteur verticale dans un environnement fermé.

Sur chacun de ces deux sites, les différentes méthodes décrites précédemment ont été mises en œuvre pour effectuer un cheminement complet. Les résultats obtenus ont été comparés entre eux ainsi qu'aux vérités terrain, établies par des points de contrôle indépendants. En complément de cette analyse géométrique, le temps passé sur le terrain pour chaque méthode a également été mesuré et comparé, afin d'évaluer leur efficacité opérationnelle dans des conditions proches du réel. Ce protocole permet ainsi de mesurer objectivement la précision, la répétabilité, la durée d'intervention et la praticité d'exécution de chaque approche.

### 5. Étude théorique

J'ai mené une étude théorique afin de vérifier la cohérence des résultats obtenus empiriquement. J'ai d'abord analysé le cheminement en centrage forcé en appliquant une transmission d'erreurs moyennes quadratiques (EMQ) sur les équations du gisement zéro (G0), puis sur les points lancés tout au long du cheminement. Cette approche permet d'évaluer l'amplification des incertitudes liées aux visées et aux mesures de distance, afin d'identifier les zones potentiellement sujettes à risque de dérive. Ces calculs ont été appliqués à mes relevés pour confirmer la justesse des résultats observés sur le terrain.

Dans un second temps, j'ai utilisé le logiciel de compensation topométrique CoMeT pour observer la précision des points obtenus à l'issue de chaque méthode testée à la station. Ce logiciel permet de modéliser un réseau topographique, de réaliser un calcul compensé par la méthode des moindres carrés, et d'obtenir des indicateurs précis sur les incertitudes finales. Cette étape a permis de conforter les résultats obtenus empiriquement tout en mettant en lumière les effets de configurations géométriques ou de visées imparfaites sur la précision globale du cheminement à la station.

Cette étude a également permis de mettre en évidence un facteur déterminant dans la qualité d'un cheminement topographique : la longueur des visées. Il a été constaté que les visées très courtes dégradent fortement la précision globale du cheminement. Cette dégradation est due à une sensibilité accrue aux erreurs angulaires, dont l'impact relatif augmente à mesure que la distance entre les points diminue. Ce constat justifie la nécessité d'optimiser la configuration géométrique des stations, même dans des environnements contraints, afin de garantir une qualité de mesure suffisante.

### 6. Conclusion et perspectives

Ce travail a permis d'explorer en profondeur les différentes méthodes de cheminement topographique envisageables dans des environnements industriels contraints, en particulier pour des implantations à travers des voiles. À travers une approche combinant expérimentation, modélisation et analyse théorique, il a été possible d'évaluer les compromis entre précision, logistique et faisabilité opérationnelle.

Les méthodes classiques par station totale conservent l'avantage en termes de précision, mais montrent des limites claires en matière de déploiement dans les milieux restreints. À l'inverse, les approches par scanner laser (statique ou mobile) offrent une grande souplesse d'acquisition, mais nécessitent des protocoles rigoureux pour atteindre la précision requise en implantation. L'étude théorique a permis de valider les observations terrain et d'expliquer les dérives rencontrées, notamment dans les cas de visées courtes.

À travers la mise en œuvre de tests concrets dans deux configurations distinctes et une analyse fine des résultats, ce projet propose une grille d'évaluation robuste pour guider le choix méthodologique selon les contraintes du site.

En perspective, un approfondissement spécifique de l'étape d'implantation serait particulièrement pertinent. Il s'agit d'un moment critique du processus où une grande partie de la précision finale ne peut pas être améliorée, mais peut facilement être dégradée. Une piste d'amélioration consisterait à développer des méthodologies hybrides, combinant les avantages de plusieurs approches : Une piste d'amélioration réside dans la mise en place de méthodologies hybrides permettant de limiter les pertes de précision lors du cheminement. Cette approche viserait à articuler plusieurs techniques de mesure pour renforcer la fiabilité du positionnement sans introduire de rupture dans la continuité géométrique du cheminement. L'objectif serait de sécuriser ces phases sensibles, qui restent les plus exposées aux imprécisions cumulées tout au long du processus de relevé et de calcul.

# Mise en compatibilité de nouvelles stations totales dernière génération de la société HAPPYSURVEY avec un logiciel de monitoring propriétaire HYP-ARC

PFE présenté par : Théophile Duboz  
Société d'accueil : Hyp-Arc  
Directeur de PFE : Olivier Le Donge  
Correcteur : Gilbert Ferhat



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le domaine de la topographie appliquée au monitoring, la surveillance d'ouvrages d'art ou d'infrastructures sensibles est une nécessité incontournable pour garantir la sécurité des constructions et prévenir les risques liés aux mouvements de terrain ou aux travaux à proximité. Pour répondre à ces enjeux, la télésurveillance s'impose comme une solution fiable, automatisée et réactive. Contrairement à l'auscultation, la télésurveillance permet de recueillir des données à haute fréquence, voire quasiment en temps réel, sans intervention humaine sur site pendant l'acquisition.

Dans ce contexte, la télésurveillance permet une détection rapide des mouvements anormaux et le déclenchement d'alertes automatiques en cas de franchissement de seuils prédéfinis. S'inscrivant dans cette logique d'automatisation et de simplification, de nouveaux équipements intégrés émergent. Parmi eux, la station totale robotisée Happy Saturn (Figure 1), développée par la société Happy Survey, se distingue. Ce format tout-en-un facilite le déploiement du dispositif sur les chantiers souvent marqués par des contraintes logistiques et constitue une alternative sérieuse aux systèmes traditionnels, souvent composés de multiples éléments à connecter manuellement.



Fig. 1 : Station totale Happy Saturn (Happy Survey)

Ce travail s'inscrit ainsi dans une démarche d'intégration complète de la station Happy Saturn au sein du dispositif de télésurveillance d'Hyp-Arc et plus précisément dans le système de monitoring automatisé VIGILE. L'objectif est de rendre cet instrument pleinement opérationnel, interopérable et maîtrisé, à toutes les étapes de la chaîne de mesure et de traitement des données. L'intégration ne se limite pas à l'aspect matériel. Elle exige une adaptation approfondie de la station à l'environnement logiciel existant, en tenant compte de la gestion des flux de données et des contraintes liées au cloud constructeur (Happy Hélios). L'enjeu fondamental est de garantir à Hyp-Arc un contrôle total sur l'acquisition, le stockage, l'exploitation et la sécurisation des données, indépendamment de tout logiciel ou hébergement externe non maîtrisé.

Ce processus repose sur plusieurs étapes clés, à commencer par l'acquisition et la configuration des accessoires. Il comprend également un accès initial à la plateforme Happy Hélios du constructeur, afin d'analyser les logiques d'échange de données. Enfin, une prise en main technique approfondie de la station est réalisée, d'abord à travers une série de tests en atelier, puis, dans la mesure du possible, lors d'une phase d'expérimentation en conditions réelles sur chantier. Un point clé de ce projet est la connexion entre la station Happy Saturn et le logiciel VIGILE. Il s'agit de faire en sorte que les deux systèmes communiquent efficacement entre eux, en adaptant les formats de données et les protocoles utilisés, pour assurer une continuité dans le traitement des mesures, l'analyse et le déclenchement des alertes automatiques. L'objectif est que la station totale s'intègre parfaitement au système de télésurveillance existant, sans interruption ni perte d'information.

En parallèle, une vigilance particulière est portée à l'accès et à la gestion des données brutes. Il est essentiel de pouvoir les récupérer librement, les traiter localement à l'aide d'outils développés par Hyp-Arc et en conserver la pleine propriété.

## 2. Présentation du système de télésurveillance actuel VIGILE

Le système VIGILE constitue le cœur du dispositif de télésurveillance automatisée développé par Hyp-Arc. Cette plateforme logicielle interne centralise, traite et restitue les mesures issues de stations totales robotisées déployées sur site, dans le cadre du suivi d'ouvrages d'art ou d'infrastructures sensibles. Pour bien comprendre les enjeux liés à l'intégration d'un nouveau matériel comme la station totale Happy Saturn, il est essentiel de rappeler le fonctionnement du système actuel sur le terrain (Figure 2). Sur chaque chantier, une ou plusieurs stations totales sont installées sur des mâts ou potences, selon les contraintes environnementales. La station totale est reliée à une armoire électrique, qui assure à la fois l'alimentation électrique et la transmission des données. La communication entre les deux appareils s'effectue généralement via un port série.



Fig. 2 : Dispositif de télésurveillance VIGILE

Des prismes sont fixés sur les zones critiques de l'ouvrage à surveiller et également en dehors de la zone sensible, servant de références, sur des supports stables.

Ces références permettent de calculer les coordonnées de la station libre à chaque cycle. En complément, des levés manuels sont réalisés avant et après les travaux, afin de comparer les mesures du système automatisé avec les mesures de référence et de valider les déplacements enregistrés tout au long de la mission. Une fois les éléments installés sur le chantier, une phase dite d'apprentissage des cibles est réalisée. Elle consiste à effectuer une première mesure de tous les prismes à l'aide de la station totale, afin de déterminer leurs coordonnées approchées dans le référentiel local. Un premier cycle de mesure est ensuite lancé pour vérifier que l'ensemble des points est bien mesuré. Cette étape est commandée depuis un PC (ou un smartphone) grâce au logiciel d'accès à distance LogMeln. À ce stade, une configuration est effectuée pour définir la fréquence des cycles, la méthode du double retournement, la définition des seuils d'alerte et la création de groupes de points (par rail, par profil) permettant d'optimiser l'ordre de mesure. Une fois ces paramètres validés, le système est prêt à fonctionner, de manière autonome et continue, pendant toute la durée du chantier.

## 3. Solutions similaires existantes

La littérature scientifique et technique consultée dans le cadre de ce projet met en évidence une évolution constante des systèmes de télésurveillance, avec une généralisation progressive des stations totales robotisées et des capteurs GNSS pour la surveillance d'ouvrages ou de chantiers sensibles. Les travaux fondateurs de Michel et al. (2003) et de Cranenbroeck & Brown (2004), présentés lors des conférences de la Fédération Internationale des Géomètres (FIG), soulignent l'intérêt précoce pour la mise en réseau de stations totales motorisées dans une optique de monitoring en continu. Cette approche a été enrichie par des contributions récentes du 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) (Kutterer et al., 2025 ; Niemeier, 2025 ; Zaczek-Pepliška & Kowalska, 2025), qui proposent une vision actualisée des systèmes intégrés, de l'infrastructure logicielle et de la fusion de données multi-capteurs dans des milieux complexes.

Sur le plan académique, plusieurs mémoires d'ingénieurs réalisés à l'INSA Strasbourg (Martin, 2012 ; Lefebvre, 2014 ; Autin, 2015 ; Chérel, 2017) présentent des cas concrets d'intégration de stations totales et de solutions logicielles comme VIGILE, en tenant compte des contraintes de terrain (environnement, météo, type d'ouvrage) et des besoins de traitement automatisé des données.

Le mémoire de Martin (2012) en particulier détaille l'architecture logicielle de VIGILE, qui constitue aujourd'hui la base du système utilisé par Hyp-Arc. Du côté des constructeurs, les documentations techniques fournies par Leica, Happy Survey, Geodata, ITMSOL ou encore Terra apportent des éléments sur les capacités matérielles, les options de connectivité, les protocoles de communication et les spécificités logicielles des stations totales utilisées dans les projets de surveillance. Cependant, ces documents manquent souvent d'harmonisation : différences de terminologie, formats propriétaires variés, protocoles fermés ou peu documentés.

Les systèmes actuels de suivi topographique s'appuient sur un ensemble de technologies, associant stations totales motorisées, récepteurs GNSS, capteurs météorologiques et plateformes logicielles de traitement et de visualisation. Ces dispositifs permettent un suivi précis et automatisé des déplacements, avec des précisions subcentimétriques, en continu. Les stations totales robotisées des grandes gammes constructeurs (Leica TPS, Trimble S Series, Topcon GT) sont notamment utilisées pour leur capacité à cibler automatiquement des prismes réfléchissants ainsi que pour leur précision angulaire (souvent de 0,5" ou 1"). Ces instruments sont le plus souvent couplés à des logiciels spécialisés tels que Leica GeoMoS ou des solutions propriétaires comme VIGILE et SkillAlert, qui assurent le pilotage à distance, le traitement des données brutes et l'envoi d'alertes automatiques.

En parallèle, les récepteurs GNSS sont de plus en plus utilisés dans des systèmes hybrides, notamment pour la surveillance de structures exposées à des mouvements lents et continus. Aussi, l'évolution vers des architectures cloud s'accélère. Les données sont généralement transmises par modules 4G vers des serveurs distants. Des solutions comme GeoMoS Now! (Leica) ou SwissMon (Terra®) offrent ainsi des interfaces accessibles à distance, avec des alertes configurables et des tableaux de bord interactifs.

#### **4. Présentation de la station totale Happy Saturn**

La station totale Happy Saturn, développée par Happy Survey, se distingue par son architecture tout-en-un et ses fonctionnalités avancées, combinant les performances d'un instrument de haute précision avec les exigences actuelles du monitoring automatisé. Première station dite Real Time Robotic (RTR) du marché, elle intègre nativement la motorisation, la connectivité 4G, une interface Android et une caméra embarquée, le tout dans un format compact destiné à simplifier les déploiements sur site. Sur le plan technique, la station Happy Saturn offre une précision angulaire d'une seconde d'arc (1") et une précision en distance de 1 mm + 1 ppm, assurant des mesures fiables à longue portée. Elle existe également avec une précision angulaire d'une demi-seconde d'arc (0,5"). Sa vitesse de rotation (jusqu'à 180°/s) permet des cycles de mesure rapides, optimisant ainsi l'efficacité en contexte de télésurveillance. Les mesures peuvent être stockées localement sur mémoire interne ou carte SD, ou transmises automatiquement sur le cloud propriétaire Happy Hélios, via la carte SIM 4G intégrée. Grâce à la caméra embarquée, il est possible de visualiser à distance le champ de visée et de contrôler l'environnement autour de la cible. La connexion 4G permet à la fois la synchronisation des mesures avec le cloud et le pilotage à distance de la station via AnyDesk.

#### **5. Expérimentations & Résultats**

Au cours de cette phase d'expérimentations, nous avons d'abord identifié et commandé l'ensemble des accessoires indispensables au bon fonctionnement de la station Saturn (câble d'alimentation, contrôleur dédié, carte SIM 4G et accès à la plateforme cloud Happy Hélios). Nous avons ensuite organisé plusieurs rendez-vous téléphoniques avec le constructeur afin d'opérer les mises à jour nécessaires et d'associer le contrôleur à la station Saturn pour qu'ils communiquent correctement entre eux. Nous avons configuré AnyDesk et Happy Hélios pour obtenir un contrôle total à distance. Chaque jour en atelier, nous avons lancé des cycles de monitoring au cours desquels nous avons fait varier différents paramètres (la fréquence d'acquisition, le choix des références pour le calcul de la station libre, le nombre de mesures de distance par face, l'activation du double retournement en phase de surveillance et l'application des corrections atmosphériques). Enfin, nous avons réalisé un essai de surveillance entièrement à distance (de l'apprentissage des points jusqu'à la visualisation des résultats, en passant notamment par l'utilisation de la caméra) et analysé les données recueillies pour identifier les fonctionnalités à améliorer ou à ajouter.

Ainsi, la station totale peut être facilement déployée sur le terrain dès lors qu'elle est alimentée sur secteur (ou par une batterie rechargée à l'aide de panneaux solaires), qu'elle est reliée à son contrôleur et connectée au cloud via la 4G, avec un pilotage à distance assuré grâce à l'application AnyDesk. Après quelques ajustements initiaux réalisés en collaboration avec le constructeur, la caméra embarquée fonctionne de manière fiable. Le double retournement, inutile lors de l'apprentissage où seules les coordonnées approchées sont recherchées, est en revanche automatiquement activé en phase de monitoring. Nous avons également constaté que l'augmentation du nombre de mesures de distance par face améliore la précision des coordonnées calculées, ce qui renforce la confiance dans les résultats. En atelier, les conditions atmosphériques étant stables, l'application ou non des corrections (basées sur des valeurs constantes de température et de pression, comme sur des stations totales classiques) n'a pas d'impact significatif. L'ajout futur d'une station météo permettrait toutefois d'affiner ces ajustements. Enfin, nous avons identifié plusieurs points d'optimisation à transmettre au fabricant en vue d'améliorations futures.

## 6. Conclusion et perspectives

L'intégration de la station Happy Saturn au sein du système VIGILE, bien qu'encore en cours, a d'ores et déjà validé la faisabilité d'une solution tout-en-un capable de maintenir une précision submillimétrique sur les coordonnées mesurées. Les expérimentations en atelier ont confirmé la robustesse des cycles de mesure et l'importance d'un paramétrage fin, tandis qu'un test de supervision entièrement à distance a démontré l'autonomie opérationnelle de l'équipement. Pour aller plus loin, il est essentiel de lancer des essais prolongés sur chantier pour éprouver la station en conditions réelles (vibrations, variations climatiques, environnement). L'intégration d'une station météorologique permettra d'ajuster les corrections atmosphériques en extérieur, améliorant ainsi la fiabilité des relevés. Côté logiciel, le module de conversion de la Saturn à VIGILE, en cours de développement, devra être finalisé et testé sur le terrain. Enfin, il conviendra d'obtenir du fabricant la propriété pleine et exclusive des données, en assurant leur hébergement sur les infrastructures cloud d'Hyp-Arc.

## 7. Références bibliographiques

- Autin, J. (2015). Audit des chantiers CYCLOPS et amélioration des calculs des moindres carrés, Mémoire d'ingénieur de l'INSA de Strasbourg, spécialité Topographie. 67 pages.
- Chérel, B. (2017). Prise en compte optimale des facteurs météorologiques dans les mesures automatiques tachéométriques sur les chantiers d'auscultation de Sixense-Soldata, Mémoire d'ingénieur de l'INSA de Strasbourg, spécialité Topographie. 87 pages.
- Cranenbroeck, J.V. & Brown, N. (2004). Networking Motorized Total Stations and GPS Receivers for Deformation Measurements. FIG Working Week, Athens. 15 pages.
- Kutterer, H., Even, M., Seidel, A., and Weisgerber, J. (2025). Bridging the scales, Earth observation infrastructure and geodetic deformation monitoring. 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Karlsruhe. 9 pages.
- Lefebvre, L. (2014). Étude de marché et validation des développements informatiques de mesure Soldata, Mémoire d'ingénieur de l'INSA de Strasbourg, spécialité Topographie. 67 pages.
- Martin, G. (2012). Développement du logiciel VIGILE : intégration de mesures sans réflecteur et traitements pour la télésurveillance vidéo asservie, Doctoral dissertation, INSA de Strasbourg. 65 pages.
- Michel, V., Person, T., Kasser, M. (2003). 74 Motorized Tacheometers Aiming at 5350 Prisms in Amsterdam : The Largest Topometric Continuous Real Time Monitoring System in the World ? FIG Working Week, Paris. 9 pages.
- Niemeier, W. (2025). 50 Years of Deformation Monitoring - What has been achieved ? 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Karlsruhe. 8 pages.
- Zaczek-Pepińska, J. & Kowalska, M.E. (2025). Principles and Case Study of IMSGeo : Automatic Displacement Monitoring System for Construction Sites. 6th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Karlsruhe. 6 pages.

# Définition d'un nouveau processus pour l'implantation topographique au CERN à l'aide d'une solution de traçage robotisé.



PFE présenté par : **Anna-Sarah Mezzatesta**  
Société d'accueil : **CERN**  
Directeur de PFE : **Kacper Widuch**  
Correcteur : **Gilbert Ferhat**



## 1. Introduction

### 1.1 Contexte général du traçage au CERN

Le CERN ou Centre Européen de la Recherche Nucléaire, mondialement reconnu pour la recherche en physique des particules, abrite un complexe d'infrastructures souterraines constitué de cavernes, tunnels, galeries techniques et réseaux de services. Pour garantir la bonne installation des composants de l'accélérateur, il est essentiel d'assurer un traçage précis des éléments. Cela consiste à projeter sur le sol des points spécifiques définis en amont et qui servent de référence pour le placement des composants pendant la phase d'installation.

En effet, le faisceau de particules circulant dans l'ensemble des machines est guidé par des aimants capables de le focaliser ou de le dévier. L'alignement de tous ces composants est donc essentiel afin de garantir une trajectoire du faisceau fidèle à celle calculée par les physiciens. Au CERN, les composants sont mesurés puis alignés par la section ASG (Accelerator Survey and Geodetic Measurements) en charge du lissage vertical et radial des lignes de faisceaux avec une tolérance de l'ordre de 0.2 millimètre sur une fenêtre glissante de 200 mètres. Afin d'assurer cette tolérance submillimétrique, les composants doivent eux-mêmes déjà être installés dans une précision moyenne de 2 à 3 mm, impossible sans points de repères au sol [Fuchs et al., 2023].

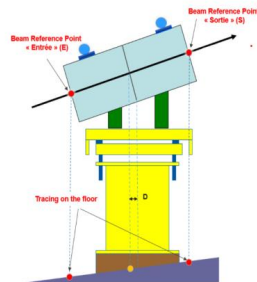


Figure 1 : Schéma des points faisceaux projetés au sol pour être tracés. [Fuchs et al., 2023]

Ces points à tracer sont le résultat d'une collaboration entre les équipes chargées de l'alignement et les personnes responsables de la conception et l'installation de l'équipement à installer. Aujourd'hui la majorité des points à tracer sont des points positionnés sur le faisceau de particules : la ligne faisceau est projetée au sol ainsi que les points d'entrée et de sortie du faisceau dans chacun des composants ou il circulera comme le montre la figure 1.



Figure 2 : Traçage manuel de points faisceau.

Traditionnellement, cette tâche est réalisée manuellement, sur la base des coordonnées des points à tracer et à l'aide de plans d'installations. A la manière d'une implantation, les éléments sont tracés au sol au marqueur à l'aide d'une cible et d'une station totale. Bien que cette méthode ait fait ses preuves, elle est très chronophage et répétitive pour les opérateurs. La répétition du mouvement et les positions inconfortables tenues sur des temps long peuvent engendrer des blessures.

## 1.2 Objectif du projet

La complexité croissante des installations, ainsi que les avancées vers des accélérateurs toujours plus longs et puissants, nécessitent une évolution des méthodes utilisées. L'enjeu devient aujourd'hui de moderniser et automatiser le processus de traçage, afin de gagner en efficacité et en flexibilité tout en maintenant la précision. Ce travail s'inscrit dans le contexte plus large d'un effort d'automatisation des procédés au sein de la section ASG, responsable des mesures et alignement de tous les composants des accélérateurs, en vue de préparer les grands projets à venir.

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est de définir un nouveau procédé permettant un échange efficace des données à tracer entre les équipes afin d'aboutir à un format compatible avec une solution robotique de traçage dans les environnements faisceaux du CERN.

## 2. Utilisation d'une solution de traçage automatisée

Dans le cadre de ce besoin, plusieurs solutions de traçage robotisé ont été testées avant mon arrivée, dont une a été choisie.

### 2.1. Le robot HP SitePrint

La technologie HP SitePrint est un robot de traçage autonome conçu pour marquer au sol les repères nécessaires à la construction d'un bâtiment par exemple. Il utilise une station totale robotisée pour se localiser avec précision dans un référentiel défini lors de la mise en station. L'entreprise HP a créé une interface qui permet d'insérer les dessins numériques (CAD) à imprimer et de se connecter au robot ainsi qu'à la station totale afin de débiter l'impression.

En effet, à partir des données que lui transmet la station totale en traquant le prisme sur le robot, ce système permet de tracer sur divers types de sol tous les éléments dessinés dans le fichier CAD. La précision annoncée par HP est de 2 à 3 mm [HP Development Company, L.P., 2025a], ce qui est aujourd'hui atteint lors du traçage manuel.



Figure 3 : Le robot traceur HP SitePrint

### 2.2 Tests de la technologie réalisés au CERN

Ce produit robotisé est aujourd'hui largement utilisé sur chantier et permet un gain de temps considérable dans le domaine de la construction. Cependant, les précisions recherchées sur chantier ne sont pas les mêmes que celles du CERN. L'un des enjeux principaux de mon projet est donc de tester cette nouvelle technologie afin d'évaluer sa précision et d'en déduire sa pertinence pour le traçage dans les infrastructures souterraines.

Afin de permettre une installation précise des composants d'un accélérateur, les principaux éléments à tracer seront des lignes et des points connus en coordonnées matérialisés par des croix. Afin de simuler les conditions des tunnels, des environnements longs, étroits et contraints, les essais ont été réalisés dans un bâtiment de stockage permettant le positionnement d'un réseau de points d'amplitude angulaire similaire à ce qui sera mise en place dans le tunnel. La figure 4 présente un plan schématique de l'un de ces tests, ici pour le traçage d'une même ligne avec plusieurs stations.

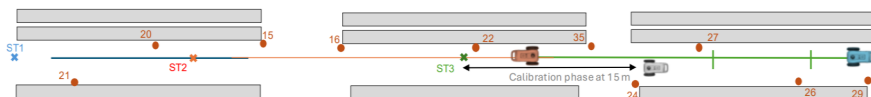


Figure 4 : Plan schématique du type de tests réalisés afin d'étudier le fonctionnement du robot.

Ces différents tests ont montré que la précision peut varier selon plusieurs facteurs, dont certains ont été difficiles à identifier. La qualité de la mise en station, la pente du sol ainsi que la distance du robot de la station totale peuvent entre autres faire varier la qualité du traçage. Certains de ces paramètres

influençant la précision sont mentionnés par l'équipe HP [HP Development Company, L.P., 2025b] mais d'autres points ont été notés au fur et mesure des tests réalisés. C'est par exemple le cas de l'influence du prisme 360° dont le robot est équipé. En effet, en fonction de la face du prisme visée lors de la calibration initiale du robot et de la phase visée lors du traçage de la ligne au sol, nous avons remarqué un décalage, parfois de plus de 3 mm, un exemple est visible sur la figure 5. Ces types de problématiques sont directement communiqués à l'équipe HP qui nous permet de trouver des solutions pour améliorer la précision de sa technologie.

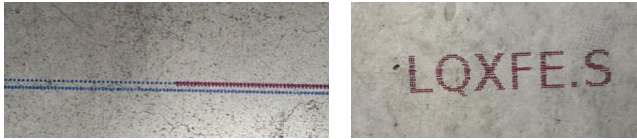


Figure 5 : Résultats de tests de traçage d'une ligne et d'un texte.

Ces expériences ont permis de définir les meilleures façons d'utiliser le robot afin de rester dans la précision requise mais aussi d'obtenir les meilleurs rendus visuels pour une clarté générale des informations transmises.

### 3. Analyse des besoins en traçage

Le traçage est une étape critique du processus d'installation des équipements du LHC (Large Hadron Collider) car toute erreur peut engendrer des retards, des conflits d'installations ou des modifications de dernière minute contraignantes. Une des missions parallèles de mon projet a été de rendre compte des besoins en traçage de l'ensemble des équipes responsables de l'installation de composants au point 1 et 5 du LHC représentés sur la figure 6 dans le cadre du projet d'amélioration HL-LHC (High-Luminosity LHC), dont l'objectif est de produire des collisions de particules encore plus puissantes.

Afin de recueillir et comprendre les besoins spécifiques de chaque équipe en matière de traçage, de nombreuses réunions ont été organisées. Celles-ci ont permis de mieux connaître les équipements concernés et de définir un traçage à la fois utile pour l'installation et compatible avec la technologie robotique.

La figure 7 est un exemple avec les aimants, composants de base d'un accélérateur de particules qui permet de les guider ou de les focaliser. Le traçage au sol consiste à projeter l'axe du faisceau entre l'entrée et la sortie de l'aimant (voir figure 1), ainsi qu'à marquer une croix centrale pour positionner les trois pieds et le support central.

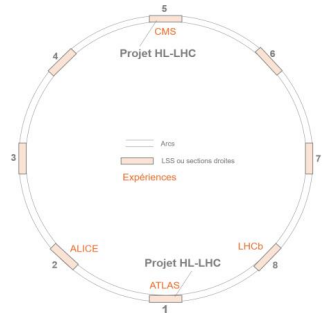


Figure 6 : Organisation schématique du LHC et les points concernés par le projet HL-LHC

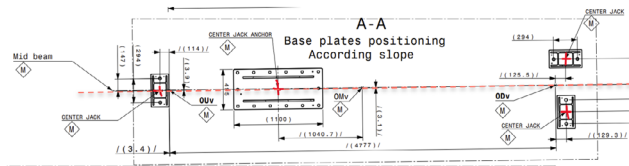


Figure 7 : Exemple de points à tracer projetés au sol pour un aimant

Chacune de ces équipes travaille dans son propre système de coordonnées et utilise des formats d'échanges des données différents. Un point clé de mon travail est de définir un nouveau processus de collecte des données afin d'utiliser la technologie robotique pour le traçage.

## 4. Analyse du workflow actuel et proposition d'évolution

Jusqu'à présent, au CERN, la majorité des données de traçage sont collectées à partir d'un fichier rassemblant les données optiques du faisceau [Missiaen et al., 2020]. Les points de ce fichier sont ensuite intégrés dans la base de données de l'équipe d'ingénieurs topographes, pour être projetés puis tracés manuellement au sol. Ce procédé, utilisé dès le début des années 2000 lors de l'installation du LHC, fonctionne encore très bien aujourd'hui. Cependant, comme mentionné précédemment, l'envergure des projets à venir rend indispensable l'automatisation de ce processus. L'un des principaux enjeux de mon projet est donc d'adapter ce procédé pour qu'il soit compatible avec le robot traceur, notamment pour permettre le marquage automatique des points liés au faisceau.

Par ailleurs, les besoins en traçage évoluent : il ne s'agit plus uniquement de marquer les points du faisceau, mais aussi de faciliter l'installation de composants essentiels au bon fonctionnement de l'accélérateur, bien que non directement liés à la trajectoire des particules. Cela inclut notamment les éléments de cryogénie, de tuyauterie ou encore les réseaux de câblage, dont certains sont illustrés en figure 8 et se trouvent sur la voute du tunnel.

Il s'agit donc de définir un nouveau workflow permettant de centraliser l'ensemble des points à tracer dans le système de coordonnées utilisé par la section ASG : le CCS, ou CERN Coordinate System. Ce système, mis en place à l'origine pour le premier accélérateur du CERN, couvre aujourd'hui l'ensemble des infrastructures [Jones, 2001].

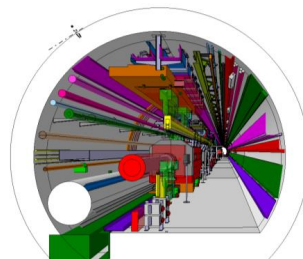


Figure 8 : Exemple de section du tunnel avec des éléments non liés au faisceau.

Une fois les points transformés en CCS, ils doivent être stockés dans la base de données locale de l'équipe de topographes, puis convertis en fichiers CAD interprétables par le robot et son logiciel. Ce nouveau processus, en constante évolution, se construit au fil des échanges avec les différents groupes impliqués à chaque étape, permettant ainsi d'aboutir à une solution cohérente.

## Conclusion

Ce projet explore l'intégration d'une solution robotisée dans le processus de traçage topographique au CERN. Il s'inscrit dans une dynamique d'automatisation des méthodes actuelles afin de répondre aux exigences croissantes de précision et de flexibilité dans l'installation des équipements d'un accélérateur de particules. Les tests menés avec le robot HP SitePrint apportent de nouvelles questions sur le procédé de traçage et l'interprétation des données. Parallèlement, la diversité des besoins en traçage des équipes en charge des différents composants du projet HL-LHC met en évidence l'intérêt de concevoir un workflow unifié, interopérable et évolutif. Finalement, ce projet contribue à la définition d'un nouveau processus de traçage, adapté à l'ensemble des équipes impliquées mais surtout permettant l'intégration d'une solution robotique.

## Bibliographie

- [Fuchs et al., 2023] Fuchs, J.-F., Bestmann, P., Valentin, P., et Venduvre, C. (2023). *Survey guidelines and requirements for the alignment of new accelerator equipment on a beam line at CERN*. Rapport technique, CERN, BE/GM. 55 pages.
- [HP Development Company, L.P., 2025a] HP Development Company, L.P. (2025a). *HP SitePrint Robot – Datasheet*. Référence du document c08651741, avril 2025. © 2022, 2025 HP Development Company, L.P.
- [HP Development Company, L.P., 2025b] HP Development Company, L.P. (2025b). *HP SitePrint Robot – User Guide*, 5<sup>e</sup> édition, mai 2025. © HP Development Company, L.P.
- [Jones, 2001] Jones, M. (2001). *The coordinate system and geodetic reference at CERN*. Rapport technique, CERN. 2 pages.
- [Missiaen et al., 2020] Missiaen, D., Naegely, A., et Jones, M. (2020). *Definition of the format of the MAD-X output file for survey*. Rapport technique, CERN, EN-SMM. 6 pages.

# Développement d'une plateforme de réalité virtuelle pour le traitement de scène de crime : Optimisation dynamique des données 3D pour la visualisation



*PFE présenté par :* **Mélanie Gendraud**  
*Société d'accueil :* **IRCGN**  
*Directeur de PFE :* **Major Sébastien Damman**  
*Correcteur :* **M. Mathieu Koehl**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'Institut de Recherche Criminelle de la Gendarmerie Nationale est un institut de sciences forensiques regroupant l'ensemble des technologies et des sciences permettant d'obtenir la vérité scientifique des faits. L'institut cherche donc à développer de nouvelles méthodes de traitement des informations en fonction des technologies en cours de développement.

Actuellement le principal inconvénient pour les enquêteurs de la gendarmerie nationale est l'aspect éphémère des données à analyser et à étudier des scènes de crime. Par conséquent, il est essentiel de se rendre rapidement sur les lieux afin de réaliser les multiples relevés d'informations nécessaires à l'enquête avant leurs dégradation naturelle. C'est ainsi qu'une volonté de fixation des scènes de crime a vu le jour au sein de la gendarmerie via l'utilisation d'appareils photographiques au début de l'activité remontant à une vingtaine d'années. Le pôle judiciaire de la gendarmerie nationale a par la suite décidé d'acquérir des scanners laser ainsi que des drones équipés de caméra. Ces acquisitions ont permis un gain de temps considérable pour la fixation et elles ont également permis d'obtenir de meilleures précisions sur les environnements. Néanmoins, lors des relevés, certaines contraintes liées à l'utilisation spécifique de l'activité des experts sont à prendre en considération. En effet, il est important de rappeler que les éléments des scènes de crime ne peuvent être déplacés ou modifiés. Ainsi, l'expert doit s'adapter aux circonstances des scènes.

Par conséquent, une visualisation tridimensionnelle dans un environnement virtuel des scènes de crime possède de nombreux avantages, tels que la possibilité de se rendre sur les lieux à n'importe quel moment sans aucune dégradation. Elle permettrait aussi d'obtenir une meilleure compréhension du déroulé des événements menant au crime. C'est donc dans ce contexte qu'une volonté de création de jumeaux numériques a connu une forte demande. Néanmoins, de nombreuses contraintes lors des phases de production des jumeaux numériques ne sont pas à écarter puisqu'il est impératif de ne pas créer de la donnée ou bien de la modifier. Par conséquent, dans ce PFE, nous essayerons d'optimiser les différentes phases de production des jumeaux numériques afin d'obtenir une visualisation optimale des scènes en réalité virtuelle par rapport aux relevés effectués.

## 2. Acquisition et pré-traitement des données

La première phase consiste en l'acquisition des données sur les scènes. Pour cela, l'IRCGN possède des tachéomètres, des GNSS, un lidar aérien et plusieurs scanners laser ainsi que des drones équipés de caméras. L'acquisition s'effectue généralement à l'aide de scanners laser pour les scènes intérieures et extérieures. Pour les scènes à fixer en extérieur spécifiquement, l'IRCGN utilise également des données acquises par drone. Les scènes nécessitent rarement d'être géoréférencées, ainsi les modèles sont pour la grande majorité d'entre eux dans un système local.

Un pré-traitement des données doit être effectué afin notamment de consolider les scans entre eux. De même, il est nécessaire de réaliser un nettoyage du nuage de points global de la scène obtenu. En revanche, le nettoyage doit être succinct dans notre situation pour permettre de garder le plus possible de données et ainsi d'être garant de la fiabilité des données supprimées. Cela est essentiel pour l'utilisation que nous souhaitons faire du nuage de points.

Plusieurs méthodes de nettoyage sont possibles utilisant ou non le machine learning, tel que l'algorithme PointCleanNet développé par Rakotsoaona (2020). Le nettoyage peut se faire selon des méthodes d'optimisation traditionnelles, en fonction de la densité ou bien encore via l'ajustement local de surface. Des algorithmes Python utilisant deux de ces méthodes de nettoyage ainsi que la méthode de Rakotsoaona sont utilisés dans la chaîne de traitement du nuage. Ces choix ont un but comparatif et permettent d'obtenir plusieurs solutions en fonction des nuages de points à traiter. L'étape de segmentation du nuage de points suit ensuite cette phase de pré-traitement.

### 3. Segmentation et classification

Dans le but d'obtenir un maillage qualitatif par la suite, il est important de structurer les données permettant la segmentation du nuage de points selon l'utilisation de diverses méthodologies. Les méthodes de segmentation sont diverses et peuvent reposer ou non sur l'utilisation également du Deep Learning. Dans un premier temps, il a été privilégié de travailler sans machine learning. Les diverses solutions de segmentation existantes sont les suivantes : la segmentation basée sur les caractéristiques locales, la segmentation basée sur reconnaissance des primitives, comme la méthode de RANSAC, et enfin selon l'utilisation de l'apprentissage profond. Le choix des méthodes utilisées a pour objectifs d'obtenir plusieurs alternatives en fonction des paramètres des nuages à traiter et ainsi de pouvoir rendre la chaîne de traitement pour l'optimisation dynamique adaptative.

Le développement d'algorithmes utilisant les méthodes de RANSAC, DBSCAN et HDBSCAN, méthode de croissance de région et enfin la méthode des graphes ont été employés. La méthode de RANSAC permet, dans un premier temps, de détecter efficacement les plans. Une première phase de classification lors de cette étape est effectuée à l'aide de l'équation des plans. Puis, l'utilisation de la méthode HDBSCAN permet de segmenter les points du nuage qui n'ont pas été identifiés lors de l'étape précédente. Le choix d'utiliser ces deux méthodes ensemble a été fait car, à l'aide de multiples tests sur différents nuages de points possédant des paramètres d'acquisition et d'environnements variés, ces méthodes se sont avérées stables.

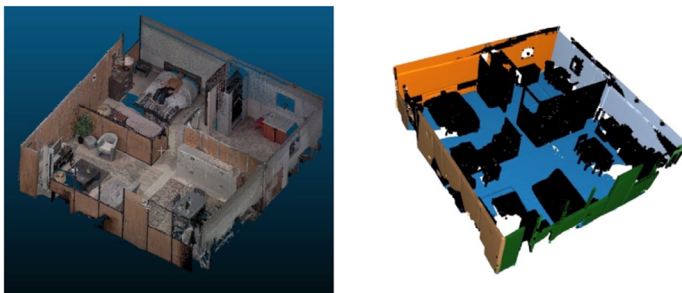


Fig.1 : Résultats obtenus de la segmentation des plans avec RANSAC.

Néanmoins, il a également été souhaité de développer d'autres solutions de segmentation ne se basant pas sur le machine learning. Pour ce faire, l'idée de continuer le développement de l'algorithme de Florent Poux (2013) sur Matlab utilisant la méthode de croissance de région a émergé. De plus, une segmentation selon la méthode des graphes s'est aussi avérée pertinente notamment

pour les nuages de plus faible densité. L'utilisation de ces différentes méthodes permettra aussi de pouvoir les comparer entre elles et de présenter des préconisations en fonction des scènes de crime à traiter.

L'étape de segmentation représente une grande partie du travail de ce PFE car les plus grands problèmes rencontrés au cours de ce projet résident dans la gestion du volume de données. En effet, les nuages de points à traiter peuvent parfois avoir une valeur de stockage importante de l'ordre de plusieurs dizaines de gigaoctets. Par conséquent, définir des méthodes de gestion des nuages de points est essentielle. Plusieurs méthodes dites structurées telles que la voxélisation et des méthodes non structurées comme l'utilisation de PointNet sont possibles. Plusieurs stratégies de gestion de la structure des nuages de points sont employées dans ce projet de fin d'étude.

La classification réalisée actuellement repose sur l'utilisation de l'architecture de réseau neuronal profond PointNet++ dans le logiciel Matlab. Cependant, l'entraînement du modèle est essentiel. Ainsi, plusieurs modèles d'entraînement ont été établis afin de pouvoir ensuite reconnaître certains objets plus spécifiques au domaine, tels que les chevalets servant à indiquer le placement des indices sur les scènes par exemple.

## 4. Maillage

Le maillage du modèle est une étape cruciale car elle permet notamment de pouvoir créer des colliders lors de son application à la réalité virtuelle via Unity. En effet, un maillage crée une surface à un objet rendant ainsi possible son interaction avec les joueurs et les autres objets maillés, ce que ne permet pas le nuage de points seul. Par conséquent, lors de cette étape, plusieurs modèles de maillage sont testés afin d'établir des recommandations en fonction des paramètres d'entrées du nuage à traiter et de la qualité visuelle souhaitée. Lors de cette phase, les méthodes de maillage testées sont les suivantes : méthodes de Ball-Pivoting, de Delaunay, de Poisson, de Marching Cubes mais également des méthodes dites hybrides. Les méthodes hybrides permettent de regrouper deux sortes de maillage. Dans ce projet, uniquement les méthodes de maillage citées ci-dessus seront traitées.

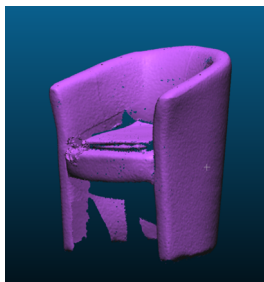


Fig. 2 : Objet segmenté puis maillé selon la méthode de Poisson.

## 5. Visualisation du jumeau numérique

La dernière étape de ce projet consiste à la visualisation du jumeau numérique dans un visualiseur afin de rendre son usage simple, rapide et sans besoin matériel considérable. Ceci permettrait à l'avenir aux équipes sur le terrain de pouvoir avoir accès aux modèles numériques. Pour cette étape, plusieurs visualiseurs sont envisageables, tel que PotreeViewer. De plus, le dernier objectif étant la visualisation des nuages de points mais aussi des modèles maillés dans des casques de réalité virtuelle. Le Pôle Judiciaire de la Gendarmerie Nationale a récemment acquis une salle de réalité virtuelle avec pour souhait de rendre possible une immersion totale dans les scènes de crime.

Pour ce faire, l'implémentation des jumeaux se fait à l'aide de l'outil Unity, comme dit précédemment. Afin de pouvoir comparer les modèles maillés aux nuages de points, une superposition des deux est envisagée. L'introduction du nuage de points se fait à l'aide de l'utilisation de l'outil de conversion Potree et l'implémentation se fait quant à elle grâce aux algorithmes développés par Fraiss (2017). Cette solution permet d'obtenir une alternative gratuite à l'utilisation du plugin Stipple.



Fig.3 : Visualisation du nuage de points dans Unity sans le plugin Stipple.

## 6. Conclusion et perspectives

La création d'un jumeau numérique visualisable en réalité virtuelle nécessite une chaîne de traitement des données bien précise afin de pouvoir obtenir une visualisation optimale des scènes de crime. De même, ce traitement permet une meilleure gestion des données mais aussi l'ajout de données de type sémantique lors notamment de la phase de classification. Cet ajout peut avoir un fort intérêt à l'avenir, en particulier lors de la visualisation en réalité virtuelle des jumeaux numériques.

Néanmoins, les difficultés de ce PFE résident dans le caractère adaptatif de la chaîne de traitement des nuages de points puisque d'une scène à une autre les données sont très variables. Elles résident aussi dans les multiples paramètres terrain non modifiables (ex : luminosité, ouverture de fenêtres, etc.) qu'il faut prendre en compte sur les lieux. Enfin, la taille de stockage des nuages de points est également une des contraintes majeures.

Les perspectives résident dans le développement de l'utilisation du machine learning, notamment dans le processus de segmentation à l'avenir. De même, dans le but d'obtenir une classification plus précise des objets, il serait intéressant de produire de nouveaux modèles d'entraînement en plus de ceux réalisés dans ce PFE.

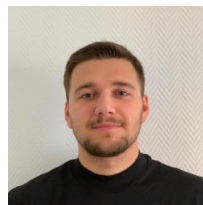
## 7. Bibliographie

FRAISS, S.M. (2017). Rendering large point clouds in Unity, Mémoire Bachelor de l'université de Wien, 54 pages.

KHARROUBI, A. (2019). Classification et intégration des nuages de points 3D dans un environnement de réalité virtuelle, Mémoire d'ingénieur de l'Université de Liège, 104 pages.

RAKOTOSAONA, M-J. & al. (2020). PointCleanNet : Learning to Denoise and Remove Outliers from Dense Point Clouds, 17 pages.

## Vers une exploitation Lean BIM des bâtiments : couplage de la maquette numérique avec les images 360° et création d'une visite virtuelle open source



*PFE présenté par :* **Eliot WAYDELICH**  
*Société d'accueil :* **DGEMA**  
*Directeur de PFE :* **Noé FILOSA**  
*Correctrice :* **Hélène MACHER**  
*Encadrants :* **Nicolas MANIEZ / Maxime JORE**



### Introduction

Dans un contexte où la gestion du patrimoine bâti requiert toujours plus de réactivité, de transparence et de traçabilité, le croisement de plusieurs technologies numériques devient essentiel. Le présent Projet de Fin d'Études (PFE) s'inscrit dans cette logique en associant visites virtuelles immersives, maquettes BIM et intelligence artificielle. Il vise à améliorer l'accès à l'information, même en l'absence de maquette, et à structurer les données en s'appuyant sur des standards ouverts.

DGEMA amorce une stratégie BIM intégrant progressivement des outils immersifs pour une meilleure communication. Le projet répond ainsi à des besoins concrets identifiés en interne : valoriser l'image dans la préparation des maquettes, structurer la donnée sans multiplier les outils lourds, accélérer les cycles d'exploitation, et proposer une solution plus visuelle et accessible aux agents techniques et d'exploitation sur laquelle l'entreprise à le contrôle totale.

La gestion traditionnelle des actifs repose encore souvent sur des plans papier, des bases de données disparates ou des fichiers non interconnectés. Le passage à une gestion numérique centralisée et visuelle apparaît comme une évolution nécessaire. Ce projet vise donc à créer un environnement hybride, articulant représentation immersive, structuration BIM et enrichissement semi-automatique des données. Il ambitionne de rendre l'information non seulement accessible mais aussi contextualisée, dynamique et utile à chaque étape du cycle de vie d'un bâtiment.

## Objectifs et positionnement

Le projet poursuit trois objectifs principaux, qui répondent à des problématiques bien identifiées dans la chaîne de valeur de la gestion du patrimoine :

- **Rendre la visite virtuelle opérationnelle** en l'enrichissant de points d'intérêt (POI), placés manuellement ou automatiquement, afin de proposer une exploration à la fois visuelle et informative du bâtiment.
- **Associer ces POIs à la maquette BIM** afin d'assurer une cohérence sémantique et géographique entre le visuel et les données structurelles, facilitant ainsi les interventions, la maintenance et le suivi du cycle de vie.
- **Automatiser la détection d'équipements** ou le floutage de personnes ou d'objets via un modèle d'IA (YOLOv12) entraîné sur des images panoramiques et standardiser l'annotation dans les environnements immersifs.

En croisant ces trois axes, le projet vise à proposer une solution complète allant de l'acquisition d'information à sa visualisation et son intégration dans les outils de gestion. L'approche choisie repose sur la création d'une chaîne de traitement modulaire, interopérable et reproductible, qui peut s'adapter à divers contextes bâtis.

## Démarche technique

La réalisation de la visite virtuelle a commencé par la conception d'un environnement immersif à partir de panoramas à 360°. Pour ce faire, Marzipano un viewer open source a été retenu en raison de sa grande flexibilité, de sa capacité à s'exécuter localement sans dépendre d'un serveur distant, ainsi que de ses possibilités d'intégration dynamique de points d'intérêt (POIs) et d'éléments d'interface informatiques. Un script développé en Python avec l'interface Tkinter automatise la génération de fichier *.json* pour la création semi-automatique de la visite virtuelle. Ce processus comprend également la création d'une mini-carte, l'insertion de hotspots (lien pour naviguer d'un panorama à un autre directement dans la vue) pour la navigation, l'application de filtres, et l'affichage d'informations contextuelles au clic.

Une fois les panoramas mis en place, la gestion et le positionnement des POIs s'effectuent soit manuellement, à partir de coordonnées angulaires (yaw, pitch), soit automatiquement grâce à une méthode de triangulation. Une interface graphique dédiée permet à l'utilisateur de définir plusieurs directions de visée. Ces dernières sont ajustées selon les métadonnées EXIF des photos (incluant roll, pitch, yaw qui définissent le décalage des axes machines par rapport aux axes orthonormés), ce qui permet une plus grande précision. Des scripts Python sont utilisés pour déterminer le point d'intersection de ces lignes de vue, aboutissant à la localisation des POIs dans l'espace à travers leurs coordonnées XYZ. Ces données peuvent ensuite être exportées dans divers formats, tels que CSV ou BCF, selon les besoins du projet.

Pour accélérer le processus d'annotation des panoramas et garantir une homogénéité des données, une solution d'intelligence artificielle a été intégrée. À partir d'une base d'images annotées, un modèle YOLOv12 a été entraîné à détecter des éléments spécifiques comme les extincteurs, les détecteurs de fumée ou encore les blocs d'issus de secours. Une fois entraîné, ce modèle est capable d'inférer automatiquement la présence de ces objets sur de nouveaux panoramas, générant ainsi les POIs correspondants avec leurs coordonnées angulaires, leur taille et leur type. Ce module d'IA permet non seulement de gagner un temps considérable, mais aussi de normaliser les informations collectées.

L'ensemble du traitement est orchestré par un pipeline semi-automatisé, capable de gérer de gros volumes d'images et de produire des exports exploitables dans la visite virtuelle ou dans une maquette BIM.

Enfin, l'intégration des POIs dans l'écosystème BIM a été rendue possible grâce à l'interopérabilité avec des outils comme Revit ou IFC.js, via le format BCF. Ce format, couramment utilisé pour l'échange d'informations dans le monde BIM, permet de charger les POIs directement dans Revit ou BIMcollab. Une synchronisation bidirectionnelle est envisagée : il est potentiellement possible de cliquer sur un POI dans la visite pour centrer la vue dans un viewer BIM, et inversement.

## Résultats obtenus

Les expérimentations ont été menées sur un jeu de données réel fourni par la DGEMA, composé de plusieurs milliers de panoramas 360° sur une vingtaine de projet différent, d'une maquette Revit d'un bâtiment témoin, et de documents annexes (plans, CCTP). Les tests ont permis de valider les trois briques fonctionnelles : visite immersive, détection IA, et synchronisation avec le BIM.

- **Visite virtuelle opérationnelle** : la navigation fluide entre panoramas, la lecture contextuelle des POIs et la mini-carte interactive permettent un accès intuitif à l'information bâtiment. Les POIs sont filtrables, éditables et exportables.
- **Détection IA** : le modèle YOLOv12 entraîné localement a atteint une précision de 85 % (mAP50) sur les classes ciblées. Il est capable de traiter plusieurs images par seconde et d'annoter automatiquement les objets détectés. Les résultats sont exportés sous forme de POIs intégrables dans la visite ou exploitables indépendamment.
- **Interopérabilité BIM** : les exports BCF ont été testés avec succès dans Revit, BIMcollab et IFC.js.

En somme, cette solution de visite virtuelle s'avère pleinement viable : elle est simple à mettre en place, entièrement open source, et nous en gardons le contrôle total, tant sur la protection des données que sur les évolutions futures. Comparée à une solution propriétaire comme Pano2VR, elle se distingue également par sa rapidité de mise en œuvre et son accessibilité, ce qui en fait un choix stratégique et durable.

## Analyse critique et limites identifiées

Le projet a démontré la faisabilité et l'intérêt de croiser images panoramiques, maquette BIM et IA dans une approche immersive et modulaire. Cependant, plusieurs points restent à améliorer pour envisager un déploiement à plus grande échelle :

- **Alignement géométrique** : sans géoréférencement précis des images 360°, le recalage spatial présente une marge d'erreur. L'utilisation de nuages de points ou de marqueurs pourrait améliorer cet aspect.
- **Robustesse du modèle IA** : bien que performant, le modèle est sensible aux variations d'éclairage, aux angles de prise de vue et aux occultations. Un enrichissement du jeu de données d'entraînement, notamment en diversité d'environnements, serait nécessaire pour généraliser.

- **Interopérabilité GMAO** (gestion de maintenance assisté par ordinateur) : le lien entre la visite immersive et les outils de gestion (base patrimoine, etc.) n'a pas encore été pleinement automatisé. Cela nécessite de structurer les exports et de développer des connecteurs spécifiques.
- **Interface utilisateur** : l'outil est pour l'instant destiné à des utilisateurs techniques. Pour être adopté plus largement, notamment sur le terrain, une interface plus épurée et adaptée à un usage tactile ou mobile serait à envisager.

### Perspectives d'évolution

Plusieurs pistes peuvent être explorées pour valoriser le travail réalisé et élargir les usages :

- Intégration d'un nuage de points pour améliorer le recalage 3D et par conséquent la détermination de la position 3D des POIs dans la visite virtuelle
- Extension du modèle IA à d'autres types d'objets (prises, tableaux électriques, dégradations) ;
- Mise en place d'un module collaboratif pour annotation multi-utilisateur dans la visite ;
- Développement d'un connecteur vers les bases patrimoniales ou systèmes GMAO existants ;
- Déploiement en mobilité (tablette, smartphone) pour une consultation terrain.

À plus long terme, la solution pourrait être industrialisée sous forme d'un module logiciel interopérable capable de s'interfacer avec des jumeaux numériques existants, ou d'accompagner la constitution de ceux-ci à partir de données légères (panoramas, POIs).

### Conclusion

Ce PFE a permis de concevoir, développer et tester une solution immersive de gestion patrimoniale croisant images 360°, maquette BIM et intelligence artificielle. Le travail mené démontre que les images immersives peuvent devenir un vecteur puissant de contextualisation, de repérage et d'enrichissement sémantique, au service de l'exploitation technique des bâtiments.

Le système mis en place est modulaire, interopérable, et s'appuie sur des technologies ouvertes et répliquables. Il représente une réponse pragmatique aux besoins exprimés sur le terrain, tout en s'inscrivant dans une logique d'acculturation progressive aux outils BIM.

En apportant une preuve de concept concrète, ce projet ouvre la voie à de nouvelles interfaces homme-bâtiment, où l'immersion devient un levier d'action, de diagnostic et de collaboration. Il confirme également que l'IA peut jouer un rôle structurant dans la valorisation automatique des données visuelles, pour une gestion plus agile, visuelle et connectée du patrimoine.

# Solutions de restitution immersive au service de la conservation numérique et de la médiation scientifique.

## Cas du centre de commande de la LGV Paris-Lyon.



**PFE présenté par :** Charles Balland  
**Sociétés d'accueil :** SNCF Réseau / INSA  
(PFE en collaboration)  
**Directeur de PFE :** Mathieu Regul  
**Correcteur :** Pierre Grussenmeyer  
**Encadrante :** Tania Landes



### 1. Une initiative de valorisation du patrimoine technologique ferroviaire

Inauguré en 1981 par François Mitterrand, le poste d'aiguillage et de régulation (PAR) de la ligne à grande vitesse (LGV) Paris-Lyon a joué un rôle déterminant lors de la mise en service de la première ligne de train à grande vitesse française. Ce poste constitue un élément essentiel dans la gestion du trafic ferroviaire sur l'une des lignes TGV les plus empruntées de France, avec un train circulant en moyenne toutes les quatre minutes. Depuis novembre 2024, les installations historiques du centre Henri Lang, situées dans le XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris, ont été transférées vers l'établissement Jean Macé, dans le VII<sup>e</sup> arrondissement de Lyon. Aujourd'hui, les salles de relais et de stockage, ainsi que la salle centrale bâtie autour du TCO : *tableau de contrôle optique* (fig. 1), ont été démantelées. La préservation numérique du site et son accessibilité sont donc devenues indispensables pour la SNCF.

Aujourd'hui, la valorisation du patrimoine technologique et industriel reste trop limitée. Longtemps délaissé au profit d'autres formes de patrimoine historique, le patrimoine ferroviaire a cependant gagné en reconnaissance depuis les années 1970, notamment par le classement de nombreuses gares et postes d'aiguillage au titre des monuments historiques. En 2022, les bâtiments techniques ne représentent encore que 14 % des protections ferroviaires, soit une vingtaine d'édifices, dont la moitié seulement a été classée après 2000. Le programme « Postes remarquables », lancé par SNCF Réseau, a permis de souligner l'importance de ces infrastructures. Mais aujourd'hui, la SNCF recherche une solution pour offrir au public comme à ses collaborateurs une immersion plus interactive et dynamique qu'une simple visite virtuelle passive.

La valorisation du site, mentionnée dans le cahier des charges de la SNCF, s'oriente logiquement vers une diffusion numérique sur le Web, support privilégié pour le partage auprès du public. À l'instar du projet *Florence As It Was* (Bent et al., 2022) ou de la plateforme de navigation guidée développée pour le château *Farnèse à Piacenza* (Gaspari et al., 2024), qui démontrent le potentiel des restitutions patrimoniales en ligne, l'enjeu est ici de mettre en valeur un ensemble de ressources visuelles, audiovisuelles et documentaires, notamment celles issues de l'ouvrage *Remarquables postes d'aiguillage* (Vellay, 2022). L'objectif du projet est donc de concevoir un processus de traitement et de diffusion généralisé et exhaustif, aisément déployable et facilement répliquable sur d'autres sites techniques ferroviaires.



Fig. 1 : Le PAR de la ligne à grande vitesse Paris-Lyon en activité (image d'archive SNCF).

## 2. Choix des outils interactifs pour la médiation 3D

Pour toucher un public le plus large possible, il est nécessaire d'adopter une solution qui valorise la représentation numérique 3D de manière simple et efficace. En ce sens, les plateformes web interactives s'imposent comme un outil flexible pour ce projet. Les visionneuses web peuvent afficher en ligne des scènes complexes intégrant des données variées, tout en offrant une navigation fluide et la possibilité d'ajouter des éléments de médiation (annotations, animations, etc.). Aujourd'hui, de nombreuses solutions existent, chacune proposant des fonctionnalités différentes pour se démarquer. Certaines sont commerciales, telles que Sketchfab ou Autodesk Viewer, d'autres sont libres de droits, comme iTowns, CesiumJS, 3DHOP ou Potree. Une évaluation comparative selon plusieurs critères (qualité des données, multimodalité, interactivité) a mis en évidence deux solutions adaptées au projet, **Potree** et **3DHOP**, chacune avec ses spécificités, en fonction des types de données à valoriser :

**Visualisation des nuages de points** : Potree est un projet communautaire open-source, conçu pour la visualisation de nuages de points denses et de modèles 3D légers. Issu d'un projet de fin d'études (Schuetz, 2015), il s'est imposé comme l'un des outils majeurs du partage de données tridimensionnelles, avec plus de 12 000 projets recensés sur GitHub reposant sur sa structure de base. Il se distingue par une architecture efficace, fondée sur une organisation hiérarchique des données et des méthodes de rendu optimisées (fig. 2), permettant d'afficher progressivement les détails en fonction du niveau de zoom et de l'orientation du regard, tout en préservant les performances. Son interface entièrement personnalisable facilite par ailleurs l'intégration de contenus pédagogiques et contextuels. Aujourd'hui, Potree est largement utilisé pour la diffusion de relevés 3D de grande ampleur, notamment ceux issus des campagnes LiDAR en Suisse, dans l'Eurométropole de Strasbourg ou aux Pays-Bas.

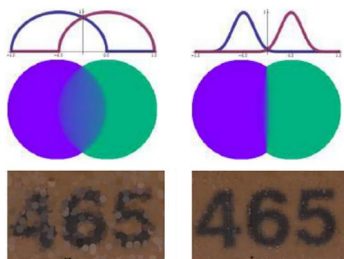


Fig. 2 : Exemple d'optimisation graphique utilisée sur Potree (droite). Cette méthode applique une courbe de Gauss comme pondération, améliorant ainsi la jonction entre deux points et évitant les effets de transparence indésirables (gauche).

**Visualisation des modèles 3D** : 3DHOP (*3D Heritage Online Presenter*) est une bibliothèque open source dédiée à la visualisation interactive de modèles 3D maillés et texturés. Elle est particulièrement adaptée à la présentation d'objets patrimoniaux nécessitant une restitution fine de la géométrie et des matériaux. Elle adapte dynamiquement le niveau de détail en fonction de la distance d'observation, permettant de visualiser des modèles complexes sans solliciter excessivement les ressources de l'appareil utilisé.

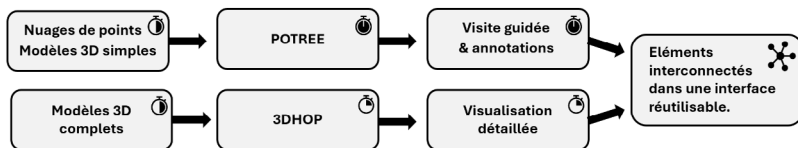


Fig. 3 : Solutions retenues pour la valorisation du poste d'aiguillage de la LGV Paris-Lyon et temps de traitement associé, aboutissant à une interface web réutilisable.

Le projet s'appuie donc sur 3DHOP, utilisé tel quel, pour la visualisation des maillages 3D complexes, et sur Potree pour l'affichage des nuages de points, autour duquel a été conçue une visite guidée enrichie de contenus de médiation scientifique (textes, images, audio). Les pages HTML de Potree ont été entièrement préconfigurées afin de proposer une structure générique, facilement réutilisable. Cette organisation permet, pour les futurs déploiements, de ne modifier que les données, sans avoir à adapter l'interface ou les fonctionnalités. Si la configuration initiale demande un investissement, elle assure ensuite un gain de temps significatif et une reproductibilité efficace (fig. 3).

### 3. Données collectées, traitées et intégrées au projet

Deux campagnes d'acquisition ont été réalisées pour sauvegarder numériquement le poste d'aiguillage : la première alors que le site était encore actif, la seconde après son démantèlement partiel. Ces campagnes ont permis de produire différents types de données, à savoir :

- Deux nuages de points intérieurs ont été acquis par géoréférencement indirect à l'aide d'un scanner FARO Focus 3D X130 : 25 stations pour la salle des relais (3,5 Go) et 16 pour la salle du TCO (2,8 Go), avec une résolution spatiale de 3mm à 10m et un rééchantillonnage de 2 mm pour alléger les nuages. L'objectif était de produire un nuage assemblé et nettoyé, certaines zones étant supprimées manuellement puis remplacées par des modèles photogrammétriques texturés. Des éléments comme le sol ont été modélisés à l'aide de primitives géométriques texturées sous Blender pour améliorer le rendu visuel. Un troisième nuage, acquis à l'extérieur avec un scanner RIEGL VZ-600i, a été fourni par la SNCF.
- Des photographies ont été acquises à l'aide d'un appareil Canon EOS R5, avec les réglages suivants : capteur plein format, ISO 100, focale 28 mm, ouverture F/11, assurant une taille de pixel-objet moyenne d'environ un dixième de millimètre pour des prises de vue à 1m. Ces images ont ensuite été traitées sous Metashape afin de générer des modèles 3D maillés et texturés (fig. 4). En complément, d'autres séries de prises de vue ont été réalisées à des fins strictement documentaires sur des objets techniques.
- Des photographies réalisées avec une caméra 360° RICOH THETA, offrant une vue panoramique du site.

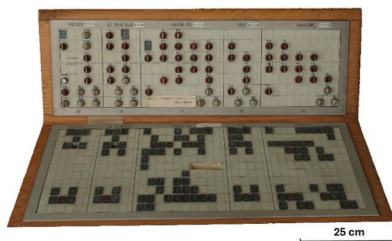


Fig. 4 : Modèle 3D maillé et texturé d'un poste de régulation à transit souple, réalisé sous Agisoft Metashape à partir de 12 photographies, et comprenant un maillage texturé d'un million de facettes.

Une modélisation 3D intégrale du site, visant à reconstituer manuellement l'ensemble de l'espace dans ses moindres détails à l'aide d'un logiciel de modélisation polygonale, n'a pas été retenue. Bien que cette méthode permette un rendu esthétique et complet, elle impliquerait un investissement important en temps et en compétences techniques, peu compatible avec les objectifs du projet. À l'inverse, la démarche adoptée repose sur des outils plus flexibles et transférables, nuages de points, et modèles photogrammétriques, qui, tout en exigeant une expertise certaine, reposent sur des protocoles bien documentés, facilitant leur déploiement dans d'autres contextes. Le nuage de points, acquis avec une exactitude annoncée par le constructeur à  $\pm 2$  mm, constitue le socle principal de la représentation. Il restitue fidèlement la volumétrie du site et sert de référence pour l'intégration de modèles 3D maillés et texturés, mis à l'échelle et recalés avec une précision moyenne de quelques millimètres. Ce choix méthodologique vise à concilier qualité visuelle, faisabilité technique et réutilisabilité.

### 4. Développement d'une plateforme immersive avec Potree et 3DHOP

L'objectif, défini dans le cahier des charges, est de proposer une interface Web qui dépasse le simple affichage de données, pour offrir une solution immersive et informative, conçue comme un véritable outil de médiation et d'exploration du lieu. Pour cela, les deux visualiseurs, développés en JavaScript et reposant sur l'API WebGL associée à la bibliothèque Three.js, ont été entièrement modifiés et repensés. La structure du projet s'organise autour d'une page principale, nommée « index », conçue comme un menu central regroupant les différents éléments développés spécifiquement pour ce projet. Cette page permet, via des boutons cliquables, d'accéder aux différentes scènes proposées par les deux visualiseurs Web : les nuages de points et les modèles photogrammétriques. En complément, ces pages sont interconnectées entre elles afin de former un réseau de navigation fluide et cohérent.

Afin de rendre l'interface accessible à des utilisateurs aux compétences numériques variées, y compris non spécialistes de la 3D, deux modes de navigation ont été développés dans Potree : une exploration libre, donnant accès à l'ensemble des outils, et une visite guidée, où les déplacements sont automatisés et accompagnés de commentaires audio sur des points de vue prédéfinis. Le nuage de points sert ici de support de médiation, dans lequel sont intégrés de nombreux éléments interactifs cliquables renvoyant vers divers contenus : photographies d'éléments techniques, panoramas 360°, extraits audio, animations de caméra, informations textuelles, ou encore liens vers des modèles 3D hébergés sur 3DHOP. L'affichage de ces éléments (fig. 5) est optimisé en fonction de la distance et de l'orientation de la caméra, afin d'éviter toute surcharge visuelle. Des images d'archives et une vidéo de présentation du site sont également accessibles, respectivement via un menu déroulant qui regroupe l'historique du projet, les informations générales, ainsi que des indications d'utilisation de l'interface Potree. Enfin, des outils complémentaires, comme la mesure de coordonnées, permettent d'interroger directement les informations spatiales du nuage de points.



Fig. 5 : Exemple d'items cliquables intégrés dans le visualiseur Potree, permettant d'accéder à du contenu de médiation scientifique.



Fig. 6 : QR-Code du projet PAR de la LGV Paris-Lyon.

Dans un souci d'accessibilité multiplateforme, une version mobile du visualiseur a été développée afin de permettre la consultation du site sur smartphone et tablette (fig. 7). Cette version allégée ne permet pas l'intégration des modèles 3D dans les nuages de points, ce qui réduit la qualité graphique par rapport à la version pour ordinateur, où l'affichage reste optimal. La navigation s'effectue à l'aide de deux joysticks virtuels, adaptés à l'usage tactile. Enfin, le projet global a été structuré dans un dossier hiérarchisé, qui peut être intégré à un site internet existant ou hébergé sur un serveur public renvoyant vers le menu « index ». Cette solution constitue un outil clé en main, réutilisable par la SNCF et adaptable à tout projet similaire. À l'occasion des Journées de la Topographie de l'INSA de Strasbourg, le visualiseur sera accessible via le QR code ci-contre (fig. 6).



Fig. 7 : Aperçu des différentes configurations Potree sur ordinateur et sur téléphone mobile.

## 5. Références

- [1] Bent, G. R., Brooks, M. K, Pfaff, D., Radpour, R. (2022). A practical workflow for the 3D reconstruction of complex historic sites and their decorative interiors : Florence As It Was and the church of Orsanmichele. *Heritage Science*. Vol.10, N°1. 118 pages. DOI : 10.1186/s40494-022-00750-1.
- [2] Gaspari, F., Joli, F., Barbieri, F., Rivieri, C., Dondi, M., Pinto, L. (2023). An Open-Source Web Platform for 3D Documentation and Storytelling of Hidden Cultural Heritage. *Heritage*. Vol.7, N°2. Pages 517-536. DOI : 10.3390/heritage7020025.
- [3] Schuetz, M. (2015). Potree : Rendering Large Point Clouds in Web Browsers. Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur, Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien. 84 pages.
- [4] Vellay, O. (2022). Remarquables postes d'aiguillage. Cécile Hochard, Laurent Vermeersch. Paris : Rails & Histoire / SNCF Réseau. 329 pages. ISBN : 978-2-9585427-0-2.

# Estimation des précisions GNSS pour le calcul de trajectoire d'un mobile : comparaison de logiciels et de scenarii GNSS



*PFE présenté par :* **Ilona Musq**  
*Société d'accueil :* **Fugro Geoid SAS**  
*Directeur de PFE :* **Sylvain Lacombe**  
*Correcteur :* **Gilbert Ferhat**  
*Encadrant :* **Olivier Groult**



---

## 1. Contexte de l'étude

Fugro Geoid SAS recourt depuis de nombreuses années au positionnement GNSS (Global Navigation Satellite System) pour le géoréférencement de levés LiDAR (topographique ou bathymétrique) ou gravimétriques, réalisés à bord d'avion ou de navire. Ce thème a d'ailleurs été exploré lors d'un précédent projet de fin d'études en 2015 par Claire Cadieu. Toutefois, l'évolution des exigences clients impose désormais une précision accrue des livrables, dépendante en grande partie de la justesse du calcul de trajectoire du mobile utilisé lors des levés. Cette précision est influencée à la fois par les conditions de réalisation du levé (scénarios GNSS) et par le traitement des données brutes, notamment en fonction du logiciel utilisé.

Ce projet de fin d'études a donc pour objectif d'évaluer la précision des trajectoires calculées à partir de différents logiciels de traitement GNSS, au travers d'une analyse comparative de leurs performances dans des contextes GNSS variés.

## 2. Les logiciels de calculs de trajectoire

Le traitement des données GNSS brutes est une étape déterminante pour garantir la qualité du positionnement d'un mobile. De nombreux logiciels existent aujourd'hui, proposant soit un positionnement absolu (SCRS PPP), soit relatif (Trimble Business Center), ou les deux (Leica Infinity). Le positionnement relatif est reconnu pour offrir une meilleure précision, notamment dans les contextes professionnels exigeants, ce qui a orienté le choix de ce projet vers trois logiciels intégrant au moins cette fonctionnalité.

Le premier, **POSPac**, développé par Applanix Corporation, est un logiciel propriétaire. Leader sur le marché, il est largement utilisé chez Fugro Geoid SAS, notamment pour les levés LiDAR bathymétriques. Il a la particularité de traiter des données GNSS combinées à des données inertielles (accélération et rotation), au format POS, format propriétaire des centrales inertielles Applanix. L'utilisation d'une centrale inertielle (IMU) permet de maintenir une trajectoire cohérente – de précision décimétrique – même en cas de perte temporaire de signal GNSS. POSPac propose plusieurs types de traitements relatifs adaptés à diverses géométries de réseaux de stations de référence : (Multi) Single Base adapté à des stations de référence longeant la trajectoire et Smart Base pour des stations de référence encadrant la trajectoire.

Le second, **GrafNav**, développé par le groupe Waypoint de Novatel, est principalement utilisé chez Fugro pour les levés gravimétriques aéroportés. A l'inverse de POSPac, qui traite des données inertielles et GNSS, GrafNav ne traite que les données GNSS. Il est utilisé pour les calculs de trajectoire de levé gravimétrique, car il dissocie, à l'inverse de POSPac, les accélérations verticales liées aux mouvements du mobile de celles induites par les variations du champ gravitationnel. Il adapte automatiquement son paramétrage de calcul en fonction du type de mobile. Il a la particularité de ne pas traiter seulement les observations de code et de phase, mais aussi des observations de décalage Doppler, qui présente un intérêt dans le cas de milieu masqué car ces observations sont plus robustes au multi-trajet, d'après Vincent et al. (2020).

Enfin, **TRACK** est une commande issue du logiciel scientifique GAMIT (« GNSS At MIT »), développé par le département de la Terre, de l'atmosphère et des sciences planétaires du MIT (Massachusetts Institute of Technology). Fonctionnant uniquement en ligne de commande sur un système Linux, ce logiciel est exclusivement dédié au positionnement relatif. Il offre une grande souplesse de configuration (nombre de stations, nombre d'ambiguïtés à résoudre, modèle troposphérique, etc.). Bien que GAMIT ait déjà démontré sa fiabilité en positionnement statique chez Fugro, il n'a encore jamais été évalué dans le cadre du calcul de trajectoires cinématiques.

	<b>POSPac</b>	<b>GrafNav</b>	<b>TRACK</b>
Système d'exploitation	Windows (interface graphique)	Windows (interface graphique)	Linux (ligne de commande)
Type de traitement	Absolu (PP-RTX, PPP...) Relatif (Single Base, Smart Base)	Absolu (PPP) et relatif	Relatif uniquement
Fichier d'éphémérides précis	Obligatoire	Facultatif	Obligatoire
Prise en main	Interface graphique mais navigation complexe. Messages d'erreurs peu explicites	Interface claire, message d'erreur détaillés, options accessibles facilement	Moins accessible pour les débutants (ligne de commande) mais rapide à lancer
Options de paramétrages	≈ 0	+++	++++

Tableau 1 - Comparaison des caractéristiques des logiciels étudiés

Le tableau ci-dessus propose une synthèse des principales caractéristiques des trois logiciels de traitement GNSS utilisés dans ce projet ainsi qu'une première comparaison.

Afin d'évaluer empiriquement les différences entre les logiciels étudiés, une trajectoire identique a été calculée à l'aide de POSPac, GrafNav et TRACK, en utilisant les mêmes stations de référence et les mêmes données GNSS brutes. Les différences de position entre les trajectoires produites par chaque logiciel ont ensuite été analysées, en particulier les écarts entre GrafNav et POSPac, puis entre GrafNav et TRACK (cf. Figure 1). Les résultats montrent qu'en planimétrie, POSPac est en accord avec GrafNav à environ 4 cm près, tandis que TRACK présente un écart légèrement plus important, autour de 6 cm. En altimétrie, POSPac reste également plus proche de GrafNav, avec des écarts n'excédant pas 10 cm. En revanche, TRACK peut présenter des écarts allant jusqu'à 20 cm, en particulier lorsque la distance entre la trajectoire et les stations de référence devient significative.

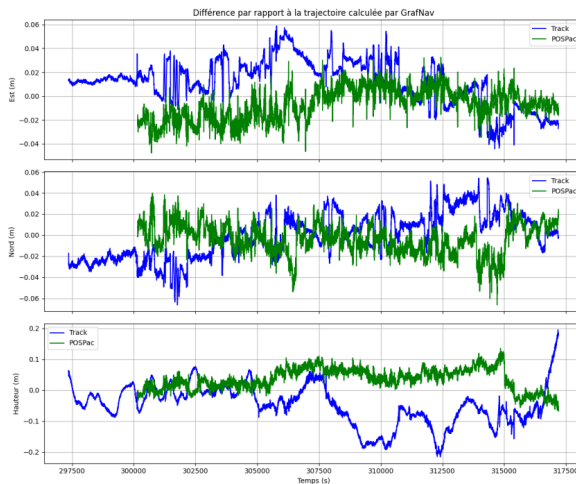


Figure 1 - Ecart entre une même trajectoire calculée avec TRACK et POSPac et une trajectoire GrafNav

Pour aller au-delà des comparaisons croisées et identifier quel logiciel est potentiellement le plus exact, une trajectoire de référence a été introduite. Deux approches ont été envisagées : l'utilisation d'un point fixe considéré comme statique, ou celle d'un mobile dont la trajectoire de référence est déterminée par un moyen indépendant.

La première méthode a pu être mise en œuvre à partir d'une station permanente d'un réseau GNSS, utilisée comme « rover » cinématique, puis recalculée avec les logiciels GrafNav et TRACK. Les coordonnées obtenues ont ensuite été comparées aux coordonnées officielles fournies par le gestionnaire du réseau. Ce test n'a pas pu être réalisé avec POSPac, en raison de la nécessité d'utiliser des fichiers au format propriétaire POS pour les mobiles. Les résultats ont mis en évidence une meilleure exactitude pour GrafNav, qui restitue des trajectoires plus proches des coordonnées de référence que TRACK. Ce dernier présente des valeurs extrêmes plus importantes, visibles sur la figure 2 à une distance de 100 km (aux autres distances les résultats de GrafNav devenaient illisibles). L'exactitude de POSPac a toutefois été évaluée de manière indépendante par Kacmarek et al. (2022), à travers une expérimentation menée avec un chariot équipé d'une centrale inertielle Applinix, d'une antenne GNSS et d'un prisme 360° suivi en continu par une station totale robotisée. Les trajectoires calculées par POSPac se situent à seulement 1,5 cm en planimétrie et 1,3 cm en altimétrie par rapport à la trajectoire levée à la station totale.

### 3. Les scenarii GNSS

La précision d'une trajectoire GNSS ne dépend pas uniquement du logiciel de traitement, mais également du scénario GNSS mis en œuvre au moment du levé. Ici, je n'aborderai seulement que deux paramètres influents : la distance entre les stations de référence et la trajectoire ainsi que l'effet du choix des constellations utilisées.

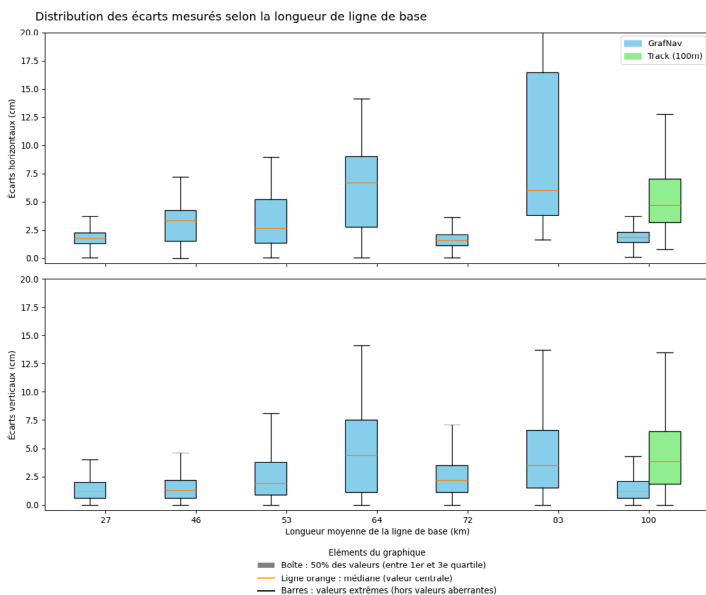


Figure 2 - Distribution des écarts mesurés selon la longueur moyenne de la ligne de base (3 stations de référence)

#### Impact de la distance station-trajectoire

La littérature souligne une corrélation entre la longueur de la ligne de base (distance entre le mobile et la station) et la qualité du positionnement : plus la distance augmente, plus les erreurs introduites par les effets ionosphériques ou troposphériques deviennent difficiles à corriger. Claire Cadieu (2015) propose une limite de 30 km au-delà de laquelle la précision altimétrique se dégrade sensiblement (écart de 15,5 cm avec une station située à seulement 330 m). L'équipe marine de Fugro Germany (2025) recommande quant à elle une limite plus stricte, autour de 25 km.

Dans le cadre de ce projet, une étude a été menée en considérant une station permanente comme « mobile » cinématique. Cette station a été recalculée à l'aide de plusieurs stations de référence, situées à des distances variables. Les résultats montrent une tendance générale cohérente avec la littérature entre 27 km et 64 km, avec une augmentation progressive de l'erreur horizontale ( $e_{horizontal} = \sqrt{(E - E_{vrai})^2 + (N - N_{vrai})^2}$ ) et de l'erreur verticale ( $e_{vertical} = |H - H_{vrai}|$ ). Toutefois, au-delà de cette plage, des fluctuations apparaissent sans logique apparente, comme illustré en figure 2. Ces irrégularités peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : une dégradation de la géométrie des stations de référence ou des stations de référence de moindre qualité. Avec ces résultats, il semble compliqué de fixer une distance critique universelle.

### Impact du nombre de constellations GNSS

Le second paramètre étudié dans le cadre des scénarios GNSS concerne l'utilisation des constellations satellites. La littérature souligne généralement l'intérêt d'intégrer plusieurs constellations (Galileo, Beidou, etc.) en complément du GPS et de GLONASS, en particulier dans des environnements dégradés ou masqués (zones urbaines denses, couverts végétaux). En effet, la multiplication des satellites visibles améliore la géométrie du réseau (PDOP) et renforce la robustesse de la solution GNSS. Dans le cadre de ce projet, l'objectif était de déterminer si cet avantage s'applique également à des levés en conditions dégagées, typiques des trajectoires maritimes et aériennes. Plusieurs calculs ont ainsi été réalisés avec un nombre croissant de constellations : GPS seule, GPS+GLONASS, jusqu'à GPS+GLONASS+Galileo+Beidou

Les résultats montrent un comportement contrasté selon les logiciels. Sur POSPac, la précision annoncée par le logiciel reste inchangée, quel que soit le nombre de constellations. À l'inverse, sur GrafNav, une amélioration progressive de la précision estimée est observée avec l'augmentation du nombre de constellations. Une vérification supplémentaire a été effectuée en comparant la trajectoire obtenue avec une seule constellation à celle calculée avec l'ensemble des constellations disponibles. Les écarts maximaux en planimétrie (dE, dN) et en altimétrie (dH) sont significativement plus faibles sur POSPac ( $dE_{max} = 2,2 \text{ cm}$ ,  $dN_{max} = 2,5 \text{ cm}$  et  $dH_{max} = 10 \text{ cm}$ ), alors que GrafNav affiche des écarts plus marqués ( $dE_{max} = 4,7 \text{ cm}$ ,  $dN_{max} = 5,6 \text{ cm}$  et  $dH_{max} = 16 \text{ cm}$ ). Cette différence peut s'expliquer par l'usage de la centrale inertielle chez POSPac, qui permet de compenser partiellement une perte de satellites en maintenant la continuité de la trajectoire grâce au couplage GNSS/IMU. En revanche, GrafNav, qui se base uniquement sur les données GNSS, nécessite un minimum de constellations (au moins trois, idéalement GPS+GLONASS+Galileo) pour garantir des résultats comparables.

## 4. Conclusion et perspectives

TRACK apparaît comme le logiciel le moins performant en termes d'exactitude, bien que ses résultats puissent probablement être améliorés par un paramétrage plus fin. Le choix entre GrafNav et POSPac dépendra principalement du matériel disponible (présence ou non d'IMU) et des configurations de constellations GNSS. D'autres paramètres, comme la géométrie des stations de référence, mériteraient d'être explorés. Cette étude offre ainsi à Fugro Geoid SAS des éléments concrets pour optimiser les futurs levés GNSS embarqués.

## Références bibliographiques

- Applanix Corporation (2023). *Pospac GNSS-Inertial Tools User Guide*.
- Cadiou, C. (2015). *Méthodes de calcul GNSS cinématique précis*. Internal report, INSA Strasbourg. Rapport Interne.
- Fugro Germany Marine GmbH. (2025). *GNSS Processing Report. National Mapping of Posidonia Oceanica and Cymodocea Nodosa using Geospatial Technologies (National Seagrass Mapping)*. Rapport interne, F229215-WP-BDH-REP-XXX. Brême, Allemagne : Fugro Germany Marine GmbH.
- Kaczmarek, A., Rohm, W., Klingbeil, L., and Tchórzewski, J. (2022). *Experimental 2D extended Kalman filter sensor fusion for low-cost GNSS/IMU/Odometers precise positioning system. Measurement*, 193 :110963.
- MIT (2023). *TRACK: GPS differential phase kinematic positioning program*.
- Vincent, F., Vilà-Valls, J., Besson, O., Medina, D. and Chaumette, E., 2020. Doppler-aided positioning in GNSS receivers-Aperformance analysis. *Signal Processing*, 176, p.107713.
- Waypoint Software (2024). *Inertial Explorer – Inertial Explorer Xpress – GrafNav / GrafNet – GrafNav Static, User Manual*. Available at: <https://novatel.com/support/waypointsoftware/grafnav> (Accessed: June 2025).

# Structuration de l'offre TPLM-3D et des méthodes de mesures géométriques à bord de navires, avec une étude comparative de déformations structurelles.

*PFE présenté par :* **Julien Loingeville**  
*Société d'accueil :* **TPLM-3D (PFE en collaboration)**  
*Directeurs de PFE :* **Stéphane Hopp (TPLM-3D)**  
**Nicolas Grangier-Dhollande (MAURIC)**  
*Correcteurs :* **Tania Landes**  
**Emmanuel Moisan**



## 1. Contexte et objectifs du projet

Dans un environnement maritime où les systèmes embarqués sont de plus en plus complexes et interconnectés, le maintien d'un alignement précis entre des équipements à bord est un enjeu stratégique, notamment pour garantir l'efficacité des systèmes d'armes, de navigation et de communication.

Or, les structures des navires évoluent avec le temps, sous l'effet de contraintes mécaniques, environnementales et du vieillissement, altérant la géométrie initiale des plateformes d'où la nécessité d'une actualisation régulière des mesures et des réglages géométriques à bord.

Face à ces enjeux, TPLM-3D a initié ce projet visant à structurer leur offre de mesure adaptée aux besoins du secteur naval. Entreprise française fondée en 2004 par David Desbuisson et Stéphane Hopp, ingénieurs géomètres diplômés de l'INSA Strasbourg, TPLM-3D est spécialisée dans la topographie appliquée à l'industrie, au BTP et au patrimoine architectural. Reconnue pour son expertise dans les travaux spéciaux, l'entreprise se distingue par une forte capacité d'innovation et une culture de la précision. Cette dernière requiert l'emploi d'équipements spécifiques et l'application de protocoles rigoureux, adaptés à chaque contexte d'intervention.

Ce projet est encadré également par l'entreprise MAURIC avec Nicolas Grangier-Dhollande, spécialisée dans la conception de navires et l'intégration de systèmes, apportant son expertise en architecture et structure navale à cette problématique.

L'objectif principal du projet est de développer des méthodes fiables permettant de garantir l'alignement précis des systèmes embarqués, en prenant en compte les contraintes structurelles propres aux navires. Pour cela, le projet prévoit d'abord de quantifier les déformations que subit un navire dans différents états (à quai et sur ligne de tins en bassin) et d'évaluer leur impact sur l'alignement des équipements. Il s'agit également d'analyser les tolérances admissibles des systèmes critiques sensibles aux désalignements, comme les radars, les centrales inertielles ou les canons. Le projet comprend par ailleurs la définition de repères de référence spécifiques aux navires militaires, en lien avec leurs plans et axes caractéristiques. Des procédures opérationnelles de mesure sont élaborées à partir de techniques telles que la lasergrammétrie, la tachéométrie ou l'inclinométrie, et donnent lieu à des modes opératoires détaillés accompagnés de fiches de contrôle, adaptées au matériel utilisé par TPLM-3D. Enfin, l'ensemble des données collectées est structuré et restitué à l'aide d'outils numériques dédiés, notamment via le logiciel TopTools, développé en interne par TPLM-3D.

Ce projet a pour ambition de fournir à TPLM-3D une base technique et méthodologique solide, afin de renforcer son positionnement sur le marché naval. Il contribuera également à structurer son offre commerciale de manière cohérente, facilitant ainsi les échanges avec les clients. Enfin, la production de guides de bonnes pratiques et de réponses techniques ciblées permettra de répondre efficacement aux problématiques rencontrées sur le terrain.

## 2. Fondements des mesures et enjeux à bord de navire

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans la continuité d'un Projet de Recherche Technologique (PRT) antérieur, mené sur des thématiques similaires. Ce travail préparatoire a permis de poser les bases de la réflexion en abordant la problématique à travers des premières études théoriques.

Pour cela une compréhension approfondie des matériaux utilisés dans les structures navales, ainsi que des déformations auxquelles ces structures peuvent être soumises s'imposent. Il est également essentiel de bien connaître les différents types de systèmes embarqués, leurs spécificités fonctionnelles, et les principes d'alignement qui leur sont associés. Ces alignements doivent être réalisés en fonction de référentiels, qu'ils soient physiques (plans de référence « marbre », axes repérés à bord « ligne de foi ») ou théoriques (à redéterminer selon la structure), comme représenté sur la figure 1. Cette compréhension globale est indispensable pour appréhender les enjeux techniques du secteur et proposer des solutions pertinentes face à ses contraintes particulières.

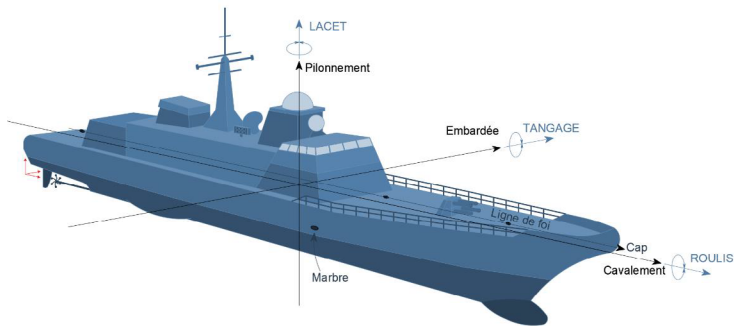


Fig 1 : Schéma représentatif des référentiels théoriques liés aux navires.

Une des principales contraintes est que les opérations de mesure sont rendues complexes par les mouvements constants du navire dus à la houle lors des missions à quai. Ces contraintes exigent des méthodes de mesures tridimensionnelles adaptées et surtout sur les calculs de consolidation robustes en 3D, loin des approches classiques utilisées sur terre ferme en 2D+1.

Le projet s'appuie principalement sur des instruments tels que la station totale, le scanner laser statique 3D et le niveau différentiel. La station totale permet de créer un canevas entre les références lié à la structure du navire et les systèmes embarqués, principalement sur des mesures en cap, tandis que le scanner est utilisé pour modéliser la géométrie du navire en cas d'absence de référence physique à bord. Le niveau différentiel, quant à lui, permet de mesurer avec précision les écarts d'inclinaison en roulis et tangage entre le plan de pose des équipements et le plan de référence souvent appelé le « marbre ».

L'harmonisation des systèmes embarqués repose sur des procédures rigoureuses de mesures d'alignement et de vérification, nécessaires pour garantir la performance des équipements critiques (radars, antennes, centrales inertielles, systèmes d'armes...). Ces opérations doivent s'inscrire dans une logique de maintenance continue, au-delà de la simple phase d'installation et de réglage.

Des méthodes similaires sont évoquées dans la littérature spécialisée. Par exemple, la collimation radar ou les *tram readings*, présentés notamment dans le document *Fire-Control Maintenance Concepts* publié par l'US Navy en 1997, illustrent les pratiques de certaines marines en matière de contrôle et de maintien de l'alignement des systèmes embarqués. Toutefois, ce domaine reste très confidentiel, ce qui rend l'accès à des documents techniques difficile. Les informations disponibles sont peu détaillées, ce qui souligne l'intérêt de les adapter et de les formaliser dans un cadre opérationnel clair, reproductible et adapté aux réalités du terrain.

### 3. Mesures à bord d'un navire de la Marine

Dans la continuité des méthodes de mesure déjà bien ancrées chez TPLM-3D, l'entreprise a souhaité approfondir sa compréhension des phénomènes de déformation structurelle afin de mieux répondre aux problématiques rencontrées sur le terrain. L'objectif était de vérifier si, et dans quelle mesure, la structure d'un navire pouvait évoluer selon ses conditions d'appui, en comparant son comportement à quai avec celui observé en cale sèche sur ligne de tins.

Pour mener à bien cette étude, TPLM-3D a pu accéder à la même unité navale dans deux configurations distinctes. Le navire étudié fait plus de 100 mètres de long. Deux campagnes de mesures ont été réalisées à bord de celui-ci à quelques mois d'intervalle :

- La première s'est déroulée du 10 au 14 février, alors que le navire était amarqué à quai ;
- La seconde a eu lieu du 22 au 30 avril, durant son arrêt technique en cale sèche sur lignes de tins.

Ces deux interventions ont offert une occasion unique d'observer les effets des conditions de support sur la géométrie du navire, et d'en évaluer les conséquences potentielles sur l'alignement des systèmes embarqués.

Afin d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des mesures, des cibles ont été réparties stratégiquement (lors de la première session et réutilisées pour la deuxième) sur les ponts et superstructures pour garantir une bonne géométrie d'observation. Pour ces deux jeux de mesures, trois instruments ont été utilisés :

- La station totale TS60, pour les relevés topographiques de ces références (points de ligne de foi, cibles Bohnenstingl, cibles damier) avec une étude de mouvement sur ce canevas ;
- Le scanner laser 3D Z&F 5016, pour modéliser la structure globale du navire avec une étude des différences des superstructures et des tôles de ponts ;
- Le niveau différentiel BlueLEVEL Wyler, pour mesurer les variations d'inclinaison selon le plan de référence, en roulis et tangage, du navire et les plans de pose des équipements.

Les données recueillies lors des deux campagnes ont été traitées séparément selon une méthodologie aussi similaire que possible, afin de garantir la cohérence des comparaisons. Cette démarche a permis de quantifier les éventuelles déformations structurelles entre les deux états du navire (à quai et en ligne de tins) et de confirmer l'influence notable des conditions d'appui sur la géométrie du bâtiment.

Comme l'illustre la figure ci-contre, des écarts significatifs ont été observés entre les deux nuages de points, avec une déformation de type « effet banane » atteignant jusqu'à 4 cm, soit environ 0,03°. Dans le cas de systèmes embarqués nécessitant une grande précision d'alignement (de l'ordre du centième de degré) tels que les centrales ou les systèmes d'armes, il est préférable d'effectuer les opérations d'harmonisation et de réglage en condition réelle d'exploitation, c'est-à-dire lorsque le navire est à quai, plutôt qu'en ligne de tins.

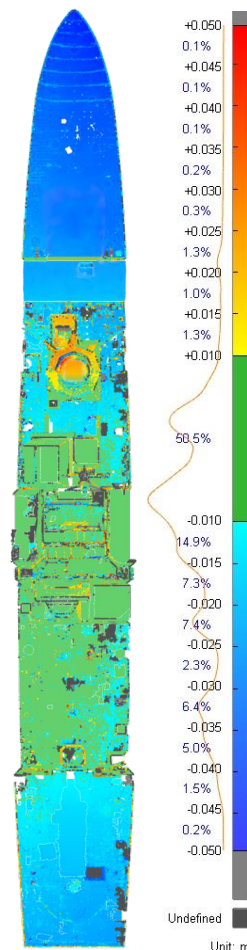


Fig 2 : Représentation graphique de la comparaison des nuages de points de deux sessions.

*Le rendu a été volontairement présenté sans échelle, afin de garantir la confidentialité des données sensibles.*

## 4. Structuration de l'offre TPLM-3D et modes opératoires associés

Fort de plus de vingt années d'expérience, TPLM-3D a réalisé de nombreuses interventions sur des systèmes embarqués variés, tels que les centrales inertielles, radar, systèmes de communications..., ou encore sur des bâtiments comme les chasseurs de mines. Cependant, en l'absence de modes opératoires formalisés à ce jour, les méthodes employées peuvent varier d'un intervenant à l'autre, ce qui peut conduire à des différences d'approches. Ce constat souligne la nécessité de formaliser des modes opératoires clairs, standardisés et suffisamment flexibles pour s'adapter à la diversité des situations rencontrées à bord.

Dans cette optique, les connaissances acquises ont été organisées dans des modes opératoires dédiés aux spécificités du domaine naval. Ces procédures sont accompagnées d'outils complémentaires développés en interne, notamment des modules intégrés dans le logiciel TopTools et des fiches de traitement sous Excel. Ces supports facilitent le déroulement des opérations et garantissent une homogénéité dans les rendus.

En parallèle de l'analyse des données recueillies lors des campagnes de mesure du même navire, un travail a été mené pour exploiter les différentes possibilités de traitement et évaluer leur pertinence. Cette démarche a permis de souligner l'intérêt de rationaliser les outils utilisés chez TPLM-3D. Une comparaison approfondie des logiciels disponibles a ainsi permis d'identifier les mieux adaptés à chaque usage, dans le but d'optimiser la chaîne de traitement, de limiter les manipulations entre plateformes, et de réduire les risques de pertes ou d'erreurs lors du transfert de données.

En complément, un travail notable a été mené pour enrichir les fonctionnalités de TopTools, notamment dans le module de compensation 3D. Celui-ci permet désormais de visualiser les erreurs résiduelles normées rapidement avec un code couleur dès lors que leurs valeurs sont au-delà de [2.58], ainsi qu'une représentation géométrique du réseau de points, les visées associées, avec leurs ellipses d'erreur, offrant une appréciation visuelle de la qualité du canevas. Une interface a également été développée afin de restituer les résultats d'harmonisation sous forme angulaire, à la fois selon l'axe en cap (calculé via TopTools) et selon les plans roulis/tangage (issus des mesures différentielles traitées sous Excel). Ces résultats sont accompagnés d'indicateurs de précision, de références claires et des informations essentielles liées à chaque opération d'harmonisation, comme l'illustre la figure 3.

Par ailleurs, les interventions en environnement naval présentent des conditions souvent contraignantes et potentiellement dangereuses. Pour garantir à la fois la sécurité des opérateurs et la fiabilité des mesures, des précautions techniques rigoureuses et des consignes de sécurité spécifiques sont indispensables. Les risques liés à la présence de substances nocives de l'air dans des espaces confinés, au travail en hauteur ou encore au travail isolé nécessitent une préparation adaptée et l'adoption d'équipements appropriés. Ces exigences ont été intégrées dans la structuration des méthodes de mesure, afin d'assurer des interventions à la fois sécurisées et techniquement maîtrisées.

Ainsi, ce projet a permis de structurer une approche complète et rigoureuse des mesures géométriques embarquées à bord des navires, en intégrant à la fois des protocoles techniques adaptés, des outils logiciels optimisés et des méthodes d'analyse reproductibles. Les campagnes menées à quai et en cale sèche ont démontré l'influence significative des conditions d'appui sur la géométrie structurelle d'un bâtiment naval. Toutefois, pour compléter cette analyse, la réalisation d'une troisième session de mesures, plusieurs mois après le retour du navire à quai, serait pertinente. Elle permettrait de déterminer si les déformations observées sont de nature élastique (avec un retour à la forme initiale) ou si elles traduisent des déformations plastiques affectant la structure de manière permanente.

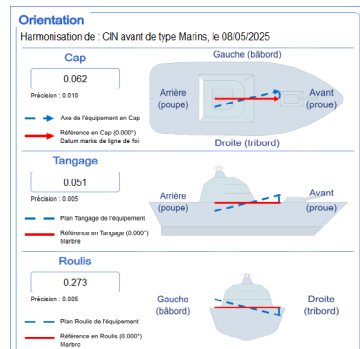


Figure 3 : Représentation d'une illustration des possibilités de rendu de l'interface Homme / machine à la suite d'une harmonisation.

# Mise en place et configuration du logiciel « Limit Addict » dans un cabinet de Géomètres-Experts.

*PFE présenté par :* **Armand ODDOS**  
*Société d'accueil :* **Géo-Siapp**  
*Directeur de PFE :* **Gaëtan HAGUE**  
*Correcteur :* **Mathieu KOEHL**  
*Encadrant :* **Gaëtan HAGUE**



---

## 1. Contexte de l'étude

La Société Anonyme (SA) Géo-Siapp est un cabinet de Géomètres-Experts basé à Aubenas, en Ardèche. Elle est composée d'une partie topographie et d'une partie bureau d'études. Elle possède également d'autres agences en Ardèche, à Vallon-Pont-d'Arc et à Guilherand-Granges, ainsi qu'une agence dans la Drôme, à Pierrelatte. L'entreprise est dirigée par deux Géomètres-Experts et composée d'une trentaine de collaborateurs, dont neuf Géomètres. La partie géométrie est orientée sur deux axes : les plans topographiques d'une part et les travaux fonciers de l'autre. Ces derniers comprennent les travaux de bornage, délimitation, division, rétablissement, ainsi que les mise en copropriété/volume.

La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et plus précisément le DAO (Dessin Assisté par Ordinateur), est au cœur du métier des géomètres. Elle permet l'établissement des plans, la création de projets, l'élaboration des documents spécifiques au métier (DP, DMPC, ...). Cette partie nécessite l'utilisation d'un logiciel dédié.

Au fil des années, le logiciel métier Covadis, développé par la société française Sogelink et fonctionnant comme une extension du logiciel de DAO AutoCAD, développé par Autodesk, a dominé le monde des logiciels de géomètre. Du fait de ce monopole, les licences qui étaient autrefois perpétuelles sont devenues des abonnements, avec des prix de moins en moins abordables, rendant difficile le maintien d'une licence par employé.

De ce fait, des logiciels métiers alternatifs émergent petit à petit, en se basant sur d'autres logiciels de CAO/DAO. En parallèle, des sociétés cherchent à migrer de logiciel pour retrouver une approche commerciale avec des prix abordables et un service client réactif.

Entre une orientation très spécifique au métier de Géomètre-Expert et un développement basé sur l'optimisation des tâches répétitives, tout semble pousser vers une transition sur le logiciel Limit Addict (LA). Cette extension du logiciel de DAO TopStation et développé spécifiquement par un ingénieur géomètre de l'ESTP avec une réelle expérience terrain.

L'étude menée ici a pour objectif de faire le lien entre l'évolution du marché des logiciels dédiés aux Géomètres-Experts et le développement du cabinet Géo-Siapp. L'idée est de réaliser une transition optimale des collaborateurs pour que chacun puisse être formé sur le nouveau logiciel sans pour autant subir une baisse de motivation ou de productivité.

Il s'agira dans un premier temps de recensé les logiciels existants et généralement utilisés dans les cabinets. Tout en analysant les besoins réels d'une entreprise de Géomètres-Experts, et en particulier du cabinet Géo-Siapp, afin de confirmer le choix de Limit Addict.

Dans un second temps, l'objectif sera de paramétrer le logiciel pour respecter la charte graphique employée par l'entreprise depuis plus de 30 ans. L'idée est que la transition n'altère pas la qualité des rendus et n'apporte que du positif pour les collaborateurs. L'intérêt de passer sur une solution paramétrable est de s'investir dans l'optimisation via une automatisation des processus répétitifs et fastidieux.

## 2. État de l'art

Il existe de nombreux logiciels de CAO/DAO, utiles principalement dans l'industrie et la construction. Parmi ceux-ci, certains sont dédiés à un métier en particulier. Nous allons donc nous intéresser globalement aux logiciels existants destinés aux Géomètres et Topographes. Puis, un approfondissement sur les logiciels spécifiques au métier du Géomètre-Expert sera effectué.

### 2.1 Les logiciels de CAO/DAO

L'intégration de la CAO/DAO dans la pratique des géomètres représente l'une des évolutions les plus significatives du métier de ces dernières décennies. Ces logiciels assurent une grande partie du travail de bureau, depuis les calculs et jusqu'à la production des plans.

De ce fait, on retrouve de nombreux logiciels, notamment de CAO, qui inondent le marché. Parmi eux, il y a les solutions proposées par les constructeurs d'appareils de mesure comme Leica Infinity de Leica ou encore Trimble Business Center (TBC) de Trimble. Ces deux solutions sont comparables et orientées sur deux axes. Le premier est le traitement de données issues d'un levé GNSS (Global Navigation Satellite System) principalement mais également à partir de données lasergrammétriques, d'images, ou encore de mesures effectuées avec une station totale. Le second est l'aspect conception qui permet la création et le suivi d'un chantier à l'aide notamment d'une maquette numérique, en partant des acquisitions jusqu'à la production (plans, maquettes...).

Dans le même esprit, il existe le logiciel Mensura, commercialisé par Sogelink et permettant la réalisation de projets similaires.

On retrouve également les logiciels du groupe américain Autodesk et notamment AutoCAD, spécialisé dans la CAO. Il existe un produit similaire, ZWCAD développé par la société chinoise ZWSOFT et commercialisé en France par la filiale ZW France du groupe Géomesure, également revendeur Trimble. Ces deux logiciels sont très performants pour le DAO et la CAO avec une bonne ergonomie pour le dessin en 2D et l'élaboration de projets.

Pour finir, on peut parler du logiciel TopStation, récemment acheté par TERIA, qui se veut être une plateforme de CAO/DAO intelligente fonctionnant sous la forme d'une gestion de base de données.

L'ensemble de ces logiciels propose une compatibilité avec le format dwg, ce qui montre l'importance de ce format développé par le logiciel AutoCAD (1982), traduisant la domination du marché par ce dernier.

### 2.2 Les extensions dédiées aux Géomètres-Experts

Parmi les logiciels de CAO/DAO, certains ont vu émerger une solution métier orientée vers la spécificité du métier de Géomètre-Expert. Ces dernières, fonctionnant en tant qu'extensions du logiciel associé, s'ajoutent via une licence annexe indépendante.

On retrouve donc Covadis, créé par GEOMEDIA et aujourd'hui commercialisé par Sogelink. Covadis, extension d'AutoCAD, est utilisé par de très nombreux cabinets. Covadis n'est pas le premier logiciel utilisé par les géomètres-experts, mais il est probablement le premier à proposer une solution intégrée, complète et dédiée à leurs besoins métier en environnement AutoCAD.

Bien que ce dernier ait dominé le marché pendant de nombreuses années, on retrouve aujourd'hui d'autres solutions émergentes, du fait de l'augmentation des tarifs et de la baisse de qualité du SAV

(Service Après-Vente). On retrouve d'un côté GEOGEXFR, proposé par SOGELINK également, dont les objectifs sont d'utiliser un logiciel moins coûteux, ZWCAD, et de proposer une solution proche de Covadis, allégée et recentrée sur le métier de Géomètre-Expert, avec un tarif en conséquence. De l'autre côté, est apparu Limit Addict, extension de TopStation et développé par Thomas MARTEL, ingénieur géomètre. Il se veut dédié au métier et mise sur l'automatisation et la diminution des tâches fastidieuses. Contrairement à ZWCAD, Limit Addict n'a pas du tout la même architecture que Covadis.

Ces extensions permettent l'ajout de fonctionnalités à la fois sur la partie levé terrain, avec l'ajout ou l'amélioration de la gestion de la codification, parfois l'ajout des calculs topométriques (Géobase Covadis), mais également des éléments liés au foncier comme l'import du cadastre, les comptes de propriété du SPDC (Serveur Professionnel de Données Cadastrales), les versements RFU (Référéntiel Foncier Unifié). Globalement, l'ensemble de ces trois binômes logiciel–extension apporte les outils nécessaires au bon déroulement de chaque mission d'un Géomètre-Expert.

Comme on peut le voir sur la figure 1, Limit Addict propose en plus de générer de manière semi-automatique les différentes pièces administratives via un module dédié intégré à la version de base.



Fig. 1 : Module Pièces Administratives de Limit Addict

D'autres fonctionnalités, comme l'ergonomie de la codification et des cartouches, la gestion des altitudes ou encore les masses pour les bornages et divisions, font de ce logiciel une option très intéressante. En effet, il permet d'être plus performant dans les tâches répétitives et, après une bonne prise en main, de gagner du temps au quotidien.

### 3. Mise en place de Limit Addict au sein du cabinet Géo-Siapp

Au vu des éléments de l'état de l'art, le choix du logiciel Limit Addict semble évident dans une entreprise telle que Géo-Siapp. En effet, les effectifs étant majoritairement jeunes (autour de 30 ans) cela étaye la volonté des plus anciens de faire évoluer l'entreprise vers une solution plus adaptée aux besoins réels des Géomètres-Experts. Ce choix s'accompagne d'une nécessité de paramétrer spécifiquement le logiciel aux besoins du cabinet. En effet, la génération de nombreux éléments automatiquement ne peut être utile que si un minimum de modifications est nécessaire ensuite. De ce fait, j'ai, durant mon projet, pu mettre en place bon nombre de prototypes et modèles fluidifiant l'utilisation du logiciel.

Le paramétrage des éléments vise à conserver la charte graphique utilisée par l'entreprise depuis sa création tout en profitant de la transition pour moderniser certains éléments.



# Étude de solutions low-cost pour l'acquisition et le traitement de nuages de points 3D dans le cadre de suivi et de gestion d'infrastructures.



PFE présenté par : **Nicolas BRIANT**  
Société d'accueil : **Ferrcad**  
Directeur de PFE : **Yvon KILA**  
Correcteur : **Amadi MURTIYOSO**  
Encadrante : **Hélène MACHER**



## 1. Contexte et objectif de l'étude

L'acquisition et l'exploitation de données 3D sont devenues un enjeu majeur pour l'ensemble des acteurs impliqués dans l'acte de construire ou de maintenir durablement un actif. Le développement du BIM (*Building Information Modeling*) impose aujourd'hui des instruments capables de restituer l'état réel d'un ouvrage avec précision, rapidité et fiabilité. Dans ce contexte, les scanners laser terrestres (SLT) se sont imposés comme des références en matière de relevé 3D, offrant une précision millimétrique et une densité de données élevée. Toutefois, le coût d'acquisition, la complexité d'utilisation, la nécessité de former des opérateurs qualifiés ainsi que les frais de maintenance associés les rendent inaccessibles pour de nombreux acteurs de la filière, en particulier les structures de petite ou moyenne taille.

L'entreprise **FERRCAD**, dont l'activité est aux deux tiers consacrée à fournir une assistance technique et technologique dans le cadre de projets de construction ou de gestion, exploitation et maintenance (GEM) d'actifs en milieu varié, a exprimé le besoin de disposer d'une solution alternative plus légère, à la fois simple à mettre en œuvre sur le terrain, rapide, et suffisamment précise pour permettre le suivi d'évolutions d'ouvrages dans des contextes très variés. Ces environnements peuvent aller de zones étroites et confinées à de vastes espaces ouverts, avec des contraintes d'accès, de lumière et de sécurité. L'outil recherché doit ainsi concilier flexibilité, autonomie, performance et coût maîtrisé.



Figure 1 : Exemples de contextes industriels rencontrés par Ferrcad

C'est dans ce cadre qu'a été défini ce projet de fin d'études, dont l'objectif est d'identifier, tester et comparer plusieurs **solutions d'acquisition 3D** dites **low-cost**, c'est-à-dire dont le coût total, incluant l'équipement de capture et le logiciel de traitement, reste inférieur à 10 000 euros. Ces solutions doivent être compatibles avec les besoins opérationnels de FERRCAD et s'intégrer facilement dans les chaînes de production existantes. L'enjeu est de démontrer qu'il est possible, grâce à une combinaison de technologies légères et de bonnes pratiques d'acquisition, de produire des nuages de points fiables, exploitables et cohérents avec les exigences professionnelles d'un suivi d'infrastructure.

## 2. Sites d'étude et dispositifs testés

Pour évaluer les solutions d'acquisition 3D envisagées, plusieurs campagnes d'essais ont été menées sur deux sites représentatifs des environnements dans lesquels intervient régulièrement l'entreprise FERRCAD. Le premier site est une galerie technique souterraine, caractérisée par des volumes étroits, une faible luminosité et la présence de nombreux câbles, gaines et structures métalliques. Ce type d'environnement est particulièrement exigeant pour les méthodes de numérisation 3D, en raison des occlusions fréquentes, du manque de recul et de la faible richesse texturale des surfaces. Le second site est un local technique de petite à moyenne taille, situé également dans les sous-sols de l'INSA Strasbourg. Il comprend du câblage électrique, des tuyaux et divers équipements. Cet espace, relativement bien éclairé et plus ouvert, permet de tester les performances des dispositifs dans un cadre plus favorable à la photogrammétrie et à la vidéogrammétrie.

La sélection finale des dispositifs testés a été réalisée à partir d'acquisitions préliminaires sur plusieurs équipements, en privilégiant ceux offrant une bonne simplicité d'utilisation, une flexibilité d'usage et une accessibilité budgétaire. Quatre systèmes principaux ont ainsi été retenus :

- **iPhone 15 Pro Max** : initialement évalué avec son capteur Lidar intégré, ce mode a été rapidement écarté lors des tests préliminaires en raison de sa portée limitée. L'iPhone a donc été utilisé en mode vidéo, avec un traitement par vidéogrammétrie à partir des images extraites.
- **GoPro Hero 9 Black** : testée dans deux configurations. En mode vidéo 4K, pour une reconstruction par vidéogrammétrie, et en mode *time-lapse* photo, avec une image capturée toutes les deux secondes, afin d'évaluer l'impact du type d'acquisition sur la qualité du nuage.
- **Canon EOS R5** : appareil photo reflex couplé à un objectif grand angle 15 mm, utilisé à la fois en photogrammétrie (*time-lapse*) et en mode vidéo. Ces deux approches ont permis de tester les capacités de l'appareil à générer des nuages de points via des méthodes classiques ou par vidéogrammétrie.
- **DJI Mini 4 Pro** : drone léger exploité en vol manuel et automatique, avec des prises de vues sphériques réalisées à différentes hauteurs. Ce dispositif a été utilisé dans un environnement ouvert, afin d'assurer une couverture complète et homogène des volumes.

## 3. Méthodes et protocoles développés

La réussite d'un relevé 3D ne dépend pas uniquement du matériel utilisé, mais repose en grande partie sur la qualité du protocole mis en œuvre lors de l'acquisition. Dans ce projet, une attention particulière a été portée à la définition d'une méthode rigoureuse et reproductible, adaptée à la diversité des capteurs testés et capable de garantir des résultats cohérents, exploitables et comparables, même dans des conditions d'acquisition complexes.

Chaque système testé présentait des contraintes spécifiques : durée maximale de capture, stabilisation, type de données produites, sensibilité à la lumière, champ de vision, ou encore autonomie. Afin d'assurer une base commune de comparaison, un organigramme d'acquisition global a été élaboré, puis ajusté selon les particularités techniques de chaque appareil (voir *Figure 2*). En complément, des protocoles spécifiques ont été développés pour chaque dispositif, afin de permettre à l'entreprise et à ses partenaires de reproduire les acquisitions dans des contextes opérationnels réels, avec un minimum de formation.

Un protocole de traitement standardisé a été appliqué à l'ensemble des acquisitions à l'aide du logiciel *Agisoft Metashape*, afin d'assurer une comparaison équitable entre les différentes méthodes testées. Chaque jeu de données a suivi une même chaîne de traitement, depuis l'importation des images jusqu'à la génération des nuages de points, selon des réglages identiques. Cette homogénéité permet de garantir que les écarts observés entre les modèles résultent bien des performances des capteurs et non d'un biais lié à des paramètres de traitement inégaux. La mise à l'échelle des modèles a été réalisée à partir d'éléments de référence mesurés sur site, afin de garantir la comparabilité des résultats en dimensions réelles.

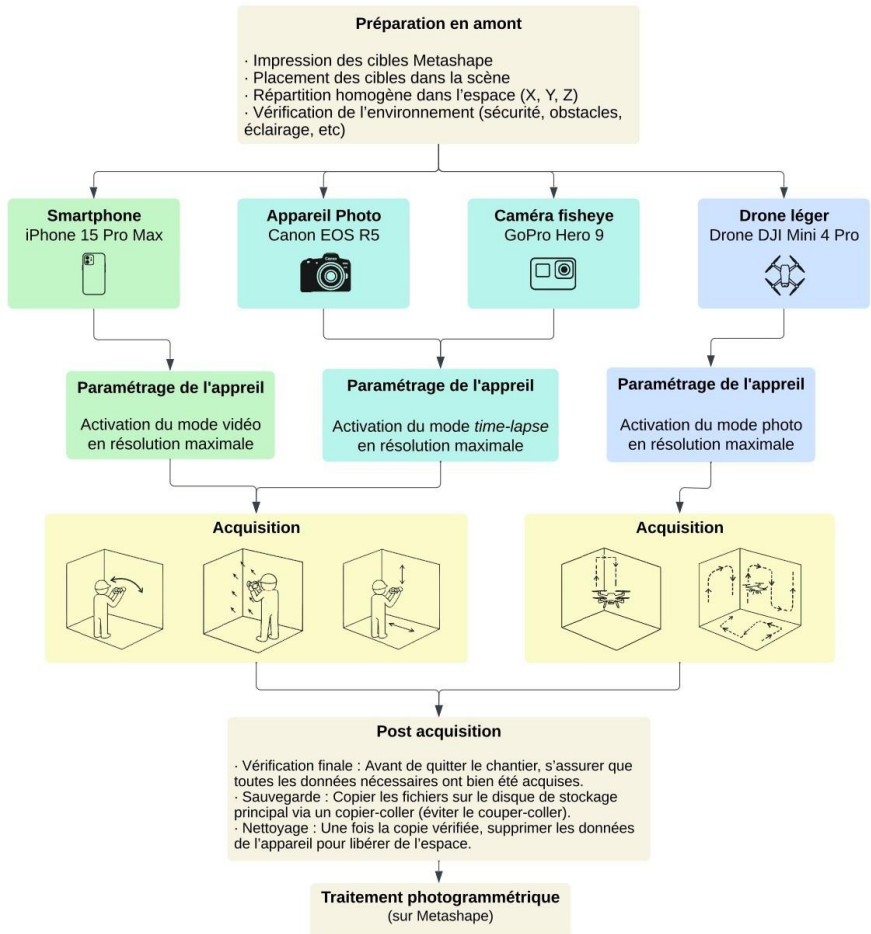


Figure 2 : Organigramme des protocoles d'acquisition

## 4. Analyse des résultats et comparaison des méthodes

Afin de comparer objectivement les différentes méthodes d'acquisition 3D, chaque nuage de points a été comparé à un nuage de référence obtenu à l'aide d'un scanner laser terrestre. L'analyse s'est appuyée sur l'algorithme M3C2 pour quantifier les écarts entre les modèles. En complément, une vérification géométrique a été réalisée sur un tuyau cylindrique présent dans le local technique, afin d'évaluer la fidélité des reconstructions en comparant le rayon mesuré à une valeur connue.

Les résultats obtenus sont résumés dans le *Tableau 1*, qui compare les principales métriques (erreur moyenne M3C2, écart-type, erreur sur le rayon) pour chaque méthode, dans les deux environnements testés.

La GoPro Hero 9, utilisée en vidéo et en time-lapse, montre des écarts notables selon le mode choisi. En vidéo, les résultats sont limités par le flou des images extraites, ce qui nuit à la qualité des reconstructions. En revanche, le mode time-lapse s'est avéré être le meilleur compromis de l'étude, offrant un bon équilibre entre précision, stabilité et simplicité d'utilisation, notamment dans le local technique.

Le Canon EOS R5, également évalué en vidéo et en time-lapse, s'est montré peu performant en mode vidéo, en raison de problèmes de stabilisation et de recouvrement. En mode time-lapse manuel, il produit des nuages denses et cohérents, mais présente un écart-type plus important que celui de la GoPro, ce qui limite sa fiabilité pour la détection de changements.

L'iPhone 15 Pro Max, utilisé uniquement en vidéogrammétrie, fournit un nuage relativement homogène, mais moins dense, avec certaines lacunes dans les zones complexes. Cette méthode reste utile pour des relevés rapides, mais ne répond pas forcément aux exigences pour un suivi technique.

Appareil	Méthode	Scène	Erreur moyenne M3C2 (mm)	Écart-type M3C2 (mm)	Erreur rayon cylindre (mm)
GoPro	Time-lapse	Local technique	0	10	1
		Galerie	3	14	
	Vidéo	Local technique	0	12	-5
iPhone	Vidéo	Local technique	0	11	-4
Canon	Time-lapse	Local technique	1	9	-8
		Galerie	2	15	
	Vidéo	Local technique	0	12	20
Drone	Hors zone étude	Couloir + pièce	-1	15	
		Couloir	-3	8,5	

Tableau 1 : Synthèse des performances des méthodes d'acquisition testées

Pour des raisons de sécurité, le drone DJI Mini 4 Pro n'a pas pu être utilisé dans les environnements confinés testés avec les autres dispositifs. Les essais ont donc été menés dans un milieu plus dégagé, permettant un vol stationnaire contrôlé et des prises de vues sphériques.

Le modèle obtenu est de bonne qualité globale, avec une couverture homogène et peu d'artefacts. Les mesures indiquent un écart M3C2 moyen de -3 mm (et un écart-type de 8,5 mm). Le drone se révèle efficace pour la capture de volumes ouverts, avec peu de contraintes mais son usage en intérieur reste limité et conditionné à un environnement sécurisé, même si cela reste envisageable dans certains cas.

## 5. Conclusion

L'ensemble des tests réalisés a permis de mettre en évidence les atouts et les limites de chaque méthode d'acquisition 3D. Si certaines configurations légères, comme la GoPro en *time-lapse* ou le Canon en mode *time-lapse*, offrent des résultats proches d'une solution professionnelle, d'autres en particulier les approches par vidéo se révèlent nettement moins fiables pour un usage technique.

Cependant, cette étude comparative ne constitue qu'une première étape. Des évaluations complémentaires restent à mener, notamment pour vérifier si les nuages de points générés sont suffisamment précis et structurés pour être exploités dans des workflows BIM. À ce titre, l'intégration et le test des modèles avec la brique technologique FerrSRO, développée par Ferrcad pour le suivi des infrastructures, représenteront une étape clé pour juger de leur réelle pertinence pour la détection de changements.

# Mise en place des technologies non destructives de géoréférencement des réseaux existants dans le but d'améliorer les études de projets d'Infrastructures.



PFE présentée par : **Joëlle MROUE**  
Société d'accueil : **EIFFAGE Route**  
Directeur de PFE : **M. Benjamin MALAN**  
Correcteur : **M. Gilbert FERHAT**  
Encadrant : **M. Benjamin MALAN**



---

## UN CHASSEUR DE TRÉSOR DOIT-IL CREUSER ?

La recherche d'objets enfouis sous terre est un véritable défi. Creuser pour localiser des réseaux est dangereux, lent, peu pratique et coûteux, en particulier sur de grandes surfaces. De plus, dans certains lieux sensibles où le sol ne doit pas être endommagé comme sous les bâtiments, sur les voies publiques ou dans les espaces publics, le forage devient tout simplement impossible.

### 1. Contexte et objectifs

Eiffage Route est une entreprise spécialisée dans la conception, la réalisation et l'entretien de routes. Filiale du groupe Eiffage, acteur majeur des infrastructures en Europe, l'entreprise mène une politique active d'innovation technologique au service de la sécurité, de la performance et du respect de l'environnement.

Dans le cadre des projets d'infrastructures, la connaissance précise de l'état des réseaux souterrains constitue un enjeu important. Les aléas liés à une détection insuffisante ou imprécise peuvent engendrer des retards importants, des surcoûts, ainsi que des risques pour la sécurité. C'est pourquoi Eiffage Route investit aujourd'hui dans des technologies non destructives de détection et de géoréférencement, dans le but d'optimiser la conception, de garantir la continuité des réseaux, et de fiabiliser les données intégrées aux maquettes numériques BIM.



Fig. 1 : Géoradar GS8000



Fig. 2 : Détecteur électromagnétique VIVAX vLOC3

À l'agence de Réguisheim, au sein de la cellule topographie, l'entreprise a récemment acquis deux outils innovants : le géoradar Proceq GS8000 et le détecteur électromagnétique Vivax vLoc3, tous deux couplés à un système GPS RTK. Le géoradar Proceq GS8000, lancé en 2022, est le premier instrument combinant détection radar et géoréférencement GPS haute précision. Mon rôle au sein de

l'entreprise consiste à adapter ce produit aux besoins opérationnels du terrain, en élaborant une procédure d'utilisation détaillée et en étudiant rigoureusement sa précision.

Ce Projet de Fin d'Étude a pour objectif d'analyser les méthodologies actuelles de détection et de traitement des réseaux souterrains, d'en identifier les limites, puis de proposer des améliorations concrètes tant sur le plan matériel que logiciel. L'objectif est de déployer ces appareils sur le terrain, de rédiger des procédures claires, d'analyser les résultats obtenus, d'avoir un retour critique sur les données sortantes, et de créer un workflow technique structuré. Ce workflow sera accompagné de procédures d'utilisation précises et intégré à une démarche qualité, afin de standardiser l'activité de détection et de fournir un service fiable à l'équipe interne d'Eiffage ainsi qu'aux clients.

À terme, l'ambition est d'optimiser la qualité des levés de réseaux souterrains en alliant précision, efficacité et intégration au processus BIM, tout en garantissant la sécurité des intervenants et la fiabilité des travaux d'infrastructures.

## 2. Principe de fonctionnement du Géoradar : Méthodes de collecte des données

Le Géoradar est un dispositif d'exploration non destructif qui permet une analyse détaillée des structures souterraines. Il fonctionne en émettant des ondes électromagnétiques dans le sol, lesquelles sont réfléchies lorsqu'elles rencontrent des objets ou des anomalies, comme des réseaux souterrains. Le processus commence par le choix d'une ligne de scan selon une direction prédéterminée. Le GPR est ensuite déplacé le long de cette ligne, en enregistrant des positions successives à chaque position ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$ , ...,  $P_N$ ), il émet des ondes électromagnétiques qui se propagent dans le sol. Lorsqu'elles rencontrent un réseau souterrain, ces ondes sont réfléchies par le réseau et crée un profil bidimensionnel en profondeur, offrant ainsi une cartographie précise de la composition du sous-sol et une localisation claire des éléments enfouis.

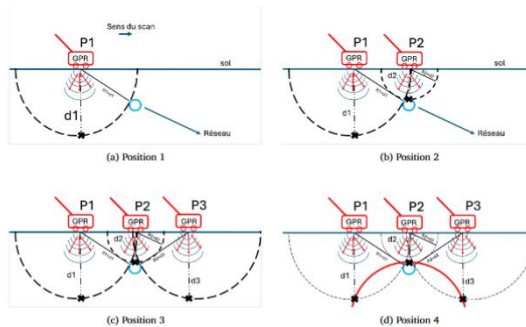


Fig. 3 : Illustration du fonctionnement du GPR avec quatre positions de mesure.

À la position  $P1$ , les ondes se propagent en formant un cercle de rayon  $d1$  où  $d1$  représente la distance entre le GPR et le réseau détecté, comme le montre la figure (3.a). À la position  $P2$ , illustré sur la figure (3.b), le GPR émet également des ondes, mais cette fois, celles-ci atteignent directement le réseau à la verticale de sa position. En continuant ainsi, à chaque position, le géoradar enregistre le point sur l'arc de réflexion correspondant au contact avec le réseau.

En reliant ces points, on obtient une parabole dans les données du radargramme, ce qui est mis en évidence dans la figure (4). Cette parabole correspond au réseau détecté, où les ondes sont réfléchies par la surface du réseau. La véritable position de l'objet souterrain dans le radargramme

bidimensionnel se situe au sommet de la parabole. La forme de la parabole dépend de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau traversé et de la taille de l'obstacle.

Dans le radargramme :

- L'axe  $X$  représente le déplacement linéaire du GPR sur le terrain.
- L'axe  $Y$  indique la profondeur estimée du signal réfléchi, donc la distance entre le GPR et le réseau.

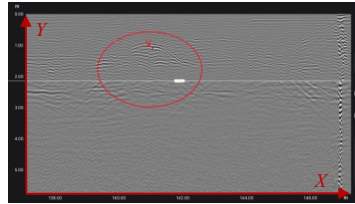


Fig. 4 : Radargramme affiché sur la tablette du GPR

La forme et l'ouverture de la parabole dépendent de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau traversé (sol, enrobé, béton, etc.), ce qui influence la précision de la localisation verticale.

Le sommet de la parabole représente la distance la plus courte entre toutes les positions PN du GPR et le réseau, comme le montre la figure (4), ce qui correspond à la position où le GPR est directement à la verticale de l'objet. Cela permet une analyse précise de la position et de la profondeur du réseau.

Selon le GPR utilisé par l'entreprise (Proceq GS8000), la direction de déplacement du GPR est géoréférencée dans un système planimétrique CC48. Cela signifie que les positions successives ( $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$  ...  $PN$ ) sont couplées aux mesures fournies par le GNSS RTK intégré, également exprimées dans le système CC48. Après un processus de traitement de données, cela permet d'obtenir des coordonnées tridimensionnelles précises, de la génératrice supérieure des réseaux détectés.

### 3. Analyse des limitations techniques et pistes d'amélioration de la détection par géoradar

Lors de la mise en œuvre des relevés avec le géoradar, plusieurs difficultés techniques ont été rencontrées, affectant la qualité des données et leur exploitation en post-traitement.

L'un des principaux obstacles concerne le traitement des fichiers DXF générés après détection. Ces fichiers présentent une structuration peu adaptée : les points sont représentés sous forme de cercles, de segments et de textes multiples, ce qui complique l'identification précise du centre de chaque réseau pour l'élaboration de plans fiables. Ce format ne permet pas de générer directement des objets DAO 3D exploitables, tels que des blocs avec attributs ou des polygones 3D. Par ailleurs, les coordonnées  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  des réseaux ne sont ni clairement intégrées ni facilement accessibles dans ces fichiers, limitant fortement leur réutilisation.

Des incohérences de géoréférencement ont également été constatées entre les relevés GNSS du géoradar et ceux du GPS Trimble RTK. Ces écarts horizontaux sont principalement dus à un offset planimétrique entre les antennes, non pris en



Fig. 5 : Test de répétibilité GPR sur clou géoréférencé

compte lors du positionnement. Une problématique analogue a été observée entre les profondeurs mesurées par le géoradar et celles obtenues par le détecteur électromagnétique : le premier fournit la profondeur jusqu'à la génératrice supérieure du réseau, tandis que le second donne une profondeur relative entre la surface du sol et le centre du réseau. Cette divergence de référence peut entraîner des erreurs d'interprétation si elle n'est pas correctement compensée.

En outre, le GPS intégré au géoradar restait bloqué en mode "Single", malgré l'activation des corrections RTK et SBAS. Cela a eu pour effet de limiter la précision, la maintenant au-dessus du seuil réglementaire de 10 cm requis pour les relevés de classe A dans les travaux d'infrastructure.

Face à ces limitations, plusieurs solutions concrètes ont été développées durant mon alternance :

- **Automatisation de l'extraction des données** : un script AutoCAD a été développé pour extraire automatiquement les coordonnées des réseaux par calque et générer un fichier CSV structuré, directement exploitable dans Covadis.
- **Conversion altimétrique** : un second script, en Python, a été conçu pour convertir les coordonnées des réseaux en altitude et profondeur, afin de permettre leur intégration dans Mensura ou dans un environnement BIM.

J'ai notamment effectué quatre passages (M1, M2, M3, M4) rigoureusement alignés et perpendiculaires sur un clou de géoréférencement fixe, afin d'en évaluer la précision de localisation, illustré dans la figure (5). Malgré ces précautions, un décalage supérieur à 20 cm a été constaté entre les quatre mesures.

Ce test a permis de quantifier les erreurs liées à l'absence de prise en compte de l'offset d'antenne et à l'imprécision du mode Single. Il a également souligné l'importance d'appliquer correctement les corrections géodésiques pour garantir une position fiable du GPR sur les repères de référence.

#### 4. Évaluation des méthodes de positionnement et perspectives d'amélioration

Dans une logique d'amélioration continue, une nouvelle solution est actuellement à l'étude : l'interfaçage du GPR avec une station totale Trimble à l'aide d'un flux Pseudo NMEA GGA. Cette configuration vise à pallier les limites du GNSS intégré, notamment dans les environnements urbains denses où les signaux satellites sont souvent perturbés. Le système permet à la station totale de suivre en temps réel le déplacement du GPR grâce à un prisme fixé sur le chariot, garantissant ainsi une précision planimétrique et altimétrique bien supérieure. Des essais sont en cours pour valider la fiabilité de cette méthode, notamment en comparant les données obtenues avec celles issues de la station seule et du GPR en mode classique.

L'ensemble de ces expérimentations permet d'identifier les points faibles des méthodes initiales, mais aussi de mettre en place des solutions concrètes et reproductibles. L'optimisation du traitement des données et le recours à une géolocalisation externe plus précise ouvrent des perspectives intéressantes pour garantir la conformité des relevés, tant sur le plan technique que réglementaire. Ces travaux se poursuivront dans le cadre d'une évaluation à plus grande échelle pour valider la robustesse de la solution interfacée et son intégration dans les flux de production courants.

Ce projet a permis de poser les bases d'un protocole fiable de détection non destructive des réseaux souterrains, conciliant précision topographique et intégration BIM. Grâce à l'automatisation du traitement des données, à l'analyse des écarts GNSS et à l'expérimentation d'un interfaçage station totale/GPR, des pistes concrètes d'amélioration ont été identifiées. Ces travaux ouvrent la voie à une standardisation des méthodes de relevés de réseaux pour les projets d'infrastructure à haute exigence technique.

# Optimisation des méthodes d'exploitation des données lidar pour les reports topographiques en milieu ferroviaire

*PFE présenté par :* **Martin PAILLAT**  
*Société d'accueil :* **Kadran**  
*Directeur de PFE :* **Maël MOREAU**  
*Correcteurs :* **Emmanuel MOISAN**  
**Pierre GRUSSENMEYER**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

KADRAN est une entreprise spécialisée dans le domaine de la topographie, fondée en 2015. Elle fait partie intégrante du groupe GEOLIANCE, aux côtés des autres filiales que sont DATAGEO et INFRAMIND DATAKAD. Les domaines d'intervention de KADRAN sont multiples et couvrent un large spectre d'activités, allant de la métrologie industrielle à des prestations topographiques classiques, en passant par des expertises avancées dans le traitement, l'analyse et l'exploitation de données issues de levés LiDAR. Dans le cadre spécifique de ce projet, c'est précisément cette dernière compétence qui a été étudiée et mobilisée, qu'il s'agisse de données acquises directement par KADRAN ou non. Dans le domaine du traitement de données LiDAR, le rôle de l'entreprise s'étend de manière complète, partant de la réception de données brutes jusqu'à la production de livrables variés, souvent complexes, incluant des plans, des profils topographiques et d'autres formes de représentation normalisée. Il arrive également, bien que plus rarement dans le cas de l'environnement ferroviaire, que l'entreprise assure elle-même la phase d'acquisition des données sur le terrain.

Le secteur ferroviaire, au sein duquel ces données sont utilisées, constitue un domaine d'application particulièrement exigeant et spécifique, notamment en raison d'un ensemble de normes rigoureuses encadrant la description de la plateforme ferroviaire. Cela inclut à la fois une terminologie normalisée, des définitions géométriques précises des objets d'étude, ainsi qu'une documentation technique spécialisée. S'ajoute à cela un cahier des charges particulièrement strict, tant sur la forme que doivent prendre les livrables attendus que sur les exigences relatives aux données à exploiter. Face à ces exigences, la chaîne de traitement actuellement en vigueur au sein de l'entreprise permet d'atteindre les objectifs imposés par les clients. Toutefois, une marge d'amélioration subsiste, notamment en termes d'efficacité, de temps de traitement, et de rationalisation des étapes. Cette marge représente précisément le cœur du projet mené dans le cadre de ce travail de fin d'études.

Le point de départ de cette démarche a été la chaîne de traitement déjà en place chez KADRAN, qui constitue une base solide, mais perfectible. L'objectif a donc été d'analyser les points perfectibles dans les processus existants afin d'en proposer une version optimisée, s'appuyant sur des méthodes améliorées et, si possible, automatisées. Cette amélioration visée découle d'un certain nombre de constats : la variabilité importante des jeux de données traités, l'utilisation successive de plusieurs logiciels pour générer un unique livrable final, ou encore la répétition manuelle de certaines opérations particulièrement chronophages, propices à l'automatisation. Le projet présenté ici s'inscrit dans une démarche globale d'optimisation de cette chaîne, en ciblant plusieurs axes fondamentaux.

Une première phase du projet a été consacrée à la préparation et à la standardisation des données initiales, dans le but de rendre le traitement plus robuste face aux variations de formats, de structures ou de contenus. Une seconde phase a visé à réduire la dépendance à l'égard de divers logiciels spécialisés, notamment en ce qui concerne la génération de certains rapports topographiques, afin de centraliser les traitements. Enfin, une troisième phase s'est attachée à concevoir et mettre en œuvre une solution d'automatisation pour certaines étapes de production, en particulier pour les livrables qui

s'y prêtaient le mieux, tant du point de vue technique que méthodologique. Ce projet repose donc sur une logique d'amélioration continue, articulée autour de ces trois volets complémentaires.

## 2. Mise en place de solutions pour améliorer la chaîne de traitements

### 2.1 Amélioration de la préparation des données

La première étape de la chaîne de traitement que nous analysons est donc la récupération des données livrées par les différents clients, avec un jeu de données propres à chaque projet. Dès lors, un constat immédiat est que l'unicité des données n'est pas respectée et il est donc primordial d'anticiper cela. L'objectif étant de pouvoir facilement s'adapter aux données reçues, il est nécessaire de mettre en place une solution flexible qui utilise directement le format des données. Le recours à FME (Feature Manipulating Engine) semble alors permettre cette souplesse. En effet, comme le montre Saritha et al. (2021), FME permet une gestion dense de format de données et un travail en profondeur sur les caractéristiques des nuages de points notamment. Cela intègre également donc une possibilité de travailler avec les trajectoires, point primordial lors de la préparation des données. De plus, la compatibilité de FME avec les fichiers à formats multiples est fondamentale car de nombreuses informations sont issues de fichiers KML, XLSX ou encore DXF fournis par le client.

Ainsi, le formulaire FME mise en place s'organise en trois étapes : la récupération et le traitement du fichier KML du projet pour façonner l'emprise du projet, l'import de la trajectoire et le découpage des nuages de points et enfin l'export d'un fichier DGN (qui est le format utilisé dans la suite de la chaîne de traitements) avec les différents éléments calculés.

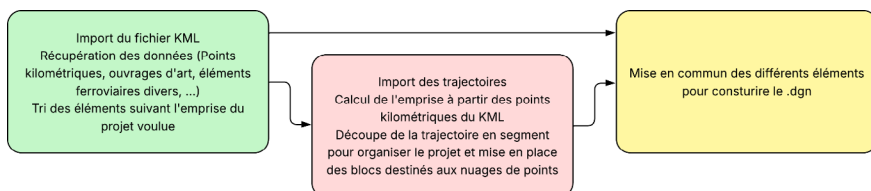


Figure 1 Simplification du principe du formulaire FME pour la préparation des données

Ce formulaire FME permet donc de traiter rapidement les nouvelles données reçues pour démarrer la préparation des données.

### 2.2 Automatisation de la production de livrables DAO

Un aspect important de ce projet était donc l'automatisation ou semi-automatisation de livrables ciblés à l'aide d'une solution DAO. Les objectifs étaient distincts suivants les différents livrables mais menaient tous à une solution logicielle unique. Il était question de concentrer le travail sur un seul logiciel pour plusieurs livrables, de se séparer d'une solution coûteuse dans le cadre de certains traitements ou encore d'automatisation de tâches basiques mais fastidieuses réalisées manuellement. Un dernier critère de poids était afférent aux demandes du client en termes de format de livrables qui se trouvent être des fichiers DWG. La solution choisie permet ainsi une gestion efficace des nuages de points ainsi qu'une automatisation poussée et un format de fichier coïncidant avec les attentes. L'étude menée par Zhou et al. (2025) portée sur le dessin automatisé dans le cadre de construction navale évoque le fait de considérer des logiciels complets afin d'assurer une intégration de la solution efficace dans la chaîne de traitements globales.

Le premier rendu ciblé était ainsi la production de profils en travers. En effet, dans le cadre de l'analyse des plateformes ferroviaires, le rapport à l'environnement des voies est important. Ainsi, la production de coupes transversales permet de visualiser la géométrie de la voie au droit de certains éléments

particuliers de la plateforme ferroviaire. Pour cela, le protocole actuel nécessitait une première phase de création de coupes manuelles puis un export dans un logiciel DAO pour finaliser l'habillage et obtenir le rendu définitif. Ce protocole était lourd en manipulations successives et en échange entre les logiciels. L'objectif était donc de mettre en place une solution permettant de lier la gestion des nuages de points avec la création de profils en travers à partir d'éléments DAO (représentant les éléments particuliers de la plateforme ferroviaire) tout en améliorant le temps de production et d'habillage des coupes. C'est pourquoi l'idée d'un protocole automatisé fut produite comme le montre la figure 2. Cela permettait d'interagir avec notre logiciel solution pour manipuler le nuage de points puis les profils produits par la suite.

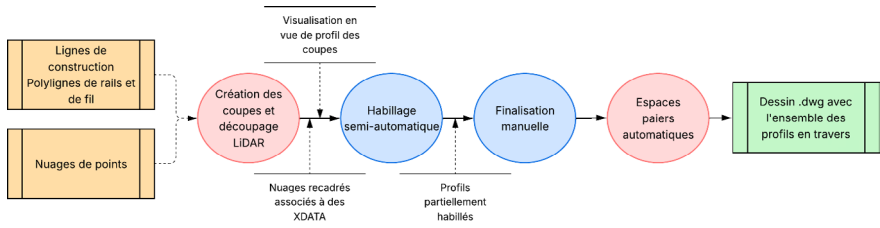


Figure 2 Chaîne de production de profils en travers de façon automatique

Ainsi, l'utilisation de premiers scripts était dédiée à la manipulation des éléments DAO tandis que les seconds scripts permettaient d'organiser le dessin et la préparation de l'habillage des coupes. Ce protocole rend donc la création des profils en travers semi-automatiquement en utilisant directement les lignes de construction pour générer les coupes et permettre un habillage rapide en utilisant les détails des données LiDAR pour finaliser les dessins.

Une analyse à l'issue de cette production consistait principalement en une comparaison entre les profils produits automatiquement avec les mêmes profils mais réalisés manuellement. Les principaux critères d'analyse sont les données numériques présentes dans les dessins (altitudes, distances cumulées, distances partielles...) mais aussi le positionnement des éléments visuels. Cette phase d'analyse a pour but de valider la précision et la cohérence des profils générés.

Dans le cadre de ce PFE, il était aussi question des profils en long qui représente également une production fastidieuse dans la précision et l'organisation des éléments que cela nécessite. En effet, les profils en long se basent sur des éléments DAO issus d'autres rendus de type plan topographique. La difficulté dans le dessin des profils en long se trouvaient dans la quantité d'éléments à traiter pour lesquels différentes configurations existent. De plus, le dessin du profil en lui-même était jusqu'à présent réalisé à l'aide d'un logiciel externe dont l'entreprise aimerait pouvoir se passer. De nouveau, on retrouve comme solution choisi une série de scripts afin de récupérer les éléments requis pour les profils en long mais aussi pour la construction et l'habillage pour le rendu final, comme présenté sur la figure 3.

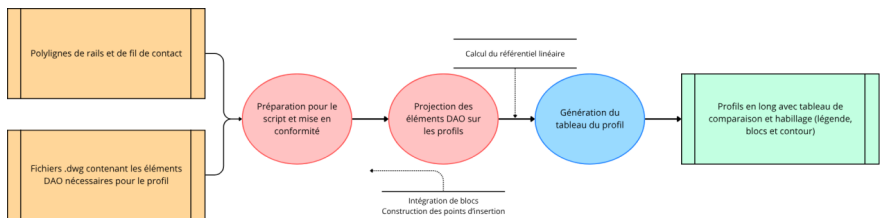


Figure 3 Protocole pour automatiser la création des profils en long

Une analyse similaire à celle mise en place pour les profils en travers visait à identifier les potentiels écarts dans les valeurs numériques (altitudes, distances et pentes) qui sont primordiales dans le cadre d'un profil en long. Une superposition avec l'outil de comparaison intégré avait pour but de comparer le positionnement général des éléments dans le profil dessiné même si l'utilisation de ce genre d'outil à des limites notamment sur l'absence de données statistiques et une analyse purement visuelle.

## 2.3 Production automatique de livrables spécifiques aux passages à niveau

Une dernière problématique était dédiée à la production de livrables concernant les profils en long des passages à niveau (PN). En effet, il s'agit d'un élément spécifiquement produit. Il est donc demandé de produire un fichier excel indiquant différentes informations d'altitudes au niveau des axes de chaque PN notamment pour les rails. Jusqu'à présent, la réalisation de ce livrable impliquait la création des axes et le remplissage semi-manuel du fichier excel de chaque PN à l'aide d'un gabarit normalisé. Une ligne ferroviaire pouvant croiser jusqu'à 40 PN dans les cas les plus exceptionnels, cette tâche simple initialement pouvait s'avérer chronophage et propice aux erreurs d'inattention. Ainsi, il était nécessaire de mettre en place une solution reprenant le principe de construction des fichiers de profils de PN mais de façon semi-automatisée afin de réduire grandement le temps de traitement tout en conservant une précision élevée.

Cette solution s'articule autour d'un seul dessin manuel des bords de chaussées puis d'une exploitation des nuages de points et des polygones de rails. Le fait de limiter les manipulations manuelles permet d'améliorer l'efficacité mais aussi de réduire le risque d'erreur au moment de la production des fichiers afférents aux profils de PN.

Une vérification des coordonnées des axes ainsi que des valeurs d'altitudes obtenues permet de valider le processus mis en place dans le cadre de la génération de fiches TIPULE.

## 3. Conclusion

Dans le cadre de cette étude, la notion d'amélioration de chaîne de traitements incluait une automatisation des traitements initiaux mais également une réflexion sur les outils à utiliser afin de fournir le processus le plus adapté aux besoins et moyens de l'entreprise. Ce travail d'amélioration concernait différentes phases du protocole global et demandait donc une réflexion globale pour intégrer la solution dans le reste des productions pour assurer la compatibilité et la continuité des données. La partie d'analyse était primordiale pour chaque livrable étudié afin de valider l'instauration de ces solutions. La transmission des méthodes à l'ensemble des futurs utilisateurs permettra de s'assurer de la bonne intégration dans l'environnement KADRAN en vue des améliorations à venir (notamment une industrialisation des solutions par la Direction Innovation) du groupe GEOLIANCE.

## 4. Bibliographie

Saritha, G., Saravanan, T., Anbumani, K., & Surendiran, J. (2021). Digital elevation model and terrain mapping using LiDAR. *Materials Today: Proceedings*, 46, 3979-3983. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.525>

Zhou, J., Camba, J., Li, X., 2024. An Approach to Drawing Automation of Ship Stiffeners in the Shipbuilding Industry. *CAD&A* 25–41. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2025.25-41>

# Mise en place et optimisation d'une chaîne de traitement des nuages de points et des images issues d'acquisitions par scanner dynamique dans des milieux présentant une réception GNSS dégradée.



PFE présenté par : **Nicolas Guilhemat**

Société d'accueil : **GEOFIT Strasbourg**

Directeur de PFE : **M. Nicolas End**

Correcteur : **M. Emmanuel Moisan**

Encadrant : **M. Arnaud Sprauel**

**geofit**

## 1. Introduction et contexte de l'étude

Dans une volonté de s'inscrire dans une politique d'évolution technologique, la société GEOFIT a investi dans des systèmes de cartographie mobile (*Mobile Mapping Systems*). Une chaîne de traitement a été mise en place, mais celle-ci n'a jamais été évaluée ni optimisée. De plus, des améliorations ont été apportées au système durant notre étude, ce qui a permis de développer des outils d'optimisation facilement intégrables dans la chaîne de traitement. Ces outils permettront d'éviter des traitements répétitifs et similaires. Le système de cartographie utilisé dans notre étude est le Viametris MS-96.

Le Viametris MS-96 est un scanner laser 3D mobile français de 5,2 kilogrammes qui intègre trois technologies complémentaires dans un système unifié. Il combine deux têtes LiDAR (*Light Detection And Ranging*) générant 960 000 points par seconde avec une exactitude de 10 millimètres, une centrale inertielle atteignant 0,015 degrés de précision angulaire en post-traitement, et un récepteur GNSS multi-constellations garantissant une précision de 1 centimètre plus 0,5 ppm. Il intègre également quatre capteurs de 24 mégapixels fonctionnant à 5 images par seconde pour la colorisation du nuage de points, avec un éclairage LED qui permet de maintenir des conditions visuelles convenables pour la prise de photo.



Figure 1: Système de cartographie mobile MS96  
(Source : <https://viametris.com/fr/ms-96-fr>)

La polyvalence opérationnelle de ce système permet d'être adaptée aux contraintes terrain avec différentes options d'installation : portage dorsal, bras articulé, montage véhiculaire. L'autonomie de 2 heures par cycle de batteries et le stockage SSD de 1 téraoctets ( $\pm$  12 heures d'acquisition) optimisent la productivité terrain sans interruption d'acquisition.

La société GEOFIT a investi massivement dans ce type d'équipement afin de répondre à des marchés nécessitant l'acquisition de gros volumes de données. Par exemple, elle l'utilise dans le cadre d'un marché pour modéliser les communes de l'agglomération de Mulhouse, ainsi que pour l'acquisition de nuages de points d'un ensemble d'établissements scolaires du département du Doubs. Cette technologie représente un gain de temps considérable : pour les acquisitions de corps de rue, il est possible en une journée de réaliser 15 kilomètres linéaires en assurant une précision satisfaisante, tandis qu'un relevé traditionnel à l'aide d'une station totale et d'un récepteur GNSS nécessite un temps plus d'un mois ( $\pm$  300 m / jour).

Pour les acquisitions d'intérieur à l'aide de cette technologie, il est possible de numériser un bâtiment de 12 000 m<sup>2</sup> en 2 ou 3 jours selon la complexité de l'environnement, contre plusieurs semaines avec un scanner statique moderne.

Dans cet environnement technologique dynamique, il est pertinent d'évaluer les processus actuels et de proposer d'éventuelles pistes d'optimisation dans des conditions critiques (environnements faiblement détaillés ou ne présentant aucun signal GNSS), mais aussi d'améliorer le traitement par l'étude et l'analyse des différentes méthodes de calcul, ainsi que par le développement d'un outil de calcul automatique de trajectoires.

## 2. Étude bibliographique

Avant d'obtenir un nuage de points cohérent et précis issu d'un scanner mobile, il est crucial de calculer la trajectoire de ce système. Pour cela, nous utilisons des algorithmes de SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*). L'objectif de ces algorithmes est de déterminer la position d'un objet mobile dans un environnement inconnu tout en créant une carte de cet environnement simultanément.

Pour déterminer cette trajectoire, le SLAM peut s'appuyer sur plusieurs types de mesures : des photographies, des données LiDAR, des données inertielles ou encore des données de positionnement issues de récepteurs GNSS. L'optimisation de cette trajectoire peut être réalisée selon deux philosophies principales : l'optimisation par filtre (comme le filtre de Kalman étendu) ou par graphe de poses (Graph-SLAM).

Le SLAM visuel, détermine la trajectoire du système à partir d'images, constitue une approche particulièrement intéressante. Cette méthode utilise des algorithmes de photogrammétrie tels que SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) pour extraire des points de jonctions entre les différentes prises de vue successives, comme des coins de murs ou d'autres éléments géométriques forts. Cette technique présente l'avantage d'être flexible et peu coûteuse, mais son application reste très contraignante. Comme en photogrammétrie traditionnelle, la précision des informations dépend grandement des conditions d'acquisition telles que l'éclairage, ainsi que de la configuration de l'appareil. Il existe également un manque de robustesse dans les environnements présentant une faible densité géométrique. De plus, les trajectoires calculées par SLAM visuel sont victimes de dérive cumulative, particulièrement problématique sur de longues distances [Tourani et al., 2022].

En opposition, le SLAM LiDAR repose sur l'exploitation de nuages de points. Cette approche utilise la consolidation de nuages de points successifs grâce à des algorithmes de recalage géométrique tels que l'ICP (*Iterative Closest Point*) ou le NDT (*Normal Distributions Transform*). À partir de cette consolidation séquentielle, une trajectoire est extraite en estimant les transformations géométriques entre les acquisitions successives. Tout comme le SLAM visuel, cette technologie dépend de la densité géométrique de l'environnement pour fonctionner efficacement. Cependant, elle présente l'avantage majeur d'être indépendante des conditions d'éclairage, seule la colorisation du nuage de points dépend de l'éclairage de la scène. Malgré son coût d'acquisition plus important, le SLAM LiDAR s'avère plus robuste et efficace que le SLAM visuel, particulièrement dans des environnements complexes et étendus [Li et al., 2025].

La fusion multicapteurs représente une évolution prometteuse de ces approches. Des algorithmes comme LOAM (*LiDAR Odometry and Mapping*) exploitent la complémentarité entre données LiDAR et informations inertielles ou de positionnement. Le système MS-96 intègre ces différents capteurs, mais leur exploitation dépend fortement des conditions d'utilisation. Lorsque le système est porté par un opérateur, les données inertielles deviennent inexploitable en raison du bruit important généré par les mouvements humains, ce qui créerait une dérive incontrôlée. En revanche, lorsque le système est monté sur un véhicule, la stabilité de la plateforme permet de supprimer les mouvements parasites, notamment ceux perpendiculaires au mouvement principal. Cette synergie des capteurs permet d'obtenir des trajectoires plus exactes dans certaines configurations [Kannan et al., 2023].

Le calcul de la trajectoire nécessite une phase d'optimisation cruciale, qui peut suivre deux philosophies distinctes : l'optimisation par filtres ou l'optimisation par graphe de poses. Ces deux approches

répondent à des besoins différents et présentent des avantages complémentaires selon le contexte d'application.

L'optimisation par filtres, notamment le filtre de Kalman étendu, traite les données de manière séquentielle qui s'appuient sur les données GNSS et inertielles en temps réel. Cette approche est particulièrement adaptée aux systèmes embarqués sur véhicule car les données inertielles sont exploitables ce qui permet une estimation continue de la position. Cependant, elle peut souffrir d'accumulation d'erreurs sur de longues séquences sans contraintes [Li et al., 2025].

L'optimisation par graphe de poses, quant à elle, considère l'ensemble du problème de manière globale. Elle modélise les poses du capteur comme des nœuds d'un graphe reliés par des contraintes géométriques. Cette approche permet d'intégrer efficacement les fermetures de boucle (*loop closures*) qui corrigent rétroactivement les erreurs accumulées, résultant en une précision globale supérieure [Li et al., 2025].

### 3. Evaluation et Optimisation

Avant tout la première étape est d'étudier et d'analyser les processus actuellement réalisés par la société. Le logigramme suivant nous montre les étapes majeures de cette chaîne de traitements :

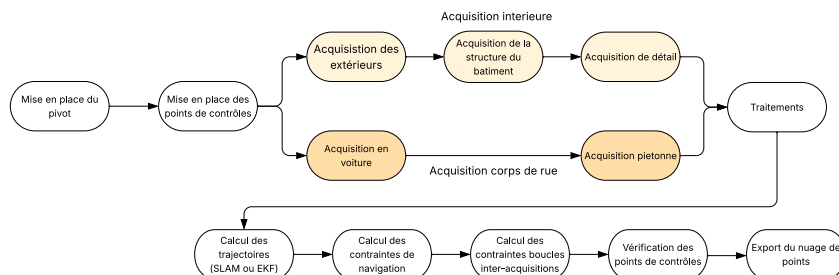


Figure 2: Chaîne de traitements pour la réalisation de projet de cartographie mobile

La stratégie centrale de la chaîne de traitements, repose sur la multiplication des passages d'acquisition pour maximiser les contraintes géométriques et obtenir des résultats robustes. Cette redondance permet de créer un réseau dense de relations spatiales qui se renforcent mutuellement. De plus pour les acquisitions d'intérieur, il est judicieux d'aller récupérer une réception GNSS satisfaisante afin d'assurer un géoréférencement de chaque nuage de points. Pour les acquisitions extérieures de corps de rue, elles peuvent être uniquement réalisées à l'aide du système monté sur véhicule mais peuvent être complétées par une acquisition piétonne en cas de zones d'occlusions.

L'adaptation des algorithmes selon la plateforme révèle une compréhension fine des contraintes physiques. Les acquisitions en sac à dos exploitent uniquement les données LiDAR car les données inertielles sont trop bruitées, donc la trajectoire est optimisée par graphe de poses, tandis que celle réalisée sur un véhicule, bénéficiant de la stabilité de la plateforme, utilisent le filtre de Kalman étendu pour fusionner toutes les données capteurs.

Notre évaluation s'appuie sur des sites critiques : zones à faible réception GNSS, espaces intérieurs et tunnels peu détaillés. L'utilisation d'une station totale établit une vérité terrain permettant de mesurer deux types d'exactitude. L'exactitude absolue quantifie les écarts de position directs, tandis que l'exactitude relative évalue la cohérence géométrique interne, révélant si un nuage mal géoréférencé conserve une géométrie correcte.

De plus, l'utilisation d'un scanner statique pour les expérimentations en levé d'intérieur va nous permettre d'obtenir un nuage de point de référence car les scanners statiques ont une robustesse géométrique supérieure à celle des scanners dynamiques.

Cette approche méthodologique articule contraintes techniques et rigueur scientifique pour développer une chaîne de traitement robuste et adaptable aux réalités terrain.

Les sources d'optimisation de l'acquisition reposent sur le principe de répétition des mesures afin de quantifier l'amélioration apportée par cette redondance. Cette répétition d'acquisition identique permet de caractériser la variabilité des résultats et d'identifier le nombre optimal de passages nécessaires pour atteindre une précision cible. Ceci permettra également d'établir un rapport coût-bénéfice entre effort d'acquisition et gain en précision. L'analyse quantitative de ces répétitions constitue la base de l'optimisation de la chaîne de traitement en fournissant des données objectives sur les performances du système dans différentes configurations d'utilisation. Ces données de précision sont issues de l'analyse des écarts des points de contrôles positionnés depuis une station totale et ceux issus de la comparaison des nuages de points avec celui de référence. De plus, une étude des diverses méthodes de calcul de trajectoire sera réalisée pour analyser leur comportement dans des environnements critiques et identifier leur complémentarité potentielle.

L'outil GEOTRAJ a également été développé afin d'automatiser le calcul des trajectoires. En effet, le logiciel utilisé par GEOFIT pour le calcul de trajectoires est entièrement adapté pour l'utilisation d'un système de cartographie mobile, mais il est peu efficace car pour chaque acquisition, nous devons créer un projet, le paramétrer et importer les données d'acquisition et de la base GNSS. La création d'un projet peut prendre jusqu'à 10 minutes, lors de la réalisation de projets complexes tels que des levés d'intérieur où nous réalisons jusqu'à une vingtaine d'acquisitions, cela représente une perte de temps importante. Le besoin d'automatiser cette étape est donc crucial. Lorsque l'utilisateur souhaite utiliser GEOTRAJ, il n'a qu'à renseigner le dossier qui contient les acquisitions, là où les bases GNSS se trouvent, puis l'utilisateur choisit le mode de calcul pour chaque acquisition. Il y a également la possibilité de convertir la hauteur ellipsoïdale en altitude grâce à une interpolation bicubique de la grille IGN 69 RAF 20 diffusée par l'IGN. Ceci permettra de supprimer un traitement qui apparaîtrait plus tard dans la chaîne de traitements.

#### 4. Conclusions et perspective

Ce projet de fin d'études va permettre de développer une chaîne de traitements complète pour la réalisation de projets de cartographie mobile de la société GEOFIT. En effet, les expérimentations vont nous permettre d'obtenir des protocoles d'acquisition dans des zones avec une faible réception GNSS mais aussi de manière globale, avec l'étude d'environnements critiques pour la technologie SLAM. Pour la partie traitements, ces expérimentations vont nous permettre de déterminer les possibilités d'utiliser les différents types de données et combinaisons afin d'obtenir une précision cohérente avec les attentes du projet. De plus, le développement de l'outil GEOTRAJ représente un gain de temps important pour le traitement des trajectoires des projets complexes.

#### 5. Références

##### Table des figures :

Figure 1: Système de cartographie mobile MS96.....	1
Figure 2: Chaîne de traitements pour la réalisation de projet de cartographie mobile.....	3

##### Références bibliographiques :

[Li et al., 2025b] Li, Y., An, J., He, N., Li, Y., Han, Z., Chen, Z., and Qu, Y. (2025b). A review of simultaneous localization and mapping algorithms based on lidar. *World Electric Vehicle Journal*, 16(2) :56.

[Tourani et al., 2022] Tourani, A., Bavle, H., Sanchez-Lopez, J. L., and Voos, H. (2022). Visual slam :What are the current trends and what to expect ? *Sensors*, 22(23) :9297

[Kannan et al., 2023] Kannan, K., Chakrabarty, A., Baculi, J. E., Kawamura, E., Holforty, W., and Ippolito, C. A. (2023). Comparison of visual and lidar slam algorithms using nasa flight test data. In *AIAA SCITECH 2023 Forum*, page 2679.



Pour pallier ces problématiques et améliorer la segmentation, le projet a intégré le modèle « *Segment Anything Model* » (SAM), développé par Meta AI (Kirillov *et al.*, 2023), utilisé ici en mode interactif. Cette méthode permet de segmenter rapidement n'importe quel objet sur une image, même s'il ne fait pas partie des classes d'entraînement ou s'il n'est pas correctement détecté. Cela ouvre la voie à une segmentation généralisée d'objets non étiquetés. Bien que ces objets ne soient pas automatiquement classifiés, ils peuvent tout de même être intégrés au processus de production.

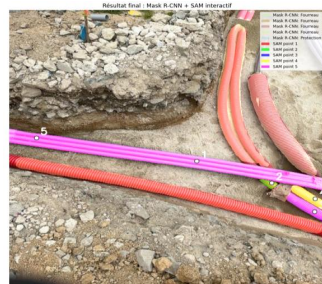


Fig. 2 : Résultats de prédiction avec Mask R-CNN et SAM interactif

La seconde étape consiste à projeter les masques binaires extraits (valeur 255 pour les pixels segmentés, 0 sinon) sur le nuage de points 3D. Pour cela, une approche spécifique a été mise en place : la segmentation est réalisée directement sur des orthophotos découpées en tuiles, ce qui permet de générer des masques binaires géoréférencés, avec la même résolution et la même système de coordonnées que les orthophotos d'origine. La projection repose sur l'établissement d'une correspondance entre chaque point du nuage et sa position en pixels sur le masque binaire. En considérant que le coin inférieur gauche de l'orthophoto correspond à l'origine (0,0), et sachant que les coordonnées X, Y, Z de cette origine sont connues, il est alors possible de déduire la position en pixels des points du nuage :

- Si la valeur du pixel correspondant est 255, le point est conservé dans le nuage.
- Sinon, il est exclu.

Cette méthode permet de reconstruire une forme 3D filtrée et structurée à partir d'une segmentation 2D, Ce qui permet l'exploitation métier des objets segmentés directement dans l'espace tridimensionnel.

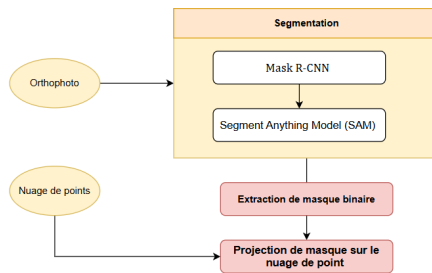


Fig. 3 : Chaîne de traitement complète recevant une orthophoto et un nuage de points en entrée, et produisant un nuage de points segmenté en sortie.

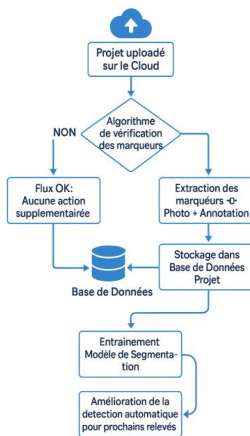
Par ailleurs, pour assurer le développement de ces méthodes et améliorer la segmentation sémantique, il est essentiel d'alimenter en continu les bases de données d'apprentissage. Grâce à la solution mobile, l'utilisateur peut collecter des photos sur le terrain et de placer des marqueurs contenant des attributs enrichis. Une API dédiée a été développée pour stocker les informations collectées : chaque marqueur comprend une photo de l'objet, ainsi que sa position 3D (x,y,z).

Cette méthode, hébergée sur un serveur, permet de mettre à jour automatiquement les bases de données et de réentraîner les modèles en continu, afin d'améliorer progressivement la performance de la segmentation.

Le processus global est représenté par l'algorithme suivant :

### Algorithme 1 – Cycle d'enrichissement automatique et de réentraînement du modèle de segmentation

1. **Chargement du projet sur le Cloud**  
L'utilisateur envoie les données terrain (photos, marqueurs, annotations) vers le serveur cloud.
2. **Vérification automatique des marqueurs**  
Un algorithme contrôle la validité du flux :
  - Si toutes les données nécessaires sont présentes (photo + annotation + coordonnées), aucune action supplémentaire n'est requise.
  - Sinon, le système procède à l'extraction des informations disponibles.
3. **Extraction des marqueurs**  
Si le projet contient de nouveaux marqueurs, le système extrait les éléments suivants :
  - Une photo de l'objet concerné
  - Une annotation (classe ou type)
  - Une position géographique (X, Y, Z)
4. **Stockage dans la base de données**  
Les données extraites sont structurées et stockées dans la base de données du projet.
5. **Réentraînement du modèle de segmentation**  
Le modèle de segmentation est réentraîné en intégrant les nouveaux exemples.  
Ce processus ajuste les poids du modèle pour améliorer sa capacité de détection.
6. **Amélioration continue**  
À chaque itération, la précision du modèle s'améliore, réduisant les erreurs lors des prochaines segmentations.



### 3. Résultats et Analyse

Classe	Précision	Rappel
Cable	0.7100	0.6128
Fourreau	0.9268	0.8484
Protection	0.8824	0.9785
Tube	0.9152	0.1904

Fig. 4 : Évaluation quantitative des résultats de prédiction par Mask R-CNN sur chaque classe à l'aide d'indicateurs métriques standards (précision, rappel), dont les valeurs sont comprises entre 0 (mauvaise performance) et 1 (performance optimale).

Les résultats qualitatifs obtenus avec Mask R-CNN ont montré une bonne convergence du modèle, en comparant les scores de prédiction (probabilités) avec l'observation visuelle des objets segmentés sur les images. Le passage à une analyse quantitative a confirmé la pertinence de l'approche, mais a également mis en évidence, via le facteur de rappel, que plusieurs tubes n'avaient pas été détectés. L'intégration de la segmentation interactive avec SAM a renforcé la fiabilité de la phase de traitement, notamment dans les cas où les contraintes de temps ou le manque de données limitaient la qualité de l'entraînement initial.

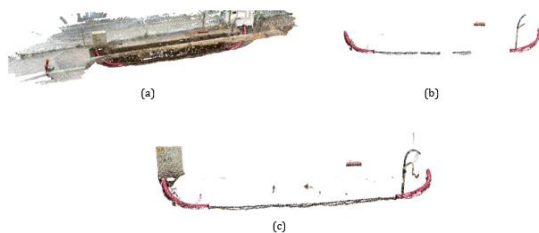


Fig. 5 : Effet de la segmentation sur la reconstruction 3D du nuage de points  
 (a) Nuage de points initial complet ;  
 (b) Résultat de la projection avec les masques de Mask R-CNN uniquement ;  
 (c) Résultat enrichi par l'ajout du modèle SAM en mode interactif.

La projection 3D a été réalisée en deux étapes afin de valider l'approche de reconstruction filtrée basée sur la segmentation 2D.

Dans un premier temps, la projection du nuage de points original Fig. 5 (a) a servi de référence. Ensuite, les masques binaires issus de Mask R-CNN ont été projetés Fig. 5 (b). Les résultats montrent une bonne détection des classes entraînées, mais aussi des lacunes, notamment dans les zones où les câbles sont partiellement masqués sur l'orthophoto de départ (végétation ou terre), ce qui se traduit par des interruptions dans la reconstruction 3D.

Dans un second temps, l'application du modèle SAM en mode interactif a permis de compléter efficacement les objets non détectés initialement Fig. 5 (c). Cette étape a notamment permis de restituer la continuité des câbles et d'identifier un coffret électrique, bien visible dans la scène, alors qu'aucune classe dédiée n'avait été utilisée pour l'entraîner. Ce résultat souligne le potentiel du modèle SAM pour enrichir la reconstruction 3D avec des objets hors du jeu d'entraînement initial.

#### 4. Conclusion et perspectives

Ce projet a permis de poser les bases d'une chaîne de traitement semi-automatisée, combinant des approches de deep learning et des méthodes géospatiales pour le récolement des tranchées. L'intégration conjointe de Mask R-CNN et du Segment Anything Model (SAM) a montré la complémentarité entre détection supervisée et interaction intelligente, renforçant la robustesse de la segmentation. Les premiers résultats valident la pertinence de l'approche, aussi bien pour la restitution géométrique que pour l'exploitation métier dans un environnement 3D.

À terme, le projet vise à aller au-delà de la simple segmentation, en assurant une vectorisation automatique des objets détectés, ainsi qu'une classification exhaustive des entités métier, sans dépendre d'une forte interaction humaine. Une autre perspective importante concerne l'optimisation des traitements pour des machines à ressources limitées, car les orthophotos en entrée nécessitent aujourd'hui des capacités matérielles élevées. Une gestion plus efficace de la mémoire et des flux de calcul permettrait ainsi de rendre la solution plus légère, adaptable et facilement déployable.

#### 5. Références

Dufour, A., 2023. Intégration des outils de photogrammétrie dans le cadre de relevés de tranchées. Mise en place des procédures de mesures et de calculs avec analyse des limites et déploiement de la solution. Mémoire de master, INSA Strasbourg

Haenel, R., Semler, Q., Semin, E., Tabbone, S. et Grussenmeyer, P., 2023. Instance segmentation applied to underground infrastructures. In: International Conference on Image Analysis and Processing. Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 3–14.

Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T., Whitehead, S., Dollár, P., Girshick, R., He, K., Adams, A., Gkioxari, G. et Zitnick, C.L., 2023. Segment Anything. arXiv preprint arXiv:2304.02643. Available at: <https://arxiv.org/abs/2304.02643>

# Le scanner 3D – Faisabilité et potentiel dans le cadre de suivis observationnels / auscultation.

PFE présenté par : **Thomas SAINT-ANDRE**  
Société d'accueil : **MONACO TOPO**  
Directeur de PFE : **Nicolas Bernard**  
Correctrice : **Tania Landes**  
Encadrant : **Nicolas BERNARD**



## Définition d'une mission d'auscultation et de son enjeu à Monaco :

L'auscultation, dans le domaine de la géomatique et de la surveillance d'ouvrages, désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour observer, mesurer et analyser l'évolution géométrique d'une structure dans le temps. Elle consiste à détecter des mouvements, déformations ou affaissements, souvent très fins (de l'ordre du millimètre), en comparant des états successifs d'un ouvrage.

Notamment, cette méthode de suivi régulier consiste à recueillir des données à l'aide d'instruments de mesure (capteurs, jauges de déformation, inclinomètres, etc.) installés sur l'ouvrage afin de détecter d'éventuels mouvements, déformations, fissurations ou variations de contraintes. Réalisée de manière ponctuelle ou continue, elle permet de vérifier la conformité du comportement réel de l'ouvrage par rapport aux hypothèses prévues lors de sa conception, et d'anticiper d'éventuels désordres pour garantir la sécurité et la pérennité de la structure.

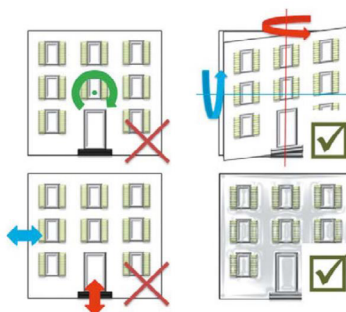


Figure 1. Mouvements pouvant être identifiés ou non sur une façade avec un levé à la station totale sans réflecteurs. Illustration tirée de Barras et al., 2017 [1].

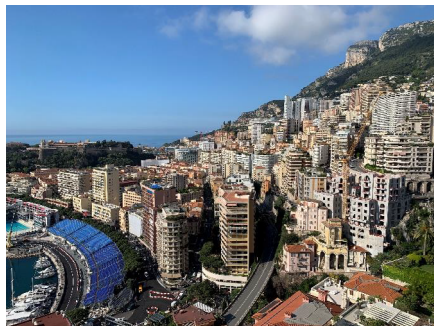


Figure 2. Photographie du quartier de La Condamine. On y voit la forte densité des constructions au cœur de Monaco

De son côté, Monaco présente un défi urbanistique unique au monde. La pression démographique exceptionnelle, combinée à l'impossibilité d'extension territoriale de manière horizontale, a conduit la Principauté à développer des solutions d'aménagement vertical audacieuses et à gagner du terrain sur la mer [2]. Cette urbanisation contrainte génère un paysage où des espaces urbanisés denses coexistent dans un relief escarpé. Routes et bâtiments s'empilent littéralement sur différents niveaux, créant de véritables canyons urbains ponctués de tunnels et de viaducs. Dans ce contexte de chantiers omniprésents et d'infrastructures en constante évolution, la surveillance des ouvrages devient un enjeu de sécurité publique majeur.

Les défis sont ainsi multiples : surveiller l'impact des nouvelles constructions sur le bâti existant, et assurer la pérennité d'un patrimoine architectural dense dans un environnement de sismicité modérée. L'auscultation traditionnelle, bien qu'efficace, se heurte aux contraintes spécifiques de Monaco : difficultés d'installation de canevas polygonaux et de stations totales dans un environnement urbain saturé, complexité administrative liée aux copropriétés, et nécessité de solutions moins intrusives pour le fonctionnement de la ville.

## Contexte de l'étude :

Lors de mon stage de fin d'étude dans le cabinet MONACO TOPO, j'ai d'abord eu l'occasion de me former à l'auscultation d'ouvrage en utilisant des stations totales de dernière génération (Trimble TS60). Lors de ces différentes expériences sur le terrain, j'ai pu constater que cette approche conventionnelle, bien qu'éprouvée, présente plusieurs limitations dans le contexte monégasque. Ces dernières peuvent être synthétisées autour de trois axes principaux :

- **Sur le terrain**, les cibles (prismes) se révèlent particulièrement vulnérables à leur environnement et aux activités des chantiers. Les risques de perte de repères, les gênes occasionnées aux activités urbaines et l'exposition aux éléments constituent des contraintes opérationnelles significatives. L'installation de stations automatiques aggrave ces difficultés en nécessitant l'accord des syndicats de copropriétés environnantes, rendant leur mise en place et leur entretien particulièrement administratifs.
- **Au niveau du traitement des données**, bien que la création d'une géobase facilite l'exploitation des mesures, le processus demeure largement manuel et chronophage. Cette approche limite la réactivité et l'efficacité des analyses.
- **Concernant les livrables**, les résultats se présentent sous forme de tableaux Excel récapitulatifs des mouvements, peu intuitifs pour les clients non-spécialistes. Les phénomènes observés restent restreints et directement dépendants du nombre de prismes installés, limitant ainsi la compréhension globale des comportements structurels.

Mon travail s'inscrit alors dans l'évaluation du potentiel du scanner laser terrestre (SLT) comme moyen alternatif technologique à ces méthodes traditionnelles et d'en optimiser les protocoles. Par l'identification de certains environnements typiquement rencontrés dans ce type de levé de précision, il s'agira de déterminer avant tout si cette technologie est viable vis-à-vis des précisions et de la fiabilité que requièrent les méthodes traditionnelles.

## Objectif du projet :

Dans le cadre du développement de ces nouvelles méthodes de suivi observationnel, il apparaît nécessaire d'explorer l'utilisation de la lasergrammétrie comme solution complémentaire aux techniques traditionnelles déjà en place pour certains types de levés. Mon approche vise à démontrer la pertinence de la lasergrammétrie en tant qu'outil fiable, précis et adaptable, capable d'améliorer considérablement la qualité des livrables. Elle inclut également la conception d'un workflow semi-automatique, facilitant le traitement des données tout en assurant un rendu professionnel, compréhensible tant par des spécialistes que par des intervenants moins expérimentés.

À terme, mon travail pose les bases d'une structure initiale destinée à l'élaboration d'une plateforme plus complète, accessible et facilement exploitable par un public élargi au-delà des seuls cadres de l'entreprise.

## 1. Bilan d'erreurs et définition d'un cahier des charges :

Du point de vue de la mesure d'un point, la station totale et le scanner laser sont quasiment identiques. La seule différence réside dans la fréquence à laquelle la machine réalise la mesure de plusieurs points consécutifs. En déterminant ainsi les différentes erreurs communes et uniques aux deux méthodes, l'étude

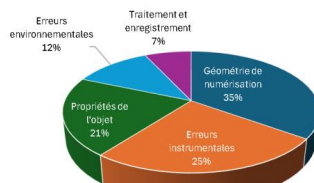


Figure 3. Natures et part d'influence d'erreurs lors de levés au TLS

révèle également les différentes manières dont ces dernières viennent influencer les résultats des études d'auscultation.

Ces recherches préliminaires vont alors mener à la détermination de méthodes de compensation immédiatement lors des levés comme des méthodes de compensation analytiques. De cette base, la définition d'un cahier des charges de l'étude sera déterminé.

## 2. Mise en place d'un banc d'auto-calibration :



Figure 4. Mise en place d'un quarantaine de cibles pour le premier prototype de la salle d'auto-calibration.

L'étalonnage d'un scanner 3D ne peut actuellement être réalisé que par le constructeur, une procédure souvent longue qui peut immobiliser l'appareil pendant plusieurs semaines. Il devient donc essentiel de compléter cet entretien annuel par un dispositif interne permettant de détecter d'éventuelles dérives de mesure et de sélectionner l'instrument le plus performant pour chaque mission.

Le développement d'un banc d'auto-calibration en interne nous a permis d'établir un parallèle avec les méthodes classiques de collimation des angles verticaux et horizontaux. Ce dispositif offre la possibilité de corriger, lorsque nécessaire, les erreurs d'alignement des scanners, tout en garantissant la traçabilité et la fiabilité des mesures.

Cette approche vise à identifier l'appareil offrant les meilleures performances à un instant donné, tout en

respectant le niveau de précision exigé par nos cahiers des charges. L'auto-calibration permet de compenser les dérives et biais systématiques des instruments, en ajustant leurs références internes à partir de standards reconnus, réduisant ainsi l'écart entre valeurs mesurées et valeurs vraies.

Le procédé de calibration que j'ai développé repose sur une méthode robuste d'estimation des paramètres. Il utilise une architecture à deux boucles imbriquées :

- Une boucle externe robuste basée sur la méthode danoise de Krarup et al. en 1980 (*Danish Method*) pour la gestion des données aberrantes [3].
- Une boucle interne appliquant le modèle de Gauss-Markov pour l'estimation linéarisée des paramètres.
- Finalement, l'initialisation par décomposition en valeurs singulières telle que vu dans Horn, 1980 permet d'obtenir une première estimation fiable des coefficients de transformation [4]. Cette opération est répétée jusqu'à ce que les critères de fin de boucle soient atteints.

Avec une fréquence mensuelle, la mise en place de cette solution permettrait désormais d'évaluer continuellement la qualité de nos mesures et d'offrir aux clients une garantie supplémentaire de fiabilité et d'exactitude.

## 3. Développement du pipeline :

Dans le cadre de l'analyse temporelle de nuages de points 3D, j'ai ainsi développé un pipeline semi-automatique codé en Python autour de l'algorithme M3C2-EP, développé en 2021 par le Dr. Winiwarter et son équipe et bénéficiant de mises-à-jour régulières au travers de la bibliothèque Py4Dgeo [5]. Ce workflow permet une gestion complète du traitement, depuis l'import des données LIDAR brutes jusqu'à l'analyse des changements intertemporels, en intégrant rigoureusement les incertitudes de mesure (instrumentales et d'alignement). Le pipeline combine des étapes automatisées (nettoyage des données brutes, recalage ICP, estimation de entre autres) et des vérifications visuelles via une interface légère, garantissant à la fois efficacité et fiabilité. L'approche repose sur une architecture modulaire et scriptable, favorisant la reproductibilité et l'intégration de séries temporelles longues. Grâce à la puissance statistique du test de Wald en 3D et à la pondération des observations selon leur incertitude, M3C2-EP améliore significativement la détection de changements subtils, notamment sur les surfaces naturelles rugueuses. Ce système ouvre la voie à une auscultation d'ouvrage haute fréquence plus précise, robuste et automatisée.

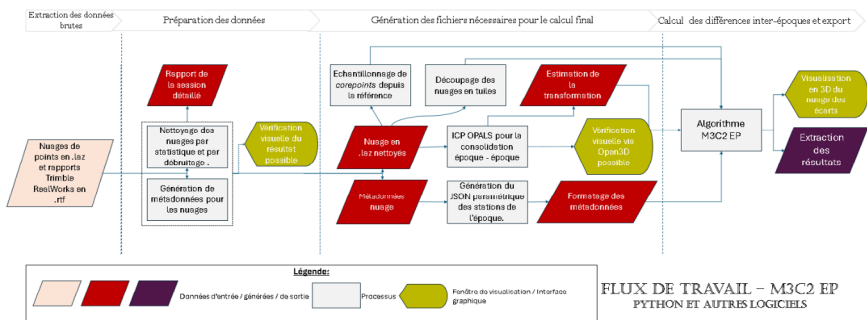


Figure 5. Flux de travail M3C2 - EP

#### 4. Évaluation et confirmation :

Après avoir effectué les acquisitions LiDAR terrestre multi-temporelles et les traitements de données avec les différents codes modulaires Python, une analyse comparative des différents changements détectés sera effectuée. Avec la présentation et l'analyse de plusieurs situations pouvant survenir lors d'un levé d'auscultation, l'objectif sera pour chacune déterminer la pertinence de l'utilisation d'une telle technologie. Cette analyse s'appuiera sur les résultats de l'algorithme M3C2EP (Multiscale Model to Model Cloud Comparison with Error Propagation) en comparaison avec une maquette fabriquée pour simuler certaines situations pouvant être rencontrées lors de diverses missions d'auscultation. Cette approche permettra d'évaluer la précision de la détection des changements et de quantifier les incertitudes liées aux mesures LiDAR dans le contexte de la surveillance multi-temporelle de sites divers.

De même, une étude visant à juger de l'optimisation et de la rapidité du processus lors des traitements ainsi qu'une étude économique comparative des deux types de méthodes nous permettra de conclure ce projet.

#### 6. Conclusion et ouverture :

Ce projet novateur a permis d'explorer en profondeur la lasergrammétrie et les outils de comparaisons d'époque souvent perçus comme une "boîte noire", en se concentrant notamment sur la question de l'évaluation de la précision et de l'intégration d'erreurs à ces calculs. Ce projet a été également l'occasion d'essayer des méthodes lasergramétriques dans le contexte de levés observationnels et . Toutefois, les nombreux tests ont été effectués sur des maquettes dans des conditions d'atelier et non directement sur le terrain. Il serait donc pertinent de vérifier si les résultats restent constants dans les conditions réelles du chantier et avec des perturbations accrues.

#### 7. Références et bibliographie :

[1] Barras, V., Cannelle, B., Chapotte, G., 2017. *Auscultation sans réflecteur*, Revue XYZ, N° 151 (2017), pp. 43-50.

[2] Briand, P., *La principauté de Monaco : le défi du territoire, entre limite frontalière, densification et extensions urbaines maritimes*, (2024). <https://cnes.fr/geoimage/principaute-de-monaco-defi-territoire-entre-limite-frontaliere-densification-extensions-urbaines> (Dernier accès: 29 juin 2025).

[3] Krarup, T., Juhl, J., & Kubik, K. 1980. *Götterdämmerung over least squares adjustment*, 14e Congress of the International Society for Photogrammetry, Hamburg, International Archives of Photogrammetry, XXIII-B3, pp. 369–378.

[4] Horn, B.K.P., 1987. *Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions*. J. Opt. Soc. Am. A 4, 629. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000629>.

[5] Winiwarter, L., Anders, K., Höfle, B., 2021. *M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 178, 240–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.06.011>

# Optimisation des méthodes de traitement des données LiDAR issues d'un système hélicoptéré RIEGL VPX-1



*PFE présenté par :* Ivan **BOUYER**  
*Société d'accueil :* Kadran  
*Directeur de PFE :* Johann **MENGUY**  
*Correcteurs :* Héléne **MACHER** et Gilbert **FERHAT**  
*Encadrant :* Tom **PAGNIER**

---

## 1. Contexte et objectif de l'étude

*Kadran*, entreprise du groupe Géoliance, est spécialisée en topographie et intervient sur des missions allant de la métrologie au scan cinématique et le LiDAR hélicoptéré.

La cartographie aérienne présente un intérêt dans de nombreux domaines tels que le suivi d'infrastructures, l'urbanisme ou l'aménagement du territoire. Parmi les solutions de cartographie aérienne, les systèmes embarqués sur hélicoptère permettent de réaliser des acquisitions rapides et précises. C'est pourquoi *Kadran* possède un système *VPX-1* de *Riegl* (figure 1), un système de cartographie aérienne hélicoptérée, composé d'un capteur LiDAR (*Riegl VUX-240*), trois appareils photos (*Phase One*), une antenne GNSS et une centrale inertielle (*Trimble AP+50*). Une chaîne de production a été mise en place lors de l'acquisition du système. Cependant, elle peut être optimisée.



Fig. 1 : Le système *VPX-1* acquis par *Kadran*

L'objectif du projet de fin d'étude (PFE) est donc d'analyser la chaîne de production en place afin de l'optimiser en termes de précision des traitements et de temps de travail nécessaire. Le but du stage est d'améliorer les méthodes de travail existantes. Il faut donc s'assurer de la qualité de la chaîne de traitement en place, l'adapter et la compléter.

## 2. Le *VPX-1* de *Riegl* et la chaîne de production de *Kadran*

### 2.1. Le système *VPX-1* de *Riegl*

Le *VPX-1* de *Riegl* est un système de cartographie hélicoptérée multi-capteurs. Il est composé d'une antenne GNSS et d'une centrale inertielle pour le géoréférencement. Un scanner laser et trois caméras permettent l'acquisition des données. Le système est notamment destiné à des levés de corridors. Le scanner laser à une précision de 1cm en planimétrie et 2cm en altimétrie. Concernant le géoréférencement, la précision annoncée de la position est de 2cm en horizontal et 5cm en vertical. Les angles de roulis et tangage sont quant à eux d'une précision de 5 millièmes de degré et 1 centième de degré pour le cap. A une hauteur de vol de 200 mètres, cela correspond respectivement à 1,7cm et 3,5cm.

### 2.2. La chaîne de production de *Kadran*

Avant de réaliser une acquisition, il est nécessaire de la préparer. Cela consiste en la création du plan de vol qui sera réalisé par l'hélicoptère. En parallèle, les paramètres du système pour le vol, tel que la

fréquence du scanner, sont définis en fonction de l'altitude de vol et de la densité de points souhaitées notamment.

Après l'acquisition, le premier traitement effectué est le calcul de la trajectoire. Le principe est alors de combiner les données de l'antenne GNSS et de la centrale inertielle afin de connaître la position du système tout au long du vol.

Une fois la trajectoire post-traitée, le nuage de points LiDAR peut être créé. Ce dernier nécessite encore d'être ajusté. Un ajustement du nuage de points consiste en la modification de la trajectoire afin de supprimer les écarts résiduels observés entre deux nuages de points différents.

La trajectoire permet également de générer les orthophotos. Le nuage de points et les orthophotos permettent de créer les livrables demandés par le client. Ces derniers peuvent prendre la forme de nuage de points classifiés, d'orthomosaïques ou encore de plans topographiques (figure 2).

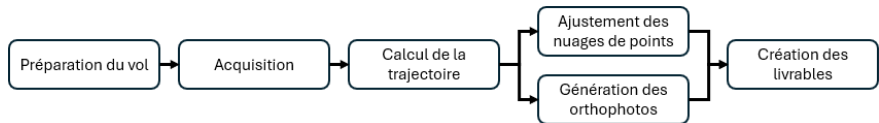


Fig. 2 : La chaîne de production

Lors du PFE, ce sont les étapes d'acquisition, du calcul de trajectoire et d'ajustement des nuages de point qui ont été optimisées. Pendant l'acquisition, des moyens de contrôles ont été recherchés. Concernant le calcul de trajectoire, l'objectif était de maîtriser pleinement le logiciel utilisé ainsi que de garantir une précision optimale. Enfin, les recherches concernant l'ajustement des nuages de points ont pour objectif d'optimiser les outils disponibles dans les logiciels utilisés par *Kadran*. Au moment de la rédaction de ce résumé, les recherches concernant l'acquisition n'ont pas encore été réalisées.

### 3. Analyses effectuées

#### 3.1. Le calcul de trajectoire

Le principe du calcul de trajectoire est de connaître, pendant toute la durée du vol, les coordonnées (X, Y et Z) et l'orientation (roulis, tangage et cap) du système. Pour cela, l'antenne GNSS permet d'acquérir la position du système et la centrale inertielle (IMU), les variations de positions et d'orientations. Les deux éléments sont complémentaires, car l'IMU est nécessaire pour avoir des informations angulaires. Mais cette dernière dérive avec le temps. L'antenne GNSS permet d'obtenir une position absolue mais également de corriger la dérive de la centrale inertielle.

Les mesures des deux composants sont combinées via un filtre de Kalman [Abuhadrous, 2005]. Auparavant, les données GNSS doivent être post-traitées à l'aide d'un réseau de stations GNSS. Le calcul de trajectoire doit être le plus précis car il impacte directement le nuage de points ainsi que les orthophotos. L'objectif des recherches est donc de s'assurer d'obtenir une précision optimale lorsque la trajectoire est calculée.

Le calcul de trajectoire est réalisé sur *POSPac*, un logiciel propriétaire d'*Applanix*. Dans un premier temps, des tests de précisions ont été réalisés sur différents projets. La précision des trajectoires a été calculée en générant le nuage de points correspondant à la trajectoire et en observant sur ce dernier un écart avec des points de contrôles.

Ces premiers tests ont permis de mettre en évidence un problème de traitement des stations GNSS de référence propre à *Kadran*. Pour le post-traitement des données GNSS, ces stations sont utilisées en complément de stations du réseau RGP de l'*IGN*. Puisque ce sont des stations de *Kadran*, placées temporairement lors du vol, elles nécessitent elles-mêmes d'être post-traitées.

Vol réalisé à Andernos	Précision altimétrique
Ancienne méthode	10,6
Sans les stations Kadran	6,1
Avec GrafNet	6,4
Nouvelle méthode	6,6

Tableau 1 Précision altimétrique du nuage de points en fonction de différentes trajectoires

Pour cela, sur *POSPac*, un ajustement était réalisé afin que la station corresponde à l'ensemble du réseau. Il s'est avéré que ce procédé faussait les calculs (ligne 2, tableau 1) puisque la précision attendue est retrouvée lorsque les stations de *Kadran* sont écartées (ligne 3, tableau 1).

Afin de confirmer que la source du problème est le traitement de la station et non la qualité de l'antenne, ces stations ont été calculées sur un logiciel tiers, *GrafNet*, avant d'être réimportées sur *POSPac* (ligne 4, tableau 1). Le problème confirmé, il faut trouver une solution adaptée afin d'être mise en place dans une nouvelle procédure. Passer par *GrafNet* n'est pas intéressant car il implique d'utiliser un nouveau logiciel lors du calcul de trajectoire.

Ainsi, une fonction de *POSPac* a été testée : *Compute RTX Coordinates*. Cette dernière utilise un réseau de stations privé propre à Trimble pour traiter une station. La trajectoire calculée en utilisant cette fonction permet d'obtenir une précision similaire à la trajectoire utilisant les stations calculées sur *GrafNet* (ligne 5, tableau 1). Nous avons donc adapté la procédure afin de mettre en place cette nouvelle solution de calcul des stations GNSS propre à *Kadran*.

Un autre axe de recherche porte sur la réalisation du calcul sur *POSPac*. Pour certaines trajectoires de vol réalisées par *Kadran*, ce calcul n'aboutit pas et présente une erreur. Cela arrive de manière aléatoire pour certains vols. Il est important d'en trouver l'origine afin de pouvoir l'éviter pour les missions futures. L'erreur que l'on retrouve dans les logs du logiciel est : « *ERROR : Process error in integration* ». Cela ne permet pas d'identifier la source du problème.

Afin de décortiquer le calcul de trajectoire et retrouver la source de l'erreur, nous avons utilisé un autre logiciel que *POSPac*. Sur *GrafNav*, les données GNSS ont été traitées. Ce calcul n'a présenté aucun problème, et aucune particularité n'a été identifiée à l'emplacement à laquelle l'erreur de *POSPac* apparaissait. Ainsi, les données GNSS ne semblent pas être en cause.

Afin de poursuivre les investigations, il n'est pas possible de calculer les données de la centrale inertielle seules. Ainsi, les angles d'orientation bruts ont été récupérés pour être couplés à la trajectoire GNSS de *GrafNav*. Cela permet de générer un nuage de points. En observant le nuage, bien que moins précis que s'il avait été entièrement traité, il ne présente aucune particularité. En revanche, à l'emplacement de l'erreur de calcul, le nuage est complètement distordu. La raison de ces distorsions sont les angles qui sont faux et prennent des valeurs aberrantes. Ainsi, la source du problème provient des données d'angles et donc de la centrale inertielle.

Ne pouvant pas agir directement sur ces données, *Riegl* a été contacté afin de résoudre ce problème et de pouvoir calculer la trajectoire d'un vol dans tous les cas.

### 3.2. L'ajustement des nuages de points

Un nuage de points est divisé en plusieurs bandes qui correspondent aux différents passages de l'hélicoptère. Ces bandes sont ensuite comparées lorsqu'elle se recouvrent. Elles présentent alors toujours un écart de l'ordre de quelques centimètres. Un ajustement est alors réalisé pour supprimer ces écarts.

Il existe deux types d'ajustement de nuages de points [Bang et al., 2009].

La « *calibration* » consiste en un ajustement global de chaque bande en modifiant chaque paramètre de la trajectoire d'une valeur constante, alors que l'ajustement par bandes effectue des modifications locales.

Dans les deux cas, les écarts sont quantifiés par des objets communs (points, plans, lignes, ...).

Avec des corrections constantes, un ajustement par « *calibration* » a pour objectif de supprimer les erreurs systématiques qui entachent le nuage. L'ajustement par bandes permet de réduire les erreurs accidentelles en réalisant un ajustement local. Ainsi, ces deux méthodes sont complémentaires.

Chez *Kadran*, seul un ajustement par bandes était effectué. Une calibration du système est réalisée tous les 6 mois, cependant, des erreurs systématiques entachent tout de même le nuage de points. C'est pourquoi, un ajustement par « *calibration* » peut être intéressant.

Un ajustement par « *calibration* » est disponible sur les deux logiciels déjà utilisés par *Kadran*. C'est l'algorithme de *Riprocess*, *Scan Data Adjustment (SDA)*, qui a été testé et mis en place car il offre plus de visibilité sur les opérations réalisées que la solution proposée par *TerraMatch*.

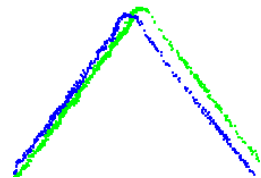


Figure 3 Exemple de toit de bâtiment non ajusté

Dans un premier temps, il faut comprendre l'algorithme. Le SDA se divise en plusieurs parties. Tout d'abord, des plans communs sont détectés, il est possible d'adapter les paramètres de recherches. Ensuite, une première analyse est réalisée. Elle permet d'observer les écarts entre chaque plan afin d'identifier les objets faux, par exemple un plan sur une voiture en mouvement. Une fois que les plans ont été triés, le calcul peut être lancé. Une minimisation des écarts au sens des moindres carrés est alors réalisée. Il faut choisir les paramètres qui seront ajustés par ce calcul. Dans notre cas, nous souhaitons adapter les trois positions et les trois orientations de la trajectoire de chaque bande. La qualité de l'ajustement peut ensuite être contrôlée. L'objectif d'un ajustement par calibration est de supprimer les erreurs systématiques qui entachent les bandes. Ainsi, un moyen de contrôle est de vérifier que l'histogramme des écarts prend la forme d'une gaussienne centrée en 0 (figure 4). Le SDA permet un bon suivi du processus de l'algorithme en permettant notamment l'analyse des objets qui sont détectés ainsi que du résultat.

Dans un second temps, il faut quantifier la qualité de l'ajustement réalisé par le SDA. Cette analyse est réalisée en comparant les écarts entre bandes sur le nuage de points brut avec le nuage de points du SDA. Il est aussi comparé au nuage obtenu avec l'ancienne méthode d'ajustement de *Kadran*. Une comparaison visuelle est d'abord effectuée. Une solution pour comparer quantitativement les écarts est de calculer la distance entre chaque point et la bande la plus proche. La médiane de ces écarts est ensuite utilisée pour obtenir une valeur de comparaison.

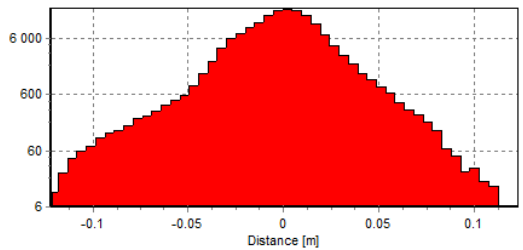


Figure 4 Histogramme des écarts des plans détectés après application du SDA

Les valeurs des médianes obtenues ne peuvent pas être comparées entre différents projets car elles sont relatives au levé. Ainsi, en milieu urbain, des médianes plus petites sont observées que pour des milieux ruraux. Cela s'explique par des distances mesurées plus grandes dans des champs, lorsque de la végétation est présente. De plus, c'est pour minimiser cette différence et s'affranchir des distances fausses que la médiane est utilisée car c'est un estimateur plus robuste que la moyenne. Le SDA a ainsi été mis en place dans la procédure d'ajustement des nuages de points.

## 4. Conclusion et perspectives

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans un processus d'amélioration de la chaîne de production de *Kadran*. Les analyses sur le calcul de trajectoire et l'ajustement des nuages de points ont permis d'optimiser les procédures de traitement en précision et en efficacité.

Des perspectives de recherches en sont ressorties. Il pourrait par exemple être intéressant de détecter des objets complexes tel que des pylônes ou des rails afin d'améliorer l'ajustement des nuages de points. *Kadran* prévoit de poursuivre les améliorations à partir des perspectives identifiées lors de ce projet.

## 5. Bibliographie

[Abuhadrous, 2005] Abuhadrous, I. (2005). Onboard Real-Time System for 3D Localization and Modelling by Multi-Sensor Data Fusion. PhD thesis, *École Nationale Supérieure des Mines de Paris*. Thèse de doctorat.

[Bang et al., 2009] Bang, K. I., Kersting, A. P., Habib, A., and Lee, D. C. (2009). Lidar system calibration using point cloud coordinates in overlapping strips. In *ASPRS 2009 Annual Conference*, pages 9–13.

# Mise en place d'un processus innovant de classification de nuages de points Lidar aérien, permettant de répondre aux normes RTE

PFE présenté par : **Yoan Naegelin**  
Société d'accueil : **Futurmap Madagascar**  
Directeur de PFE : **Romain Lemettais**  
Correcteurs : **Mathieu Koehl et Hélène Macher**  
Encadrant : **Maxence Branchereau**



## 1. Contexte et problématique

Le Réseau de Transport d'Électricité (RTE) gère l'exploitation, la maintenance et le développement du réseau haute et très haute tension en France. Pour un suivi précis et complet de ces lignes, des acquisitions Lidar héliportées sont faites régulièrement. Pour exploiter pleinement ces données, différents traitements sont effectués, dont une classification sémantique des nuages de points (cf. figures 1 et 2). La bonne classification des éléments permet d'assurer une gestion optimisée des infrastructures et ainsi garantir la sécurité du réseau national.

La société Futurmap, spécialisée dans la production, le traitement et l'exploitation de données géospatiales, s'occupe de la classification de nuages de points pour le RTE, à hauteur d'un millier de kilomètres par an minimum. Le but de ce projet est d'optimiser le processus de classification, qui est aujourd'hui obsolète à Futurmap.

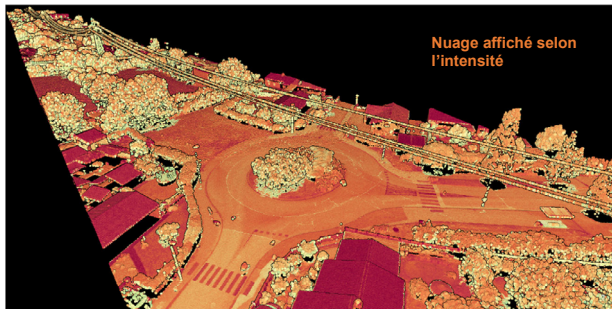


Fig. 1 : Nuage de points avant classification

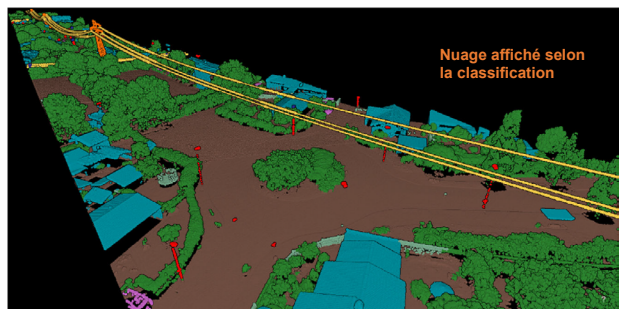
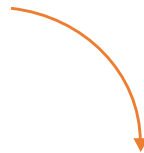


Fig. 2 : Nuage de points après classification

Ce processus est actuellement semi-automatique et manuel : le logiciel TerraScan offre des fonctionnalités permettant un pré-classement de certaines classes, et en s'appuyant sur ces premières informations, ainsi que des images satellite, la classification est terminée manuellement. Pour garantir une bonne classification, un contrôle visuel méticuleux est systématiquement effectué avant livraison des classifications. Mais ce processus présente plusieurs limites, le temps de traitement variant et trop long, et le risque d'erreurs humaines ou de subjectivité.

Face à ces problèmes, il a été jugé nécessaire de trouver un processus innovant pour classer à l'aide de solutions plus robustes et plus rapides des nuages de points, tout en assurant le maintien de la qualité des livrables. Pour cela, il a été décidé d'explorer les solutions basées sur l'intelligence artificielle pour remplacer les méthodes actuelles de pré-classification, et d'optimiser les méthodes de corrections qui font suite à la pré-classification.

## 2. État de l'art et choix méthodologiques

Pour choisir la meilleure méthode de classification automatique, plusieurs tests ont été effectués avec différents types de méthodes. Les solutions et méthodes explorées sont les suivantes :

- **Les architectures** permettant l'utilisation et l'entraînement de modèles IA spécialisés dans le traitement de nuages de points 3D, comme Pointcept ou myria3D.
- **Les logiciels de traitement** de données 3D classiques comme CloudCompare, TerraScan ou LasTools, incluant de récentes fonctionnalités de classification.
- **Les logiciels spécialisés** possédant des solutions dites « clés en main », comme Trimble Business Center ou ArcGIS Pro, ont permis des tests rapides et l'entraînement de modèles personnalisés.
- **La sous-traitance** de la classification à des entreprises spécialisées, comme ALTEIA, TCP, XEOS, nous permettant de comparer les coûts et performances du processus.

Pour comparer objectivement ces différentes méthodes, il a été nécessaire de mettre en place des critères, permettant de d'évaluer nos besoins et ainsi savoir quelle solution sera la plus adaptée pour y répondre.

Ces critères sont les suivants :

- Maintenir les performances de classification, mesurées à l'aide des métriques suivantes : précision, rappel, F1-score, exactitude (OA), IoU,
- Facilité d'utilisation et d'intégration dans le flux de travail des équipes de Futurmap,
- Garantir un gain ou une stabilité des coûts (licences, matériel, ou sous-traitance),
- Pouvoir fonctionner avec les ressources informatiques des équipes de production,

## 3. Protocole de test

Pour opposer les solutions objectivement avec les critères précédemment définis, suivre un protocole clairement établi est une nécessité. Dans un premier temps, il est nécessaire d'établir la base de données sur laquelle nous allons travailler. Futurmap ayant déjà travaillé sur une large quantité de nuages de points, les ressources nécessaires étaient déjà disponibles, ainsi une simple organisation en groupe d'entraînement, de validation et de test était à faire (cf. figure 3).

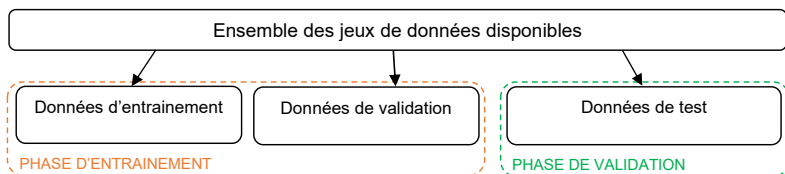


Fig. 3 : Séparation des jeux de données disponibles

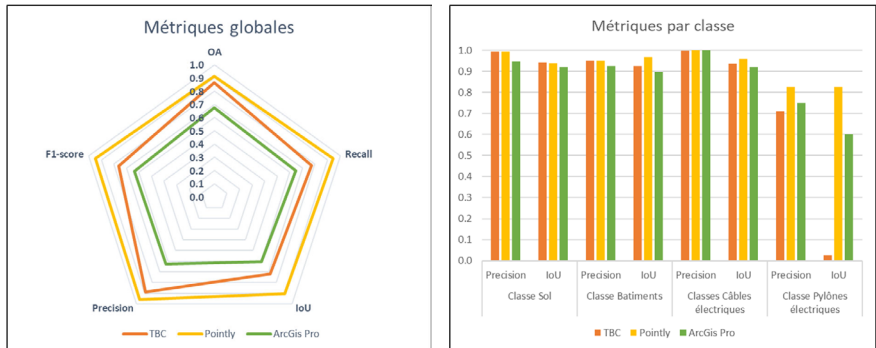


Fig. 4 : Métriques obtenues selon les classifications prédites

Pour chacune des solutions testées, les étapes suivantes ont été suivies :

- Comparaison des résultats de la classification prédite avec la classification de référence dite « vraie » obtenus sur le groupe de données de test,
- Calcul des métriques précédemment mentionnées,
- Analyse qualitative et ergonomique : temps de traitement, interface, prise en main.

Ce protocole a permis de mesurer objectivement les performances des solutions et de comprendre leurs forces et limites dans un contexte opérationnel.

#### 4. Résultats des différentes classifications automatiques

En reprenant la liste des solutions explorées, les résultats montrent que :

- Les architectures permettant d'entraîner des modèles IA requièrent d'importantes ressources informatiques ainsi que des compétences en développement IA. L'indisponibilité de ses moyens empêche une utilisation correcte de ces architectures,
- Les outils propriétaires comme Trimble Business Center (TBC) et ArcGIS Pro proposent des solutions fiables et simples d'usage, dont les performances sont prometteuses,
- Certains outils semi-automatiques comme 3DMASC ou CANUPO restent performants pour des corrections ciblées ou des jeux de données échantillonnés simples, mais sont insuffisants pour répondre à nos besoins,
- La solution Pointly offre une interface simple et intuitive d'utilisation, tout en ayant une continuité de développement. Cela rend cette solution particulièrement attrayante, en raison des résultats atteints et l'indépendance aux ressources informatiques locales et le coût de traitement.

Les métriques effectivement obtenues après prédiction en utilisant les solutions TBC, ArcGIS Pro et Pointly sont visibles sur la figure 4. Au regard de ces résultats, la solution qui semble la plus pertinente à utiliser pour la classification automatique avec IA est Pointly.

## 5. Correction des classifications prédites

Les essais visant à déterminer le temps de correction de ces différentes prédictions sont en cours, ce qui permettra de calculer le retour sur investissement, et de choisir la méthode qui sera effectivement la meilleure. Pour connaître les résultats de ces tests, se référer au mémoire ou à la présentation du projet.

## 6. Conclusion et perspectives

Après une première estimation, le calcul de retour sur investissement nous permet de connaître les gains que l'on peut espérer atteindre. En effet, la mise en place de cette solution apporte potentiellement plusieurs bénéfices :

- Gain de temps significatif dans la chaîne de production,
- Amélioration de la qualité des classifications avec plus de classes détectées au sein des nuages, tout en maintenant la précision des classes,
- Réduction des coûts de classification, de façon similaire au gain de temps, ces deux quantités étant corrélées.

Pour poursuivre ce projet, certaines pistes pourront être considérées :

- Enrichir les jeux de données d'entraînement pour améliorer encore la robustesse du modèle IA,
- Automatiser également le contrôle qualité par des métriques de cohérence ou des tests automatiques.

Ainsi, ce projet montre qu'il est pertinent et réaliste de mettre en place une solution IA de classification de nuages de points 3D pour améliorer le processus de classification des nuages de points 3D. L'approche choisie, fondée sur une combinaison IA + correction semi-automatique, permet de tirer parti des forces de chaque méthode et ainsi d'obtenir une classification respectant nos critères.

# Extraction sémantique et reconstruction 3D du bâti et de la végétation à partir de données LiDAR HD par modèle d'apprentissage

PFE présenté par : **Fiona Maroni**  
Société d'accueil : **OTE Ingénierie**  
Directeur de PFE : **Stéphane Moisy**  
Correcteur : **Mathieu Koehl**



## 1. Contexte et objectif de l'étude

Face aux enjeux du réchauffement climatique, les secteurs public et privé sont encouragés à adopter des solutions durables, notamment dans le domaine de l'aménagement urbain et de la production d'énergie. Le recours au photovoltaïque constitue une option particulièrement intéressante, grâce à ses rendements énergétiques inépuisables et à la possibilité de recycler efficacement les panneaux en fin de vie. Toutefois, pour garantir la pertinence et la rentabilité de ces installations, il est nécessaire d'en évaluer l'impact paysager et la faisabilité technique à travers des études précises.

Traditionnellement, ces études paysagères s'appuient sur des plans 2D, ce qui limite leur réalisme et leur capacité à simuler fidèlement l'insertion d'un projet dans un environnement en trois dimensions. Dans ce contexte, les maquettes numériques 3D deviennent un outil stratégique pour représenter les territoires de manière immersive, tout en facilitant les analyses de visibilité, d'ombrage ou d'ensoleillement.

Chez OTE Ingénierie, la maquette numérique s'impose progressivement comme un support d'étude pour l'implantation de projets d'énergies renouvelables. Cependant, jusqu'à récemment, la production de ces maquettes demeurait complexe et chronophage. Depuis le lancement de la campagne LiDAR HD de l'IGN, et la démocratisation des méthodes automatisées basées sur l'apprentissage machine, la recherche sur ce sujet s'est considérablement accélérée.



Fig. 1 : Illustration issue de [alamymage.fr](http://alamymage.fr)

L'objectif de ce projet de fin d'études est de produire une maquette numérique 3D sémantique à partir de données LiDAR HD fournies par l'IGN, en se concentrant sur la modélisation des bâtiments et de la végétation. OTE Ingénierie intervenant sur des projets répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain, il est essentiel de pouvoir s'appuyer sur des données homogènes, à la fois en termes de format, de qualité et de couverture. Le LiDAR HD de l'IGN, suivant un protocole national unifié, nous donne accès à une donnée standardisée sur l'ensemble de la France. Cela permet d'assurer une chaîne de traitement applicable à l'ensemble des projets, quel que soit leur emplacement sur le territoire métropolitain.

## 2. Données utilisées

Conformément à ce qui a été présenté dans l'introduction, notre étude s'appuie sur les données produites par le programme LiDAR HD de l'IGN. Le jeu de données utilisé présente une densité moyenne d'environ 10 points par mètre carré. Selon les spécifications imposées par l'IGN à ses prestataires, la précision attendue est inférieure à 50 cm en planimétrie et à 10 cm en altimétrie. Le nuage de points utilisé est livré déjà classifié, avec les principales classes suivantes : sol, végétation haute, végétation basse, et bâti. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de conserver cette classification sans chercher à l'améliorer.

En complément du nuage LiDAR, deux autres sources de données ont été mobilisées. La base de données BD TOPO, également produite par l'IGN, a été utilisée pour extraire les empreintes de bâtiments, facilitant leur détection et leur reconstruction. La dernière source de données est la BD Ortho IRC (infra-rouge couleur) qui permet, grâce au NDVI de localiser plus précisément les zones végétalisées.

Enfin, pour évaluer la qualité des résultats obtenus, nous avons choisi de concentrer notre étude sur un secteur de l'Eurométropole de Strasbourg. Ce choix repose d'abord sur la disponibilité d'une maquette 3D de référence produite en 2022 par l'entreprise RhinoTerrain, au format LoD2 CityGML, à partir des données LIDAR HD de l'Eurométropole (20 pts/m<sup>2</sup>). Générée de manière semi-automatique, cette maquette, reconnue pour sa précision, constitue une base fiable pour comparer géométriquement les objets reconstruits. Les données utilisées dans notre chaîne de traitement ayant été acquises à la même période, les écarts temporels liés à des évolutions du bâti ou de la végétation sont minimisés. Nous disposons également de l'inventaire géolocalisé du patrimoine arboré, qui permet de valider nos résultats sur la végétation. Enfin, Strasbourg présente l'avantage d'offrir une diversité: zone urbaine dense (Grande île), zone industrielle (Plaine des bouchers) et zone résidentielle (Meinau). Cela nous a permis de définir trois types de zones d'étude distinctes, afin de vérifier la qualité de la reconstruction selon le contexte urbain considéré.

### 3. Méthodologie

La chaîne de traitement développée repose sur la segmentation et la reconstruction séparée des deux principaux objets d'étude : les bâtiments et la végétation. Les approches utilisées visent à automatiser au maximum les traitements, tout en assurant une cohérence géométrique, suffisante pour les analyses paysagères.

#### 3.1. Traitement du bâti

##### Densification du nuage de point du toit

La première étape consiste à extraire le nuage de point de chaque bâtiment grâce aux empreintes des bâtiments issu de la BD TOPO. À partir du nuage de point épars du bâtiment, un modèle numérique de surface (MNS) du toit incomplet est généré sous format raster. Ensuite, grâce à l'algorithme Roof Diffusion, Lo et al (2024), qui repose sur un modèle de diffusion, un nouveau MNS complet est reconstitué, puis reconverti en nuage de points. Un modèle de diffusion est un type d'algorithme d'apprentissage génératif, le principe général repose sur deux étapes successives : dans un premier temps, une perturbation progressive (ajout de bruit) est injectée dans les données réelles ; puis, un réseau de neurones est entraîné pour apprendre à inverser ce processus, c'est-à-dire à reconstruire l'objet d'origine à partir d'une version bruitée. Appliqués à la modélisation géométrique, ces modèles permettent de prédire des surfaces continues à partir de données incomplètes ou bruitées.

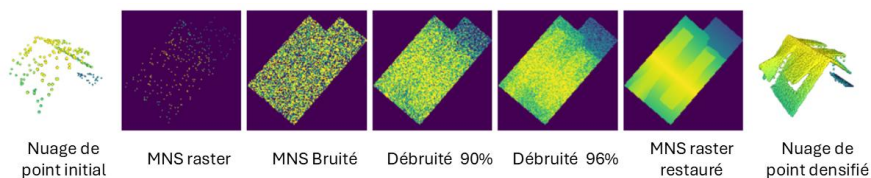


Fig. 2 : Illustration issue de l'article Lo et al (2024) expliquant l'algorithme Roof Diffusion

Dans le cadre de la reconstruction des toitures, ce type de modèle permet donc de compléter les zones partiellement absentes du nuage LiDAR, en reconstituant les formes de toiture plausibles sur la base d'un apprentissage préalable de la morphologie des toits urbains. Il agit ainsi comme une interpolation intelligente, capable de préserver les arêtes saillantes tout en comblant les zones incomplètes. Cette méthode est particulièrement pertinente pour les toits complexes (multipans, combles, décrochements) ou lorsque les données LiDAR sont dégradées dues aux effets d'ombre (types arbres ou autres objets survolants ou encore de vol oblique).

## Reconstruction du toit à partir du nuage de point du toit

Avec un nuage de point augmenté, il aurait été possible de faire un mesh reliant les points entre eux, mais pour avoir un meilleur résultat plus qualitatif et plus léger en termes de taille de données, il est préférable de réaliser une reconstruction des différentes facettes du bâtiment.

Une fois les toitures lissées et complétées à l'aide du modèle de diffusion, l'étape suivante consiste à segmenter et modéliser les toits de manière géométrique. Pour cela, l'outil Roofer Peters, R., et al 2022 est utilisé. Il s'agit d'un algorithme développé spécifiquement pour la reconstruction automatique de bâtiments au format LoD2.2 City.GML, à partir de nuages de points 3D et des empreintes de bâtiments.

Roofer repose sur une approche géométrique et procédurale : il analyse la distribution spatiale des points LiDAR pour identifier les pans de toiture, leurs orientations, leurs pentes et les ruptures de surface (faitages, arêtiers, noues). Concrètement, le nuage est d'abord filtré par emprise, puis projeté en altitude pour générer une carte de variation de pente. Des techniques de segmentation par région homogène (région growing) et de fitting de plans (ajustement par moindres carrés) sont ensuite appliquées pour modéliser les différentes surfaces de toit.

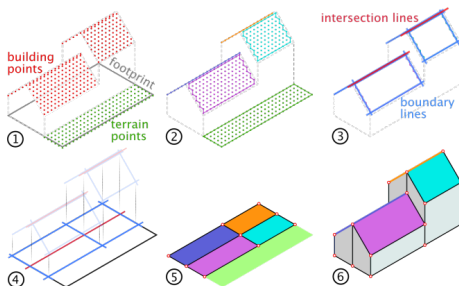


Fig. 3 : Illustration schématique de Roofer  
Issue de <https://innovation.3dbag.nl/roofer/>

Le principal atout de Roofer réside dans sa capacité à interpréter automatiquement la structure typique des toitures urbaines (à deux pans, à croupes, etc.) et à reconstruire des surfaces planes, nettes et étanches. De plus, le format de sortie de ce logiciel est du CityJSONsequence, un nouveau format de données peu volumineux et très rapide à créer ce qui permet de rendre ce logiciel encore plus performant que son prédécesseur Geoflow, facilitant ainsi son intégration dans des maquettes numériques, des simulateurs d'ombrage ou des outils de visualisation 3D. Dans le cadre de ce projet, Roofer permet ainsi de générer des représentations simplifiées, mais cohérentes des toitures, adaptées aux exigences d'analyse paysagère, sans recourir à une modélisation manuelle.

### 3.2. Traitement de la végétation

De la même manière que pour les bâtiments, nous avons fait le choix de ne pas générer un simple maillage texturé pour représenter la végétation. L'objectif est de modéliser celle-ci de manière schématique pour ne pas alourdir la carte et pour aussi rendre la modélisation plus compréhensible. Par ailleurs, nous nous concentrons uniquement sur la végétation haute, car c'est elle qui a le plus d'impact sur le rendement énergétique, l'ombrage et la visibilité des infrastructures.

La végétation haute est identifiée à partir des classes du nuage LiDAR HD préclassifié, mais également grâce à l'orthophotographie IRC (infrarouge couleur), grâce à l'indice NDVI, et à un prétraitement filtrant les points situés au-dessus de deux mètres de hauteur. Une série de filtres est ensuite appliquée pour éliminer les artefacts et le bruit.

Les points identifiés comme appartenant à des arbres ou des massifs végétaux sont ensuite regroupés par segmentation en clusters, en utilisant des méthodes basées sur la distance (méthode Watershed ou écoulement des eaux). Cette étape permet d'individualiser les couronnes des arbres. Pour chaque couronne détectée, plusieurs métriques structurelles sont extraites :

- Hauteur totale de l'arbre : différence entre la valeur maximale de Z et l'altitude du sol local
- Largeur de la couronne : distance maximale entre deux points dans le plan XY
- Position estimée du tronc : barycentre pondéré des points situés à la base de la couronne

Chaque arbre est ensuite modélisé dans ArcGIS Pro à partir de ces métriques, en appliquant une symbologie attributaire adaptée.

## 4. Résultats

Les évaluations montrent que la reconstruction des bâtiments présente une précision moyenne de 25 cm ( $\pm 18$  cm) et une exactitude de 29 cm ( $\pm 26$  cm) sans densification. Après densification par RoofDiffusion, la précision s'améliore nettement à 5 cm ( $\pm 8$  cm), tandis que l'exactitude reste stable autour de 30 cm. Les résultats varient selon le type de zone : la Plaine des bouchers reste homogène, la Grande Île souffre de fortes erreurs liées à la complexité architecturale, alors que la Meinau offre les meilleures performances, avec une exactitude proche de 10 cm. Nous avons choisi de regrouper l'ensemble des données dans un Dashboard, où chaque bâtiment est associé à ses valeurs de précision et d'exactitude, offrant ainsi une visualisation concrète et interactive des résultats.

Tableau 1 : Résultats par zone pour le bâti

Zone	Exactitude sans densification (cm)	Précision sans densification (cm)	Exactitude avec densification (cm)	Précision avec densification (cm)
Plaine	25	22	23	4
Grande Île	47	29	44	7
Meinau	12	21	11	2

La segmentation des arbres atteint une précision de 98 % et un rappel de 87 %, avec une erreur moyenne de localisation de 48 cm. Les omissions concernent surtout les arbres jeunes ou sénescents, tandis que des confusions apparaissent pour les houppiers complexes. Les métriques dendrométriques sont limitées par la faible variabilité de la base EMS.

## Conclusion

À court terme, il est raisonnable de penser que l'ensemble des cabinets d'études et des bureaux d'ingénierie spécialisés dans l'analyse de projets photovoltaïques adopteront des chaînes de traitement automatisées basées sur les données LiDAR HD. Cependant, les perspectives d'application de ces outils vont bien au-delà de ce seul domaine : les maquettes numériques enrichies produites offrent la possibilité de simuler une grande variété de phénomènes urbains, tels que la dispersion de la pollution atmosphérique, les flux de circulation routière, ou encore les effets d'événements ponctuels comme les incendies, les inondations ou les situations d'urgence. Elles deviennent ainsi de véritables outils d'aide à la décision, au service de la planification urbaine ou encore capables de modéliser l'évolution d'un quartier.

Pour continuer à améliorer la qualité des résultats, plusieurs pistes d'optimisation ont été identifiées. La première concerne l'amélioration de la classification des nuages de points, notamment dans les zones hétérogènes ou complexes, ce qui permettrait d'affiner la segmentation des objets et d'augmenter la précision des reconstructions. Par ailleurs, des écarts parfois significatifs, atteignant deux mètres, ont été constatés entre les empreintes bâties issues de la BD TOPO et les contours effectivement observables dans les données LiDAR. De telles imprécisions compliquent les étapes de modélisation, notamment pour ce qui concerne l'ajustement géométrique et la génération automatique des volumes 3D.

Enfin, le traitement de la végétation urbaine demeure un défi technique important. Il s'agit d'un objet morphologiquement très variable et peu structuré, ce qui le rend difficile à segmenter et à reconstruire de manière fiable. Toutefois, les récents progrès en apprentissage profond ouvrent des perspectives prometteuses. Plusieurs algorithmes montrent des performances remarquables pour la reconstruction d'arbres et l'identification d'essences. Cependant, ces méthodes nécessitent des nuages de points très denses et de haute qualité, souvent issus de capteurs aéroportés ou terrestres à très haute résolution, encore inaccessibles aujourd'hui avec les jeux de données standards du LiDAR HD.

## Références bibliographiques

- Peters, R., et al 2022. Automated 3D Reconstruction of LoD2 and LoD1 Models for All 10 Million Buildings of the Netherlands. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 88(3), p.165-170.
- Lo, K.H., Peters, J., and Spellman, E. 2024. RoofDiffusion: Constructing Roofs from Severely Corrupted Point Data via Diffusion. *arXiv preprint arXiv:2404.09290*.

# Extension du jeu d'apprentissage IA FLAIR sur les thématiques agricoles et détection d'objets

PFE présenté par : **Luca Joseph**  
Société d'accueil : **IGN**  
Directeur de PFE : **Nicolas David**  
Correcteur : **Mathieu Koehl**  
Encadrant-es : **Anatol Garioud, Eva Bookjans et Nicolas David**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le cadre du suivi de l'artificialisation des sols via le projet Occupation du Sol à Grande Echelle (OCS-GE), l'IGN a produit des cartes Couverture du Sol par Intelligence Artificielle (CoSIA). Celles-ci décrivent l'occupation du sol via des modèles de *deep learning* appliqués à des images aériennes de la BD Ortho avec une haute résolution de 20 cm par pixel (voir Fig. 1). Pour faire simple, les algorithmes de *deep learning* sont capables de détecter la nature du sol après avoir été entraîné sur une base de références, aussi appelées labels. Ces labels jouent un rôle essentiel dans le processus de détection automatique. Dans le cas de cette étude, une référence a la forme d'une image annotée selon une nomenclature précise. Enfin, les défis French Land cover from Aerospace ImageRy (FLAIR), élaborés par l'institut, ont fait participer la communauté scientifique et technique afin de consolider les modèles IA, appelés simplement FLAIR, produisant les cartes CoSIA.

L'IGN intervient également dans la mise à jour du Registre Parcellaire Graphique (RPG), qui est un SIG agricole à l'échelle de la France. Il fournit un inventaire sur l'usage des parcelles avec plus d'une centaine de codes de culture différents.

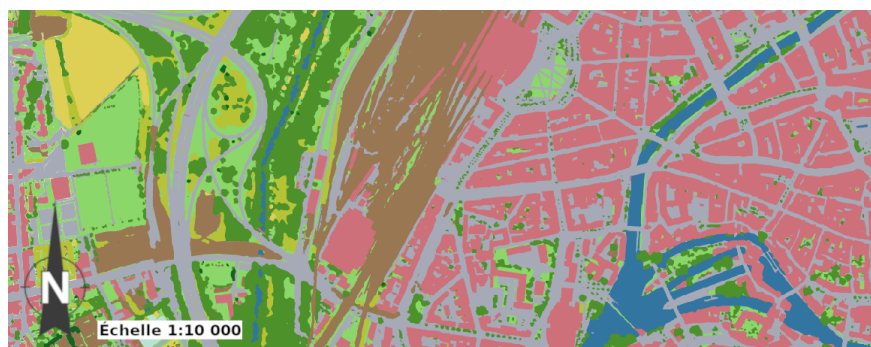


Fig. 1 : Carte CoSIA (inférence), zone située à Strasbourg (67), source : geoservices.ign.fr

L'objectif principal de cette étude est d' « agriculturaliser » CoSIA en intégrant le détail sémantique agricole du RPG pour permettre la détection des cultures et produire des cartes « CoSIA agricoles ». En particulier, il s'agit de constituer un nouveau jeu d'apprentissage annoté fusionnant CoSIA et RPG.

**Problématiques :** Quelle nomenclature choisir ? Comment fusionner les données d'annotations ? Comment étendre le jeu d'apprentissage à bas coûts ? Comment garantir la reproductibilité de la méthode ?

## 2. Présentation des données

FLAIR utilise un algorithme d'apprentissage supervisé, c'est-à-dire qu'il va exploiter des exemples annotés afin d'entraîner un modèle IA capable de prédire des résultats sur de nouvelles données. Les données annotées servant à l'entraînement ont un rôle central dans ce processus. En effet, ces annotations servent de référence et leur qualité conditionne les résultats de détection. Spécifiquement, en détection d'objet sur image raster, le jeu de données annotées est un ensemble d'images où chaque pixel est classifié. Cette étude utilise principalement deux jeux de données de références produites par l'IGN : les labels CoSIA et le RPG.

### 2.a. Les annotations CoSIA

L'annotation des références CoSIA repose sur les images aériennes de la BD Ortho. Les géométries avec une nature de sol unique sont ensuite extraites par photo-interprétation depuis les images aériennes. L'occupation du sol est codifiée parmi les 16 classes, allant de bâtiment à broussaille. Le produit est une image vectorielle appelée label CoSIA, visible sur la figure 2b. Chaque image sera rasterisée pour des besoins calculatoires. Un label CoSIA est entièrement annoté, il ne comporte donc aucun trou sans donnée. Ce jeu de données couvre plus de 2500 km<sup>2</sup> de l'Hexagone, répartis sur 71 départements. Ces cartes produites peuvent également aider au calcul d'autres indicateurs comme la végétation en ville, par exemple.

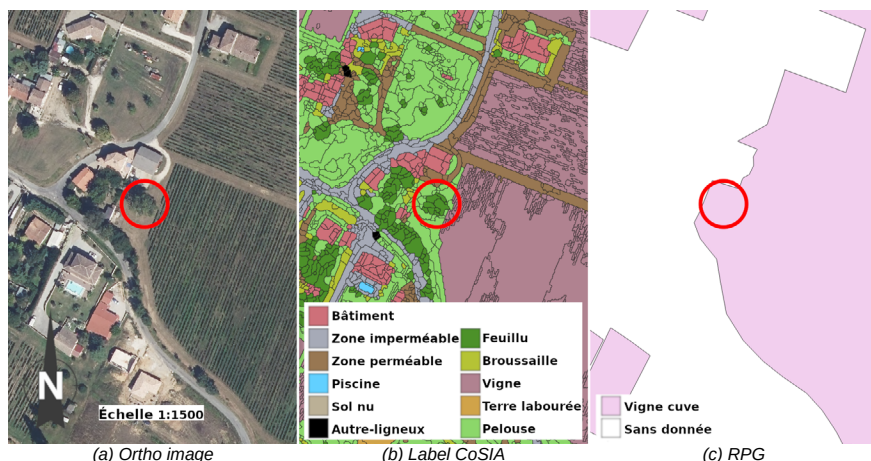


Fig. 2 : Illustration des données brutes de l'étude, zone située à Saint-Seurin-de-Bourg (33). Un arbre isolé est entouré en rouge, ne figure pas sur le RPG.

### 2.b. Le Registre Parcellaire Graphique

Le RPG est une base de données d'objets vectoriels (voir Fig. 2c), mis à jour annuellement à partir des déclarations des exploitants pour leur demande d'aides dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC). Précisons donc que la déclaration au RPG n'est pas obligatoire, mais très répandue. Chaque polygone est une parcelle agricole et renseigne son usage agricole grâce à un code associé selon une nomenclature de plus d'une centaine de classes. On recense approximativement 10 M de polygones chaque année. Le RPG bénéficie d'une grande richesse thématique, mais présente certaines limites : le biais déclaratif de la donnée, la fréquence de mise à jour ne fournit pas assez de détails sur les cultures bisannuelles, par exemple.

## 2.c. Différences majeures entre CoSIA et RPG

Les informations fournies par les annotations CoSIA et le RPG servent de référence, mais leurs différences nous poussent à traiter ces données différemment. Pour CoSIA, une parcelle agricole appartient soit à de la « Culture », « Terre labourée », ou « Surface Herbacée », alors que le RPG distingue cette parcelle parmi une centaine d'autres classes. Toutefois, les bords de la parcelle est mieux définie par CoSIA (voir Tab. 1) et complète toutes les surfaces non-renseignées par le RPG. En résumé, le RPG accentue les détails sémantiques liés aux activités agricoles, tandis que CoSIA se distingue par son niveau de détail spatial et son apport en informations sur les surfaces qui ne sont pas agricoles. De plus, certains objets sont lissés sur le RPG par la culture principale, comme un arbre isolé dans un champ de blé, alors que cet arbre figure sur les annotations CoSIA (voir Fig. 2).

Différences	Labels CoSIA	RPG
Méthode de saisie	Photo interprétation	Déclarations des agriculteurs
Exhaustivité spatiale	Aucun vide	Pas d'information en dehors des parcelles
Nombre de classes	16	Variable par année, entre 170 à 230
Échelle de la donnée	Détail au pixel près (20 cm)	Détail à la parcelle près
Fréquence de mise à jour	Très irrégulière	Tous les ans
Surface du jeu de données	Environ 2 500 km <sup>2</sup>	Toute la France (environ 10 M d'objets)

Tab. 1 : Différences entre les labels CoSIA et le RPG

## 3. Définition du nouveau jeu d'apprentissage

Le jeu de données d'apprentissage FLAIR constitue déjà un volume important. Au total, plus de 2500 zones (d'au moins 512 m de côté) ont été extraites, en veillant à obtenir une bonne représentativité des classes de couverture du sol. C'est-à-dire aboutir à des surfaces équitables entre les classes et aussi inclure les variations spatio-temporelles du paysage.

### 3.a. Nouvelle nomenclature

En termes de classification, la simple concaténation des codes CoSIA et RPG aboutirait à un volume de 246 classes potentielles, représentant un détail trop fin pour être appris efficacement par notre modèle de *deep learning*, ou alors il faudrait beaucoup plus d'annotations. Il est alors nécessaire de faire le choix d'une nouvelle classification en regroupant des cultures et nous avons abouti à 3 nomenclatures hiérarchiques avec 38, 46 et 61 classes, allant du plus général au niveau de détails le plus élevé. Les cultures sont regroupées par temporalité, phylogénie, usage et hétérogénéité. Par exemple, des cultures distinctes telles que le blé tendre d'hiver ou le blé tendre de printemps figurent dans le niveau 3, mais ont été regroupées en une seule et même classe « Blé » pour le niveau 1. Enfin, certaines classes figurent dans CoSIA et dans le RPG et ont été regroupées en une seule, c'est le cas des vignes, par exemple.

### 3.b. Fusion des données

L'un des défis majeurs de cette étude a été de combiner les informations de CoSIA et du RPG pour créer un jeu d'apprentissage « CoSIA agricole ». Cette fusion s'est heurtée à des conflits de classes, c'est-à-dire qu'il a fallu choisir le jeu de données le plus pertinent dans des cas particuliers. Par exemple sur la figure 2, il est plus pertinent d'écraser la donnée agricole par l'arbre isolé de CoSIA, pour se rapprocher de la réalité. Pour guider ces choix de fusion, nous avons mené plusieurs analyses statistiques, notamment via des matrices de co-occurrences comparant les surfaces attribuées à chaque classe entre CoSIA et RPG. Par exemple, cela a notamment mis en lumière le cas des arbres isolés et la stratégie adoptée a été de superposer les arbres issus de CoSIA sur les images annotées.

## 4. Extension du jeu de données

Les zones annotées n'ont pas été choisies en pensant aux cultures spécifiques du RPG, or le jeu de données fusionné avec celui-ci ajoute un certain nombre de classes et certaines cultures se retrouvent sous-représentées (e.g. seulement 5 % du soja français représenté). Il est nécessaire d'ajouter de nouvelles zones annotées, c'est-à-dire ajouter de la surface d'apprentissage pour les cultures sous-représentées. Cependant, la photo-interprétation est coûteuse en temps et en argent. Or, le RPG détient l'information sur les cultures et CoSIA celle sur la couverture du sol hors parcelles agricoles et en remplaçant les labels par des inférences (cartes) CoSIA générées au préalable, on obtient une « pseudo-information » à moindre coût. Une stratégie de pseudo-labélisation est envisagée afin d'annoter de nouvelles zones, combinant les déclarations du RPG et les cartes CoSIA. Les étapes de la méthodologie envisagées sont : la cartographie de la distribution des classes RPG, la sélection de zones en veillant à la représentativité des classes, puis la fusion du RPG avec les inférences CoSIA, comme précédemment. Trois scénarios sont envisagés : 200, 500 et 1500 nouvelles zones pour choisir le meilleur compromis entre coût et efficacité du modèle IA FLAIR.

## 5. Premiers résultats et conclusions

En fusionnant les annotations CoSIA et le détail sémantique agricole du RPG, nous avons créé un jeu d'apprentissage « CoSIA agricole » avec 3 niveaux hiérarchiques, qui permettra l'entraînement de modèles IA FLAIR. Des règles de fusion spatiale et sémantique basées sur l'analyse de matrices de confusion ont appuyé la gestion de conflits de géométrie et de classe. La pseudo-labélisation permettra de remédier à la sous-représentation de certaines classes. Les premiers résultats sont prometteurs (voir Fig. 3) dans le cas du maïs et du colza qui ont un IoU supérieur à 80 %. Toutefois, les résultats illustrent également la sous-représentation de certaines classes, comme « Lin/Chanvre/Tabac », ou avec un score inférieur à 2 %, qui nécessitera beaucoup plus de surfaces annotées. Soulignons que cette étude opère selon un mode itératif, que ce soit la sélection de nouvelles zones d'annotations, ou les modalités de fusion (conflits de classes), les processus dépendent des résultats d'entraînement du modèle IA.

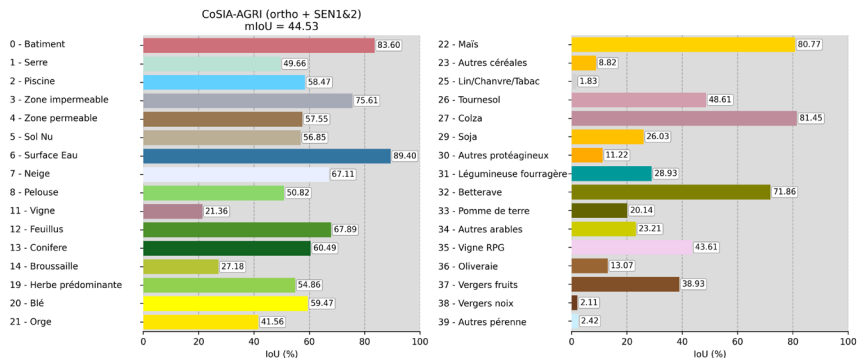


Fig. 3 : Premiers résultats d'un modèle IA FLAIR (mIoU et IoU par classe). Entraînement avec 40 classes, sur la base d'images aériennes (BD Ortho) et satellites (Sentinel 1 et 2)

En guise d'ouverture, les travaux à venir concernent la pseudo-labélisation de nouvelles zones, visant l'équilibre des classes et l'amélioration de leur score IoU. De plus, quelques points de cette étude pourraient être approfondis : certains conflits de classes sont encore à expliciter dans les annotations (comme le cas particulier des serres), ou encore intégrer des traitements plus spécifiques sur les parcelles (superposer les bandes herbeuses depuis CoSIA, de manière similaire aux arbres). Enfin, la reproductibilité des méthodes et la pérennité de l'étude est assurée par une documentation détaillée, permettant de promouvoir FLAIR sur d'autres sujets thématiques comme la détection des haies, ou de la végétation en ville.

# Intégration de l'Intelligence Artificielle dans le processus Scan-to-BIM : Automatisation de la segmentation sémantique des nuages de points pour la reconstruction BIM.



PFE présenté par : **Saad Boudarbala**  
Société d'accueil : **Futurmap**  
Directeur de PFE : **Thibault Bavoux**  
Correctrices : **Tania Landes & Hélène Macher**



## 1. Introduction

Le Building Information Modeling (BIM) est une méthodologie de conception et de gestion numérique des bâtiments, basée sur des modèles 3D enrichis d'informations techniques et fonctionnelles. Cette approche facilite la collaboration, améliore la précision et optimise les phases de construction, d'exploitation et de maintenance des structures. Le processus Scan-to-BIM, consistant à numériser des bâtiments existants via des technologies telles que le LiDAR ou la photogrammétrie, permet d'obtenir des maquettes numériques précises reflétant fidèlement l'état réel des structures.

Futurmap se positionne comme étant une entreprise spécialisée dans le traitement de données géographiques et la production de maquettes numériques BIM. Son département Méthodes et Innovation a pour mission d'améliorer et d'automatiser les processus de production actuels, en s'appuyant sur un triptyque fondamental : qualité, coût et délais.

Le processus Scan-to-BIM, malgré son importance grandissante, rencontre des difficultés majeures liées à l'exploitation efficace des nuages de points. En effet, extraire automatiquement des informations structurées à partir de ces nuages brutes est complexe, en raison du volume important de données, de la diversité des éléments à modéliser, et de la nécessité de garantir une précision élevée. La question centrale de ce projet est donc de déterminer comment utiliser efficacement l'intelligence artificielle pour améliorer et automatiser la transformation des nuages de points en modèles BIM précis et exploitables.

Pour mener à bien ce projet, une revue bibliographique a permis de mettre en évidence l'importance de la segmentation sémantique des nuages de points 3D dans l'automatisation du processus Scan-to-BIM. Cette étape est essentielle pour identifier précisément les éléments architecturaux et structuraux d'un bâtiment. Les recherches récentes s'attachent à améliorer cette segmentation à l'aide de bases de données annotées, créées manuellement ou automatiquement. Nous avons ainsi exploré les différentes méthodes de génération de jeux de données labellisés à partir de nuages de points et de maquettes numériques, ainsi que les approches classiques d'apprentissage automatique et les techniques plus récentes de deep learning, en soulignant leurs avantages, limites et perspectives.

Dans ce PFE, nous nous sommes concentrés sur l'automatisation de la création de jeux de données labellisés à partir de maquettes numériques et sur l'entraînement de modèles à partir de ces données, en vue de les intégrer dans un pipeline complet Scan-to-BIM basé sur l'IA.

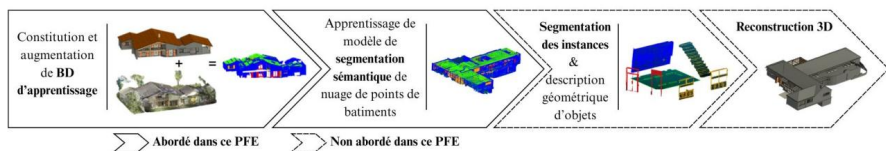


Fig. 1 : Pipeline automatique du processus Scan-To-BIM basé sur l'IA

## 2. Constitution de jeux de données d'apprentissage

### Labélisation automatique de NP à partir de maquettes numériques

Tout modèle d'apprentissage automatique nécessite des jeux de données labélisés pour permettre le bon déroulement des phases classiques d'entraînement, de validation et de test, avant son déploiement final pour la tâche ciblée, en l'occurrence, la segmentation sémantique des nuages de points de bâtiments. Pour préparer de tels jeux de données, nous nous sommes appuyés sur la base de données de futurmap, qui est très fournie et variée, incluant des **nuages de points** et leurs **maquettes numériques**. Ces données concernent principalement des bâtiments scolaires, des bureaux, des logements collectifs ainsi que des maisons individuelles, de tailles variées et proviennent de méthodes d'acquisition différentes. Le choix de ces typologies de bâtiments s'appuie notamment sur la vérification de l'hypothèse de Manhattan qui postule que les bâtiments sont principalement rectangulaires et la majorité de leurs structures bâties sont composées de surfaces planes orientées selon trois axes orthogonaux principaux (X, Y, Z). Les maquettes numériques correspondantes sont modélisées manuellement à partir de nuages de points sur le logiciel Revit.

Pour la labélisation des nuages de points de bâtiments, nous nous sommes appuyés sur la sémantique des objets BIM issus des maquettes. Nous avons ciblé principalement les éléments structuraux (**murs**, **sols**, **plafonds** et **escaliers**) ainsi que certains éléments ponctuels (**portes** et **fenêtres**). Deux approches automatiques ont été développées : l'une basée sur les enveloppes englobantes (BBX) d'objets, l'autre sur la recherche de l'objet BIM le plus proche voisin (PPV). En complément, une méthode de segmentation manuelle a également été établie, afin de fournir un nuage de référence labélisé, pouvant servir par la suite à l'évaluation quantitative. La figure 2 résume ces développements.

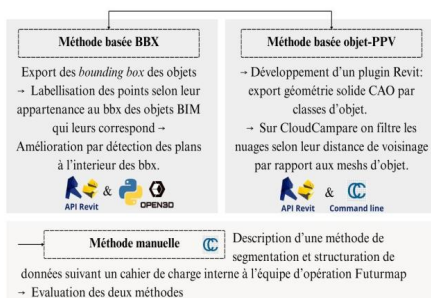


Fig. 2 : Méthodes d'automatisation de labélisation des nuages à partir des maquettes correspondantes

En prenant comme référence le nuage de points segmenté manuellement, nous avons évalué les classifications obtenues par les deux méthodes à l'aide de plusieurs métriques, notamment le rappel et l'IoU. De manière générale, la méthode fondée sur les objets PPV surpasse celle utilisant les BBX. Ainsi, pour la suite du projet, nous adopterons la méthode basée sur les objets PPV pour constituer nos jeux de données d'apprentissage.

### Structuration en pièces des données

Pour répondre aux limitations de modèles d'apprentissage, une méthodologie de structuration des nuages de points 3D a également été développée via une segmentation par pièce. Cette approche combine les volumes de pièces extraits des maquettes et les nuages labélisés pour diviser ces nuages complets de bâtiments en pièce. Cette approche modulaire améliore la qualité, la reproductibilité et l'efficacité de l'apprentissage dans des environnements architecturaux complexes.

En conclusion, notre méthodologie de création de jeux de données d'apprentissage, illustrée à la figure 3, est généralisable et peut être appliquée à tout type de nuage de points disposant d'une maquette associée. Elles permet ainsi de constituer automatiquement une base de données d'apprentissage, quelle que soit sa taille, sans dépendre d'une équipe de production, ni être limitée par le temps nécessaire à la labélisation ou les erreurs inhérentes à la segmentation manuelle.

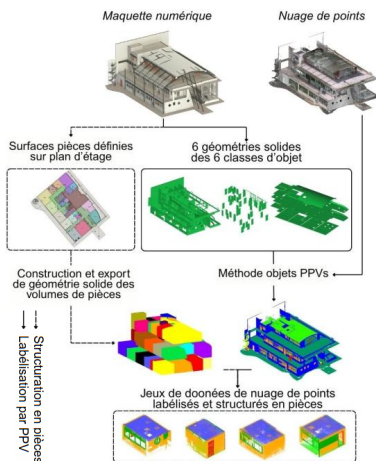


Fig. 3 : Méthodologie développée pour la constitution de jeux de données d'apprentissage

### 3. Segmentation sémantique des nuages de points

Comme le montre la figure, le développement du modèle d'apprentissage permettant la segmentation sémantique de nuage de points passe par deux grandes phases principales :

**Phase 1 – Apprentissage et comparaison des modèles :** Cette phase, représentée en vert, porte sur l'évaluation initiale de deux modèles de deep learning, PointNet++ et Sonata+PTv3, à partir d'une base de données composée de nuages de points de 7 bâtiments segmentés par pièce et classés en six catégories.

**Phase 2 – Perfectionnement du modèle retenu :** Illustrée en rouge, cette phase vise à améliorer le modèle jugé plus performant, en enrichissant le jeu de données (taille, attributs géométriques et radiométriques) et en optimisant ses paramètres architecturaux. Un processus d'inférence sera ensuite mis en place pour garantir une utilisation efficace du modèle dans son contexte final.

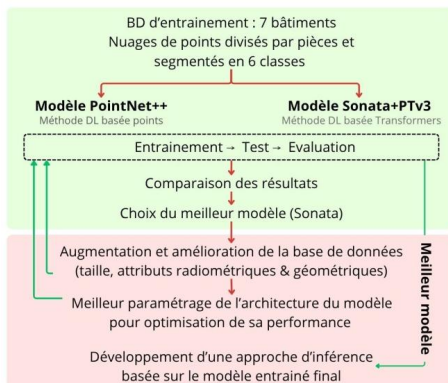


Fig. 4 : Apprentissage du modèle deep learning de segmentation sémantique

#### PointNet++ & Sonata+PTv3 (Comparaison)

D'une part, le choix de l'architecture PointNet++ dans cette étude est motivé par son rôle pionnier dans le domaine du traitement des nuages de points par Deep Learning. En effet, PointNet++ constitue une évolution du modèle original PointNet, largement reconnu comme la première architecture à traiter directement les nuages de points par des méthodes de deep learning. Plusieurs architectures ultérieures se sont directement inspirées des principes fondamentaux introduits par cette dernière.

D'autre part, le Point Transformer (PTv1) a marqué une avancée importante en introduisant une attention locale tenant compte des positions relatives entre points, avec de très bons résultats sur les nuages de bâtiments. Son évolution a conduit à l'architecture Sonata, basée sur PTv3, qui intègre un prétraitement auto-supervisé innovant pour les nuages de points. Cette approche a permis d'atteindre d'excellentes performances, notamment pour la segmentation sémantique des intérieurs de bâtiments, malgré leur complexité.

Pour l'apprentissage des deux modèles, nous avons utilisé un jeu de données de 7 bâtiments, automatiquement labellisés selon la méthodologie décrite précédemment. Six bâtiments (193 pièces) ont servi à l'entraînement, et un bâtiment (41 pièces) a été réservé au test et à la validation, selon une répartition de 80 % / 20 %. Les données proviennent de différents modes d'acquisition, avec une seule composante géométrique (XYZ) et une composante radiométrique couleur (RVB) de qualité limitée. Les performances sur le bâtiment de test sont présentées sur la figure 5 et la figure 6.

La figure 5 illustre les scores IoU par classe pour les architectures PointNet++ et Sonata. On observe que pour les classes structurelles majeures — Murs, Sols et Plafonds — les deux modèles atteignent des performances élevées, traduisant une capacité d'apprentissage efficace sur ces entités dominantes et plus régulières dans les nuages de points. Sonata surpasse légèrement PointNet++ sur ces classes, confirmant sa robustesse.

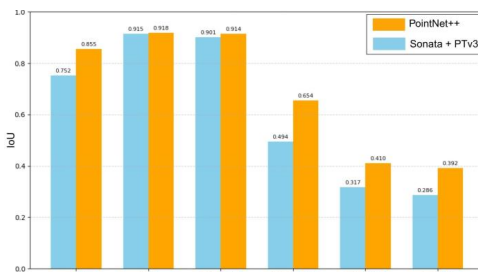


Fig. 5 : Comparaison des IoU en fonction des classes pour tous le nuage du bâtiment de test

En revanche, pour les classes plus complexes ou moins représentées (Escaliers, Fenêtres et Portes) les performances globales sont plus faibles pour les deux modèles, ce qui reflète la difficulté de segmentation liée à leur variabilité géométrique ou à leur faible fréquence dans les données d'entraînement. Malgré cela, Sonata affiche une amélioration significative sur ces classes, notamment sur les escaliers (+16% d'IoU), ce qui témoigne de meilleures capacités de généralisation et d'une meilleure prise en compte des structures fines et localisées.

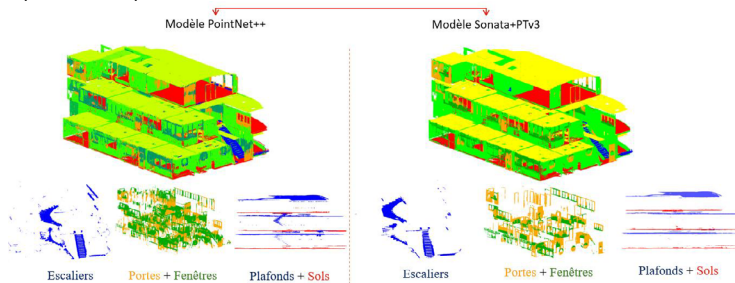


Fig. 6 : Résultats visuels de test des modèles de segmentation sémantique sur le nuage dédié

Sur le plan qualitatif, on observe que Sonata produit une segmentation plus homogène, en particulier pour les classes d'ouvertures. Les objets détectés présentent une certaine régularité géométrique, signe que le modèle parvient à mieux capter la structure des éléments, même si une confusion persiste entre portes et fenêtres. En comparaison, PointNet++ montre plus de dispersion et semble moins apte à appréhender le contexte géométrique global des objets (point observé sur toutes les classes), ce qui limite sa capacité à distinguer correctement ces classes.

### Améliorations de performance de Sonata+PTv3

Ces résultats du premiers apprentissage suggèrent que Sonata dispose d'un fort potentiel. Avec un ajustement plus fin de ses hyperparamètres et une amélioration du jeu de données d'apprentissage, notamment par un meilleur équilibrage des classes complexes, elle pourrait atteindre des performances encore plus élevées sur l'ensemble des catégories. Afin de mettre en œuvre les améliorations nécessaires, nous avons identifié les remarques les plus pertinentes, au cours du premier apprentissage, susceptibles de guider efficacement nos ajustements.

#### 1. Améliorations liées à l'apprentissage :

- Les IoU des classes complexes (*Escaliers, Fenêtres, Portes*) augmentent à partir de l'époque 80 (parmi 100), ce qui montre l'effet bénéfique d'un taux d'apprentissage plus bas et d'un entraînement prolongé.
- La courbe de perte ne se stabilise pas totalement, suggérant que le nombre d'époques est insuffisant → il faudrait l'augmenter.
- Les fluctuations entre époques indiquent un taux d'apprentissage initial trop élevé → il est recommandé de le réduire au départ.

#### 2. Améliorations liées aux données :

- 3 parmi 6 bâtiments d'entraînement ne contiennent pas de couleurs (RGB), ce qui limite l'exploitation des informations visuelles → il faut intégrer des nuages de points complets avec couleur.
- Il est également pertinent de calculer les normales des nuages avant l'entraînement pour enrichir la description géométrique locale.

### 3. Conclusion

En conclusion, ce projet nous a permis de poser les bases d'un pipeline automatique end-to-end pour le processus Scan-to-BIM, basé sur l'IA, comme illustré dans la figure 1 de l'introduction. Grâce à l'automatisation de la labellisation et à l'intégration de modèles d'intelligence artificielle performants, nous avons démontré la faisabilité d'une segmentation sémantique efficace des nuages de points.

Si ce sujet vous intéresse et que vous souhaitez en découvrir davantage, je vous invite à assister à ma soutenance de PFE le vendredi 26 septembre à 9h30.

# DeepChoice : Fusion Multi-Vues par Deep Learning pour la Classification Automatisée des Nuages de Points 3D

PFE présenté par : **Digre Frinde**  
Société d'accueil : **HEIG-VD**  
Directeur de PFE : **Adrien Gressin**  
Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**  
Encadrant : **Antoine Carraud**

**HE<sup>VD</sup>  
IG**



## 1. Contexte, Problématique et Objectifs de l'étude

L'INSIT (Institut d'Ingénierie du Territoire) est un institut de recherche appliquée de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD) dont l'expertise couvre un ensemble varié de techniques dédiées à l'aménagement durable, au développement territorial, et à la gestion efficiente des infrastructures. Il accompagne les acteurs territoriaux dans les défis actuels liés aux transitions énergétiques, environnementales et technologiques, grâce notamment à ses laboratoires spécialisés en environnement, gestion des ressources naturelles, géomatique et infrastructures urbaines.

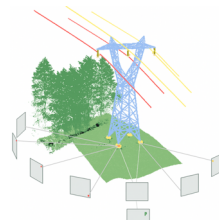


Fig. 1: Principe multi-vues : un point du nuage vu par plusieurs images.

Dans ce contexte, l'INSIT développe actuellement le projet AutoInspect3D, visant à **automatiser la mise à jour des données des réseaux électriques**. Ce projet s'appuie notamment sur l'utilisation combinée de **relevés LiDAR par drone, d'images acquises durant les relevés par le drone et de techniques avancées d'apprentissage automatique**, afin de réaliser une segmentation sémantique automatisée des nuages de point 3D de ces réseaux.

À cet égard un relevé LiDAR a été réalisé sur plusieurs installations électriques à l'aide d'un drone équipé à la fois d'un capteur LiDAR et d'une caméra RGB. Chaque point 3D du nuage, est donc visible par plusieurs images issues de points de vue différents comme le montre la figure 1. Nous disposons d'une classification de ces images, nous cherchons maintenant à effectuer une segmentation sémantique des nuages de points 3D à partir des informations fournis par les images.

**L'objectif principal de ce projet est de développer une méthode automatique qui attribue, pour chaque point du nuage, un poids à chacune des images dans lesquelles il apparaît.** Cela afin de favoriser les images disposant d'une bonne condition de visibilité sur le point 3D et de réduire l'impact des vues de moindre qualité.

Pour cela, notre travail s'articule autour de trois axes principaux :

- Identifier les critères qui rendent une image vraiment utile pour la classification.
- Utiliser le deep learning pour apprendre à attribuer automatiquement un poids à chaque image selon sa qualité d'observation.
- Tester et valider cette méthode sur des relevés réels acquis par drone sur des réseaux électriques

## 2. Présentation et constitution du jeu de données d'apprentissage

### Présentation

Dans le cadre de ce projet, nous avons participé à la conception du jeu de données **GridNet-HD**, qui allait servir de base pour la constitution du jeu de données pour notre travail. Il est disponible en open-source sur la plateforme **huggingface**(1). GridNet-HD est constitué de **36 relevés LiDAR**

1- <https://huggingface.co/datasets/heig-vd-geo/GridNet-HD>

accompagnés de 7 634 images et cumulant un total d'environ **2,5 milliards de points**. La figure ci-dessous présente la répartition du nombre de points 3D annotés pour chaque classe, séparés pour les ensembles d'entraînement et de tests.

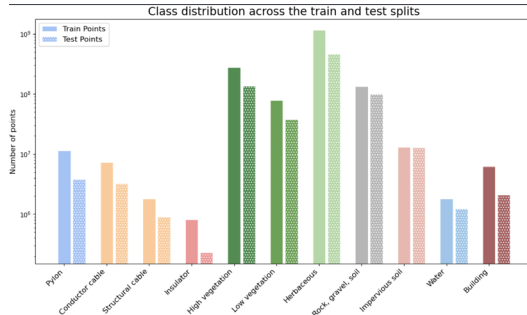


Fig. 2 : Histogramme des classes dans les données d'entraînement et de test.

### Constitution du jeu de données d'apprentissage

Nous avons d'abord récupéré les scores de classification des images, ainsi que la labélisation de chaque point du nuage fournie avec GridNet-HD. Pour chaque image, nous avons ensuite calculé un vecteur de visibilité composé des différents critères définis en amont (ces critères seront détaillés dans la section suivante.). Comme dans l'approche de GridNet-HD (voir figure 2), nous avons opté pour la même séparation des données en ensembles d'entraînement, de validation et de test afin de comparer nos résultats avec les modèles de référence.

À l'issue de ce processus, nous avons obtenu un jeu de données complet : pour chaque image dans laquelle un point 3D est visible, nous disposons désormais de ses scores de classification, de son vecteur de visibilité et de la vraie classe du point.

### 3. Méthodologie

La Figure 3 illustre la chaîne de traitement complète du modèle DeepChoice, depuis la collecte des données jusqu'à la classification finale des points 3D. Comme mentionné dans la section précédente pour chaque point d'intérêt dans le nuage, nous identifions d'abord toutes les images dans lesquelles il est visible (cercle jaune sur la figure 3). Chaque image apporte deux informations essentielles :

- **les scores de classification**, obtenus grâce à un modèle Vision Transformer (ViT). Pour chaque image  $i$ , ce score est noté  $P_i$  un vecteur de probabilités sur l'ensemble des classes possibles,
- **Un vecteur de critères de visibilité**, composé de six mesures : l'angle d'incidence, la distance caméra-point, le contraste local, la netteté, le rapport signal-bruit local et la saturation. Ces critères caractérisent à quel point chaque image "voit bien" le point 3D.

L'ensemble de ces critères pour chaque image est ensuite passé dans un réseau de neurones ("**DeepChoice**" sur la figure 3), qui attribue automatiquement un poids  $w_i$  à chaque image, selon la qualité de son observation.

La pondération des scores se fait alors de la façon suivante : pour chaque point 3D visible dans les images, le score final de classification est calculé par **une fusion pondérée** :

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

où :

1- <https://huggingface.co/datasets/heig-vd-geo/GridNet-HD>

- $P$  est le score final pour chaque classe,
- $w_i$  est le poids attribué à l'image  $i$ ,
- $p_i$  est le vecteur de probabilité de classification donné par l'image  $i$ .

La classe finale attribuée au point 3D est alors celle ayant la plus grande valeur dans  $P$ . Dans l'optique d'entraîner le modèle, une **fonction de perte** de type **cross-entropy** est minimisée en comparant la prédiction finale à la classe réelle du point. Cette fonction mesure l'écart entre la classe prédite et la classe attendue, et permet d'ajuster les paramètres du réseau par rétropropagation. Le processus se répète jusqu'à ce que le modèle produise des pondérations stables et cohérentes qui améliorent la qualité globale de la classification.

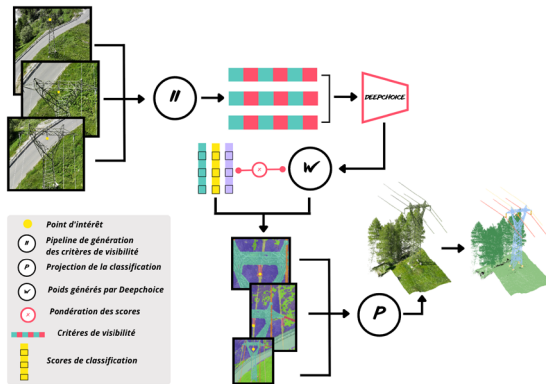


Fig. 3 : Processus de Pondération des images par DeepChoice.

#### 4. Expérimentations et Résultats

Les tests menés sur différents jeux de données montrent que DeepChoice améliore la classification pour les classes les plus importantes du réseau, comme les pylônes, les conducteurs et les isolateurs. Ces tests ont été menés dans le but de situer les performances de DeepChoice par rapport à deux approches de référence que sont : le vote majoritaire (pour chaque point 3D, la classe finale est celle prédite par le plus grand nombre d'images, sans tenir compte de la qualité des vues) et "au moins une image correcte" (un point 3D est considéré comme bien classé si au moins une image donne la bonne classe, ce qui représente la performance maximale théorique si l'on pouvait toujours choisir la meilleure vue). Pour ces éléments, qui sont essentiels à l'analyse des infrastructures, DeepChoice dépasse nettement la méthode du vote majoritaire. L'ajout des critères de visibilité permet en effet de mieux reconnaître les structures fines ou partiellement cachées, comme les isolateurs, qui sont souvent mal détectés quand on ne tient pas compte de la qualité des vues. En revanche, pour certaines classes comme la végétation basse ou herbeuse, les résultats restent plus faibles. Ces éléments sont difficiles à distinguer même visuellement sur les images, ce qui peut expliquer que le vote majoritaire donne parfois des scores similaires, voire légèrement meilleurs, sur ces classes spécifiques. Enfin, la classe "Eau" est mal reconnue par toutes les approches, avec des scores qui restent autour de 63 à 70 % (Tab. 1). Cela est sans doute dû au fait que cette classe est peu présente dans les données, et qu'elle est souvent confondue avec d'autres surfaces planes comme les routes.

CLASSE	VOTE MAJORITAIRE	DEEPCHOICE	AU MOIN UNE IMAGE
Pylone	86.66	89.49	96.45
Conducteur	77.27	79.30	95.81
Cable de garde	64.39	69.25	88.05

1- <https://huggingface.co/datasets/heig-vd-geo/GridNet-HD>

CLASSE	VOTE MAJORITAIRE	DEEPCHOICE	AU MOIN UNE IMAGE
Isolateur	66.44	70.14	90.48
Végétation haute	69.53	70.83	82.78
Végétation basse	51.96	51.30	70.70
Végétation herbeuse	54.14	53.96	69.60
Sol	51.79	54.82	71.08
Route	83.49	83.94	92.91
Eau	63.59	69.70	87.22
Construction	73.22	73.25	87.72
Moyenne	67.50	69.63	84.80

Tab. 1: Résultat des IoU par classe sur le jeux de données de test.

Pour aller plus loin dans l'optimisation du modèle, nous avons mené des expérimentations en testant différentes combinaisons de critères de visibilité pour voir leur influence sur les performances. Concrètement, nous avons permuté les six critères disponibles et observé comment chaque combinaison affectait la fonction de perte et la moyenne de l'IoU de validation au fil des époques. Les résultats présentent l'évolution du mIoU sur le jeu de données de test. Ici, on remarque que les meilleures combinaisons atteignent des valeurs plus élevées et se stabilisent plus vite, par exemple l'utilisation de la distance et de la netteté comme seul critère de visibilité, permet d'atteindre un résultat de 69.76 % de mIoU. Cela montre que le choix des critères de visibilité utilisés pour pondérer les images a un impact direct sur la qualité de la classification finale. Au final, cette démarche a permis d'identifier les critères les plus pertinents pour guider le modèle dans la sélection des meilleures vues, et donc d'améliorer les performances globales de DeepChoice sur la segmentation sémantique 3D. Les deux images ci-dessous présentent la vérité terrain (fig. 5) et le résultat de la segmentation sémantique obtenu après application de DeepChoice (fig. 4).

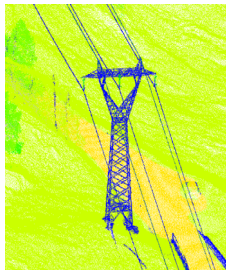


Fig. 4 : Résultat de la segmentation sémantique obtenue avec DeepChoice.



Fig. 5 : Vérité terrain.

## 5. Conclusion

Ce projet a permis de développer et de tester une nouvelle méthode, DeepChoice, pour améliorer la classification automatique des points 3D issus des relevés de drones. En combinant les avantages des critères géométriques et du deep learning, DeepChoice offre de meilleurs résultats que les approches classiques, surtout pour les éléments techniques des réseaux comme les pylônes et les isolateurs.

Vous souhaitez en savoir plus ? Je présenterai l'ensemble de ce projet lors de ma soutenance de PFE le vendredi 26 septembre à 10 h 30.

1- <https://huggingface.co/datasets/heig-vd-geo/GridNet-HD>

# Traitement open source de nuages de points diachroniques : application à l'auscultation de précision de falaises

PFE présenté par : **Emeline Coatanlem**

Société d'accueil : **Cerema**

Directrice de PFE : **Katia Mirande**

Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**

Encadrante : **Katia Mirande**



## 1. Introduction

### 1.1. Contexte de l'étude

Depuis une vingtaine d'années, les technologies d'acquisition de nuages de points se sont démocratisées et les modèles 3D trouvent des applications dans de nombreux domaines (archéologie, architecture, police, médecine, industrie, etc.). Leur caractère non destructif et la grande quantité de mesures acquises rapidement rendent cette méthode particulièrement intéressante pour évaluer l'état des parois rocheuses. Toutefois, détecter des signes précurseurs d'effondrements (déplacements millimétriques) par mesures diachroniques nécessite une rigueur extrême, depuis l'acquisition jusqu'aux méthodes de comparaison des nuages.

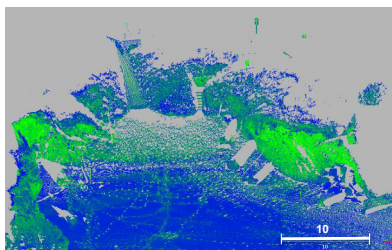


Figure 1 : Portion du nuage de points des falaises du Croisic

Dans ce cadre, le Cerema et l'IGN mènent une étude sur trois ans pour évaluer la faisabilité d'une méthodologie opérationnelle d'auscultation des falaises. Cette démarche repose sur une chaîne de traitement automatisée, reproductible et open source, afin de proposer une offre de service aux collectivités. Un premier site pilote a été choisi au Croisic (Loire-Atlantique) (voir Figure 1), où des acquisitions LiDAR et photogrammétriques (par drone et au sol) ont déjà été réalisées.

### 1.2. Objectifs et axes de l'étude

Ce PFE s'inscrit dans cette dynamique et porte sur le traitement et la comparaison de nuages de points diachroniques post-acquisition. Il aborde une problématique centrale : optimiser les paramètres de l'algorithme de comparaison pour calculer des distances et détecter des déplacements très faibles avec la plus grande précision. Un travail de synthèse bibliographique est mené afin d'identifier les méthodes existantes les plus pertinentes en matière de traitement de nuages de points, d'auscultation de falaises et de suivi. La suite du projet consiste à sélectionner, tester et intégrer les outils Python les mieux adaptés, dans une chaîne de traitement orientée vers la détection de micro-déplacements (de l'ordre de 5 millimètres) sur paroi rocheuse. Un soin particulier est apporté à la structuration du code, afin d'assurer sa modularité, sa prise en main et son évolutivité pour des traitements répétés sur des séries temporelles.

## 2. Vers une chaîne de traitement automatisée et open source

### 2.1. Le choix de bibliothèques Python

Le logiciel CloudCompare, largement utilisé pour le traitement des nuages de points, a servi de base initiale pour comprendre le fonctionnement de certains algorithmes. Pour automatiser les traitements et développer une chaîne d'analyse personnalisée, le langage Python a été choisi pour sa flexibilité et la richesse de son large éventail de bibliothèques. Plusieurs bibliothèques ont été comparées : PDAL, utile pour le prétraitement mais limité en analyse géométrique ; PCL, assez peu documentée ; et LASTOOLS, écartée pour des raisons de licence. Finalement, Open3D, sous licence MIT, a été retenue comme base principale pour sa documentation claire, sa richesse fonctionnelle et la fluidité de son API. Elle est complétée par Py4DGeo, offrant des outils adaptés à l'analyse des falaises. Ensemble, ces outils constituent une base cohérente pour une chaîne de traitement open source.

### 2.2. Les étapes de la chaîne de traitement

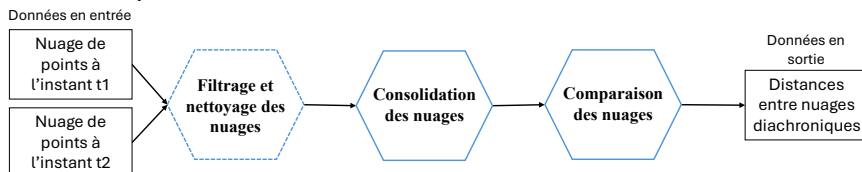


Figure 2 : Chaîne de traitement pour la détection de déplacements sur falaise

Dans notre étude, nous avons travaillé dans un contexte dépourvu de végétation mais un nettoyage préalable peut être réalisé pour améliorer le recalage : des filtres basés sur la densité ou la distance au plus proche voisin peuvent être appliqués pour enlever le bruit, ainsi que des outils comme CANUPO ou 3DMASC, qui permettent de distinguer la paroi rocheuse de la végétation.

Le recalage des nuages de points est une étape importante pour la comparaison diachronique, qui peut s'effectuer par consolidation ou par géoréférencement. En milieu naturel, cette opération est complexe en raison de l'absence de géométries régulières et de repères stables. L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) est aujourd'hui la méthode la plus couramment utilisée, avec des variantes plus robustes comme 4PCS (4-points Congruent Sets for Robust Surface Registration) ou des méthodes basées sur des descripteurs géométriques. Plus récemment, des méthodes spécifiquement conçues pour les milieux rocheux ont été développées, comme celle proposée par [Yang et Schwieger, 2022]. Cette approche utilise une segmentation en supervoxels pour cibler uniquement les zones stables, en excluant les éléments instables tels que la végétation ou le bruit, ce qui améliore la précision du recalage.

Pour la comparaison de nuages de points diachroniques en milieu rocheux, l'algorithme M3C2 (Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison) [Lague et al., 2013] est la méthode de référence, largement adoptée dans la littérature ([Bash et al., 2017] ; [Feldmann, 2018]). D'autres techniques existent, notamment celles reposant sur des modèles numériques d'élévation (MNE) [Qin et al., 2016], les comparaisons nuage-maillage comme C2M (Cloud-to-Mesh), ou nuage-nuage comme C2C (Cloud-to-Cloud). Toutefois, ces alternatives sont généralement moins adaptées aux environnements rocheux, comme l'ont démontré [Lague et al., 2013].

### 2.3. Fonctionnement de l'algorithme M3C2

M3C2 est un algorithme de comparaison directe de nuages de points diachroniques qui calcule les distances entre deux modèles à partir des deux positions moyennes ou médianes  $i1$  et  $i2$  des deux nuages le long d'une normale locale (voir Figure 53). Cette normale  $N$  est définie à partir du plan ajusté autour des points contenus dans une sphère de diamètre  $D$  (voir Figure 34). Les positions moyennes

ou médianes seront calculées à partir des points à l'intérieur du cylindre de diamètre  $d$  orienté selon la normale  $N$  (voir *Figure 4 5*). La distance nuage-nuage va être

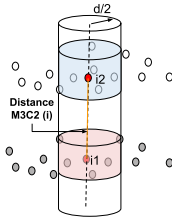


Figure 3 : Détermination des distances M3C2 [An et al., 2021] (modifié)

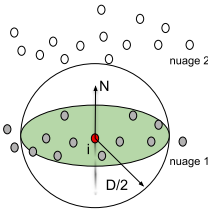


Figure 4 : Détermination de la normale locale [An et al., 2021] (modifié)

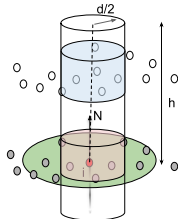


Figure 5 : Détermination de l'échelle de projection [An et al., 2021] (modifié)

Ensuite, le calcul de détermination des changements significatifs est réalisé avec l'Équation 1 où  $n_1$  et  $n_2$  sont les sous-ensembles capturés par le cylindre,  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont les variances de rugosité locales et  $reg$  est l'erreur de recalage. Il est préconisé par [Lague et al., 2013] que les sous-ensembles  $n_1$  et  $n_2$  soient supérieurs ou égaux à 5 obtenir de bonnes estimations.

$$LOD_{95}\% = \pm 1.96 \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} + reg$$

Équation 1 : Seuil de détection des changements significatifs

Le choix des paramètres en entrée de M3C2 (diamètre de sphère, diamètre et hauteur du cylindre) est crucial car ils influencent la précision de l'estimation des normales et la qualité de la projection. Plusieurs stratégies existent pour optimiser ces paramètres en fonction de la géométrie, de la densité et surtout de la rugosité locale, un enjeu important pour détecter précisément des déplacements très faibles.

### 3. L'algorithme M3C2 au cœur de l'étude : expérimentations

#### 3.1. Mise en place des tests

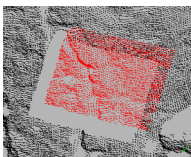


Figure 6 : Simulation du déplacement de 10 cm d'un échantillon de 3586 points dans le sens de la normale locale

Afin d'évaluer les performances des algorithmes intervenant dans la chaîne de traitement, tout en s'affranchissant des erreurs d'acquisition et de recalage, des déplacements artificiels ont été simulés à l'aide d'un script Python sur des échantillons de formes variées (carré, cercle, triangle, pentagone), appliqués selon divers modes (translation selon la normale, glissement dans un plan local, pivotement). Ce script permet de tester l'influence de la forme, de la taille, de la densité et de l'amplitude des déplacements (voir *Figure 6 6*) en générant des échantillons où le nombre exact de points déplacés est connu, ce qui permet une évaluation précise des performances des algorithmes. Un échantillon-type, conçu pour être suffisamment générique et éviter les biais liés à des cas particuliers, a ainsi été retenu pour les tests de l'algorithme M3C2.

#### 3.2. Détermination des paramètres optimaux de M3C2

Une fois un échantillon-type validé différentes méthodes de détermination des paramètres optimaux ont été explorées. Les paramètres proposés automatiquement par CloudCompare ont montré une certaine variabilité liée au sous-échantillonnage aléatoire, ce qui limite leur fiabilité pour la détection de déplacements faibles. En reprenant les préconisations de [Lague et al., 2013] et en appliquant différentes méthodes proposées par [Bash et al., 2017], [Feldmann, 2018] et [Tahir, 2024], nous avons

réalisé un comparatif des résultats détectés par l'algorithme en fonction des paramètres obtenus. Les paramètres proposés par [Bash et al., 2017] ont donné de très mauvais résultats et ont été écartés du comparatif présenté en *Figure 77*.

Pour réaliser le comparatif suivant, chaque méthode a été testée sur plus de 70 échantillons-types répartis sur un pan de falaise. À l'issue de ces tests, les paramètres  $d$  et  $D$  proposés par [Feldmann, 2018] se sont révélés les plus pertinents puisque comme montré en *Figure 77*, ce sont les résultats présentant la moyenne des distances détectées par M3C2 pour chaque échantillon (0,08 m) la plus proche du déplacement réel (0,1 m) et l'écart-type le plus faible.

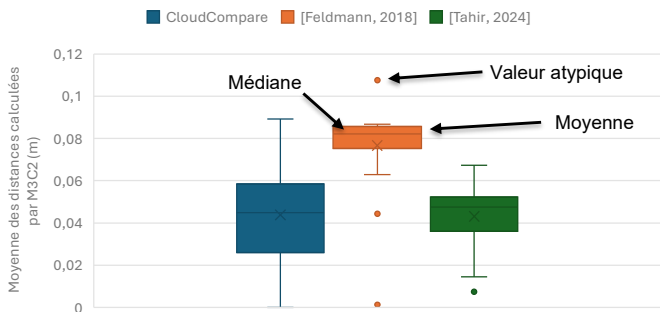


Figure 7 : Comparaison des méthodes de détermination des paramètres

Toutefois, les résultats obtenus avec la méthode [Feldmann, 2018] sont insuffisants pour garantir une détection fiable des micro-déplacements, notamment en raison d'un taux élevé de faux positifs. Ainsi, la suite du travail s'oriente vers l'optimisation du seuillage des distances, basé sur l'Équation 1 en lien avec la rugosité. Un seuillage trop permissif engendre de nombreux faux positifs, tandis qu'un seuillage trop strict risque de masquer des changements réels de faible amplitude. De plus, pour affiner cette détection, l'intégration d'algorithmes de regroupement spatial, tels que DBSCAN, est testée. L'objectif est d'identifier des critères de seuillage modulables en fonction des spécificités de chaque situation permettant ainsi une détection fine et fiable des micro-déplacements sur tout type de falaise.

## 4. Conclusion et perspectives

Ce PFE a permis d'approfondir la compréhension d'un algorithme de référence, M3C2, appliqué à la détection de micro-déplacements avec un haut niveau de précision. L'analyse de son comportement à travers une série de tests a mis en évidence l'importance cruciale de l'optimisation des paramètres d'entrée, ainsi que du filtrage des distances calculées. Ce projet pourra permettre de suggérer à ses utilisateurs les paramètres les plus optimaux de manière automatique. Le protocole développé pour simuler des déplacements sur la falaise constitue une base solide pour l'évaluation de méthodes de détection ou de consolidation. Il pourrait ainsi, à terme, être mobilisé pour comparer différentes variantes de M3C2, ou d'autres approches comme l'ICP, selon les orientations futures du projet global.

## 5. Bibliographie

- Bash, E.A., Moorman, B.J. and Gunther, A. (2024) 'Detecting Short-Term Surface Melt on an Arctic Glacier Using UAV Surveys', *Remote Sensing*.
- Feldmann, B. (2018) Caractérisation fine de l'aléa chute de blocs en milieu côtier. Rapport de projet de fin d'étude.
- Laque, 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.
- Qin, R., Tian, J. and Reinartz, P. (2016) '3D change detection – Approaches and applications', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, pp. 41–56.
- Tahir, A. (2024) Traitement de nuages de points 3D pour l'évaluation des performances de détection des matériels d'acquisition du Cerema. Rapport de fin de master.
- Yang, Y. and Schwiager, V. (2022) 'Supervoxel-based targetless registration and identification of stable areas for deformed point clouds', *Journal of Applied Geodesy*.

# Développement des solutions de capteurs virtuels sur ORI SYSTEME

PFE présenté par :

Lara DRAUSSIN



Société d'accueil :

Novatlas

Directeur de PFE :

Corentin CASTANIE

Correcteur :

Gilbert FERHAT

---

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'augmentation des exigences de sécurité sur les chantiers d'infrastructures, qu'ils soient ferroviaires, souterrains ou urbains, impose un contrôle toujours plus rigoureux et efficace de l'état des ouvrages. Dans ce cadre, la surveillance structurelle, ou *Structural Health Monitoring* (SHM), joue un rôle fondamental. Elle permet de détecter les évolutions mécaniques des structures, d'anticiper les déformations ou affaissements, et de prévenir les risques liés à la stabilité des ouvrages. L'entreprise Novatlas, à travers son pôle Monitoring, œuvre dans ce domaine en combinant des relevés topographiques, des capteurs instrumentés et des solutions logicielles.

Parmi ces outils, le logiciel ORI SYSTEME a été conçu pour centraliser les méthodes observationnelles des chantiers. Cette plateforme web rassemble les données d'auscultation, permet leur consultation à distance, et facilite la production de rapports. Toutefois, son fonctionnement était jusqu'à présent limité sur certains aspects, notamment au niveau du traitement des données automatiques et des outils d'analyse.

C'est dans ce contexte que le présent projet de fin d'études a été défini, avec pour objectif d'enrichir le logiciel ORIS par l'intégration de capteurs dits « virtuels ». Ces derniers ne sont pas des dispositifs matériels, mais des entités numériques calculées à partir de données existantes, via des formules mathématiques ou des modèles géométriques. Ils permettent d'extraire des grandeurs significatives, telles que l'écartement de rails, la convergence d'un tunnel ou le tassement différentiel, à partir de différentes mesures. Ils suivent ainsi des critères utilisés pour définir des seuils de conformité normés.

L'enjeu est donc d'automatiser la production de ces indicateurs dans ORIS, afin d'améliorer l'interprétation des données par les techniciens et pour les clients. Ce projet repose ainsi sur trois axes principaux : la définition d'une bibliothèque de capteurs virtuels, leur intégration technique dans la base de données et la plateforme ORIS, et la création d'interfaces graphiques adaptées à leur gestion. L'objectif est de proposer une solution évolutive, cohérente avec les pratiques métier de Novatlas, et capable de répondre aux besoins en visualisation intelligente des données de suivi d'ouvrages.

## 2. État de l'art

Le développement de solutions logicielles pour le suivi structurel repose sur une compréhension des pratiques d'auscultation actuelles, tant du point de vue des méthodes de mesure que de la gestion des données. Le *Structural Health Monitoring* (SHM) désigne l'ensemble des techniques permettant de surveiller l'intégrité d'un ouvrage au cours de sa vie, depuis sa construction jusqu'à son exploitation. Cette surveillance peut être continue ou ponctuelle, et s'appuie sur la collecte de grandeurs physiques comme les déplacements, les déformations ou les vibrations. Li et al. (2023) [1] soulignent l'importance de ces approches pour détecter les évolutions mécaniques précoces et évaluer la durabilité des structures.

Les systèmes de SHM sont généralement construits autour de trois composantes fondamentales, selon Tokognon et al. (2017) [2]. La première concerne l'acquisition des données, assurée par des capteurs physiques tels que les stations totales robotisées, capteurs de fissuration, ou encore chaînes inclinométriques, déployés sur le terrain. Ces données sont ensuite transmises vers une base

centralisée, soit manuellement, soit via des moyens de communication automatisés. La seconde composante est la structuration des données. **Guo et al. (2023)** [3] mettent en avant l'intérêt des bases de données relationnelles spatiales pour organiser l'information de manière cohérente et faciliter les traitements ultérieurs. Enfin, la troisième composante est l'interface d'accès aux résultats, souvent matérialisée par un portail web de visualisation. Elle permet aux utilisateurs de consulter les évolutions dans le temps, d'interpréter les tendances et d'identifier d'éventuelles anomalies. Ce processus SHM est illustré en figure 1.

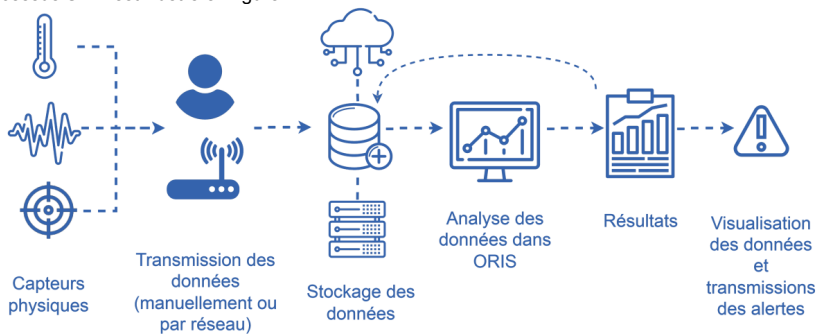


Fig. 1 : Étapes du SHM

Dans ce contexte, les capteurs virtuels apparaissent comme essentiels, car ils permettent de valoriser l'information déjà disponible, sans multiplier les capteurs physiques, ce qui présente un intérêt économique et opérationnel évident. Enfin, **Kiani et al. (2014)** [4] soulignent l'intérêt des systèmes de visualisation en temps réel pour faciliter l'interprétation des données environnementales sur les chantiers de manière intuitive via des interfaces claires, pour permettre une réaction rapide en cas de dérive. L'analyse des systèmes existants montre que, bien que la collecte automatisée des données soit désormais largement maîtrisée, l'exploitation intelligente et efficace des mesures reste perfectible.

### 3. Le logiciel ORIS actuel

Avant ce projet, le logiciel ORIS SYSTEME d'abord proposé par **Castanie (2017)** [5], bien qu'opérationnel et utilisé sur de nombreux chantiers, présentait plusieurs limites structurelles freinant l'intégration et l'exploitation des capteurs virtuels. En effet, ORIS permettait principalement de centraliser et d'afficher les mesures brutes issues de capteurs physiques, sans traitement automatique complémentaire permettant de générer des indicateurs complexes à partir de ces données. Les calculs de type virtuel, comme le suivi d'un écartement, d'un gauche ou d'une convergence, étaient donc réalisés en dehors du logiciel, souvent à l'aide d'applications tierces pour les mesures automatiques ou de tableurs pour les mesures manuelles.

Cette organisation induisait plusieurs processus à optimiser. Tout d'abord, elle augmentait fortement la charge de travail liée à l'exploitation des données, puisque chaque capteur virtuel devait être redéfini à chaque chantier. Ensuite, cette absence de gestion centralisée entraînait de forts risques d'erreurs, notamment des erreurs de saisie, et la traçabilité des calculs était limitée. Enfin, la gestion des capteurs virtuels était compliquée et parfois source de plantage du logiciel ORIS. En d'autres termes, la plateforme remplissait son rôle de gestionnaire de données physiques, mais échouait à en extraire pleinement la valeur pour les utilisateurs.

Par ailleurs, la base de données du logiciel ne possédait pas de structure adaptée pour accueillir des objets calculés. Aucun modèle n'existait pour définir les relations entre capteurs physiques et capteurs virtuels, ni pour stocker les paramètres de calcul associés (type de capteur, formules, points de mesures associés, etc.). Cela rendait impossible l'automatisation des calculs, et empêchait une évolutivité vers des bibliothèques de capteurs plus complexes.

Cette fragmentation des outils nuisait à l'uniformisation des chaînes de traitement et entraînait une dépendance à des logiciels tiers pas toujours optimisés.

Face à ces constats, le projet a visé à transformer en profondeur le fonctionnement d'ORIS, en y intégrant une logique complète de gestion des capteurs virtuels. Cela impliquait la refonte partielle de la base de données, l'ajout d'un moteur de calcul automatisé basée sur une bibliothèque de capteurs virtuels et le développement d'interfaces graphiques intuitives. L'objectif était de faire d'ORIS un outil non seulement de collecte et de visualisation, mais aussi de calcul et d'aide à l'interprétation, capable d'anticiper les besoins futurs liés à l'évolution des méthodes d'auscultation.

#### **4. Conception du système**

Le développement de la solution a été conduit selon une démarche progressive et structurée, en partant d'un recensement des besoins utilisateur jusqu'à la mise en œuvre fonctionnelle dans l'environnement ORIS. Le premier volet a consisté à concevoir une bibliothèque de capteurs virtuels adaptés aux différents types de chantiers traités par Novatlas. Cette bibliothèque a été structurée en trois grandes catégories : les capteurs ferroviaires (écartement, nivellement longitudinal, dévers, gauche simplifié, écart de dévers, dressage), les capteurs de déformations structurelles (inclinaison, ouverture de fissure, déformée) et les capteurs de mesures relatives (convergence de tunnel, tassement différentiel).

Pour chaque capteur virtuel, on a précisément défini les grandeurs physiques nécessaires à son calcul, les données d'entrée, les règles géométriques ou trigonométriques utilisées et les données de sortie. Ces capteurs, bien qu'issus de calculs simples dans certains cas, nécessitaient une modélisation rigoureuse pour permettre leur intégration au logiciel.

La seconde étape a porté sur la refonte de la base de données du logiciel ORIS, afin de lui permettre de gérer nativement ces capteurs virtuels. Une série de nouvelles tables relationnelles a été intégrée pour représenter les capteurs, les couples de points associés, les paramètres de calcul, les formules et leurs résultats. L'approche adoptée garantit ainsi une cohérence entre les objets physiques et virtuels, tout en assurant la traçabilité des calculs.

Enfin, une interface graphique dédiée a été conçue pour être intégrée dans ORIS. Elle permettra aux techniciens d'ajouter ou modifier un capteur virtuel via une interface intuitive, de choisir les données d'entrée dans des listes filtrables, puis de visualiser les résultats sous forme de courbes temporelles, avec un affichage des seuils d'alerte et une possibilité d'export en PDF.

#### **5. Résultats**

Les travaux réalisés ont permis de produire un cahier des charges structuré, exhaustif et exploitable, qui pose les fondations techniques et fonctionnelles de la future évolution du système ORIS.

Le premier résultat tangible est la formalisation complète des capteurs virtuels à intégrer dans le système. Ce travail a permis de passer à une standardisation rigoureuse, qui garantit la cohérence et la pérennité des calculs futurs. La bibliothèque ainsi constituée couvre à ce stade plus d'une dizaine de capteurs types, qui répondent directement à des besoins récurrents sur les projets suivis par Novatlas

Un second volet essentiel du projet est la spécification de la structure des données. Une modélisation complète de la base a été proposée, incluant les nouvelles entités à créer, leurs relations avec les objets existants, les clés primaires et étrangères, et les modifications des tables existantes. Cette base théorique s'appuie sur une logique relationnelle éprouvée, assurant la compatibilité avec les standards SQL actuels tout en restant flexible en vue de possibles futures évolutions.

Le cahier des charges inclut également des maquettes d'interface utilisateur, pour illustrer la manière dont les techniciens pourraient interagir avec les capteurs virtuels et pour faciliter la visualisation de l'objectif final pour les développeurs. Ces maquettes couvrent les opérations de création, modification, suppression, visualisation graphique et paramétrage d'alertes pour les capteurs et points virtuels. Elles intègrent aussi les modalités de sélection et créations des capteurs physiques sources, et les interfaces de créations de courbes.

## 6. Limites et perspectives

Le travail mené dans le cadre de ce projet a permis de poser les fondations solides d'un système de gestion des capteurs virtuels intégré à ORIS. Néanmoins, plusieurs pistes d'évolution ont été identifiées pour améliorer et étendre les fonctionnalités développées.

Une première perspective concerne l'enrichissement de la bibliothèque de capteurs. Certains cas d'usage complexes nécessitent des modèles plus avancés. Il sera pertinent d'intégrer de nouveaux capteurs au fil de l'évolution des besoins de l'entreprise.

Ensuite, une évolution naturelle réside dans l'automatisation du diagnostic. Aujourd'hui, ORIS restitue des résultats fiables et exploitables, mais laisse à l'utilisateur la tâche d'interpréter les tendances. L'ajout de fonctionnalités d'analyse automatique, comme la détection d'anomalies ou la prédiction d'évolution à partir de séries temporelles, pourrait offrir un outil d'aide à la décision. Cela impliquerait d'intégrer des méthodes issues du traitement du signal ou de l'apprentissage automatique, déjà utilisées dans d'autres domaines du monitoring structurel.

Une autre perspective concerne la simplification du processus de récupération des données brutes. Pour le moment, ORIS récupère ses données depuis des logiciels spécifiques, comme Geomos, Sigicom et Wisen, mais il serait pertinent d'avoir le moyen d'ajouter facilement des données issues de différents logiciels tiers.

Enfin, il conviendra de suivre le développement informatique du logiciel et d'adapter le cahier des charges en fonction des retours des développeurs.

Ces perspectives confirment que le travail accompli offre une base solide, mais qu'il reste un champ d'innovation important pour transformer ORIS en véritable plateforme intelligente de surveillance structurelle.

## 7. Conclusion

Ce projet a permis de poser les bases méthodologiques et techniques nécessaires à l'intégration des capteurs virtuels dans ORI SYSTEME. À travers l'élaboration d'un cahier des charges structuré, une bibliothèque de capteurs a été formalisée, une architecture de base de données proposée, et des maquettes d'interface conçues, en réponse aux besoins identifiés sur le terrain.

Bien que la phase de développement n'ait pas encore débuté, le travail accompli fournit un socle solide pour orienter la suite du projet et engager une mise en œuvre cohérente, évolutive et alignée sur les pratiques métier. Ce projet s'inscrit pleinement dans les enjeux actuels de digitalisation du monitoring des infrastructures, en valorisant les données d'auscultation grâce à des traitements intelligents.

## 8. Références bibliographiques

- [1] Li, X., Xie, L., Lu, W., Xue, S., Hong, C., Lan, W., and Shi, Q. (2023). Structural health monitoring of a historic building during uplifting process : System design and data analysis. *Structural Health Monitoring*, 22(5) :3165–3188.
- [2] Tokogon, C. A., Gao, B., Tian, G. Y., and Yan, Y. (2017). Structural health monitoring framework based on internet of things : A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(3) :619–635.
- [3] Guo, M., Qi, H., Zhao, Y., Liu, Y., Zhao, J., and Zhang, Y. (2023). Design and management of a spatial database for monitoring building comfort and safety. *Buildings*, 13(12) :2982.
- [4] Kiani, A., Salman, A., and Riaz, Z. (2014). Real-time environmental monitoring, visualization, and notification system for construction h&s management. *Journal of Information Technology in Construction*, 19 :72–91.
- [5] Castanie, C. (2017). Etude technique et développement des auscultations automatiques. Master's thesis, ESTP Paris.

# Développement d'un outil basé sur l'Intelligence Artificielle pour le contrôle automatique du respect des règles de l'art par les Géomètres-Experts : Application aux plans et procès-verbaux de bornage

PFE présenté par : **Louis MAGNEVILLE**

Société d'accueil : **DGEMA**

Directeur de PFE : **Maxime FERRER**

Correcteur : **Emmanuel ALBY**



## 1. Contexte et objectif de l'étude

Les Géomètres-Experts produisent des documents fonciers essentiels (plans, procès-verbaux) pour sécuriser les droits fonciers. Cette tâche est répétitive, chronophage et soumise à de fortes exigences réglementaires. La moindre erreur peut entraîner des litiges coûteux. Il devient donc crucial d'optimiser ce processus tout en garantissant la conformité.

L'automatisation, via l'intelligence artificielle (IA), offre des solutions concrètes pour améliorer la productivité et renforcer la fiabilité du contrôle des différents documents. Le Machine Learning et le traitement du langage naturel permettent d'analyser rapidement de grandes quantités de données et d'identifier automatiquement erreurs, oublis ou incohérences.

Des outils IA bien conçus peuvent répondre aux besoins spécifiques des Géomètres-Experts, à condition qu'ils soient impliqués dès la conception. L'objectif est de faciliter leur travail quotidien sans bouleverser leurs pratiques. C'est pourquoi un sondage a été diffusé lors de l'Assemblée Générale du Conseil Régional de l'Ordre et a permis de recueillir les attentes des professionnels. La sécurité des données traitées est ressortie comme la principale préoccupation.

Le développement d'un outil IA adapté s'inscrit donc dans une démarche de modernisation de la profession : il permet de gagner en efficacité et de sécuriser les documents.

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

L'Ordre des Géomètres-Experts (OGE), créé par la loi du 7 mai 1946, encadre la profession en garantissant la qualité des travaux fonciers. Il produit des documents de référence, comme le recueil des normes ordinales sur l'acte foncier, définissant les éléments obligatoires à faire figurer sur les plans et procès-verbaux de bornage.

Un sondage diffusé auprès de 47 professionnels montre que les méthodes actuelles de contrôle des documents sont essentiellement manuelles : relectures successives et utilisation d'outils bureautiques classiques. Cela démontre un besoin réel d'automatisation et d'assistance intelligente.

Face à cela, l'IA regroupe des techniques permettant à des machines d'imiter certaines fonctions cognitives humaines (langage, reconnaissance d'images, décision). Elle repose sur des algorithmes complexes basés sur de grandes quantités de données et utilisant des approches comme l'apprentissage supervisé, non supervisé ou par renforcement. Depuis l'émergence du « Deep Learning », l'IA joue aujourd'hui un rôle essentiel dans la modernisation des pratiques numériques. (*LeCun et al., 2015 ; Janiesch et al., 2021*).

Des exemples comme « Ross » ou « Predictice » dans le domaine juridique, ou « Intellig'IA » pour les notaires, montrent que l'analyse automatique de documents est déjà une réalité (*Barthe, 2017*).

Dans le secteur topographique, l'IA est aussi exploitée pour l'analyse de nuages de points 3D, la reconnaissance de défauts sur des ouvrages ou la structuration automatique de données spatiales (Poux, 2020 ; Leclercq et Magnaval, 2023).

L'un des algorithmes fondamentaux pour entraîner les modèles d'IA est la descente de gradient. Il permet d'ajuster les paramètres d'un modèle en minimisant une fonction coût (souvent l'erreur quadratique moyenne), et est largement utilisé pour les tâches de régression ou de classification supervisée (Saint-Cirgue, 2024). Couplé à des outils comme les expressions régulières, il permet une détection automatique d'anomalies dans des documents textuels ou graphiques.

Enfin, l'intégration de l'IA dans un cadre réglementé comme celui du géomètre-expert nécessite une attention particulière sur trois axes :

- **Déontologie** : l'IA doit rester un outil d'assistance. L'humain est seul garant de l'expertise, de la rigueur et de la responsabilité (Blitz-Frayret et al., 2024).
- **Sécurité** : les données traitées (identités, parcelles, adresses) doivent être protégées selon les exigences du RGPD, notamment par l'anonymisation, le contrôle des accès, et l'évaluation des risques.
- **Fiabilité** : la qualité de l'IA dépend fortement des données d'entraînement. Des biais peuvent être introduits à plusieurs étapes, rendant indispensable une démarche de validation et de transparence (Hours, 2023).

Le recours aux normes ISO (comme ISO/IEC 23894 ou 42001) permet d'encadrer le développement et le déploiement responsable des systèmes d'IA dans des contextes sensibles (Alaoui, 2024).

### 3. Développement de l'outil de contrôle

Face au contexte et aux enjeux en rapport avec ce projet, il est nécessaire de structurer le développement de l'outil. Le logigramme ci-après (Figure 1) reprend simplement la démarche suivie lors de la production des différents éléments de contrôle.

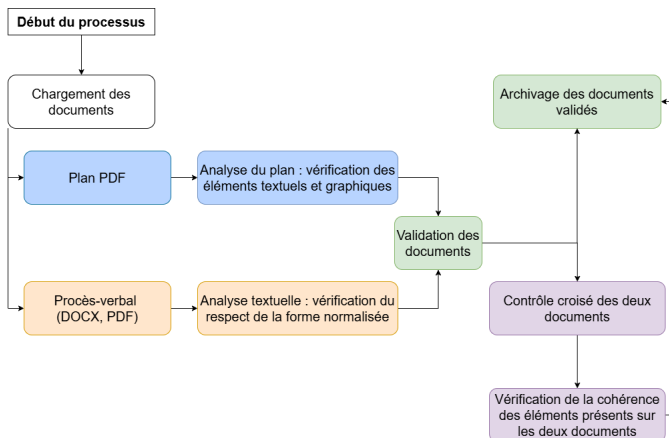


Fig. 1 : logigramme du fonctionnement de l'outil de contrôle développé

Premièrement, un sous-outil basé sur l'analyse des plans a été développé. Pour rappel, l'objectif de celui-ci est de détecter les différents éléments présents sur les plans de bornage, d'abord pour vérifier leur présence obligatoire, puis pour utiliser leurs données pour un contrôle de cohérence entre le procès-verbal et le plan d'un même bornage. Pour cela, notre choix s'est porté sur un modèle de réseau de neurones nommé "YOLO" (You Only Look Once).

En premier lieu, il s'agit d'entraîner l'algorithme choisi (version du modèle YOLOv8) avec un jeu de données orienté sur les éléments à détecter. Pour cela, un total de 52 plans a été annoté manuellement selon 10 étiquettes (aussi appelées "classes" ou "labels"). L'ensemble de ces labels est visible sur la *Figure 2* ci-contre.

1	ZONE_SIGNATURE
2	FLECHE_NORD
3	NUM_DOSSIER
4	ADRESSE
5	ECHELLE
6	ID_CADASTRE
7	COTATION
8	TAB_RATTACHEMENT
9	TAB_BORNAGE
10	PARTIE

Fig. 2 : liste des étiquettes d'annotation

Les modèles YOLOv8 fournissent des fichiers de résultats d'entraînement.

Parmi ceux-ci nous retrouvons la métrique « mAP50 » qui représente la performance globale du modèle. Elle se base sur le recouvrement entre la boîte englobante prédite et la boîte englobante réelle.

Il y a également la métrique du « Score-F1 » qui représente la moyenne entre la précision et le rappel. Il est important de noter que la précision mesure la proportion de bonnes prédictions parmi toutes les prédictions alors que le rappel mesure la proportion de bonnes prédictions parmi tous les objets présents.

Enfin, la dernière métrique intéressante est la courbe « Precision-Recall » qui permet de visualiser pour chaque classe le niveau de précision en fonction du rappel.

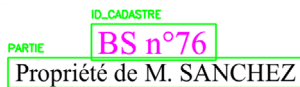
Après plusieurs entraînements, une version optimale du modèle a été retenue pour laquelle nous obtenons les courbes visibles sur les *Figures 3a, 3b et 3c* ci-après.



Fig. 3a, 3b et 3c : Métriques de l'entraînement retenu

Le score du mAP50 atteint 0.922 sa courbe montre une évolution globalement stable, avec seulement de faibles oscillations. Cela traduit une meilleure robustesse du modèle. Concernant la courbe « Precision-Recall » on observe ici des précisions très hautes pour la plupart des classes. Seules les classes « NUM\_DOSSIER » et « COTATION » sont plus faibles car présentent de petits éléments ayant des représentations qui varient beaucoup. Enfin, le score F1 global atteint 0,91 à un seuil de confiance optimal d'environ 0,46 indiquant un bon compromis entre précision et rappel. Ce score élevé reflète une détection efficace pour l'ensemble des classes.

Ce modèle permet la détection d'éléments graphiques sur un plan. Un exemple de cette détection est visible en *Figure 4*. Cela rend ensuite possible la création de scripts Python capables d'indiquer si une classe est absente du plan, ainsi que de détecter, grâce à un OCR (Optical Character Recognition), les différentes parcelles présentes.



Sur cet exemple ci-contre, deux boîtes englobantes sont détectées : un élément de la classe ID\_CADASTRE et un élément de la classe PARTIE.

Concernant le développement des sous-outils d'analyse textuelle, nous avons cherché à automatiser l'analyse des informations sur les parties dans les procès-verbaux de bornage.

Pour cela, nous avons utilisé SpaCy, une bibliothèque d'intelligence artificielle spécialisée dans le traitement du langage. Une base de 25 exemples annotés a été créée pour entraîner un modèle, mais les résultats ont été limités à cause du faible nombre de données. En parallèle, nous avons mis en place une méthode basée sur les expressions régulières, plus simple mais efficace pour certains contrôles. Cela nous a permis de détecter automatiquement les identifiants cadastraux, mais aussi de développer plusieurs sous-outils : vérification de la présence de mots-clés, contrôle de la hiérarchie des preuves, et détection des mentions obligatoires. Ces outils permettent un premier niveau de contrôle automatique des procès-verbaux.

## 4. Résultats

Les différents outils développés ont permis de mettre en place une première version fonctionnelle de contrôle automatique des procès-verbaux de bornage.

Côté graphique, le modèle YOLOv8 entraîné sur 52 plans annotés a donné des résultats satisfaisants, avec de bonnes performances en précision et en rappel selon les métriques mAP50 et F1. Ce modèle permet de détecter automatiquement les éléments essentiels présents sur les plans (comme les ID de parcelles ou les parties), et de signaler les absences éventuelles. Il est aussi capable, en combinant la détection avec un outil OCR, d'extraire les identifiants cadastraux présents visuellement sur les plans.

Pour compléter ce module, plusieurs sous-outils d'analyse textuelle ont été créés. L'approche par intelligence artificielle (avec SpaCy) a montré ses limites à cause du manque de données d'entraînement, mais la méthode par expressions régulières s'est révélée plus adaptée pour des tâches ciblées. Elle a permis de développer plusieurs modules efficaces : contrôle de la présence de mots-clés, vérification des mentions obligatoires, analyse de la hiérarchie des preuves, et détection des identifiants cadastraux dans les procès-verbaux.

Afin de regrouper l'ensemble de ces contrôles, une interface unique a été développée sous Streamlit. Elle permet de déposer un plan et un procès-verbal, puis de lancer automatiquement tous les modules d'analyse. L'interface intègre aussi un contrôle croisé qui compare les identifiants cadastraux extraits du plan avec ceux présents dans le texte, pour vérifier leur cohérence. Ce fonctionnement pose les bases d'un outil d'assistance au contrôle pour les géomètres-experts.

## 5. Conclusion et perspectives

L'outil développé démontre la faisabilité d'un contrôle automatisé des procès-verbaux et plans de bornage, en combinant la détection graphique (via YOLOv8) et l'analyse textuelle (expressions régulières). Les résultats obtenus valident le principe d'un assistant intelligent capable de repérer les oublis, incohérences ou absences d'éléments obligatoires dans les documents fonciers.

Tout au long du développement, une attention rigoureuse a été portée à la gestion des données sensibles et confidentielles. Les méthodes adoptées respectent la confidentialité de celles-ci.

Les attentes des professionnels ont été prises en compte grâce à un sondage réalisé en amont. Les retours recueillis ont guidé les choix techniques et fonctionnels.

Si les résultats sont prometteurs, notamment sur les plans, des améliorations restent possibles. Pour la suite, plusieurs pistes sont envisageables : élargir la base d'exemples annotés pour améliorer l'entraînement du modèle SpaCy, renforcer les modules existants par des règles plus fines, ou encore intégrer d'autres éléments du procès-verbal (comme la cohérence dans la définition des limites) dans le processus de vérification.

*Le détail des références bibliographiques citées dans ce résumé se trouve dans le mémoire complet.*

# Automatisation de la modélisation 3D de galeries souterraines et de leurs équipements, à partir de levés lasergrammétriques.

PFE présenté par : **Tom Cariat**  
Société d'accueil : **Fugro Geoid**  
Directeur de PFE : **Bertrand Chazaly**  
Correctrice : **Hélène Macher**  
Encadrant : **Bertrand Chazaly**



## 1. Introduction

L'objectif central de ce projet est d'optimiser le traitement des données souterraines issues de la lasergrammétrie et d'automatiser les étapes clés de la segmentation et de la reconstruction 3D. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la construction d'un laboratoire souterrain à Bure, destiné à l'enfouissement des déchets radioactifs. Une modélisation 3D précise est cruciale pour la planification, la construction, l'exploitation et la maintenance des installations. La technique d'acquisition utilisée repose sur la lasergrammétrie pour collecter des nuages de points représentant la géométrie des espaces souterrains. Actuellement, le traitement de ces données est manuel, ce qui est chronophage et complexe. L'automatisation vise à rendre la modélisation des galeries souterraines moins laborieuse et plus efficace, réduisant ainsi les délais de traitement et facilitant le travail des opérateurs.



Fig. 1 : Modèle 3D d'une galerie souterraine réalisée par Fugro

Nous pouvons souligner les défis liés à la modélisation automatique des galeries souterraines, notamment la diversité de leurs formes, textures et objets, ainsi que les défauts inhérents aux nuages de points. Les nuages de points obtenus peuvent présenter divers défauts, tels que des occultations, du bruit et une densité variable de points. L'hétérogénéité des données rend difficile le traitement et la segmentation des nuages de points, nécessitant alors des solutions spécifiques pour chaque type d'objet.

Nous avons décrit les différentes étapes du processus de modélisation 3D. La première étape d'acquisition consiste à collecter des données tridimensionnelles de l'environnement souterrain à l'aide d'un scanner laser, obtenant ainsi des nuages de points bruts. Ces derniers nécessitent un prétraitement, incluant des opérations de fusion, de filtrage et d'échantillonnage, avant de pouvoir être utilisés pour la modélisation. La segmentation consiste à découper le nuage de points en régions

significatives correspondant aux différents éléments de l'environnement souterrain, comme les parois et le sol. La reconstruction constitue l'étape finale, où le modèle 3D complet et détaillé est créé à partir des données segmentées, en utilisant des logiciels tels qu'AutoCAD et Cyclone 3DR.

## 2. Etat de l'art

Une étude bibliographique ciblée nous permet de remarquer différentes méthodes de segmentation et de reconstruction 3D. Par exemple pour la segmentation, l'ajustement de primitives géométriques identifie et ajuste des formes géométriques simples aux données du nuage de points. Les méthodes de cluster regroupent les points du nuage en fonction de leur similarité, comme leur densité ou leurs propriétés géométriques. La croissance par région ajoute progressivement des points voisins qui satisfont à certains critères de similarité, à partir d'un point ou d'un groupe de points initial. Puis, pour la reconstruction, le maillage triangulaire est utilisé pour créer un maillage des objets directement à partir du nuage de points, correspondant à la surface brute de l'objet. Les algorithmes d'ajustement déterminent les paramètres d'un modèle géométrique qui s'adapte au mieux à un ensemble de points correspondant à un objet. Ceux de reconnaissance permettent d'identifier une forme à partir d'une base de données. Enfin, les méthodes d'extractions effectuent un tri des points du nuage pour déterminer lesquels appartiennent à la forme demandée.

Nous pouvons alors diviser les différents éléments du nuage de points en différentes catégories d'objets afin d'employer des méthodes spécifiques adaptées à chaque type d'objet. Les parois présentent souvent des surfaces irrégulières et complexes, nécessitant des méthodes spécifiques pour leur modélisation. Les objets aux géométries variables tels que les tuyaux et les gaines, qui n'ont pas de dimensions standards, nécessitent des algorithmes capables de les reconnaître et de les reconstruire. Les objets aux géométries constantes comme les extincteurs et les coffrets électriques, qui ont des dimensions standardisées, peuvent être modélisés à partir de bibliothèques d'objets existantes. Finalement, de nombreux objets indésirables sont présents dans le nuage, nécessitant un filtrage manuel permettant de les supprimer de la scène.

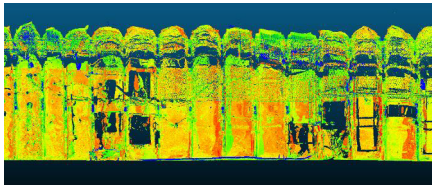


Fig. 3 : Catégorie Paroi

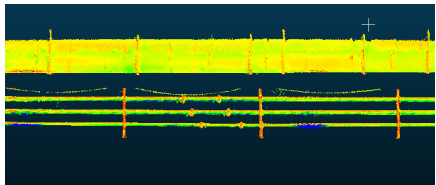


Fig. 2 : Catégorie Géométries variables

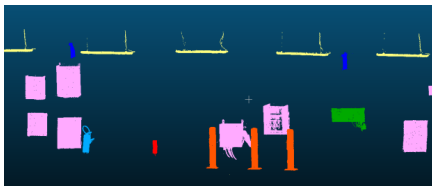


Fig. 5 : Catégorie Géométries constantes

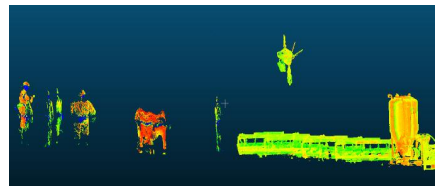


Fig. 4 : Catégorie Objets indésirables

### 3. Utilisation d'outils existants

Nous commencerons par mentionner plusieurs outils existants au sein de l'entreprise pour accélérer le processus de traitement, tels que des scripts pour automatiser la fusion et le rééchantillonnage des nuages de points. Un exécutable a également été développé pour transformer un nuage de points cylindrique en une surface plane, facilitant la segmentation et réduisant drastiquement le temps de traitement manuel de celui-ci.

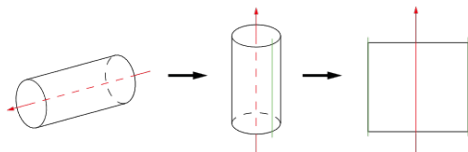


Fig. 7 : Schématisation du déroulé d'un nuage

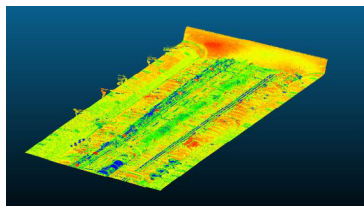


Fig. 6 : Exemple de nuage déroulé

De plus, des plugins comme Canupo et RANSAC ont été utilisés pour la classification et la segmentation des nuages de points. Le plug-in Canupo a trouvé son utilité pour la segmentation du nuage. Très rapidement, l'algorithme est capable de filtrer les points qui appartiennent à cet élément, qui ne sera pas modélisé, et qui est difficile à filtrer manuellement. Quant à l'algorithme de Ransac, il sera utile pour la segmentation automatique des géométries variables. Ce plug-in est utile pour l'extraction de primitives géométriques simples, comme les cylindres ou les plans, dans une scène complète. Nous l'utiliserons donc pour extraire simplement les points appartenant aux gaines ou aux tuyaux présents dans les souterrains.

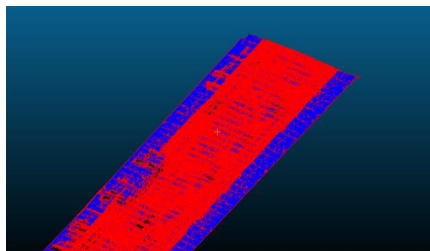


Fig.8 : Filtrage du grillage par Canupo

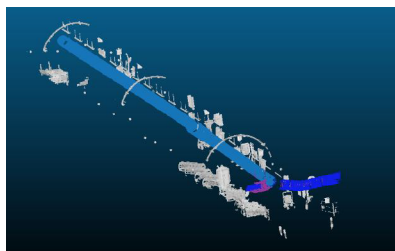


Fig.9 : Segmentation d'une gaine par Ransac

### 4. Développement d'outils spécifiques

Nous avons développé des outils spécifiques pour accélérer le processus de modélisation, notamment une intelligence artificielle pour la segmentation et utilisé un outil de programmation visuelle pour la reconstruction automatique. Une IA nommée PointNet a été mise en place pour attribuer des étiquettes à chaque point du nuage automatiquement. L'IA a été entraînée sur la base de données S3DIS, comprenant 6000 m<sup>2</sup> de données intérieures avec de nombreux objets. Cependant, pour la mettre en place dans notre contexte, nous manquons encore de données d'entraînement. Aussi, un outil de programmation visuelle, Dynamo, a été utilisé pour automatiser la reconstruction des éléments à partir des nuages de points, réduisant le temps de création des modèles. L'algorithme fonctionne déjà très bien pour les géométries variables. Le développement final de l'outil de reconstruction pour les géométries constantes nécessite des compétences avancées en programmation et pourrait faire l'objet d'un approfondissement futur.



Fig. 10 : Nuage S3DIS brut

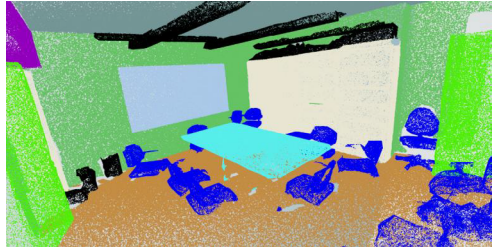


Fig. 11 : Nuage S3DIS segmenté par PointNet

## 5. Pistes d'améliorations

Nous avons identifié plusieurs pistes d'amélioration pour optimiser le processus de modélisation 3D, telles que l'optimisation des scans, l'utilisation de nouvelles méthodes d'acquisition et l'exploration d'autres logiciels et plugins. Nous suggérons par exemple d'optimiser les scans en multipliant les positions ou en utilisant des méthodes d'acquisition alternatives comme la photogrammétrie ou le scanner laser à main. Nous recommandons aussi d'explorer d'autres logiciels et plugins afin de trouver les outils les plus performants et adaptés aux besoins du projet. Les pistes d'amélioration proposées visent à optimiser davantage le processus de modélisation, en testant de nouvelles méthodes et en intégrant des outils plus efficaces.

## 6. Conclusion

En conclusion, ce projet de fin d'études présente des avancées significatives dans l'automatisation du processus de modélisation 3D des galeries souterraines de l'ANDRA. Les outils développés, qu'ils soient basés sur l'IA, sur des plug-ins existants ou sur des scripts personnalisés, constituent une base solide pour les futurs travaux de recherche et développement dans ce domaine. Les pistes d'améliorations proposées ouvrent des perspectives intéressantes pour optimiser davantage le processus de modélisation. L'automatisation de la segmentation et de la reconstruction 3D permettra de gagner du temps, d'améliorer la précision des modèles et de simplifier le travail des opérateurs, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des données 3D des galeries souterraines.

## 7. Références

[Berrios, 2022] Berrios Isaac – Point Net From Scratch – Medium – 2022

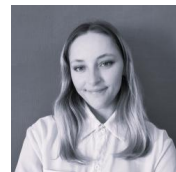
[Bey et al., 2011] Bey Aurélien, Chaîne Raphaëlle, Marc Raphaël, Thibault Guillaume - Détection de cylindres dans les nuages de points de scènes industrielles basée sur l'utilisation de modèles 3D a priori – Revue Électronique Francophone d'Informatique Graphique - 2011

[Cao et al., 2024] Cao D., Du M., Nie S., Wang C., Yang Z., Zhao H. – Cylinder point extraction in industrial scenario point clouds using multiscale prospecting - IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement – 2024

[Crovella, 2022] Crovella Paul – Semi-Autoatic Pipe Network Reconstruction Using Point Cloud Data – Construction Research Congress – 2022

[Ji et al., 2023] Ji Ankang, Xu Yuelei, Zhang Zhaoxiang, Zhang Limao, Zhou Qing - Deep learning for large-scale point cloud segmentation in tunnels considering causal inference – Automation in Construction – 2023

# Mise en place de processus de modélisation de maquettes BIM orientées structure métallique, à partir de nuages de points



*PFE présenté par :* **Apolline Clerc**  
*Société d'accueil :* **FUTURMAP**  
*Directeur de PFE :* **Thibault Bavoux**  
*Correcteur-rices :* **Tania Landes et Emmanuel Alby**  
*Encadrant :* **Thibault Bavoux**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche d'amélioration des processus de modélisation structurelle sur nuages de points au sein de la société Futurmap, basée à Lyon et à Madagascar. En effet, ces dernières années, de nombreux besoins ont émergé, notamment au sein des bureaux d'études structure, concernant la réalisation de maquettes numériques "as built", avec un enjeu majeur : pouvoir réexploiter le modèle ainsi produit dans des logiciels spécialisés de calcul et de gestion. Pour relever ce défi, il est donc primordial, pour une entreprise telle que Futurmap, de faire évoluer et d'adapter ses méthodes de production, et ce, pour toutes les typologies de projets.

Partant de ce principe, nous avons pu établir un constat simple : les travaux actuels de modélisation, principalement sur Revit, sont davantage orientés vers la représentation géométrique que vers la restitution fidèle des caractéristiques structurelles des bâtiments. Ce manque d'adéquation avec les besoins métier entraîne des ajustements conséquents de la part des utilisateurs finaux et peut également avoir un impact financier. De plus, le processus de modélisation reste chronophage, notamment pour les éléments complexes, difficilement interprétables sur un nuage de points.

Ce travail se focalise sur les structures métalliques, un domaine clé en raison du volume croissant de projets liés aux hangars, entrepôts industriels ou encore plateformes pétrolières. Leur complexité réside, entre autres, dans la diversité des profils et des assemblages, rendant la modélisation plus exigeante. L'objectif est donc d'identifier et de tester des solutions permettant d'optimiser ce processus, tant en termes de rapidité que de précision structurelle.

À court terme, l'étude vise à réaliser un état de l'art des méthodes de modélisation, des outils d'automatisation et des enjeux d'interopérabilité entre logiciels. L'objectif est de proposer des méthodes plus efficaces et de réduire le temps de modélisation tout en garantissant un niveau de détail conforme aux exigences des maquettes LOD 200, 300 et 400. Le but est d'offrir un panel de solutions adaptées aux différents usages, allant de la simple visualisation à l'exploitation avancée des modèles.

À moyen terme, Futurmap cherche à diversifier son offre et à améliorer son positionnement sur le marché de la modélisation structurelle afin de mieux répondre aux attentes de ses clients.

Pour cela, le projet s'articule en quatre grandes étapes :

1. Un état de l'art sur les principes constructifs, les outils d'automatisation et les enjeux d'interopérabilité.
2. Un audit des logiciels de modélisation et d'exploitation.
3. Une étude comparative de trois logiciels de modélisation afin d'identifier les avantages et les limites de chacun.
4. Une optimisation des processus grâce à une amélioration de l'interopérabilité et une validation des maquettes sur différents logiciels d'exploitation.

## 2. Audit des solutions existantes

Cet audit s'inscrit donc à la suite de l'état de l'art et nous a permis d'identifier un maximum d'outils et de logiciels existants pouvant répondre à notre problématique.

Afin de cibler au mieux les solutions adaptées à nos besoins, nous avons établi une liste de critères essentiels. Ceux-ci incluent, entre autres, la prise en charge des nuages de points ainsi que l'accès à une vaste bibliothèque d'éléments conformes aux normes strictes régissant les structures métalliques (assemblages, profilés, etc.).

Cette étude s'articule autour de trois axes : les solutions BIM automatiques et semi-automatiques, les solutions dites « manuelles », et enfin les logiciels d'exploitation. L'objectif était d'identifier les outils les plus couramment utilisés et d'anticiper les besoins des utilisateurs sur ce type de projets.

Les conclusions de cet audit nous ont permis d'identifier **Revit**, **Tekla Structures** et **Advance Steel** comme les logiciels les plus pertinents pour répondre à notre problématique, au regard des critères retenus. Ils feront donc l'objet d'une étude plus approfondie dans la suite du travail. En revanche, concernant les logiciels d'automatisation, aucun outil actuellement disponible sur le marché ne s'est révélé suffisamment performant, à l'exception d'**EdgeWise**. Ils n'ont donc pas fait l'objet d'une analyse détaillée, bien que leur recensement permette de suivre leur évolution à l'avenir. Enfin, pour les logiciels d'exploitation, **Robot** a été retenu en raison de sa large adoption ainsi que de son intégration dans la suite Autodesk, facilitant son acquisition et son interopérabilité avec Revit, entre autres.

## 3. Etude comparative

L'étude comparative a pour objectif de démontrer l'intérêt des différentes méthodes et outils retenus, en mettant en évidence leurs avantages et leurs inconvénients, aussi bien dans un contexte de modélisation complète que lors de la création d'éléments spécifiques. Pour ce faire, nous avons sélectionné trois projets aux typologies variées, qui ont ensuite été modélisés sur les logiciels Tekla Structures, Advance Steel et Revit (*Figure 1*).

Différents points d'attention ont été analysés, notamment l'expérience utilisateur, l'ergonomie de l'interface, le temps de traitement des différentes étapes, la diversité des éléments proposés, la gestion du nuage de points, ainsi que la qualité de la maquette finale.

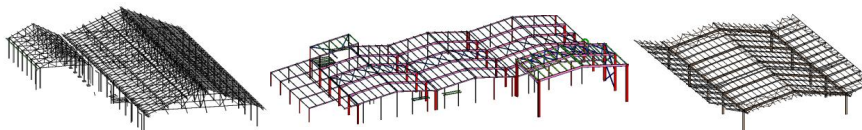


Figure 1 : Projets sélectionnés

Les principales conclusions de ce travail montrent que les trois logiciels imposent des workflows distincts pour la modélisation sur nuage de points. Revit reste le plus simple d'utilisation tout en offrant une efficacité satisfaisante. Tekla, bien que plus complexe à prendre en main, se révèle assez performant une fois maîtrisé. En revanche, Advance Steel s'avère peu adapté à la rétroconception, rendant son utilisation exclusive difficilement envisageable.

Ce dernier a donc été relégué à un rôle complémentaire de Revit, notamment grâce à sa capacité à générer facilement des éléments d'ornementation via son interface de dessin 2D et à la possibilité d'y appliquer un profilé (*Figure 2*).

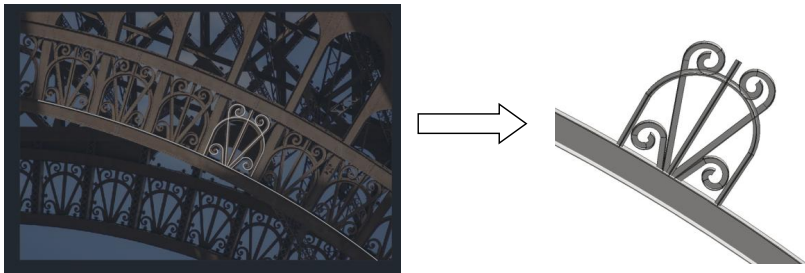


Figure 2 : Dessin 2D de l'ornementation sur Advance Steel (à gauche) et résultat, après importation sur Revit (à droite)

Parmi les différences majeures entre ces logiciels, on note que Tekla, conçu pour les ingénieurs, se distingue par sa gestion avancée des assemblages métalliques et de la préfabrication. Toutefois, il ne propose ni arborescence de projet ni la possibilité de représenter des éléments architecturaux tels que les murs ou les fenêtres. Revit, quant à lui, adopte une approche plus globale du projet (architecture, structure, MEP), mais reste limité pour les structures métalliques complexes ainsi que pour la gestion détaillée des assemblages. Son interopérabilité avec d'autres outils de la suite Autodesk constitue néanmoins un atout.

En ce qui concerne la gestion du nuage de points, Tekla se démarque légèrement grâce à des outils mieux adaptés à son exploitation directe, notamment la possibilité d'effectuer des comparaisons précises entre la modélisation et le nuage de points (Figure 3).

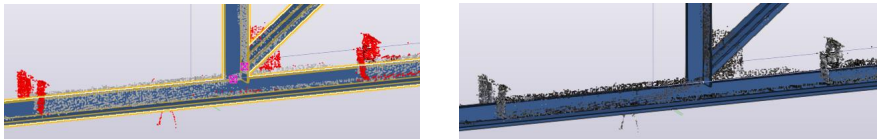


Figure 3 : Utilisation de l'outil "collision" sur Tekla pour mettre en valeur les points situés à plus de 2 cm de l'élément modélisé

En conclusion, l'intérêt de ces logiciels réside, en partie, dans leur capacité à faciliter la création de maquettes 'as-built'. En effet, la rétroconception reste aujourd'hui un défi en raison de l'absence d'outils dédiés et pleinement adaptés à la gestion de nuages de points.

#### 4. Optimisation des résultats

L'exploitation des maquettes vise à définir le scénario de modélisation le plus adapté en fonction des besoins et des attentes du client. L'objectif est de déterminer si une interopérabilité efficace entre les logiciels est possible afin de garantir un workflow optimisé, exploitant les atouts de chacun, conduisant à des résultats variés et/ou assurant une meilleure qualité finale. Pour cela, nous avons intégré des plug-ins et des extensions facilitant le transfert direct entre ces logiciels, ainsi qu'avec le logiciel d'exploitation Robot.

L'étude sur l'interopérabilité, fondée sur l'état de l'art, s'est principalement concentrée sur les différentes méthodes de transfert d'un projet : direct (plug-in), indirect (IFC) ou via une API. Il en ressort que l'utilisation d'un lien direct constitue la solution la plus optimale, notamment entre Revit et Advance Steel. À l'inverse, les échanges via une maquette IFC se révèlent bien moins performants, en raison de leur caractère chronophage et de leur manque de précision. Ils ne représentent donc pas une solution viable à ce stade, comme l'ont démontré les éléments manquants ou mal interprétés lors du transfert.

Par la suite, l'importation des modèles créés dans un logiciel d'exploitation a fait l'objet d'une analyse approfondie afin de définir de bonnes pratiques de modélisation et d'assurer une visualisation optimale, réduisant autant que possible la nécessité pour les clients de remodeliser certains éléments. Il a été démontré que la création de modèles analytiques de qualité était essentielle pour optimiser cette importation (Figure 4).

L'ensemble du processus de création de ces maquettes a ensuite été synthétisé dans une notice interne. Les résultats obtenus confirment qu'une réelle valeur ajoutée peut être apportée au travail de modélisation. Sur Revit, nous avons identifié des points de vigilance et des axes d'amélioration pour garantir la fiabilité du modèle analytique et son importation dans un logiciel de calcul. Par ailleurs, certaines limites ont été mises en évidence, permettant d'établir une communication claire avec les futurs clients. Concernant Tekla, l'analyse du logiciel nous a permis de mieux comprendre son fonctionnement, d'évaluer les conditions optimales de son utilisation et d'identifier les types de projets pour lesquels il présente un réel intérêt.

Enfin, cette analyse a permis de mettre en évidence quatre scénarios de modélisation (100 % Revit, 100 % Tekla, hybride Tekla/Revit et hybride Revit/Advance Steel), aboutissant à quatre typologies de maquettes structurales adaptées à une clientèle variée, à différents types de projets et à diverses structures.

Elles sont définies comme suit :

- **Maquette d'encombrement (géométrique)**
- **Maquette et modèle analytique exploitables directement**
- **Maquette de haute précision (LOD élevé)**
- **Maquette mêlant éléments d'ornementation métallique et structure**

Ces produits ont ensuite été formalisés sous forme de notices commerciales détaillant leurs atouts, leurs limites, les logiciels et outils employés ainsi que le profil des clients auxquels ils sont principalement destinés. Les méthodologies de création ont été synthétisées sous forme d'organigramme.

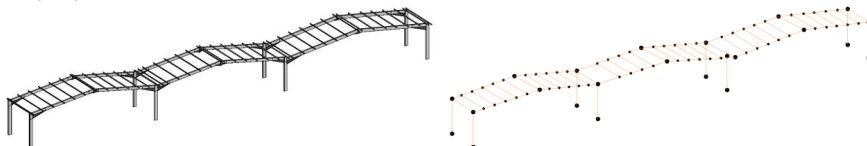


Figure 4 : Modèle physique Revit (à gauche) et analytique (à droite)

## Conclusion

L'analyse comparative de Tekla, Revit et Advance Steel a mis en évidence que chaque logiciel offre des solutions adaptées à des types de projets spécifiques. Tekla reste la meilleure option pour la modélisation de maquettes avec un LOD élevé. Revit se distingue par sa polyvalence, particulièrement pour les projets globaux intégrant structure, architecture et réseaux. Enfin, Advance Steel s'avère être un excellent outil pour la représentation détaillée des éléments d'ornementation. Bien que Tekla réponde efficacement aux besoins de modélisation structurelle, son adoption doit être considérée avec précaution. Son acquisition représente un investissement conséquent, non seulement en raison de son coût, mais aussi en raison de sa courbe d'apprentissage, qui nécessite des formations ainsi qu'un matériel performant. La rentabilité de cet investissement dépendra de la demande du marché et de l'émergence d'un besoin réel. Futurmap devra donc anticiper les évolutions du secteur afin de déterminer si Tekla peut devenir un outil stratégique, lui permettant ainsi de renforcer son positionnement en proposant de nouveaux services.

# Réalisation du jumeau numérique d'un groupe scolaire pour préconiser des usages économes et des bouquets de travaux de rénovation

PFE présenté par :

Lucas Straumann

Société d'accueil :

Pôle Build&Connect puis Imag'ing

Correctrice :

Hélène Macher

Encadrants :

Philippe Jacglin puis Thomas Savry



---

## Introduction

Face aux enjeux environnementaux, énergétiques et économiques croissants, la rénovation des bâtiments est devenue une priorité pour réduire la consommation d'énergie tout en améliorant la performance énergétique des infrastructures et le confort des habitants. En France, les bâtiments représentent environ 44 % de la consommation énergétique totale, un chiffre qui souligne l'urgence d'adopter des stratégies efficaces pour limiter leur impact écologique. Parmi les solutions innovantes, l'intégration des outils numériques, notamment le BIM (*Building Information Modeling*) et les jumeaux numériques, se présente comme une approche prometteuse pour optimiser la gestion et la rénovation énergétique des bâtiments.

Dans ce contexte, ce projet de fin d'études s'inscrit dans une démarche d'expérimentation et de développement d'un jumeau numérique appliqué à un groupe scolaire. L'objectif est double : proposer des solutions pour une gestion plus efficiente des ressources énergétiques et accompagner les collectivités dans la prise de décisions en matière de rénovation. Ce projet a été initialement porté par le Cluster Patrimoine Bâti 4.0, situé à Troyes, qui a missionné le pôle Build&Connect de ces missions grâce à l'installation de capteurs et régulateurs par Europrod, concepteur français de solutions IoT. Le pôle avait pour mission de mettre en relation différents acteurs du BTP et d'apporter une expertise dans le domaine du développement durable et de l'innovation numérique pour le bâtiment, cependant, la liquidation du pôle en février 2025 a conduit à un transfert du projet vers la société Imag'ing, spécialisée dans la modélisation BIM et la gestion des données du bâtiment.

Le projet consiste donc à concevoir un jumeau numérique d'un établissement scolaire de la métropole auboise afin d'analyser ses consommations énergétiques, d'évaluer des scénarios d'amélioration et de proposer des préconisations de travaux de rénovation basées sur des calculs thermiques. La problématique est donc : **Comment concevoir et réaliser le jumeau numérique d'un groupe scolaire pour préconiser des usages économes en énergie et des bouquets de travaux de rénovation ?**

L'ensemble de ce travail vise ainsi à démontrer la pertinence de l'utilisation du jumeau numérique dans une démarche d'optimisation énergétique et à proposer des perspectives pour son développement à plus grande échelle. La première partie présente un état de l'art sur les solutions numériques appliquées à la gestion énergétique des bâtiments, en détaillant les concepts de BIM, IoT et jumeau numérique. La deuxième partie expose la mise en œuvre du projet, de la modélisation de la maquette numérique à la création du jumeau numérique et à l'exploitation des données. Enfin, la dernière partie est consacrée à l'analyse des visuels générés et aux calculs thermiques réalisés pour évaluer les différentes stratégies de rénovation envisageables.

## 1. État de l'art sur les solutions numériques pour la gestion énergétique des bâtiments

La transition numérique offre des outils puissants pour améliorer la gestion et la consommation énergétique des bâtiments. Parmi eux, trois technologies principales se distinguent : le BIM, l'Internet des Objets (IoT) et les jumeaux numériques. Le BIM permet la création de maquettes numériques détaillées des bâtiments, facilitant l'optimisation des interventions et la simulation des performances énergétiques. Grâce aux maquettes BIM, il est possible d'anticiper les besoins de rénovation et d'améliorer l'efficacité énergétique dès la phase de conception. Cette approche est particulièrement intéressante pour les bâtiments anciens qui nécessitent une refonte en profondeur. L'intégration de capteurs IoT dans les bâtiments permet une collecte continue de données sur la consommation énergétique, la température, l'humidité ou encore la qualité de l'air. Ces données sont essentielles pour affiner les stratégies d'optimisation énergétique et améliorer le confort des occupants. Grâce à cette technologie, il est possible de détecter des déperditions thermiques non visibles à l'œil nu et d'ajuster les paramètres de régulation énergétique en fonction des conditions réelles d'utilisation du bâtiment. Enfin, le jumeau numérique associe BIM et IoT pour créer une réplique virtuelle du bâtiment capable de simuler son comportement énergétique en temps réel. Cette technologie permet de tester différents scénarios de rénovation et d'identifier les solutions les plus performantes. Par exemple, elle peut être utilisée pour comparer l'efficacité de divers matériaux d'isolation, mesurer l'impact de nouvelles ouvertures ou encore prévoir l'usure des équipements énergétiques.

En utilisant ces solutions numériques, il existe des approches visant à réduire la consommation énergétique des bâtiments. Parmi elles, l'optimisation des comportements des occupants joue un rôle majeur. Une meilleure sensibilisation aux enjeux de l'efficacité énergétique, couplée à des outils pédagogiques interactifs tels que le jumeau ou les capteurs IoT, permet de réduire la consommation d'énergie sans nécessiter d'importants investissements technologiques. Des solutions plus passives, comme l'amélioration de l'isolation thermique ou l'optimisation des apports solaires, peuvent également offrir des gains énergétiques significatifs mais demandent un investissement initial plus important. Cette dernière solution peut tout de même être optimisée par le BIM voire le jumeau numérique.

Des expérimentations et projets similaires au cas d'étude de ce PFE ont été menées dans des immeubles résidentiels ainsi que dans d'autres établissements scolaires et bâtiments tertiaires. Plusieurs collectivités ont déjà testé l'intégration du BIM et des jumeaux numériques pour améliorer la gestion énergétique de leurs infrastructures. Des plateformes comme Autodesk Tandem ou dTwin ont permis d'obtenir des résultats concrets en matière de réduction des consommations et d'optimisation des coûts d'exploitation. Ces expériences démontrent l'intérêt d'une approche numérique pour la gestion énergétique des bâtiments publics et ouvrent la voie à une généralisation de ces technologies à plus grande échelle.

## 2. Création de maquettes et de jumeaux numériques pour un groupe scolaire

L'expérimentation a été réalisée sur un groupe scolaire à Troyes, sélectionné en raison de son fort potentiel d'optimisation énergétique. L'établissement a été équipé de capteurs IoT pour surveiller divers paramètres et alimenter le jumeau numérique en données. Les capteurs installés mesurent non seulement la température et l'humidité, mais aussi la concentration de CO<sub>2</sub> et les flux d'énergie électrique au sein du bâtiment. Ces données permettent d'identifier les périodes de forte consommation et d'adapter les usages en conséquence grâce à des régulateurs.

À partir des plans existants et des relevés sur site, une maquette numérique BIM a été créée sur Revit. Cette maquette a ensuite été contrôlée et optimisée pour être compatible avec la plateforme de jumeau numérique. Des tests d'interopérabilité ont été réalisés pour s'assurer que les données

collectées en temps réel s'intègrent correctement à la simulation dynamique. Cette étape a permis de corriger certaines incohérences entre la réalité physique du bâtiment et sa représentation numérique.

Les données collectées par les capteurs IoT ont été intégrées à la maquette numérique via une plateforme dédiée qu'est Tandem, permettant d'analyser en temps réel les performances énergétiques du bâtiment (Figure 1). L'objectif de cette intégration est d'optimiser l'utilisation des ressources et d'identifier les postes de consommation les plus critiques pour proposer des solutions adaptées. Une analyse fine des comportements énergétiques a été menée pour détecter les écarts entre la consommation théorique et la consommation réelle.

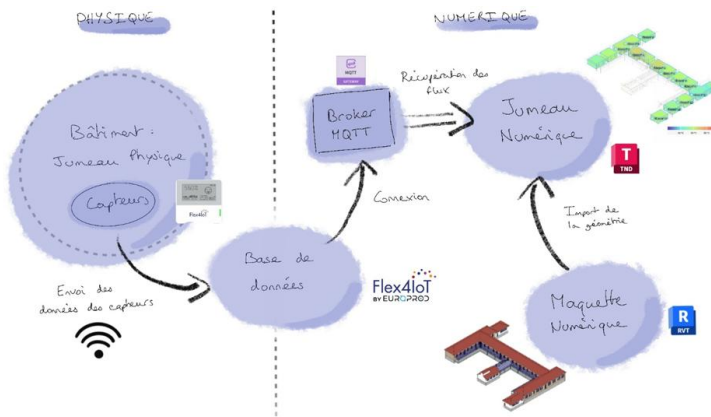


Figure 1 : Schéma de la solution utilisée

### 3. Visualisation et analyse des données des capteurs IoT grâce aux jumeaux numériques

Enfin, une interface de visualisation a été développée sur Tandem pour rendre les données accessibles aux différents acteurs du projet. Des graphiques dynamiques et des représentations 3D permettent d'interpréter facilement les informations et d'orienter les décisions en matière d'optimisation énergétique (Figure 2). Ces outils de visualisation sont essentiels pour faciliter la communication entre les différents intervenants du projet, qu'ils soient ingénieurs, architectes ou gestionnaires d'établissements scolaires.

Les simulations thermiques ont permis d'identifier les faiblesses énergétiques du bâtiment et de proposer des préconisations adaptées. Différents scénarios ont été comparés afin de sélectionner les solutions les plus rentables et efficaces. Ce travail met ainsi en évidence l'intérêt du jumeau numérique pour optimiser la gestion énergétique des bâtiments et proposer des pistes d'amélioration basées sur des analyses précises et dynamiques.

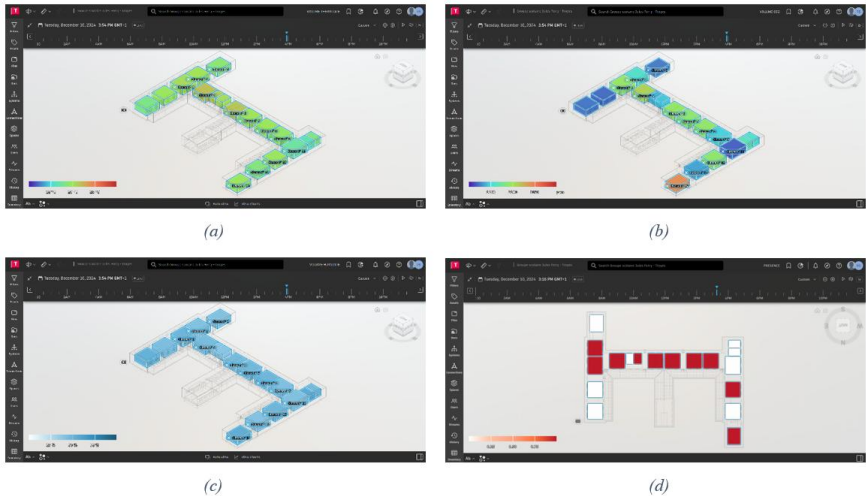


Figure 2 : Visuels créés pour l'école primaire  
 (a) : Température ambiante, (b) : Concentration de CO<sub>2</sub>, (c) : Pourcentage d'humidité relative, (d) : Présence

## Conclusion

Ce projet de fin d'études a permis d'explorer et d'expérimenter l'usage des jumeaux numériques dans la gestion énergétique des bâtiments scolaires. L'approche adoptée, combinant modélisation BIM, intégration de capteurs IoT et simulations thermiques, a démontré son potentiel pour mieux comprendre et optimiser la consommation d'énergie d'un établissement. Les résultats obtenus confirment que l'utilisation d'un jumeau numérique permet non seulement de visualiser et d'analyser les performances énergétiques en temps réel, mais aussi d'anticiper les travaux de rénovation les plus efficaces.

Cependant, malgré ces avancées, certaines limites doivent être prises en compte. La mise en place d'un jumeau numérique demande des investissements initiaux conséquents en termes de matériel, de formation et de temps d'implémentation. De plus, la fiabilité des analyses repose sur la qualité des données collectées et leur bonne interprétation. Ces contraintes nécessitent une évolution des pratiques et une meilleure intégration des outils numériques dans les politiques de gestion du patrimoine bâti.

À l'avenir, le développement de solutions plus accessibles et interopérables pourrait faciliter l'adoption des jumeaux numériques à plus grande échelle. L'intelligence artificielle et le *machine learning* offrent également des perspectives intéressantes pour affiner les prédictions et automatiser certaines prises de décision. Enfin, une sensibilisation accrue des gestionnaires et utilisateurs des bâtiments aux bénéfices de ces technologies sera essentielle pour maximiser leur impact et garantir des économies d'énergie durables. Ce travail constitue ainsi une étape vers une meilleure maîtrise énergétique des bâtiments publics et pose les bases d'une transition numérique efficace dans le secteur du bâtiment.

# Développement d'un outil de calcul de l'exposition à la végétation en milieu urbain, par application de la règle 3-30-300



PFE présenté par : **Elodie Lemonnier**  
Société d'accueil : **Virtual City Systems**  
Directeur de PFE : **Thomas Adolph**  
Correcteur : **Mathieu Koehl**



## 1. Introduction : contexte et objectifs du stage

La végétation prodigue de multiples services écosystémiques, c'est à dire des bénéfices pour le bien-être humain, qui sont essentiels pour garantir la qualité de vie, et donc la santé, des habitants en ville. Face à un enjeu de densification des villes, la règle 3-30-300 introduite par Konijnennijk (2022) se veut être un outil d'aide à la planification urbaine, qui s'appuie sur des valeurs seuils, en cohérence avec la recherche scientifique. Chaque logement ou poste de travail doit bénéficier de :

- 3 arbres visibles depuis les fenêtres ;
- 30% de surface arborée dans le voisinage ;
- 300 mètres de distance pour atteindre le parc le plus proche.

L'objectif de ce PFE était de traduire ces principes sous forme de modèle de calcul SIG, et de le programmer en script Python. L'entreprise souhaite par la suite intégrer cet outil à son logiciel d'exploitation de jumeaux numériques. Les jeux de données ont été obtenus sur les plateformes open data des villes concernées par notre étude, ainsi que sur les BD OpenStreetMap, Urban Atlas, et ALKIS (qu'on peut considérer comme l'équivalent allemand de la BD Topo).

## 2. Visibilité

Plusieurs études ont associé l'exposition visuelle à des paysages naturels avec des bénéfices pour la santé de personnes confinées (personnes incarcérées en prison, patients en hôpitaux, population durant la pandémie de COVID 19). En dehors de période de confinement, un européen moyen passe plus de 90% de sa journée dans un milieu intérieur. La vue disponible par les fenêtres d'un bâtiment impacte le bien-être de ses occupants, principalement la présence de végétation. Seuls les arbres sont considérés pour ce paramètre, car c'est la végétation la plus courante et la plus visible en milieu urbain.

Plusieurs études observent que la densité de végétation mesurée sur des images en perspective aérienne et celle issue d'images à hauteur du regard (*streetscape* ou *eye-level* dans la littérature) ne sont que faiblement corrélées. Pour représenter le paramètre de visibilité, nous cherchons à nous placer à hauteur de regard, mais ce type d'acquisition est difficilement pris en charge par des méthodes SIG.

Une première méthode s'appuie sur l'outil Viewshed Green Visibility Index, développé par Labib et al. (2021). Les données aériennes sont retranscrites dans une perspective humano centrée grâce à la méthode *viewshed analysis*, qui utilise un Modèle Numérique de Surface pour déterminer les pixels visibles depuis un point d'observation donné. En y superposant une cartographie raster de la canopée, l'outil calcule un score de visibilité végétale, obtenu par ratio du nombre de pixels verts visibles par rapport à l'ensemble des pixels visibles. Afin de reproduire la taille relative des éléments de paysage dans le champ de vision, les pixels sont pondérés selon la distance au point d'observation. La valeur seuil de 3 arbres visibles n'est pas directement transposable sous forme de

ratio, grâce à une étude empirique sur la zone d'étude de Berlin, elle est placée à 10% de visibilité végétale.

Pour modéliser la vue depuis les fenêtres d'un bâtiment par la méthode *viewshed analysis*, nous proposons d'isoler les pixels de façade du bâtiment et de calculer la moyenne de visibilité végétale sur cet ensemble de pixels. Les pixels sont sélectionnés en retrait de la façade, la distance de retrait est ajustée selon la résolution du MNS. Ceci permet de définir la hauteur d'observation depuis la hauteur du sol et non de la toiture. Évidemment les façades mitoyennes ne sont pas concernées par le calcul de visibilité, et les pixels contenus dans des polygones de bâtiments ont été supprimés de la sélection.

Une deuxième méthode, que je propose de qualifier d'analyse du champ visuel obstrué, utilise la couche vectorielle des polygones de bâtiment pour déterminer si les pixels de végétation sont visibles depuis un point d'observation donné. Un pixel est considéré comme visible si le segment qui relie son centre au point d'observation n'intersecte aucun élément de la couche bâtiment. Contrairement à la méthode par *viewshed analysis*, la hauteur des éléments de paysage ne rentre pas en compte.

Son atout est de pouvoir modéliser et orienter la géométrie du champ visuel depuis une fenêtre, et d'aligner le point d'observation sur l'emplacement des fenêtres lorsque celui-ci est connu. Nous avons placé la valeur seuil à 50m<sup>2</sup>.

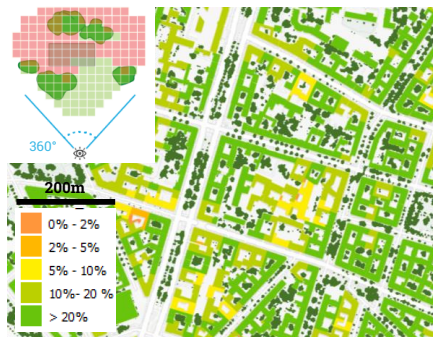


Figure 1 : Score de visibilité obtenu par la méthode *viewshed analysis* (Berlin Friedrichshain)



Figure 2 : Score de visibilité obtenu par la méthode de champ visuel obstrué (Berlin Friedrichshain)

### 3. Disponibilité

Une couverture arborée d'au moins 30 % en milieu urbain a été associée de nombreux bénéfices pour la santé des habitants. De plus, la canopée urbaine joue un rôle majeur dans les effets de rafraîchissement, de réduction de la pollution et du bruit, de facilitation des interactions sociales à l'échelle du quartier, et de maintien de la biodiversité.

La modélisation de ce paramètre est assez simple, mais la fiabilité du résultat repose grandement sur la qualité de la cartographie de la canopée qui est fournie en entrée du calcul. Pour pallier aux cas où cette donnée n'est pas disponible, nous avons développé une méthode d'extraction de la canopée qui repose sur le traitement d'orthophotographies multispectrales de haute résolution (minimum 1m).

Nous avons suggéré d'introduire des indicateurs de qualité de la végétation, pour pondérer les valeurs des pixels de canopée, selon s'ils génèrent plus ou moins de services écosystémiques. À ce titre le NDVI, qui est basé sur l'émissivité des végétaux dans le domaine infrarouge, fournit une indication sur la santé des plantes. Le *Forest Index*, tel qu'il est décrit par Bobálová et al. (2024), est significativement corrélé à l'indice de surface foliaire (*Leaf Area Index*). Plus la surface de feuillage est importante, plus l'arbre procure un effet rafraîchissant par évapotranspiration. Sur la base des travaux de Hofmann et al. (2011), on peut proposer une pondération des pixels de canopée selon le logarithme de la hauteur de végétation.



Figure 3 : Variations du NDVI (gauche), du Forest Index (milieu) et de la hauteur de végétation (droite) sur la zone d'étude Berlin Friedrichshain. Les zones qui présentent des valeurs plus hautes (en vert foncé) sur ces indicateurs sont identifiées comme de la végétation de haute qualité

Nous choisissons d'agrèger le calcul de surface arborée selon une zone tampon autour de chaque bâtiment plutôt que selon les limites administratives, qui ne décrivent pas la réalité des déplacements des individus ni des effets de la végétation. Pour dimensionner cette zone tampon, nous nous référons à une méta-analyse de Browning & Lee (2017) comparant les distances tampons considérées sur un panel de 47 études médicales. Labib et al. (2020) expliquent qu'il est impossible de définir une distance tampon pour laquelle on observerait les meilleurs effets sur la santé, car les mécanismes par lesquels la végétation impacte notre santé sont multiples. Ils proposent donc une approche multiscalaire pour prendre en compte la multiplicité des échelles auxquelles les bénéfices de la végétation s'appliquent en milieu urbain.

En appliquant différentes variations du modèle de calcul aux différentes zones d'études considérées dans ce projet, nous avons été surpris de constater que la grande majorité des bâtiments ne satisfait pas le critère de 30% défini par Konijnendijk (2022). Une récente étude menée par Croeser et al. (2024) sur huit grandes agglomérations à travers le monde, aboutit aux mêmes constatations : la surface arborée des villes est globalement insuffisante pour assurer la qualité de vie des habitants.

#### 4. Accessibilité

La présence d'espaces verts encourage l'activité physique des individus qui habitent à proximité, ce qui impacte positivement leur santé physique et mentale. La fréquentation est globalement inversement proportionnelle à la distance : plus un parc est proche du domicile, plus il est fréquenté. Les études de terrain suggèrent que la distance idéale se situe entre 300 et 500 mètres. Les grands parcs sont plus attractifs, et individus peuvent être prêts à parcourir des distances plus grandes pour les atteindre, mais les micro-parcs de quartiers sont aussi un enjeu important pour les centres villes denses.

Pour modéliser l'accessibilité des parcs, nous nous basons sur les travaux de Wang et al. (2021). Nous définissons la zone d'influence de chaque parc par une géométrie d'isodistance, qui englobe toutes les destinations accessibles depuis un point de départ pour une distance donnée. Lorsque le polygone de bâtiment intersecte un polygone de zone d'influence, le parc auquel il correspond est considéré comme accessible. Le calcul de cette géométrie repose sur le réseau de circulation piétonne (couche de données vectorielles linéaires), il génère des erreurs lorsque cette couche est incomplète ou que les tronçons ne sont pas reliés. Notre modèle de calcul par isodistance ne prend pas en compte la topographie, qui peut également influencer les déplacements piétons, particulièrement dans les villes où le relief est très marqué.

Certains parcs sont accessibles par tous leurs abords mais en ville de nombreux parcs sont clôturés. Wang et al. (2021) recommandent de calculer l'accessibilité des parcs depuis les entrées. Ils proposent une méthode d'identification des entrées par intersection de la trame piétonne avec le

contour élargi du parc. Sur tous les tests que nous avons menés dans le cadre de ce projet, les polygones de parcs et les tronçons de chemins piétons ont été extraits de OSM, avec une qualité aléatoire mais globalement satisfaisante. Nous avons adapté la méthode pour mieux prendre en compte les anomalies et les spécificités de la base de données OSM (fusion des géométries adjacentes, recherche des entrées par intersection de la zone tampon pour les parcs sans entrées sauf jardins familiaux, identification des entrées privées).

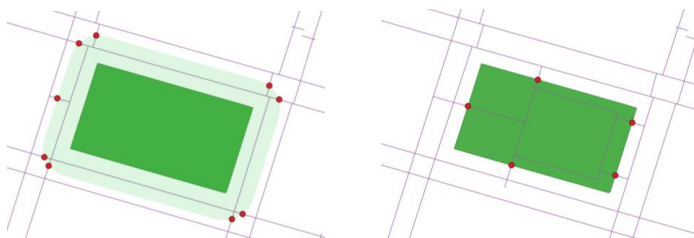


Figure 4 : Principes d'extraction des entrées d'un parc par zone tampon lorsque les géométries ne s'intersectent pas (à gauche) et sans zone tampon lorsque les géométries s'intersectent (à droite)

Nous proposons dans un second temps de définir la zone d'influence d'un parc selon son attractivité, en appliquant l'approche par niveaux fonctionnels théoriques, décrite par Stessens et al. (2017). L'attractivité est définie principalement par sa taille : plus un parc est grand, plus il s'adresse à une large échelle, plus il est petit, plus il s'adresse aux habitations situées à proximité immédiate. D'autres attributs tels que la présence d'équipements sportifs, de jeux pour enfants, de cours d'eau, ou la densité d'arbre sur le raster canopée peuvent aussi être pris en compte dans le degré d'attractivité.

## 5. Agrégation des composantes

L'approche la plus naturelle au regard de la formulation de la règle 3-30-300 consiste à compter le nombre de paramètres qui sont vérifiés à chaque adresse, c'est à dire exprimer un score entre 0 et 3, où 0 correspond au cas le plus défavorable et 3 correspond au cas le plus favorable. La limite de cette approche est de binariser des situations pour lesquelles la recherche scientifique n'observe pas de rupture nette. Une autre agrégation possible repose sur un système de notation de chaque composante, puis une combinaison linéaire. Ceci permet de pondérer différemment les composantes, et d'intégrer les facteurs de qualité qui ont été mentionnés. Croeser et al. (2024) suggèrent un système de notation allant de -5 à +5, où l'atteinte exacte du 3-30-300 constituerait le point zéro.

## 6. Bibliographie

- Bobáľová, H., Fal'án, V., Benová, A., Kožuch, M., Kotianová, M., & Petrovič, F. (2024). Measuring the quality and accessibility of urban greenery using free data sources: A case study in Bratislava, Slovakia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 93, 128217.
- Browning, M., & Lee, K. (2017). Within what distance does "greenness" best predict physical health? A systematic review of articles with GIS buffer analyses across the lifespan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 675.
- Croeser, T., Sharma, R., Weisser, W. W., et al. (2024). Acute canopy deficits in global cities exposed by the 3-30-300 benchmark for urban nature. *Nature Communications*, 15, 9333.
- Hofmann, P., Strobl, J., & Nazarkulova, A. (2011). Mapping Green Spaces in Bishkek—How Reliable can Spatial Analysis Be? *Remote Sensing*, 3(6), 1088-1103.
- Konijnendijk, C. C. (2022). Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3-30-300 rule. *Journal of Forestry Research*, 34(3), 821-830.
- Labib, S. M., Huck, J. J., & Lindley, S. (2021). Modelling and mapping eye-level greenness visibility exposure using multi-source data at high spatial resolutions. *Science of The Total Environment*, 755, 143050.
- Labib, S. M., Lindley, S., & Huck, J. J. (2020). Scale effects in remotely sensed greenspace metrics and how to mitigate them for environmental health exposure assessment. *Computers, Environment and Urban Systems*, 82, 101501.
- Stessens, P., Khan, A. Z., Huysmans, M., & Canters, F. (2017). Analysing urban green space accessibility and quality: A GIS-based model as spatial decision support for urban ecosystem services in Brussels. *Ecosystem Services*, 28, 328-340.
- Wang, S., Wang, M., & Liu, Y. (2021). Access to urban parks: Comparing spatial accessibility measures using three GIS-based approaches. *Computers, Environment and Urban Systems*, 90, 101713.



1875

2025

150 ANS

**Plus d'infos**

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

**Contact : Hélène Macher**

Maître de conférences

INSA Strasbourg

[helene.macher@insa-strasbourg.fr](mailto: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](http://www.insa-strasbourg.fr)

