

# 13<sup>e</sup> JOURNÉES DE LA TOPOGRAPHIE DU 21 AU 23/09/16

Données topographiques  
du futur: du numérique  
au virtuel

Photos : Shutterstock - Mise en pages : Céline Emonet - Impression : Car

Plus d'infos : <http://topographie.insa-strasbourg.fr>

## Contact

[jdt2016@insa-strasbourg.fr](mailto:jdt2016@insa-strasbourg.fr)

## Avec l'aide de Tania Landes

Maître de conférences INSA Strasbourg  
[tania.landés@insa-strasbourg.fr](mailto:tania.landés@insa-strasbourg.fr)  
tél. 03 88 14 47 34

## INSA Strasbourg

Spécialité topographie  
24 boulevard de la Victoire  
67084 Strasbourg Cedex  
tél. 03 88 14 47 00  
[www.insa-strasbourg.fr](http://www.insa-strasbourg.fr)

## ≡ Sommaire

Programme	-----	p. 5
Mot du délégué de classe	-----	p. 6
Mot du directeur	-----	p. 7
Challenge de la topographie	-----	p. 8
Conférence sur les « Données topographiques du futur: du numérique au virtuel »	-----	p. 9
Ordre de passage des PFE	-----	p. 11
Résumés des PFE	-----	p. 17

# ≡ Programme

## MERCREDI 21 SEPTEMBRE

**8h**

Accueil

**8h30 - 11h30 et 14h - 17h**

Soutenances de Projets de fin d'études (PFE)

## JEUDI 22 SEPTEMBRE

**8h**

Accueil

**8h30 - 11h30**

Soutenances de PFE

**14h30 - 16h30**

Challenge de la Topographie

**16h30**

Présentation de l'Association française de topographie (AFT) et de son prix

**17h30**

Conseil de l'AFT

## VENDREDI 23 SEPTEMBRE

**8h**

Accueil

**8h30 - 11h30**

Soutenances de PFE

**14h - 15h30**

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

**15h30 - 17h30**

Conférence sur les « Données topographiques du futur: du numérique au virtuel »

**17h30**

Annnonce des résultats

**18h30**

Verre de l'amitié

## ≡ Mot du délégué de classe

Comme le veut désormais la tradition des Journées de la topographie (JTD), c'est au tour des étudiants entamant leur 5<sup>e</sup> année, de les organiser. Une nouvelle équipe dynamique et enthousiaste s'est rassemblée pour choisir le thème d'actualité: « Données topographiques du futur: du numérique au virtuel ».

Les Journées de la topographie sont avant tout le lieu des soutenances de Projets de fin d'études (PFE). Le PFE, orienté vers des travaux de recherche, est l'ultime conclusion de 5 années d'études consacrées à la topographie au sens large. Durant ces années, ils ont appris les théories et les pratiques du métier de géomètre topographe au travers de cours, travaux pratiques, projets, et stages en entreprise. Être ingénieur INSA, c'est savoir en permanence apprendre, comprendre, et innover dans un contexte économique tant complexe qu'intéressant, qui évolue rapidement.

Les Journées de la topographie sont également un lieu de rencontre entre étudiants, enseignants, et professionnels. Nous sommes fiers de recevoir les entreprises au sein de notre école. Elles nous instruisent toujours par leurs riches conférences et nous proposent d'intéressants sujets de PFE. Je souhaite donc, au nom de tous les étudiants, les remercier d'une part pour leur participation aux journées de la topographie, et d'autre part pour les stages qu'ils nous offrent. C'est une marque de confiance qui nous est chère et nous ferons de notre mieux pour ne pas les décevoir.

Pour finir, je souhaite à tous et à toutes d'excellentes Journées de la topographie.

## ≡ Mot du directeur

Dernière étape d'un parcours qui conduit au diplôme d'ingénieur en topographie, les Journées de la topographie 2016 de l'INSA de Strasbourg représentent la 13<sup>e</sup> édition de cet événement. Organisées en grande partie par les élèves ingénieurs, elles donnent notamment lieu à un rendez-vous inédit d'étudiants et de professionnels à l'occasion d'un Challenge de la topographie au cours duquel s'affrontent amicalement des équipes mixtes pour répondre à une problématique importante, certes tenue secrète jusqu'au moment de la compétition, mais qui sera probablement en lien avec... la réalité virtuelle! En effet, ce thème sera au cœur des débats tout au long de ces journées. Enfin, de nombreux sujets d'actualité sont également traités dans le cadre des soutenances de projets de fin d'études de nos futurs diplômé(e)s.

Aussi, en tant que directeur de l'INSA de Strasbourg, je ne peux que me réjouir de ce rendez-vous marquant de la communauté des topographes. Grâce au partenariat avec l'Ordre des géomètres experts et avec l'Association française de topographie ainsi qu'à l'aide apportée par les professeurs de l'INSA, nos élèves ingénieurs ont à nouveau su relever le défi de l'organisation des Journées de la topographie à la grande satisfaction de tous.

Je tiens enfin à remercier tous les acteurs à savoir les étudiantes et étudiants, l'équipe pédagogique et technique qui les encadre, ainsi que les professionnels qui leur font confiance, pour leur engagement au service d'une profession dynamique qui honore une spécialité emblématique de notre établissement.

## ≡ Challenge de la topographie

JEUDI 22 SEPTEMBRE DE 14 H 30 À 16 H 30  
SALLE DE TOPOGRAPHIE

Le Challenge de la topographie met en compétition des équipes de 6 à 8 personnes, constituées d'élèves ingénieurs topographes de 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> année, des nouveaux diplômés, mais aussi de professionnels et d'enseignants.

Des QCM et des ateliers pratiques amènent ces équipes à s'affronter dans la joie et la bonne humeur!

L'esprit d'équipe, l'entraide et le partage sont les mots-clés de la réussite aux challenges que vous devrez relever!



Challenge de la topographie 2015

## ≡ Conférence sur les « Données topographiques du futur: du numérique au virtuel »

VENDREDI 23 SEPTEMBRE DE 15 H 30 À 17 H 30  
AMPHITHÉÂTRE DE DIETRICH

Comment parler du futur sans évoquer le passé? Après une courte rétrospective des outils et méthodes employées en topographie jusqu'à nos jours, les intervenants conférenciers auront à cœur de vous présenter leur vision prospective de l'évolution à venir des données topographiques.

Cette conférence se situe dans le prolongement du débat mené dans le cadre du Congrès de l'Ordre des géomètres experts, « Dessinons le monde à l'ère numérique », qui s'est tenu à Nancy fin juin 2016.

Des exemples de projets couplant des mesures 2D, 3D, voire 4D, des documents papiers et numériques, intégrés ensuite à une plateforme de réalité virtuelle vous permettront de vous immerger dans des visites virtuelles et d'apprécier la puissance de ces nouvelles technologies.

Que nous prépare l'avenir en termes de données, d'outils et d'environnements?

Nous numérisons la réalité pour la reconstruire dans le domaine virtuel. Le monde du numérique est en évolution permanente. La réalité augmentée supplantera-t-elle la réalité?

Le débat est ouvert, n'hésitez pas à poser des questions à nos conférenciers!

# ≡ Ordre de passage des PFE

MERCREDI 21 SEPTEMBRE

## JURY 1

**8 h 30 • Développement du processus de modélisation 3D de maquettes numériques à partir de nuages de points • p. 19**

- Étudiant : BAVOUX Thibault
- Structure d'accueil : Futurmap - Le Tuba, Lyon
- Correcteurs : LANDES Tania et GRUSSENMEYER Pierre

**9 h 30 • Industrialisation des processus d'extraction d'objets à partir de données photogrammétriques par drones • p. 23**

- Étudiant : BROSSARD Jérémie
- Structure d'accueil : SNCF Réseau, Paris
- Correcteurs : LANDES Tania et GRUSSENMEYER Pierre

**10 h 30 • Conception d'une nouvelle commande dans 3DReshaper: modélisation de bâtiments par détection de motifs répétitifs • p. 27**

- Étudiante : DESCHAMPS Anaïs
- Structure d'accueil : Technodigit, Genay
- Correcteurs : ALBY Emmanuel et GRUSSENMEYER Pierre

**14 h • Protocoles d'acquisition d'images et de traitement des données par drone: modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie • p. 31**

- Étudiant : MURTIYOSO Arnadi
- Structure d'accueil : Drone Alsace, Strasbourg
- Correcteurs : KOEHL Mathieu et GRUSSENMEYER Pierre

**15 h • Suivi par thermographie infrarouge aéroportée et par photogrammétrie terrestre pour l'évaluation des échanges nappe-rivière et de la dynamique morphologique d'un cours d'eau restauré [réserve naturelle du Rohrschollen, Strasbourg] • p. 35**

- Étudiante : ROY Julie
- Structure d'accueil : Laboratoire Live - Faculté de géographie et d'aménagement, Strasbourg
- Correcteurs : KOEHL Mathieu et GRUSSENMEYER Pierre

**16 h • Étude et développement de méthodes de mesure de convergence en galeries souterraines • p. 39**

- Étudiant : MALLOUH Jordan
- Structure d'accueil : Fugro Geoid SAS, Jacou
- Correctrice : LANDES Tania



## **JURY 2**

**8h30 • Mise en place de procédures automatiques en vue d'accélérer la production des plans topographiques au sein de l'entreprise Techni Drone** • p. 43

- Étudiant: JAVERLIAT Kévin
- Structure d'accueil: Techni Drone, Baix
- Correcteur: KOEHL Mathieu

**9h30 • Développement du BIM en tant qu'outil d'aide à la conception d'un projet d'infrastructure linéaire** • p. 47

- Étudiant: MOREL Victor
- Structure d'accueil: Setec international, Vitrolles
- Correcteur: KOEHL Mathieu

**10h30 • Mise en place d'un SIG pour l'aide à l'insonorisation des logements proches de l'aéroport Marseille Provence** • p. 51

- Étudiante: NGOM Ouleymatou Pauline
- Structure d'accueil: Espace 9, Aix-en-Provence
- Correcteur: KOEHL Mathieu

**14 h • Étude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres** • p. 55

- Étudiante: LEMPEREUR Marine
- Structure d'accueil: Laboratoire Icube - Équipe Trio, INSA Strasbourg
- Correcteur: ALBY Emmanuel

**15 h • Étude pour l'utilisation de la grille Circé Rhône en GNSS RTK et NRTK sur la concession CNR** • p. 59

- Étudiante: PRADIER Camille
- Structure d'accueil: Centre d'analyse comportementale des ouvrages hydrauliques, Lyon
- Correcteur: FERHAT Gilbert

**16 h • Évaluations des incertitudes de mesure appliquée aux métrologies sous-marines; étude comparative des trois techniques existantes** • p. 63

- Étudiante: WILHELM Laure
- Structure d'accueil: Total SA, Pau
- Correcteur: FERHAT Gilbert

## **JURY 3**

**8h30 • Étude des limites actuelles de l'orbitographie. Cas de l'altimétrie satellitaire** • p. 67

- Étudiant: KOCH David
- Structure d'accueil: Astrogéo - Laboratoire Géoazur, Valbonne
- Correcteurs: FERHAT Gilbert et BONNEFOND Pascal

**9h30 • Exploitation de bases de données géomatiques globales, régionales et locales pour le développement d'un outil d'extraction de cibles « simples » à partir d'imagerie satellite haute résolution. Application aux surfaces en eau** • p. 71

- Étudiante: VELTEN Mélanie
- Structure d'accueil: Sertit - Icube - Parc d'innovation, Illkirch
- Correcteur: ALBY Emmanuel

## **JEUDI 22 SEPTEMBRE**

### **JURY 1**

**8h30 • Numérisation 3D dans le souterrain de Naours et intégration des données 3D de la base de données Graffiti** • p. 75

- Étudiant: BALLAND Maxime
- Structure d'accueil: Communauté de communes Bocage-Hallue, Villers-Bocage
- Correcteurs: KOEHL Mathieu et GRUSSENMEYER Pierre

**9h30 • Imagerie 3D de la carrière de Saingt de Fleury-sur-Orne et intégration des données 3D dans QGIS** • p. 79

- Étudiant: BREITWIESER Arnaud
- Structure d'accueil: Inrap Normandie, Fleury-sur-Orne
- Correcteurs: KOEHL Mathieu et GRUSSENMEYER Pierre

**10h30 • Utilisation des outils de la télédétection très haute résolution pour le suivi de la végétation sur la zone de compensation écologique Île Falcon** • p. 83

- Étudiant: BOUTRY Clément
- Structure d'accueil: Irstea, Saint-Martin-d'Hères
- Correctrice: LANDES Tania

### **JURY 2**

**8h30 • Analyse des mesures d'altimétrie satellitaire pour l'estimation des cotes d'eau sur différents types de tronçons fluviaux** • p. 87

- Étudiant: SCHAEDELE Thomas
- Structure d'accueil: Legos, Toulouse
- Correcteur: ALBY Emmanuel

**9h30 • Limites de l'acquisition de nuages de points par système de cartographie mobile en intérieur** • p. 91

- Étudiant: CARREE Pierre
- Structure d'accueil: SELARL Quarta, Cesson-Sévigné
- Correctrice: LANDES Tania

**10h30 • Traitement d'images et exploitation de nuages de points pour le récolement de réseaux en tranchée ouverte** • p. 95

- Étudiant: ROUQUETTE Romain
- Structure d'accueil: SARL Pangeo Conseil, Agen
- Correcteur: ALBY Emmanuel

## VENDREDI 23 SEPTEMBRE

### JURY 1

**8 h 30 • Modélisation et simulation de convois exceptionnels et d'infrastructures routières pour la préparation d'itinéraires spécifiques** • p. 99

- Étudiant: DELACOURT Thomas
- Structure d'accueil: Transports Europe Services, Neuf-Brisach
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et KOEHL Mathieu

**9 h 30 • Mesures de petits objets par méthode photogrammétrique. Méthodologie et analyse de précision** • p. 103

- Étudiant: PALHA Arnaud
- Structure d'accueil: TPLM-3D, Givors
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et LANDES Tania

**10 h 30 • Optimisation des procédés d'acquisition et de restitution des données structurées des réseaux enterrés. Application aux récolements de réseaux** • p. 107

- Étudiant: FILOSA Noé
- Structure d'accueil: Galilé, Montpellier
- Correcteurs: ALBY Emmanuel et FERHAT Gilbert

### JURY 2

**8 h 30 • Correction troposphérique des interférogrammes issus d'images radar par mesures GNSS et modèle global d'atmosphère** • p. 111

- Étudiant: DUBREUIL Vincent
- Structure d'accueil: Cnam/Osuna, Le Mans
- Correcteur: FERHAT Gilbert

**9 h 30 • Adaptation de levé Lidar aérien aux référentiels géodésiques et altimétriques du Sri Lanka** • p. 115

- Étudiant: WEYER Benjamin
- Structure d'accueil: Fugro Geoid SAS, Jacou
- Correcteur: FERHAT Gilbert

**10 h 30 • Évaluation des mesures de fils tendus par photogrammétrie en vue de l'automatisation des mesures d'écartométrie pour l'accélérateur de particules LHC au Cern** • p. 119

- Étudiante: VENDEUVRE Camille
- Structure d'accueil: Cern large scale metrology section, Genève
- Correcteur: GRUSSENMEYER Pierre

### JURY 3

**8 h 30 • L'apport des nouvelles technologies dans la réalisation des divisions en volumes au regard de l'état de l'art, des pratiques en vigueur et de la jurisprudence** • p. 123

- Étudiant: CREMMEL Antoine
- Structure d'accueil: SELARL Lambert et associés, Strasbourg
- Correcteur: LEDIG Jacques

**9 h 30 • Publicité foncière et pratiques professionnelles du géomètre expert en cadastre fiscal, juridique et Alsace Moselle** • p. 127

- Étudiant: SCHERRER David
- Structure d'accueil: Conseil régional de l'OGÉ, Sélestat
- Correcteur: LEDIG Jacques

**10 h 30 • La prescription acquisitive appliquée au bornage amiable** • p. 131

- Étudiant: TEUMA Rémi
- Structure d'accueil: Alpha géométrie, Bressuire
- Correcteur: LEDIG Jacques

#### Projet de fin d'études soutenu au mois de juin 2016

**Mise en place d'une méthode de détection de changement orientée objet sur une série temporelle d'images satellites optiques** • p. 135

- Étudiante: RUIZ Mai-Linh
- Structure d'accueil: ICUBE, plateforme SERTIT
- Correcteurs: LANDES Tania

/// **Résumés des PFE**

# Développement du processus de modélisation 3D de maquettes numériques à partir de nuages de points

PFE présenté par : **Thibault BAVOUX**  
Société d'accueil : **FUTURMAP**  
Directeur de PFE : **M. Florent MICHELS**  
Correcteurs : **M. Pierre GRUSSENMEYER, Mme Tania LANDES**



## 1. Introduction

Avec l'avènement des nouvelles technologies de mesure 3D, telles que les systèmes LiDAR aéroportés, les scanners-lasers ou encore les systèmes de Mobile Mapping, il est de plus en plus facile d'acquérir de la donnée en grande quantité et ce, de manière précise et rapide. En revanche, pour ce qui est de la phase de traitement, la tâche se révèle plus fastidieuse et de plus en plus de clients font alors appel à des entreprises spécialisées pour optimiser cette opération longue et complexe. Devant ce constat, la société FUTURMAP a donc fait du traitement de nuages de points et plus généralement de la cartographie et du traitement de données géospatiales, son cœur de métier.

Aujourd'hui, en ce qui concerne son activité liée au bâtiment, la société produit majoritairement des plans d'intérieurs, de façades et de coupes. Or, avec le déploiement progressif du BIM, elle souhaite maintenant pouvoir offrir un service innovant de modélisation 3D de bâtiments, adapté aux besoins des géomètres/topographes et architectes. Ainsi, depuis janvier 2015, FUTURMAP travaille sur de la modélisation en trois dimensions et la création de maquettes numériques orientées BIM. Une première session de travail avec un étudiant de l'INSA, Noé FILOSA, a déjà permis d'établir un état de l'art sommaire de l'utilisation du BIM en France et de définir les premières procédures de production de modèles 3D sous Revit. Forte des premiers projets réalisés et d'une demande client croissante, la société aspire désormais à développer concrètement ce service, en s'appuyant sur la création de modèles BIM « tel-que-construit ». Aussi, par souci de production et de compétitivité sur le marché du « Scan to BIM », elle souhaite pouvoir développer un processus complet de standardisation et d'automatisation de création de maquettes numériques.

Ce Projet de Fin d'Etude (PFE) s'inscrit donc dans la volonté de FUTURMAP, de construire un département de modélisation 3D autour de la maquette numérique et plus généralement du BIM. **L'objectif de ce travail est de conforter et consolider cette activité, en améliorant le processus initial de création de maquettes sous Revit et en automatisant les grandes étapes nécessaires à la réalisation d'un tel modèle.**

## 2. Mise en place du processus de création de maquettes numériques

Sur la base des trois modèles initialement effectués par FUTURMAP et des premières méthodologies générales mises en place au sein de la société, un projet pilote a été réalisé, afin de pouvoir acquérir rapidement une maîtrise et une connaissance du logiciel Revit. Ce travail a été effectué sur un bâtiment tertiaire d'environ 2 800 m<sup>2</sup>, comprenant une partie historique et une partie contemporaine, s'élevant sur quatre niveaux différents (figure 1). Pour cela, l'ouvrage étudié a préalablement fait l'objet, auprès d'une société partenaire, d'un relevé intérieur et extérieur, au scanner-laser terrestre. Grâce à cette modélisation, une première procédure manuelle de création de maquettes numériques a pu être définie.

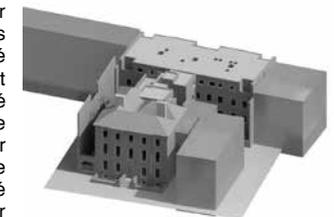


Figure 1 : Aperçu de la première maquette réalisée sous Revit

Ce processus de production (figure 2) a ensuite été repris, puis amélioré au fur et à mesure des projets réalisés. Les différents retours clients ont également permis de réviser et d'affiner certains points, notamment sur la partie conception de la maquette.

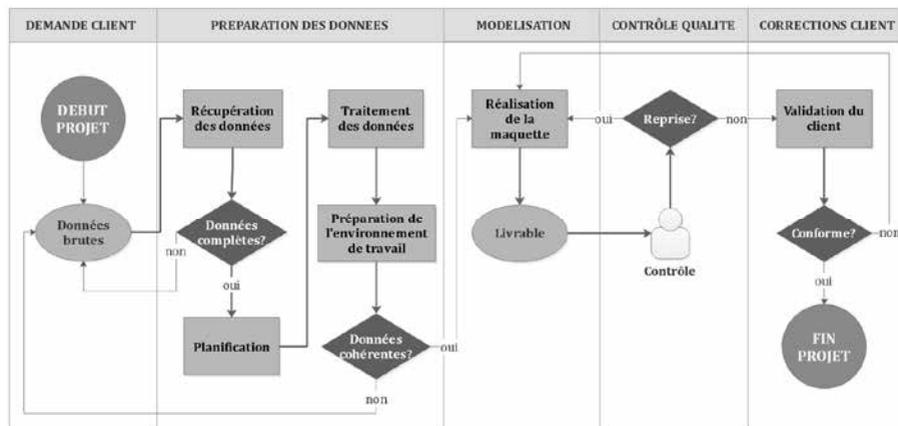


Figure 2 : Workflow général de production de maquettes numériques mis en place au sein de la société FUTURMAP

Si l'on s'en tient à ce processus, on peut donc dégager cinq phases principales, communes à chaque projet de création de maquettes numériques, à savoir : la **demande client**, la **préparation des données**, la **modélisation**, le **contrôle qualité** et les **corrections client**. Pour chacune de ces phases, des outils marketing et pédagogiques ont été mis en place afin de simplifier et de standardiser la chaîne de production, tels que :

- ✓ Un formulaire de demande de devis en ligne, qui permet de cibler clairement les besoins de chaque client.
- ✓ Un cahier des charges détaillé, sous forme de tableau qui reprend pour chaque composant le niveau de détails que l'on peut espérer pouvoir atteindre. Ce document est accompagné d'un référentiel de modélisation destiné à illustrer la définition de chaque LOD (Level of Details), afin d'aider le client dans la retranscription de son besoin.
- ✓ Des fichiers gabarits et familles d'objets Revit qui répondent aux exigences des modèles BIM « tel-que-construit ».
- ✓ Un rapport de contrôle qualité rédigé pour rendre compte au client, de la cohérence et de la précision du modèle réalisé, tout en illustrant les difficultés et problèmes rencontrés lors de la modélisation. Ce document apporte une plus-value indéniable à la maquette numérique.
- ✓ Des fiches techniques sur l'élaboration d'une maquette Revit et sur la phase de préparation des données.

Ces documents sont le socle de la mise en place du département 3D de FUTURMAP, car ils témoignent de l'expertise et du savoir-faire de la société en termes de modélisation de bâtiment BIM « tel-que-construit ». Ils seront réutilisés ultérieurement par l'entreprise, pour la formation de son personnel et comme support à la réponse d'appels d'offre.

Pour évaluer la qualité des modèles réalisés, une **étude de précision** a été menée durant ce PFE. Après avoir établi un premier bilan des erreurs pouvant intervenir depuis l'acquisition jusqu'au traitement des données, une évaluation qualitative et quantitative du modèle a été effectuée afin de respecter les engagements entrepris dans la phase de contrôle qualité. Le logiciel Revit ne disposant pas d'outils préconçus pour réaliser directement cette analyse dans le projet, il a fallu procéder à une intégration de la maquette sous CloudCompare, afin de pouvoir réaliser les diverses comparaisons nuage/maillage. En tant qu'expert de la mesure, cette capacité à analyser la qualité du travail effectué est une réelle valeur ajoutée pour le géomètre, car elle permet de valoriser l'expertise de la profession dans ce processus BIM.

De cette étude, il ressort, que les écarts par rapport au modèle de référence sont en moyenne de l'ordre du millimètre, avec un écart type  $\sigma$  entre 2 et 3 cm suivant les cas (figure 3). Un point de nuage choisi aléatoirement, a donc 68% de chance de se retrouver dans l'intervalle de valeurs  $\mu + \sigma$  et  $\mu - \sigma$  (avec  $\mu$  la moyenne des écarts). Au vu du pourcentage de points de nuage appartenant aux murs du bâtiment, on peut affirmer que cette moyenne correspond à la précision de modélisation des parois. Ces résultats sont donc satisfaisants puisque la **précision globale assurée par la société est de l'ordre de 3 cm** pour une représentation standard du bâtiment. En cas d'écarts modèle/nuage trop importants, la maquette est renvoyée directement en production, pour correction.

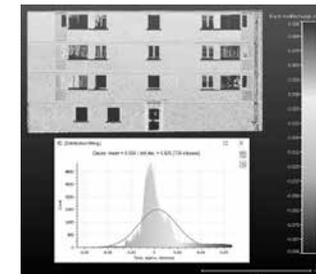


Figure 3 : Résultat de la comparaison maillage/nuage pour une façade de bâtiment

### 3. Etude d'automatisation du processus

Malgré des outils destinés à la manipulation et à l'exploitation de nuages de points, le logiciel Revit, dans sa forme originale, n'est pas complètement adapté pour des projets de rétroconception. Au fil de l'avancement de la maquette, l'utilisateur se retrouve donc contraint de contourner les procédés classiques mis à sa disposition, pour répondre au mieux aux exigences imposées. Dans le cadre de cette étude, l'utilisation d'un plug-in ou d'une application connexe se révèle nécessaire pour gérer plus efficacement ce type de données. Dans cette optique, trois logiciels de traitement semi-automatique, spécifiques à la gestion de nuages de points ont été testés, à savoir : l'appli **Scan To BIM d'IMAGINIT** et le programme **PointSense for Revit de Kubit**, couplé à l'application externe **VirtuSurv**.

Si les résultats fournis par le premier ont été plutôt décevants, les possibilités offertes par le logiciel PointSense, se sont révélées au contraire, très intéressantes. En effet, ce plug-in permet d'accroître considérablement les capacités initiales du logiciel Revit, grâce au développement d'outils puissants, spécifiques au traitement et à la gestion de nuages de points. Grâce à PointSense, il est désormais possible de :

- ✓ Créer des murs rapidement et précisément directement dans le nuage de points.
- ✓ Réaliser automatiquement la jonction et l'alignement de ces murs, suivant des critères de parallélisme et de perpendicularité.
- ✓ Créer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) précis, à partir des coordonnées 3D extraites du nuage de points.
- ✓ Positionner des éléments d'ouvertures et architecturaux tels que des portes, fenêtres, poutres ou encore poteaux, directement dans le nuage de points, grâce aux outils intégrés du logiciel VirtuSurv.
- ✓ Analyser la cohérence et la précision du modèle final réalisé dans Revit.

Pour cela, deux techniques de modélisation différentes peuvent être utilisées. La première consiste à **travailler directement sur le nuage de points** dans le logiciel de conception Revit. La seconde en revanche, permet d'**évoluer dans une vue planaire haute résolution**, comparable à une photo panoramique via l'utilisation simultanée du programme VirtuSurv. Grâce à une connexion automatique entre les deux logiciels, l'utilisateur est alors en mesure de naviguer et de s'orienter, de façon beaucoup plus intuitive, à l'intérieur du nuage de points. L'affichage des données scanner-laser est donc nettement facilité et ce notamment pour des scans réalisés en intérieur, avec des éléments de mobilier imposants, qui ont tendance à gêner l'interprétation du nuage.

Bien que cette technique fournisse des résultats probants, elle implique toujours l'intervention d'un utilisateur. De ce fait, la question d'utiliser une méthode entièrement automatique, se pose à plus d'un titre. Pour terminer cette étude, deux solutions de traitement automatisées ont donc été testées dans le cadre de ce PFE. La première concerne l'une des rares solutions commerciales existantes sur le marché du BIM et de la maquette numérique, à savoir celle proposée par SNAPKIN. Cette société a développé des algorithmes capables de détecter automatiquement dans le nuage de points, les murs, sols et plafonds d'un bâtiment. Une maquette pilote a donc été sous-traitée pour pouvoir juger de la qualité de la modélisation.

La deuxième solution, quant à elle, porte sur les travaux de thèse d'Hélène MACHER, dont la problématique est de concevoir une méthode permettant d'automatiser le passage du nuage de points au BIM. Celle-ci est de plus, réalisée à l'INSA de Strasbourg, il semblait donc opportun de pouvoir tester les algorithmes développés.

#### 4. Evaluation économique

La dernière étape de ce projet a consisté à évaluer d'un point de vue économique la place de la maquette numérique au sein de la société FUTURMAP. Dans cette partie, la question de s'appuyer sur des plans DWG au lieu d'un nuage de points pour réaliser la modélisation, a été abordée. Ainsi, suite aux premiers retours d'expérience, il s'est révélé que cette question était plutôt pertinente puisqu'on estime un **gain de temps de plus de 20%**, suite à l'utilisation de plans 2D comme référence. Toutefois, compte tenu de la richesse et de l'exhaustivité des informations fournies par le nuage, la qualité des modèles générés convient d'être différenciée. Enfin, il a aussi été question d'aborder et de comparer les rendements de production entre les méthodes manuelles, semi-automatiques et automatiques testées tout au long de ce projet. Pour cela, trois maquettes numériques ont donc été modélisées sur la base du même jeu de données (même nuage de points). Le Tableau 1 suivant donne un aperçu des résultats obtenus :

Etapas de création	Temps de production		Gain/Perte automatique/manuelle
	Méthode manuelle	Méthode semi-automatique	
Préparation des données	35 min	25 min	+30%
Modélisation des murs	110 min	60 min	+45%
Modélisation des dalles	15 min	15 min	Pas de gain
Modélisation des plafonds	65 min	65 min	Pas de gain
Modélisation des escaliers	55 min	55 min	Pas de gain
Création de la toiture	30 min	30 min	Pas de gain
Modélisation des portes	75 min	75 min	Pas de gain
Modélisation des fenêtres	50 min	30 min	+40%
Création de la surface topo	25 min	10 min	+60%
<b>TOTAL :</b>	<b>7h40min</b>	<b>6h05min</b>	<b>écart = 1h35min → +20%</b>

Tableau 1 : Comparaison des temps de production d'une maquette numérique réalisée suivant une méthode manuelle et semi-automatique

Il ressort de cette étude que l'utilisation d'une application telle que PointSense, permet un **gain de temps global sur la production d'une maquette numérique de + 20%**. Aussi, après comparaison avec ce même modèle réalisé par une approche entièrement automatisée, on constate que les temps de modélisation des murs, sols et plafonds sont équivalents entre les deux procédés. Ces résultats sont donc très encourageants et confortent le choix de l'acquisition de cette solution de traitement. Toutefois, le net avantage des méthodes automatiques est qu'elles ne nécessitent aucune intervention de la part de l'utilisateur et ce durant toute la phase de calcul des algorithmes.

#### 5. Conclusion

Ce projet avait pour but de développer le département de modélisation 3D au sein de la société FUTURMAP. Les objectifs fixés initialement ont été remplis, puisqu'un processus de traitement a pu être validé et affiné au fur et à mesure des réalisations. Plusieurs supports et outils ont également été produits, dans le but d'accompagner l'entreprise dans la mise en place de son activité. Aussi, suite à cette étude, une solution intéressante, permettant de semi-automatiser la réalisation d'une maquette sous Revit, a été proposée. Ainsi, si la société juge que les résultats obtenus lors de l'évaluation logicielle, sont suffisamment probants, elle pourra alors envisager de s'équiper en licences.

Pour ce qui est des perspectives, elles concernent dans un premier temps, le développement d'une bibliothèque d'objets Revit adaptée aux besoins des géomètres en termes de rétroconception. Dans un deuxième temps, il serait intéressant de se pencher sur l'intérêt de passer systématiquement par la réalisation d'une maquette numérique, pour la production des plans 2D. En effet, ce passage du BIM à la CAO pourrait représenter un gain de temps non négligeable pour FUTURMAP, à condition d'avoir préalablement configuré l'export des plans sous Revit.

## Industrialisation des processus d'extraction d'objets à partir de données photogrammétriques par drones

PFE présenté par : **Jérémy Brossard**  
 Société d'accueil : **SNCF**  
 Directeur de PFE : **M. Flavien Viguier**  
 Correcteurs(trices) : **M. Pierre Grussenmeyer,**  
**Mme Tania Landes**



### 1. Introduction

La Société Nationale des Chemins de Fer Français (SNCF) gère 33 000 kilomètres de lignes ferroviaires sur l'ensemble du territoire comprenant de nombreuses infrastructures. Afin d'assurer la sécurité, la disponibilité et la fiabilité du réseau, une surveillance et une maintenance régulière sont de rigueur. La politique d'innovation et de recherche SNCF a permis de développer de nombreux systèmes d'acquisitions tels que des trains de mesures ou des capteurs déposés sur les installations capables de caractériser précisément l'état du réseau. Ces systèmes permettent de minimiser la mobilisation de ressources humaines pour la réalisation des diagnostics réduisant ainsi les contraintes sécuritaires et économiques. SNCF Réseau déploie également depuis plus de deux ans, des drones dans le cadre d'opérations de surveillance et de maintenance. Leur aptitude à réaliser des acquisitions de manière non intrusive et non capacitaire leur permet d'intervenir en environnements complexes (difficiles d'accès voire inaccessibles). Ces aéronefs télépilotés, déployés par le Pôle Drones sont équipés d'un large panel de capteurs (LiDAR, photo, multispectral, ...) permettant de répondre aux besoins et aux exigences de surveillance du Réseau Ferré National (RFN).

Pour réaliser des relevés topographiques de sites exploités, le Pôle Drones effectue des acquisitions photogrammétriques par aéronef télépiloté. Une fois les données acquises, les plans topographiques sont produits par photo-interprétation par des opérateurs expérimentés. Pour cela la chaîne de traitements déployée intègre différentes étapes permettant l'obtention d'une orthophoto, d'un Modèle Numérique de Surface (MNS) ou un nuage de points photogrammétrique.

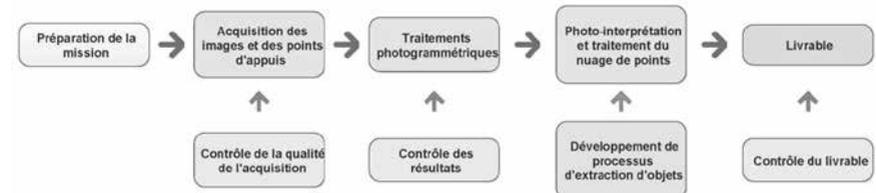


Figure 1: Chaîne de traitement photogrammétrique actuellement déployée

L'étude qui m'a été confiée s'inscrit dans un large projet visant l'automatisation de l'extraction de données ferroviaires acquises par photogrammétrie ou lasergrammétrie. Mes travaux ont ainsi démarré dans le cadre d'un projet de recherche technologique qui consistait à déterminer la position des rails à partir de coupes réalisées dans des nuages de points 3D. Pour réaliser ce projet, nous utilisons des nuages acquis par scanner laser dynamique. Bien que fonctionnelle, cette méthodologie, fondée sur l'utilisation de l'information d'intensité du signal retour, ne peut être appliquée lors de l'utilisation de nuages de points photogrammétriques (les points ne disposant pas de cette information). Face à une demande croissante en termes de production, il est nécessaire d'industrialiser des procédés d'extraction d'objets et plus particulièrement la digitalisation des rails. Il s'agit de réduire le temps d'établissement du livrable tout en garantissant une restitution de qualité. L'enjeu technique consiste donc à mettre en œuvre une extraction précise et robuste afin d'éliminer une partie des tâches redondantes ou à faible valeur ajoutée tout en assurant un saut de performance et un gain économique.

En préalable à tout processus d'extraction automatique de données, il est nécessaire de déterminer la qualité des données d'entrée utilisées : nous étudierons donc la précision des orthophotos réalisées à partir de données acquises par drone. Dans un deuxième temps nous aborderons la méthode développée pour extraire les rails. Pour terminer nous réaliserons une analyse des résultats obtenus afin de valider la méthode développée.

## 2. Etude de la qualité d'une orthophoto

L'extraction automatique de données n'est pertinente que si elle est basée sur l'exploitation de données de qualité (en précision et résolution). On distingue deux types d'erreurs pouvant affecter la qualité des données : d'une part les erreurs qui interviennent au moment de l'acquisition, et d'autre part celles issues des traitements informatiques.

Un bilan des erreurs potentielles impactant l'acquisition a été établi afin d'en réaliser une analyse. Nous pouvons lister ces erreurs dues : au GNSS du drone, à la centrale inertielle, à l'appareil photographique et au GNSS permettant de relever les points d'appuis. Ces erreurs impactent immédiatement la qualité des photos ainsi que le géoréférencement. Une analyse complémentaire sur l'utilisation de l'appareil photographique paramétré avec l'autofocus est réalisée, en vue de quantifier l'incertitude de mesure produite sur les distorsions géométriques du capteur.

Au cours du traitement photogrammétrique, les erreurs impactant l'acquisition se propagent dans les différentes étapes de traitement telles que l'aérotriangulation, la détection des points homologues, la compensation par les faisceaux, la génération du modèle numérique de surface (MNS) et la création de l'orthophoto. L'orthophoto présente une résolution de 1 à 2 cm ainsi qu'une précision absolue d'environ 3 cm (quantifiée selon les travaux de [Pereira 2015]). Elle répond donc aux attentes de la SNCF qui demande une précision absolue de 5 cm.

Bien que les données admettent des disparités radiométriques et géométriques, elles présentent une très bonne résolution et précision, permettant ainsi de distinguer les rails correctement. Nous pouvons donc les utiliser afin de réaliser l'extraction de rails automatiquement.

## 3. Développement d'une méthode d'extraction de rails

Après avoir déterminé et validé la qualité des données acquises, nous pouvons développer une méthodologie d'extraction de rails. Durant le projet de recherche technologique, nous avons constaté que le nuage de points issu de traitements photogrammétriques ne permettait pas de distinguer visuellement le profil du rail en raison d'un trop faible nombre de points et d'un lissage du nuage au niveau du champignon du rail. Fort de ce constat, j'ai choisi de développer une méthode d'extraction automatique de rails basée uniquement sur le traitement des images acquises. Deux types de données sont à notre disposition : les images brutes et les orthophotos.

	Photos brutes	Orthophotos
Avantages	Faible taille de fichier Meilleure qualité d'image (résolution, radiométrie)	Géoréférencement Objets redressés
Inconvénients	Pas de géoréférencement Effet de perspective Pas de correction des distorsions image	Création d'artefacts Disparité radiométrique Taille de fichier importante (< 1 go)

Tableau 1 : Comparaison des différentes données utilisables.

Les photos brutes n'étant pas géoréférencées et non corrigées de leurs distorsions, leur utilisation pour extraire la position des rails dans le système de coordonnées souhaité est complexe. L'orthophoto semble quant à elle plus appropriée pour extraire directement des données géoréférencées. Néanmoins, au regard de la taille des fichiers à traiter, un algorithme de découpage des dalles d'orthophotos devra être mis en place. Il est à noter que lors de l'utilisation d'orthophotos des problèmes de continuité d'objets (léger décalage au niveau du rail malgré application de corrections géométriques et radiométriques) peuvent être observés. De plus la création d'artefacts (projection des poteaux caténaux sur l'image, ...) peut induire de fausses détections pouvant péjorer la qualité de l'extraction automatique.

Pour isoler le rail, il faut tout d'abord détecter l'ensemble des contours de l'image puis appliquer différents filtres et opérateurs pour isoler les rails. Une fois cette étape réalisée, nous pourrons extraire des points de rails tous les 10 mètres (conformément aux normes SNCF).

Les premiers tests se sont concentrés sur l'exploitation de photos brutes et ont permis de réaliser le prototype de l'algorithme. L'utilisation de filtres morphologiques ainsi que des caractéristiques géométriques ont révélé des résultats prometteurs. Cependant sans l'intervention de l'opérateur pour définir la direction des rails de nombreuses lignes résiduelles étaient présentes. Par ailleurs, comme évoqué précédemment, l'utilisation des clichés bruts ne permettant pas un géoréférencement de qualité (malgré utilisation des paramètres de vol) j'ai décidé de ne pas retenir cette approche en vue d'une industrialisation.

Une nouvelle approche a été mise en place en se basant sur l'utilisation des orthophotos et des fichiers de références externes. Les premiers tests ont été réalisés sur des données de faibles tailles (< 40 Mo) pour valider la pertinence de l'algorithme. Pour rendre le processus le plus automatique possible, nous avons créé un outil permettant de tuer automatiquement les images selon la longueur souhaitée (une longueur de 10 mètres pour la réalisation de plans topographiques) mais également d'interagir avec le Référentiel Géographique d'Infrastructure (RGI) : référentiel répertoriant toutes les voies et infrastructures ferroviaires présentes sur le RFI. Cette étape permet l'extraction des Points Kilométriques (PK) indispensables au ferro-référencement des données (Ligne, Voie, PK), mais également l'extraction de la portion de polygone 2D représentant la voie (utile à la définition de l'orientation des voies). Bien qu'extraites à titre indicatif, en raison de l'imprécision du RGI ( $\pm 40$  m), ces informations facilitent les travaux d'extraction automatique du rail (levé de différentes inconnues, gain de temps de traitement, ...).

A partir des tuiles extraites ainsi que du segment 2D correspondant à l'orientation principale de la voie, nous pouvons réaliser l'extraction automatique de rails. Dans un premier temps, nous devons les détecter à partir de l'orthophoto en couleur mais aussi de l'orthophoto en niveau de gris, afin de pouvoir extraire les contours selon différents types de contraste. Nous combinons différentes fonctions d'extraction de contours implémentés dans Halcon. Les lignes sont ensuite filtrées selon leurs orientations mais aussi en fonction de critères spatiaux (parallélisme) afin d'éliminer les lignes ne représentant pas les rails. Une fois extraites elles sont exportées dans un format DXF ou Arc/Info pour permettre leur utilisation dans des logiciels de DAO. Il est à noter qu'afin de réduire les temps de calcul, un effort a été porté sur la parallélisation des tâches.



Figure 3: Résultat de l'extraction automatique (sans échelle)

Une première analyse qualitative permet de constater que la détection de rails s'effectue correctement. Cependant l'algorithme trouve ses limites lors de l'extraction de données sur des tronçons de plusieurs kilomètres.

- L'algorithme est sensible à la netteté du rail (absence de détection de contours en présence d'un léger flou au niveau du rail sur les images).
- Le seuil de filtrage selon l'orientation n'étant pas assez restrictif, des fausses détections sont observées au niveau des appareils de voie (aiguillages). Ces faux positifs ainsi que la structure principale de la ligne créent des ondulations dans les données extraites. A l'opposé, si les critères d'extraction sont trop restrictifs l'algorithme ne permet pas de détecter les files de rails.
- En présence de passages planchés ou de passages à niveau (rails à gorge) des fausses détections sont observées ne pouvant pas être éliminées après filtrage.
- Présence d'éléments résiduels après réalisation de l'ensemble des filtrages évoqués précédemment. Pour supprimer ces faux positifs, une opération de filtrage manuel par l'opérateur doit être effectuée.

Malgré les problèmes constatés l'outil développé permet un gain de temps important (quelques minutes pour l'extraction des rails sur une gare grâce à l'outil développé, contre plusieurs heures lors de traitements manuels par photo-interprétation) validant ainsi sa pertinence opérationnelle.

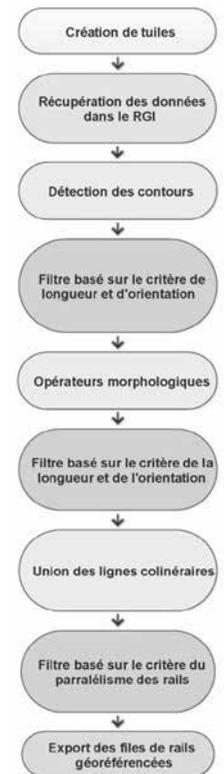


Figure 2: Ensemble des traitements réalisés

#### 4. Analyse des résultats

Après avoir extrait les rails, il convient de s'intéresser à la précision des résultats obtenus. Ainsi, afin de valider l'automatisation du processus, une étude comparative entre un relevé topographique traditionnel (par tachéométrie), considéré comme la référence et donc la valeur vraie, et l'extraction automatique de rails a été mise en œuvre. L'analyse a été menée sur une courte portion de rails (18 mètres) afin d'évaluer en détails l'extraction effectuée et d'identifier les éventuelles ondulations des polygones automatiques produites.

Afin d'avoir un échantillon conséquent (plus de 200 points par rails), nous avons créé des profils en travers tous les 15 cm sur chaque jeu de données. Nous avons alors extrait chaque point pour réaliser différentes analyses.

##### 4.1 Analyse de l'écartement des rails

	Référence(m)	Digitalisation manuelle (m)	Digitalisation Automatique(m)
Min	1,500	1,500	1,492
Max	1,509	1,510	1,539
Moyenne	<b>1,503</b>	<b>1,503</b>	<b>1,508</b>
Ecart type	0,003	0,002	0,009

Tableau 2 : Distance d'écartement entre deux rails

##### 4.2 Analyse des nuages de points

	Référence /Digitalisation manuelle (cm)	Référence / Digitalisation automatique (cm)	Digitalisation manuelle/ Digitalisation automatique (cm)
Min	0,0	0,0	0,0
Max	2,3	3,4	3,0
Moyenne	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>
Ecart type	0,6	0,6	0,5

Tableau 3 : Résultats des comparaisons planimétriques

Cette étude a permis de valider l'utilisation d'une procédure automatique d'extraction de rails. En effet, nous obtenons une distance entre les deux rails comprise dans l'intervalle annoncé. Concernant le positionnement absolu du rail, nous avons observé une précision inférieure à 1 cm. Un travail complémentaire a été entrepris en vue de confirmer cette procédure pour des orthophotos comportant plusieurs kilomètres de voies mais ne peut être présenté dans ce résumé car les investigations sont toujours en cours à la date de la rédaction de ce résumé.

#### 5. Conclusion et perspectives

Compte tenu des premiers résultats, nous pouvons affirmer que les travaux portant sur l'industrialisation de procédés d'extraction d'objets présentent un gain de productivité important sans péjorer la précision des livrables. Grâce à l'algorithme développé, il devient possible d'envisager une semi-automatisation des procédés de restitution facilitant ainsi les études et reports. Pour quantifier le gain économique, une étude financière plus approfondie serait nécessaire. Cependant, malgré de très bons résultats, l'algorithme présente des limites (sensibilité, fausses détections ...). Un travail d'optimisation devra donc être entrepris pour améliorer la détection de rails et rendre l'algorithme plus robuste. Pour améliorer l'outil développé, nous pensons qu'une approche combinatoire du traitement d'images et de l'utilisation du nuage de points 3D pourrait être appropriée. Il est également à noter que l'utilisation d'un tel algorithme ne dispense pas l'opérateur de contrôler les résultats fournis afin de valider la qualité des livrables. A partir de la méthode déployée durant ce projet, le Pôle Drones pourra mettre en place de nouveaux outils optimisant la caractérisation de l'environnement ferroviaire (extraction des caniveaux, signalisation, ...).

## Conception d'une nouvelle commande dans 3DReshaper : modélisation de bâtiment par détection de motifs répétitifs

PFE présenté par : **Anais Deschamps**  
 Société d'accueil : **Technodigit**  
 Directeur(trice) de PFE : **Nicolas Mocellin**  
 Correcteurs(trices) : **Pierre Grussenmeyer**  
**Emmanuel Alby**



### 1. Introduction

La modélisation tridimensionnelle à partir de nuage de points 3D est une procédure fortement répandue. Cependant, elle peut rapidement devenir une tâche complexe et chronophage.

Divers logiciels sont disponibles sur le marché, avec des spécificités qui leur sont propres, afin de répondre aux besoins des utilisateurs. 3DReshaper en est un. Il s'agit d'un logiciel convivial et puissant de traitement de nuage de points et de maillage 3D.

Concernant l'évolution des outils de maillage tridimensionnel, Technodigit se concentre sur le fait d'apporter à leurs clients des résultats de plus en plus complets et précis, avec le minimum d'artefacts, et ce pour un temps de traitement optimal. Ainsi, on peut citer quelques améliorations importantes dans les précédentes versions :

- v. 2015 : mise en place de l'outil « Extraire bâtiment » permettant de mailler, par détection de contours, les zones planaires d'un nuage de points 3D et de calculer des intersections entre ces maillages plans
- v. 2016 : réalisation du maillage sphérique. Ce type de maillage prend en compte les positions et directions de scannage afin d'améliorer la qualité du maillage tridimensionnel automatique résultant.

Suite à la constatation de la présence d'éléments récurrents au sein d'un bâtiment (fenêtres, piliers, balcons...), une autre piste d'amélioration a été envisagée. Elle a mené à l'élaboration de ce sujet de projet de fin d'étude : Technodigit souhaite intégrer dans son logiciel un nouvel outil qui permettrait de détecter et de modéliser rapidement ces composants répétitifs.

### 2. Etude préalable : réflexion sur le processus à exécuter pour dupliquer des éléments récurrents

Lors d'un projet de recherche technologique, une étude préalable avait permis de proposer un processus d'exécution d'une telle commande et d'évaluer les avantages et inconvénients d'un tel outil.

Tout d'abord, concernant les outils actuellement disponibles dans 3DReshaper, une duplication manuelle peut être envisagée depuis le maillage d'une des occurrences vers une autre visible dans le nuage. Le procédé est le suivant :

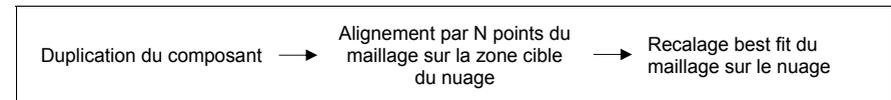


Figure 1 : Processus de duplication manuelle des composants

Les avantages de l'intégration d'une telle fonctionnalité dans 3DReshaper sont multiples. Il s'agit d'aboutir à une amélioration temporelle tout en minimisant l'interaction avec l'utilisateur. Cela est possible dans un premier temps en proposant une commande unique permettant d'effectuer le processus précédemment cité et dans un second temps en automatisant la recherche des occurrences.

La méthode de recherche automatique qui avait été suggérée lors de ces travaux préalables était de considérer une coupe fine du nuage de points comme chemin de recherche.

### 3. Implémentation de la commande

#### 3.1. Condition d'accès à la commande

L'utilisateur doit au préalable avoir modélisé, par maillage, un exemplaire de l'élément récurrent à dupliquer. Ce dernier servira de référence et sera répété à l'emplacement des diverses autres occurrences présentes dans le nuage de points 3D. L'accès à la commande est donc soumis à minima à la sélection de ces deux objets : maillage et nuage.

Ces derniers ne doivent cependant pas nécessairement être monobloc. Il est possible d'accéder à l'outil en ayant sélectionné plusieurs maillages et nuages de points qui seront alors tous considérés comme éléments de référence.

De plus, il est possible d'ajouter à la sélection d'entrée tout type de composant disponible dans 3DReshaper : points, lignes, multilignes, plans... Tous ces éléments annexes, de même que les maillages, seront alors dupliqués autant de fois que nécessaire.

#### 3.2. Méthodes implémentées

Le choix a été fait de conserver une méthode de duplication unitaire et manuelle en complément de la méthode automatique, cela pour deux principales raisons :

- permettre à l'utilisateur de rester maître de l'outil s'il le souhaite
- faire face au cas où la version automatique ne s'avèrerait pas assez efficace : zones du nuage contenant des masques de grandes dimensions, zone contenant des points erronés (points de fuite)...

##### 3.2.1. Version automatique

Concernant la version automatique, plusieurs étapes doivent être réalisées avant de lancer la recherche des occurrences mais leur ordre d'exécution n'a pas d'importance :

- Sélection d'un point de référence sur le maillage
- Définition des contraintes à appliquer sur les déplacements de l'élément de référence pour aboutir à son nouveau positionnement (rotations et translations)
- Définition de la direction de recherche : horizontale, verticale ou libre (besoin de définir deux points limitant la zone de recherche)
- Définition de la tolérance de non-similarité entre les composants

##### 3.2.2. Version unitaire manuelle

Concernant les différentes étapes de la version manuelle, elles sont les suivantes :

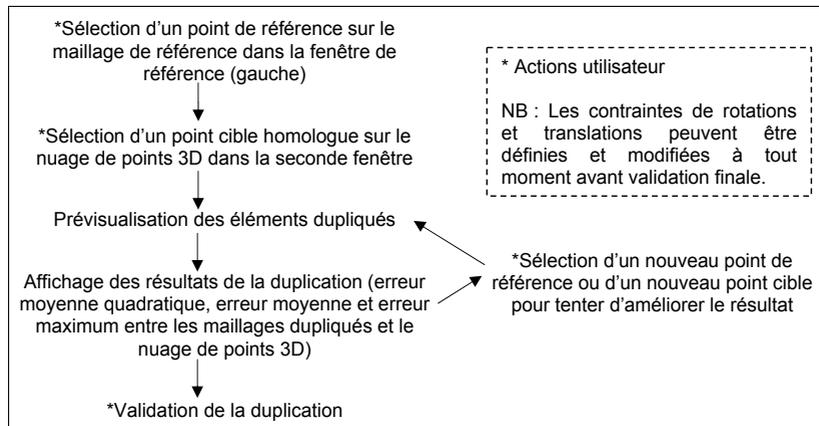


Figure 2 : Processus d'exécution de la version unitaire manuelle implémentée

### 3. Recherche d'ergonomie

L'ergonomie est un concept non négligeable dans le développement informatique. Une homogénéité doit exister entre les différentes commandes proposées par le logiciel et elles doivent être le plus intuitives possible. Cela permet une prise en main plus aisée pour les anciens comme pour les nouveaux utilisateurs du logiciel.

#### 3.1. Homogénéité entre les commandes

Afin de conserver une cohérence au sein de 3DReshaper, les options de la nouvelle boîte de dialogue et leurs apparences sont similaires à celles déjà existantes dans d'autres outils :

- Les boutons permettant de changer le maillage de référence au cours de l'exécution de la commande sont identiques à ceux de l'outil « Recalage best fit ».
- Les différentes contraintes de rotations et translations étaient déjà visibles dans les fonctionnalités « Recalage best fit » ou encore « Aligner des points ».
- Les diverses options d'affichage quant à elles sont extraites de l'outil « Extraire bâtiment ».
- On retrouve aussi les boutons « Annuler » et « Rétablir » présents entre autre dans plusieurs commandes.

#### 3.2. Facilité d'utilisation

La commande a été développée de façon à limiter l'interaction utilisateur pour simplifier son utilisation et ne pas devenir chronophage. Cela implique de soigner le visuel de l'interface graphique afin de guider implicitement l'utilisateur.

Pour ce faire, la boîte de dialogue se lit de haut en bas. On trouve tout d'abord les boutons de choix du maillage de référence à dupliquer, ceux du choix de la méthode et si nécessaire, ceux de la direction de recherche automatique puis ceux de validation. Enfin, au bas de la boîte se retrouvent les contraintes à appliquer sur les rotations et translations et les options d'affichage.

L'interaction avec l'utilisateur se limite à la définition des options dans la boîte de dialogue et à la sélection de points dans les scènes 3D. Lorsque c'est le cas, s'il ne clique pas à un endroit valide, des messages d'information sont générés pour le guider.

### 4. Interface graphique

Afin de rendre plus aisée l'exploitation simultanée des éléments de référence et des nuages de points 3D cibles, la scène a été verticalement divisée en deux vues 3D.

La première (partie gauche) est nommée « Référence » et contient l'ensemble des composants qui seront dupliqués, c'est-à-dire l'ensemble des éléments sélectionnés en entrée de la commande, excepté les nuages de points 3D. Cette vue peut être masquée ou non par l'utilisateur pendant l'exécution de la commande, par le biais d'une option de type case à cocher. Cela permet d'agrandir la surface de la seconde vue une fois que la première a été exploitée.

La seconde vue (partie droite), nommée « Cible » contient l'ensemble des éléments à afficher en fonction des paramètres d'affichage définis par l'utilisateur (nuages d'entrée, maillages dupliqués, composants annexes dupliqués...). C'est aussi dans cette fenêtre que sont affichés les différents composants temporaires en attendant une éventuelle validation de la part de l'utilisateur : direction de recherche, maillage unitairement dupliqué...



Figure 3 : Interface graphique de la commande

## 5. Points forts et limites de l'outil

Le principal point fort de l'outil est le gain de temps qu'il apporte à l'utilisateur, tout d'abord en lui évitant de modéliser plusieurs fois le même élément mais aussi grâce à une rapidité d'exécution. La durée de traitement dépend de la densité du nuage. On peut citer en exemples une durée de dix-huit secondes pour dupliquer douze contreforts d'une église sur un nuage dense et irrégulier ou deux secondes pour dupliquer quatre fenêtres d'un immeuble dont le nuage de points est plus léger et plus lisse. En général, la durée varie de trois dixièmes à une seconde et demie par occurrence dupliquée via l'outil contre plusieurs minutes avec le processus manuel, défini par la figure 1, utilisant les différentes commandes de 3DReshaper.

La précision de recalage des différentes occurrences est aussi à noter comme point fort. Le recalage par best fit proposé par 3DReshaper permet d'obtenir un résultat satisfaisant même si le point cible sélectionné n'est pas l'exact homologue du point de référence mais un point qui lui est peu distant. Il permet aussi de minimiser l'impact du bruit présent dans les nuages cibles (irrégularités, points faux...).

Concernant les limites, il est à noter que la précision de ces duplications repose sur la similarité des différentes occurrences. En effet, aucune mise à l'échelle n'est effectuée dans cette nouvelle commande, il s'agit uniquement de duplications et d'alignements.

## 6. Analyse des résultats

Une première analyse des résultats (figure 4) évalue la qualité des duplications. Cela est possible grâce à un bouton permettant de réaliser une inspection 3D en distance du nuage par rapport aux divers maillages dupliqués. On obtient alors le pourcentage de points associés à chaque intervalle de distance. Cependant, cette analyse est globale et les valeurs résultantes témoignent autant de la qualité du positionnement que de la non-similarité des composants sans pouvoir les dissocier.

D'autres tests doivent être menés afin de déterminer la robustesse de la commande face à différentes notions impactant le nuage de référence : les masques et le bruit (principalement les points erronés, points de fuite...).

Pour finir, une étude déterminera jusqu'à quelle limite de similarité entre composants l'outil produit des résultats satisfaisants.

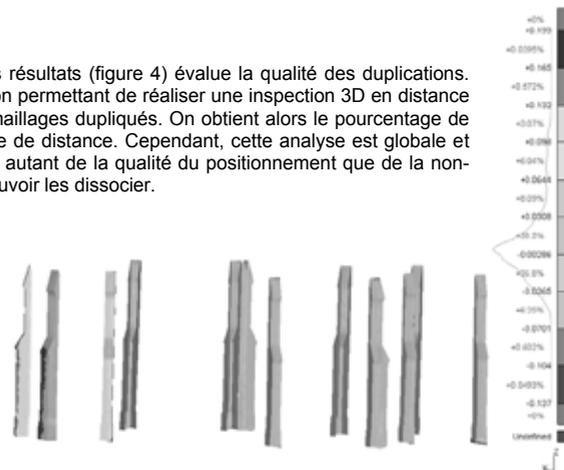


Figure 4 : Colorisation des maillages dupliqués en fonction de la distance aux points des nuages de référence

## 7. Conclusion et perspectives

La nouvelle commande mise en place dans 3DReshaper permet de réduire le nombre de manipulations nécessaires pour modéliser les différents éléments répétitifs présents sur un bâtiment et donc de gagner du temps.

La boîte de dialogue et ses options ont été pensées pour respecter la philosophie de 3DReshaper. Elle est donc en adéquation avec celles des autres outils et son utilisation est instinctive pour les utilisateurs du logiciel.

Cependant, l'outil peut encore être amélioré. La principale modification à apporter serait d'insérer une nouvelle option dans la commande qui permettrait d'autoriser une mise à l'échelle des composants dupliqués et de préférence avec un facteur d'échelle par direction afin de répondre aux possibles dissimilarités entre les occurrences.

Une autre amélioration serait de proposer non plus une analyse globale pour l'inspection en distance entre les maillages dupliqués et les nuages de points mais une analyse individuelle sur chaque occurrence. Cela permettrait de mettre plus en valeur les écarts dus au problème de non-similarité pour chaque élément.

# Protocoles d'acquisition d'images et de traitement des données par drone : modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie

PFE présenté par : **Arnadi Murtiyoso**

Société d'accueil : **Drone Alsace**

Directeur de PFE : **Tristan Freville**

Correcteurs : **Mathieu Koehl et Pierre Grussenmeyer**



## 1 Introduction

Depuis sa première conception en tant que support militaire, l'utilisation du drone a évolué de façon importante vers le domaine civil. Dans le domaine de la géomatique, cette vulgarisation de la technologie aérienne et sa miniaturisation a ouvert la voie à de nouvelles méthodes de photogrammétrie aérienne rapprochée. Couplé au développement rapide des capteurs optiques et de la puissance de calcul, le potentiel de ce type de relevé est important pour de nombreuses applications. Le domaine de la documentation du patrimoine profite naturellement de ces évolutions, en complément des méthodes déjà établies en photogrammétrie terrestre [1]. Plus récemment, les drones ont commencé à être plus spécialisés pour des secteurs spécifiques tels que le levé de zones agricoles et l'inspection industrielle à courte distance. Quelques exemples d'utilisation de drones dans le cadre d'inspection ou de la documentation du patrimoine sont présentés dans [2, 3].

Dans le domaine de l'imagerie, l'optique du capteur embarqué sur un drone joue un rôle très important. Quelques fabricants de drone ont essayé d'intégrer des lentilles de qualité supérieure, mais le poids des optiques reste un facteur limitant. Les progrès dans le domaine de la vision par ordinateur ont largement facilité la chaîne des traitements photogrammétriques. Celle-ci commence avec une extraction et un appariement automatique des points homologues, suivie par une détection robuste des fautes et leur élimination. Un ajustement des faisceaux en bloc est ensuite effectué afin de calculer les positions et les orientations de chaque station d'appareil photo [4].

La société Drone Alsace est un opérateur de drone et membre de la Fédération Professionnelle du Drone Civil (FPDC) qui travaille dans les domaines de la géomatique, de l'inspection technique et de l'audiovisuel. Sa flotte comprend non seulement des drones à voilure tournante, mais aussi à voilure fixe pour des applications à grande échelle. Drone Alsace réalise des études de faisabilité, des acquisitions de données ainsi que leur exploitation et analyse. Pour notre étude, nous avons à notre disposition un drone dédié à faire des inspections industrielles.

L'objectif de ce projet sera d'étudier les protocoles d'acquisition et de traitement existants afin de pouvoir les implémenter pour des projets de drone. Ceci implique l'étude de la calibration du capteur, la planification du vol, la comparaison des logiciels, la modélisation 3D des objets et l'étude sur les différents livrables. De plus, une étude sur la qualité géométrique et visuelle du résultat sera effectuée. Deux bâtiments remarquables de la ville de Strasbourg ont été étudiés : le Palais Rohan et l'Eglise catholique Saint-Pierre-le-Jeune. L'acquisition des données a été réalisée par voie photogrammétrique à l'aide du drone et un relevé lasergrammétrique a également été effectué pour disposer de données de référence.

## 2 Moyens et méthodes

Le premier drone employé dans cette étude est une plateforme à voilure-tournante multi-hélices construite par la société Sensefly (modèle Exom, rebaptisé Albris en avril 2016). Ce drone est apparu sur le marché pour la première fois en mai 2015 et est dédié aux inspections rapprochées à haute résolution, aux levés topographiques et à la modélisation 3D. L'Albris est équipé de plusieurs capteurs dont un appareil photo à 38 mégapixels, un capteur thermique et un capteur vidéo. Quelques capteurs à ultrasons fournissent des mesures approximatives de distances entre le drone et les objets environnants, lui permettant ainsi de se positionner à une distance arbitraire de l'objet. L'appareil photo lui-même est fourni avec une lentille de 8 mm et un capteur de 10 mm x 7,5 mm. Cette configuration lui permet théoriquement d'atteindre une taille de pixel sur l'objet de 1 mm à une distance de 6 m.

Sensefly Albris	
Plateforme	
Poids	1.8 kg
Autonomie	~22 minutes
Appareil photo	
Focale	8 mm
Taille du capteur	10 x 7.5 mm
Angle d'ouverture	63°

DJI Phantom 3 Professional	
Plateforme	
Poids	1.3 kg
Autonomie	~23 minutes
Appareil photo	
Focale	4 mm
Taille du capteur	6.5 x 5 mm
Angle d'ouverture	94°

Fig 1. Les caractéristiques principales des drones utilisés.

disponible au laboratoire, est un autre logiciel utilisé dans ce projet. Les logiciels libres Micmac de l'IGN et VisualSFM ont également été testés. Dans le cas de VisualSFM qui ne fournit que l'orientation des images, la densification du nuage de points a été réalisée en utilisant les algorithmes PMVS (*Patch-based Multi View Stereo*). Le logiciel SURE (nFrames, Stuttgart) a également été testé pour le calcul des nuages de points.

Dans le cas du levé par drone par photogrammétrie rapprochée, il est souhaitable de récupérer le plus de détails possibles. Comme en photogrammétrie terrestre, il est important de disposer d'images à fort recouvrement des détails de l'objet. Des vues obliques sont également acquises pendant le vol en plus des images perpendiculaires à l'objet. Dans le cas de la façade d'un bâtiment, les images obliques sont prises en suivant le même plan de vol mais en orientant l'appareil photo vers les quatre directions obliques.

### 3 Résultats et analyses

#### 3.1 Calibration d'appareils photos

Les résultats de chaque calibration (PhotoModeler, Photoscan, Apero et PostFlight3D) sont résumés dans le Tableau 1, tandis que *Pix4D (const)* correspond aux valeurs pré-calibrées données par Pix4D. Les paramètres obtenus sont variables, ce qui montre une forme d'instabilité du capteur. Ceci provient bien entendu du fait que les appareils intégrés dans les deux drones sont équipés de petits capteurs. La différence entre les résultats calculés et les valeurs fournies démontre le besoin d'effectuer une calibration avant de lancer une mission pour vérifier la fiabilité de ces données pré-calibrées. Ceci peut provenir de différentes raisons, comme la stabilité du capteur entre les différentes acquisitions, la géométrie du capteur, les conditions de prises de vues, etc.

Tableau 1. Résultats de la calibration avec les différents logiciels.

	DJI Phantom 3				Sensefly Albris				
	PhotoModeler	Photoscan	Apero	Pix4D (const)	PhotoModeler	Photoscan	Apero	PostFlight3D	Pix4D (const)
$c$ (mm)	3.779	3.6107	3.7231	3.5320	7.9699	8.0255	7.8259	7.8536	7.9422
$z_0$ (mm)	3.2844	3.1924	3.1926	2.9642	1.0519	1.0554	1.0515	1.0508	1.0064
$z_0$ (mm)	2.8026	2.3136	2.3248	2.2448	1.7872	1.8222	1.7915	1.7996	1.7276
$K_1$	-3.360E-04	-4.837E-04	-4.734E-04	-1.161E-03	3.006E-03	2.497E-03	3.731E-03	3.963E-03	2.831E-03
$K_2$	-1.371E-05	1.763E-05	1.893E-05	2.268E-05	-1.308E-04	-1.411E-04	-1.230E-04	-1.898E-04	-1.612E-04
$K_3$	5.114E-06	4.824E-06	2.468E-06	-1.007E-06	1.877E-06	1.679E-06	1.302E-06	2.314E-06	2.011E-06

#### 3.2 Palais Rohan à Strasbourg

Le Palais Rohan est un bâtiment historique de la ville de Strasbourg. Situé à côté de la cathédrale, le palais a été bâti pour le Cardinal Rohan entre les années 1732 et 1742. Dans le cadre de ce projet, seule la façade centrale (construite en grès jaune) du côté de l'III a été photographiée. Les dimensions approximatives de la partie numérisée sont de 14 x 20 mètres.

La taille du pixel sur l'objet est de l'ordre de 1 mm. La précision de l'aérotriangulation calculée à partir des résidus sur les points d'appui est de 9 mm. L'exactitude des points de vérification (points de contrôle) obtenus en comparant les coordonnées de référence mesurées à l'aide d'une station totale et les coordonnées du projet de photogrammétrie est de 7 mm. Notons que les points d'appui et de vérification sont des points de détail de l'objet (sans cibles). La précision et l'exactitude sont bien

Nous avons également utilisé le drone DJI Phantom 3 Professional, pourvu d'une voilure-tournaute multi-hélice. Le Phantom 3 est une plateforme légère et relativement peu onéreuse (env. 1000 €), mais n'est pas a priori destiné à des tâches d'inspection à courte distance. Contrairement aux versions précédentes, le Phantom 3 n'est plus équipé d'une lentille hypergone. Il est équipé d'une focale de 4 mm et d'un capteur de 6,5 mm x 5 mm. La Fig. 1 résume les caractéristiques principales des drones employés.

Dans le cadre de ce projet, les logiciels principalement utilisés sont Pix4D et Photoscan (AgiSoft LLC). Quelques autres logiciels ont été utilisés afin de comparer les résultats. PhotoModeler (Eos Systems Inc.),

entendu fonctions de la qualité du pointé sur les images, malheureusement bruitées dans le cas de l'Albris.

Les résultats de l'appariement dense sont comparés à un nuage de points de la façade issu d'un scanner laser (cf. Fig 2). Nous avons calculé une valeur moyenne d'écart-type de 1 cm en comparant le nuage de points denses issu des traitements photogrammétriques au nuage maillé issu du scanner laser. Visiblement PhotoModeler et Micmac fournissent des nuages moins homogènes que Photoscan et Pix4D. Sur les profils horizontaux d'une colonne, Photoscan et Pix4D génèrent un nuage plutôt « lissé », ce qui implique probablement une contrainte géométrique ou une interpolation à la fin de l'étape d'appariement. Ce phénomène est également observé avec le profil vertical sur un mur.

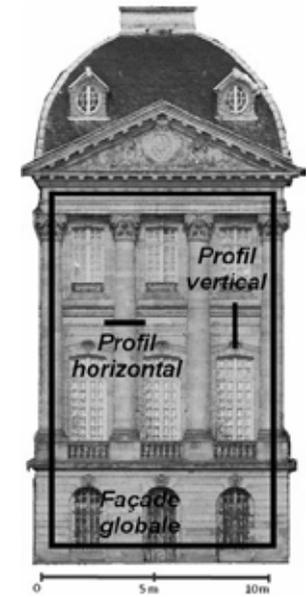
#### 3.3 Eglise catholique St-Pierre-le-Jeune à Strasbourg

L'église catholique St-Pierre-le-Jeune a été construite pendant l'annexion allemande entre 1889 et 1893. Ses façades sont en grès rose et du style néo-roman. La flèche de cette église a une hauteur de 50 mètres à partir du sol et le diamètre de la coupole est de 19 m.

Les deux drones ont été utilisés pour ce projet. La façade principale du côté sud-ouest a été photographiée avec l'Albris. Le reste du bâtiment a été levé par le Phantom 3. De plus, quelques images terrestres ont également été prises afin de compléter quelques parties du bâtiment qui sont difficiles à lever par le drone (présence d'une végétation importante autour de l'église). L'intégration de différentes sources d'images constitue un enjeu intéressant pour le projet.

Avec plus de 2500 images acquises, une gestion de projet est indispensable. Une division du projet en quelques petits blocs a été effectuée (cf. Fig 3). Cette décomposition a l'avantage de faciliter la gestion des ressources de traitement et nous permet également d'avancer dans le calcul du projet sans devoir attendre la fin de l'étape d'acquisition sur le terrain. Par contre, cette stratégie ne permet pas une compensation globale. De plus les points qui sont générés ne sont pas filtrés, d'où la présence des points redondants. L'homogénéisation radiométrique se fait alors sur la génération de la texture à partir des images et d'un modèle maillé complet.

Au niveau de l'aérotriangulation, il est intéressant de noter que les données de l'Albris donnent une précision de 8 mm. Cela est comparable avec la précision du projet sur le Palais Rohan. Pourtant, la distance caméra-objet dans ce projet est presque deux fois celle dans le projet de Rohan (taille pixel-objet de 1,4 mm).



	Exactitudes		
	Globale	Horizontale	Verticale
Photoscan	11 mm	6.7 mm	7.0 mm
Pix4D	10 mm	5.4 mm	6.6 mm
Micmac	11 mm	4.5 mm	6.9 mm
PhotoModeler	13 mm	10.2 mm	8.6 mm

Fig 2. Analyse du projet sur le Palais Rohan. Ici des mesures issues de scanner laser ont été utilisées en tant que référence. Le profil horizontal concerne une colonne de style Corinthien alors que le profil vertical concerne une portion de mur.



Fig 3. Principe de décomposition du projet.



**Exactitude de la façade sud-ouest (Albris)**

Photoscan	1.4 cm
Pix4D	1.4 cm
Micmac	1.7 cm

**Exactitude du tympan (Albris)**

Photoscan	1.2 cm
Pix4D	1.5 cm
Micmac	1.5 cm

**Exactitude de la façade sud-est (Phantom 3)**

Photoscan	1.4 cm
Pix4D	1.5 cm

**Exactitude de la gargouille de Saint-Mathieu (Phantom 3)**

Photoscan	2.6 cm
Pix4D	2.0 cm

Fig 4. Modèle maillé de l'église et analyses faites en utilisant les données laser en tant que référence.

Au niveau de l'appariement dense, encore une fois les résultats sont comparés aux données obtenues par scanner laser (cf. Fig 4). Sur la façade principale prise par l'Albris, une exactitude de 1,4 cm a été atteinte sur l'échantillon de points. Micmac donne un résultat légèrement moins bon surtout au niveau du tympan, avec la présence de plusieurs trous sans le nuage de points denses. La résolution théorique du nuage de points généré peut être calculée en utilisant la Formule 1 :

$$R_{théorique} = P * DS * GSD_{théorique} \quad (1)$$

Où  $R_{théorique}$  est la résolution du nuage de points,  $P$  le niveau pyramidal d'images utilisé pour l'appariement,  $DS$  le coefficient de sous-échantillonnage du nuage et  $GSD_{théorique}$  la taille pixel-objet théorique calculé en fonction de la distance caméra-objet. Dans ce cas là, ce calcul théorique nous donne une valeur de 2,3 cm. Sur la façade sud-est, le résultat issu d'images du Phantom 3 nous donne une exactitude de 1,5 cm sur Photoscan et Pix4D. Ceci est plutôt bien puisque la résolution attendue est entre 2,5 et 3,7 cm (sachant que les vols de Phantom 3 ne permettent pas de fixer la distance entre le capteur et l'objet). Cependant, sur la gargouille de la même façade qui représente Saint-Mathieu, la précision diminue jusqu'à 2 cm pour Pix4D et 2,6 cm pour Photoscan. La présence d'une forme plus complexe à modéliser a sans doute limité la précision dans ce cas précis.

#### 4 Conclusions

Quelques expérimentations sur la calibration montrent que les paramètres de calibration donnés par le fournisseur du drone ne sont pas forcément stables. En effet, la calibration tient compte des variations de la géométrie ainsi que de la stabilité du capteur.

Au niveau de l'acquisition des images, l'importance du taux de recouvrement et de la géométrie est évidente dans les deux cas rencontrés. Afin de pouvoir générer un nuage de points bien dense, un taux de recouvrement important (jusqu'à 80%) peut être envisagé. Par contre, afin d'assurer une qualité élevée du calcul d'aérotriangulation, une géométrie basée sur une combinaison de vues perpendiculaires et obliques des centres de prises de vues est souhaitée. Sur le terrain, l'expérience montre que dans un milieu urbain il ne faut pas négliger les signalisations (feuille d'autorisation, gilet jaune etc.) pour expliquer clairement au public les conditions et les objectifs du vol de drone.

L'appariement dense des images reste un problème particulier à traiter dans un projet de photogrammétrie rapprochée, notamment en présence de bruit important sur les images. La texture de l'objet joue également un rôle important. Ainsi, une stratégie particulière devra être envisagée pour aborder ces questions en fonction des cas rencontrés.

#### Références

- [1] Nex, F. et F. Remondino. 2014, "UAV : platforms, regulations, data acquisition and processing", dans 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage : Theory and Best Practices, édité par F. Remondino et S. Campana, chap. Photogrammetry, Archaeopress, Oxford, England, pp. 73-86.
- [2] Achille, C., A. Adami, S. Chiarini, S. Cremonesi, F. Fassi, L. Fregonese et L. Taffurelli. 2015, "UAV-based photogrammetry and integrated technologies for architectural applications - methodological strategies for the after-quake survey of vertical structures in Mantua (Italy)", Sensors (Switzerland), vol. 15, no 7, pp. 15520-15539.
- [3] Alidoost, F. et H. Arefi. 2015, "An image-based technique for 3D building reconstruction using multi-view UAV images", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-1/W5, pp. 43-46.
- [4] Remondino, F. et S. Del Pizzo. 2012, "Low-cost and open-source solutions for automated image orientation - a critical overview", Progress in Cultural Heritage Preservation - LNCS, vol. 7616, pp. 40-54.

## Suivi par thermographie infrarouge aéroportée et par photogrammétrie terrestre pour l'évaluation des échanges nappes-rivière et de la dynamique morphologique d'un cours d'eau restauré

PFE présenté par : **Julie Roy**

Société d'accueil : **Laboratoire Image Ville Environnement**

**Laboratoire ICube**

Directeurs de PFE : **David Eschbach et Laurent Schmitt**

Correcteurs : **Pierre Grussenmeyer et Mathieu Koehf**



### 1. Présentation et contexte de l'étude

L'île artificielle du Rohrschollen est une Réserve Naturelle située à huit kilomètres au sud-est de Strasbourg. L'île résulte de l'aménagement du Rhin en feston, réalisé en 1970 lors de la construction de la centrale hydroélectrique de Strasbourg. Cet aménagement a profondément perturbé le fonctionnement hydro-morphologique du fleuve : les crues sont devenues rares et statiques. Le milieu s'assèche progressivement et la principale annexe hydraulique du Rhin (le Bauerngrundwasser) s'est fortement colmatée. Ceci a pour conséquence la disparition progressive de la faune et de la flore caractéristiques des forêts alluviales rhénanes.

Le projet de fin d'études s'inscrit dans le cadre du projet LIFE+ (programme de financement pour l'environnement de l'Union Européenne), qui vise à restaurer le fonctionnement hydromorphologique et écologique de l'hydrosystème de l'île. Au moyen d'une prise d'eau et d'un chenal de connexion, le Bauerngrundwasser est reconnecté aux variations hydrologiques du Rhin et des submersions dynamiques et morphogènes sont recréées. Afin d'évaluer les bénéfices écologiques qui ressortent de ce projet de restauration, le suivi scientifique de l'île est réalisé depuis 2012.

Le PFE apporte un support technique à deux compartiments de ce suivi au travers de compétences spécifiques à la topographie. Nous pouvons dès lors dégager deux axes au projet de fin d'études : le suivi de l'évolution géomorphologique du chenal artificiel d'une part, et d'autre part son suivi hydrogéologique. Ce travail doit permettre de proposer des solutions innovantes et reproductibles pour le suivi à long terme de la Réserve Naturelle.

### 2. Suivi géomorphologique

Le chenal artificiel a volontairement été sous-dimensionné par rapport au débit maximum d'injection afin de permettre la submersion partielle de l'île. En conséquence, sa morphodynamique est élevée.

Nous retrouvons les processus d'évolutions géomorphologiques illustrés en figure 1 : de l'érosion en berge concave, du dépôt en berge convexe. Le fond du lit évolue également (rehaussement du fond).

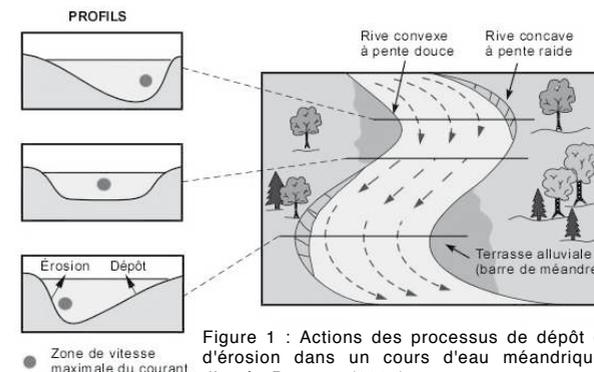


Figure 1 : Actions des processus de dépôt et d'érosion dans un cours d'eau méandrique, d'après Bourque (2004)

Le suivi géomorphologique a pour objectifs (i) de réaliser des comparaisons diachroniques de modèles 3D pour suivre les évolutions morphologiques et (ii) de quantifier les volumes de sédiments érodés ou déposés entre deux épisodes de crue (budgets sédimentaires).

Cette portion du travail se fait à deux échelles. Trois tronçons situés dans des courbes du chenal (processus d'érosion et de dépôt plus intenses) sont suivis de manière fine par photogrammétrie terrestre. Un levé topographique (profils en travers, profil en long) permet de compléter l'information en fournissant des données bathymétriques. Ce levé est étendu à l'ensemble du chenal pour un suivi global.

L'une des caractéristiques de ce projet est la non-pérennité des points implantés à chaque levé (stations de polygonation). En effet, ces points doivent être implantés à proximité immédiate des berges (contrainte de visibilité), et disparaissent ou sont déplacés lors des crues. Les données sont donc systématiquement rattachées au système de coordonnées Lambert I Grille, altitudes NGF-IGN69 par levé GNSS. En outre, la configuration des berges n'étant pas favorable à un levé photogrammétrique, il est primordial de réaliser ces acquisitions en se fiant à un protocole rigoureux.

La chaîne de traitements est basée sur les travaux de Supper (2015), comme illustré en figure 2.

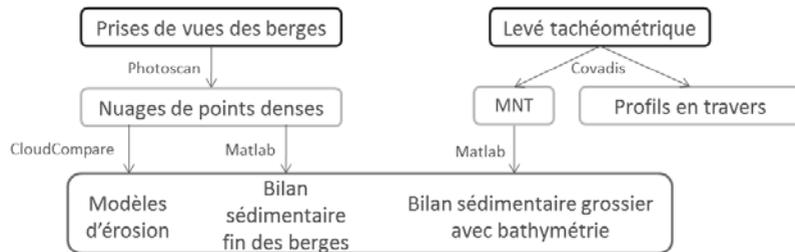


Figure 2 : Chaîne de traitements développée pour le suivi géomorphologique

Deux types de livrables sont produits dans cette section de l'étude. Ils fournissent respectivement une information quantitative et qualitative sur l'évolution de la forme du chenal artificiel. D'une part, les budgets sédimentaires (réalisés à partir d'un script Matlab de Supper (2015)) quantifient les volumes de sédiments déplacés lors de chaque crue. D'autre part, les modèles d'érosion (algorithme M3C2 de CloudCompare) permettent de spatialiser les zones du chenal où les sédiments sont érodés et déposés.

Le PFE a permis :

- d'explorer les limites de l'utilisation de ces méthodes de traitement pour le suivi de ce type de milieu
- de formuler des recommandations opérationnelles pour améliorer l'exactitude des résultats
- de réaliser la synthèse des résultats antérieurs et obtenus au cours du PFE en vue d'une publication scientifique.

### 3. Suivi hydrogéologique

Le suivi hydrogéologique consiste à évaluer l'importance des exfiltrations phréatiques au droit des alternances seuil-mouille. En effet, comme expliqué par Poole et Berman (2001), ces alternances favorisent les flux de subsurface (fig 3).

La température de l'eau de la nappe phréatique est constante, tandis que celle du cours d'eau varie rapidement en fonction des conditions climatiques.

Il est alors possible de mettre en évidence les exfiltrations phréatiques par suivi thermique de l'eau.

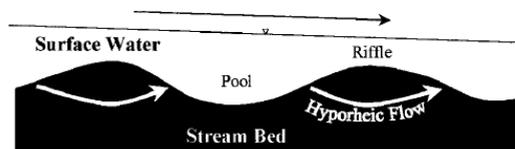


Figure 3 : Mise en évidence des remontées phréatiques aux zones d'alternance seuil-mouille, d'après Poole et Berman (2001)

Le projet de fin d'études a pour objectif de réaliser un tel suivi sur le chenal artificiel par thermographie infrarouge aéroportée. Pour ceci, diverses méthodes de traitement d'images sont mises en œuvre dans un souci d'automatisation.

La thermographie infrarouge appliquée aux cours d'eau à l'échelle de notre étude n'est pas un sujet très répandu dans la littérature. Quoi qu'il en soit, en raison du comportement de l'eau dans la partie infrarouge thermique du spectre électromagnétique (longueurs d'ondes entre 7.5µm et 13.5µm dans notre cas), un grand nombre de facteurs extérieurs perturbe la mesure de température.

En effet, l'eau se comporte comme un corps noir dans la bande de longueurs d'ondes considérée (émissivité proche de 1). Dès lors, le rayonnement électromagnétique reçu et mesuré par la caméra n'est pas constitué que du rayonnement émis par l'eau. Comme illustré en figure 4, le capteur reçoit également des rayonnements thermiques issus des réflexions des objets environnants à la surface de l'eau. L'absorption atmosphérique est également à prendre en compte.

En outre, l'émissivité de l'eau dépend de la rugosité de surface. Ce facteur est à prendre en compte, notamment aux zones d'alternance seuil-mouille où l'on passe d'un milieu lotique à un milieu lentique.

Il est également important de noter que les rayonnements reçus par le capteur sont émis par une couche d'une épaisseur de l'ordre de 100µm à la surface de l'eau.

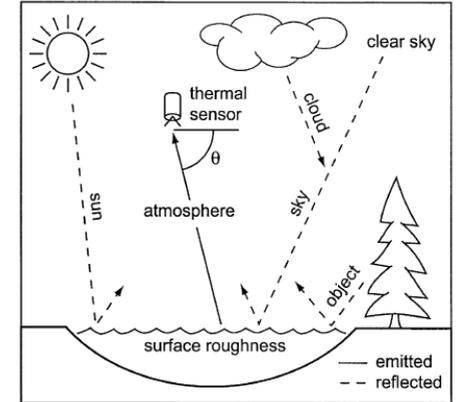


Figure 4 : Sources de rayonnements infrarouges émis et réfléchis en télédétection appliquée aux systèmes fluviaux, d'après Torgersen et al. (2001)

Afin de corriger les températures rayonnées de ces erreurs, il convient de disposer des cibles « thermiques » (à forte émissivité, et composées de différents matériaux afin d'avoir différentes températures). Ces cibles, mesurées à la fois *in situ* ( $T_{KIN}$ ) et par la caméra thermique ( $T_{RAD}$ ), fournissent des températures « vraies » pour la correction des observations. Il est également intéressant de mesurer la température de l'eau à l'aide de thermomètres immergés afin de contrôler les valeurs corrigées.

Une caméra infrarouge FLIR Tau2 a été utilisée pour ce suivi. Cette caméra a une focale de 13mm et une taille de pixel-objet de 17µm. Sa calibration radiométrique fera l'objet d'un projet ultérieur.

Le suivi thermique du Rohrschollen n'a pu être réalisé (contraintes de temps et inondation de l'île pendant plusieurs semaines). Un suivi test a donc été fait sur le Lachter à Boofzheim (67). Ce cours d'eau présente les avantages suivants pour notre étude :

- existence d'apports phréatiques à l'amont
- dimensions similaires à celles du chenal artificiel
- zones dégagées à proximité immédiate du cours d'eau pour l'atterrissage du drone
- couvert forestier partiel du cours d'eau
- accès facile depuis Strasbourg.

La configuration du levé diffère néanmoins de celle d'un levé réalisé sur le Rohrschollen dans la mesure où le drone a volé au-dessus de la canopée et non en-dessous. La taille du pixel image est donc supérieure à celle que nous aurions pu obtenir sur l'île. Quoi qu'il en soit, ce survol nous permet de tester la chaîne de traitements envisagée et de formuler des recommandations pour les levés à venir. Les acquisitions ont été faites en couplant des images acquises dans l'infrarouge thermique (FLIR Tau2) et dans le visible (GoPro Hero 4 Black).

La chaîne de traitements est présentée figure 5. La génération des orthophotos se fait à l'aide d'Agisoft Photoscan (étape 1). Les étapes suivantes (2 à 5) sont réalisées avec un script Matlab

développé au cours du PFE. Erdas Imagine permet également de classifier les images pour la suppression des pixels « contaminés » (étape 3).

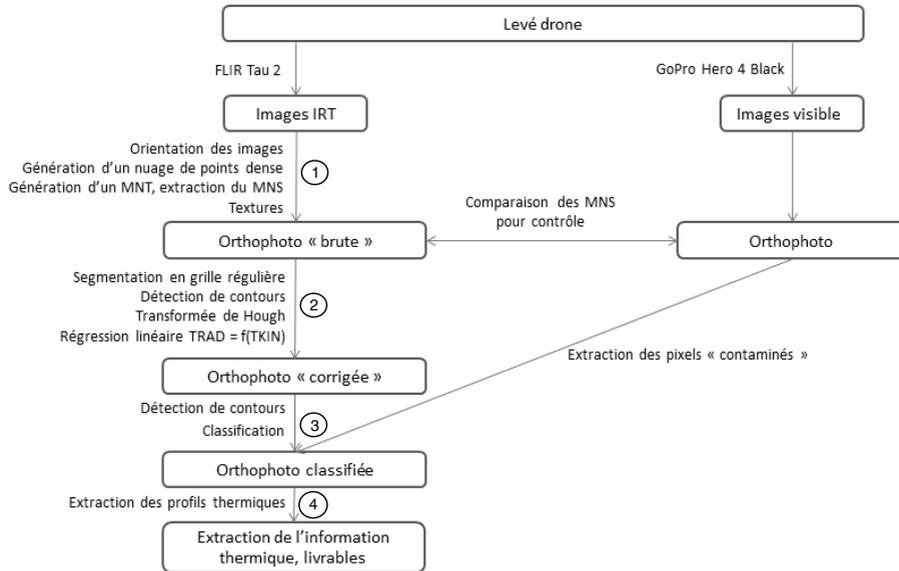


Figure 5 : chaîne de traitements proposée pour les images infrarouge

### Conclusion et perspectives

A l'issue de ce projet, diverses recommandations relatives au suivi géomorphologique peuvent être formulées. Elles concernent l'acquisition et le traitement des données, mais constituent également une mise en garde quant à l'utilisation des résultats en vue de publications scientifiques.

Les essais réalisés pour le suivi thermique du Rohrschollen nous permettent d'élaborer une chaîne de traitements et de formuler des recommandations opérationnelles pour les suivis ultérieurs. En outre, ils montrent la possibilité de travailler avec des algorithmes optimisés pour le traitement des images dans le visible, avec les limitations que cela comporte (notamment concernant les formats d'export).

Par la suite, le travail réalisé servira de base à de futurs travaux de collaboration entre le LIVE et l'INSA. Certains axes pourront être développés en particulier : proposition de nouvelles solutions pour pallier les limites des méthodes utilisées pour le suivi géomorphologique, optimisation de la chaîne de traitements des images infrarouge et calibration rigoureuse de la caméra thermique.

### Références citées :

[Bourque, 2004]  
Bourque, P.A., (2004). [En ligne]. *La dynamique externe de la Terre : les eaux de ruissellement*. Université Laval. [Planète Terre](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html).  
Disponible en ligne : [http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html)

[Poole et Berman, 2001]  
Poole, G.C. et Berman, C.H. (2001). *An ecological perspective on in-stream temperature : natural heat-dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation*. *Environmental Management*, vol. 27, No 6, pp 787-802.

[Supper, 2015]  
Supper, E. (2015). *Suivi géomorphologique du chenal artificiel du Bauerngrundwasser par combinaison de méthodes d'imagerie terrestres et aériennes*. Mémoire thesis, INSA de Strasbourg.

[Torgersen et al., 2001]  
Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J., Norton, D.J. (2001). *Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams*. *Remote Sensing of Environment*, vol. 76, pp.386-398.  
Disponible en ligne : [http://faculty.washington.edu/cet6/pub/Torgersen\\_etal\\_2001.pdf](http://faculty.washington.edu/cet6/pub/Torgersen_etal_2001.pdf)

## Etude et développement de méthodes de mesure de convergence en galeries souterraines

PFE présenté par : Jordan MALLOUH  
Société d'accueil : FUGRO GEOID SAS  
Directeur de PFE : M. Bertrand CHAZALY  
Correctrice : Mme. Tania LANDES



### 1 Introduction

#### 1.1 Le lieu de l'étude

Ce PFE est réalisé en collaboration avec l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA). Sous la tutelle des ministères chargés de la Recherche, de l'Industrie et de l'Environnement, elle étudie à Bure la faisabilité du stockage géologique profond des déchets de moyenne et haute activité à vie longue, en assurant la maîtrise d'ouvrage du projet Cigéo.

Dans cette perspective, commence en 2000 la construction du Laboratoire de Meuse/Haute-Marne à Bure, avec la participation des géologues de GEOTER (FUGRO GEOTER depuis mai 2012). Dès 2009, FUGRO GEOID intervient pour effectuer des balayages 3D de galeries, ainsi que des suivis de mesures de convergences. Le groupe FUGRO accompagne donc l'ANDRA depuis plus de 10 ans dans ses programmes de recherche et développement en galeries souterraines.

Le laboratoire est composé d'un réseau de galeries de 1.5km situé à 490m de profondeur. De nombreuses recherches y sont effectuées afin d'étudier le comportement de la couche géologique après creusements ainsi que son degré d'imperméabilité.

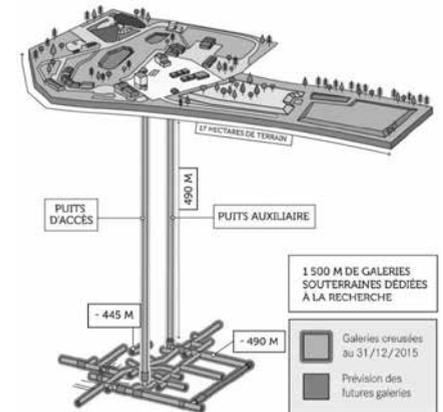


Figure 1 : plan du laboratoire souterrain de l'ANDRA, à Bure.

#### 1.2 La mesure de convergence à Bure

La réalisation d'ouvrage souterrain nécessite le suivi minutieux du comportement des excavations et soutènements. Les mesures de convergence, ou convergencemétrie ou sections de mesures de convergence (SMC), ont pour but de mesurer le rapprochement ou l'éloignement relatif de deux éléments tels que les parois de galeries, les piédroits de tunnels, soutènements, blindages etc.

A Bure, six plots de convergences par section (boulons de soixante centimètres de long) sont implantés jusqu'au terrain naturel. Ces plots forment alors six bases de mesure. Jusqu'à présent, les SMC étaient effectuées à l'aide de fils invar maintenus à une tension constante à l'aide d'un dynamomètre, et entre deux plots situés sur des parois opposées. Avec des conditions de mesures idéales et effectuées avec rigueur, la précision atteinte est de l'ordre du 1/10ème de millimètre. Mais cette méthode s'accompagne de nombreux inconvénients.

D'une part, sa mise en œuvre s'avère lourde : elle mobilise deux opérateurs, une nacelle et son conducteur ; chaque section de mesure dure 10 à 30min ; il est impossible de travailler pendant qu'une circulation quelconque s'effectue en galerie ; la mesure ne peut être réalisée lorsque la ligne reliant les points d'accrochage est obstruée (pose de gaines, de matériels de chantier...).

D'autre part, la répétabilité et la fiabilité des mesures ne sont pas assurées : le set de fils invar nécessite d'être étalonné sur un banc de contrôle ; il faut toujours appliquer la même force de serrage entre le fil et le plot ; la présence d'aération naturelle ou forcée peut faire vibrer le fil et rendre la lecture imprécise.

Enfin, le décrochement du fil invar placé en voûte peut être une cause d'accident. Ce fut le cas pour notre géomètre, blessé à la nuque.

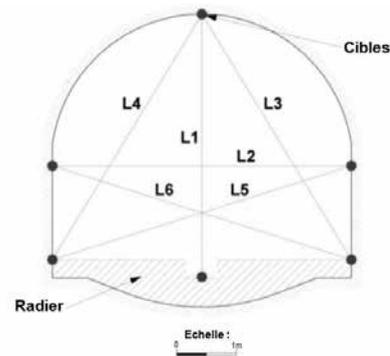


Figure 2 : disposition et principe des mesures de convergence

### 1.3 Objectifs

La mesure de convergence ne doit pas présenter de risques ni constituer une gêne pour la progression des travaux souterrains. Il était donc intéressant de proposer à l'ANDRA une méthode plus simple au regard des conditions de mise en œuvre, respectant les critères suivants :

- Coût et facilité de mise en œuvre.
- Durée d'immobilisation de la galerie.
- Garantie d'une précision submillimétrique.
- Ressources humaines et matérielles à mobiliser.
- Facilité d'acquisition et répétabilité des mesures.
- Sécurité du personnel ou de tout intervenant en galerie.

## 2 Approches envisagées

Nous avons alors étudié les différentes techniques de mesure sans contact disponibles chez FUGRO GEOID, les conditions de mesure associées et les méthodes de traitement permettant d'assurer la détection des variations submillimétriques.

### 2.1 La tachéométrie

Il faut dissocier deux techniques principales : les points rayonnés et l'intersection spatiale. Avec un tachéomètre de haute-précision ayant une résolution angulaire de l'ordre de 0.5" et en distance de  $\pm 0.1$  à  $\pm 0.2$ mm, il est possible d'atteindre une précision de mesure submillimétrique sur les mesures de convergence en rayonnant des cibles rétro-réfléchissantes ou des prismes à demeure. Comme le décrit Charles Veillard (1996), ne cherchant que des distances relatives, il suffit d'effectuer une station sur un point quelconque et mesurer les points d'intérêt en double retournement afin de s'affranchir des systématismes angulaires. Néanmoins, cette technique implique un investissement matériel très élevé et ne correspond pas aux objectifs de recherche de FUGRO GEOID où seul l'équipement préalablement assigné au chantier sera utilisé.

Nous avons alors étudié les classes de précision que nous sommes susceptibles d'obtenir par intersection spatiale au moyen d'un tachéomètre Leica TCRP1203. Pour des raisons matérielles et de facilité de mise en œuvre, nous n'avons pas opté pour la méthode de mise en station par auto-collimation.

Nous déterminons alors un système de coordonnées locales avant chaque acquisition. Ce système, déterminé par la première station, est constitué d'au moins 4 références. En fonction des conditions d'encombrement, elles sont disposées en amont de la zone de lever de convergencemétrie, et à une distance 2 à 6 fois celle de l'ordre de grandeur de la zone d'intérêt. La première station déterminant le

système de coordonnées se fera aux conditions de visée les plus favorables. Les stations suivantes se déterminent par visées de relèvement.

Dans des conditions d'intersections angulaires optimales, ce mode opératoire nous permet d'atteindre un écart moyen quadratique sur les distances relatives de  $\pm 0.4$ mm. Néanmoins, les conditions d'encombrements dues aux nombreux capteurs, gaines, ventilations, etc installés en galeries ne permettent pas d'atteindre cette gamme de précision à chaque section de mesure, où certaines cibles sont déterminées à  $\pm 2$ mm. De plus, l'un des plots de convergence est situé en contre-voûte de galerie, dans une réservation, ce qui rend impossible son lever par intersection spatiale. Enfin, les durées d'acquisitions par SMC sont de l'ordre de 45 à 60min, ce qui représente un temps d'immobilisation de la galerie encore très long.

### 2.2 La lasergrammétrie

Pour obtenir des précisions submillimétriques au scanner laser, il est nécessaire d'étudier les paramètres d'incertitude influençant la mesure. Ceux-ci peuvent être classés de la manière suivante :

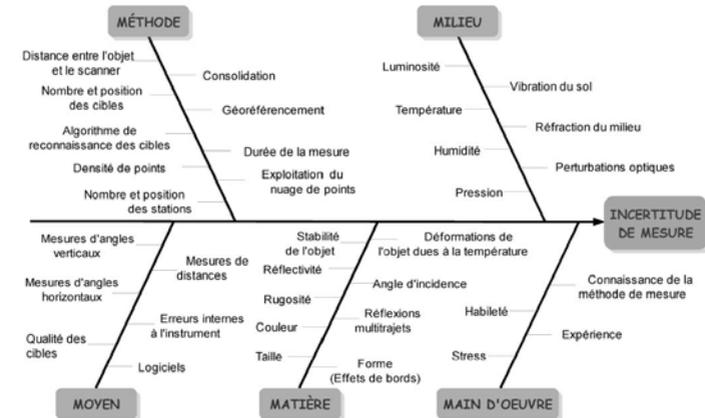


Figure 3 : diagramme d'Ishikawa sur les principales sources d'erreurs des scanners laser, Laguian (2013).

Les conditions environnementales des galeries souterraines de Bure sont stables, la température est constante et l'air y est sec.

L'expérience du personnel et sa connaissance du site permettent de négliger toute incertitude de « main d'œuvre ».

Nous nous sommes alors focalisés sur les aspects « Méthode », « Matière » et « Moyen » : le mode opératoire et le processus de traitement que nous avons mis en place réduisent au maximum les incertitudes liées à la méthode ; le développement de nouvelles cibles nous a permis de maîtriser au mieux les incertitudes de « matière » ; enfin, nous avons développé une approche permettant de détecter les systématismes de l'appareil de mesure et de les corriger si besoin.

Pour nous assurer de l'exactitude de ces deux derniers points, nous nous sommes munis d'un laser tracker Leica AT402. Sa précision angulaire de 0.07 seconde d'arc et en distance de  $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m}$ , nous garantit la détermination d'une valeur vraie permettant la caractérisation des systématismes du laser scanner et du bon usinage de nos cibles.

Le scanner laser utilisé est un Faro Focus 3D X330. Il affiche une précision télémétrique théorique de  $\pm 2$ mm à un sigma, ainsi qu'un bruit de mesure, sur une surface à 90% de réflectance, de  $\pm 0.3$ mm à 10m, pouvant être réduit à  $\pm 0.15$ mm à 10m en appliquant un algorithme de filtrage du bruit. Nos tests nous indiquent que des mesures inférieures à 10m peuvent atteindre un bruit de mesure effectif de l'ordre de  $\pm 0.2$ mm.

Nous avons développé des disques usinés de diamètre 10cm et surfacés au 1/10<sup>ème</sup> de millimètre noirs et blancs mats. Ces disques devraient être placés en galerie souterraine de manière à constituer une section de mesures identique à celle réalisée au fil invar, leur face étant orientée vers le centre de la section.



Figure 4 : cible de métrologie FUGRO GEOID

Chaque cible étant observée dans le système de coordonnées du scanner laser, nous pouvons directement calculer les distances relatives entre cibles et leur appliquer une transmission d'erreur moyenne quadratique. Cette transmission se fait en fonction des composantes du vecteur normal de chaque cible et des précisions de modélisation de chaque plan et cercle.

L'analyse de l'intensité radiométrique permet d'isoler les pixels selon la zone d'intérêt :

- En isolant les points ayant le meilleur retour d'intensité, la zone blanche, nous modélisons un plan à  $\pm 0.2\text{mm}$ .
- Nous sélectionnons ensuite les points situés à la frontière des deux couleurs. Les cibles ayant été calibrées, nous connaissons avec exactitude le diamètre du disque blanc. Cela permet ainsi de déterminer le cercle par meilleur ajustement en contraignant son diamètre au diamètre réel et en contraignant le cercle au plan déterminé précédemment. Cette détermination est de l'ordre de  $\pm 0.3$  à  $\pm 0.6\text{mm}$  selon l'angle d'incidence d'acquisition, etc.

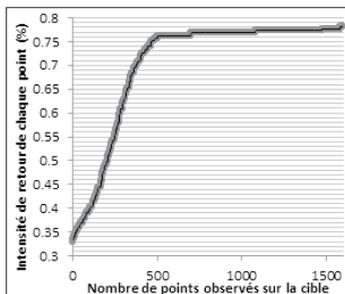


Figure 5 : exemple de variation de l'intensité du nuage de points sur cible

Grâce à ce procédé nous déterminons les distances relatives entre cibles à une précision de l'ordre de  $\pm 0.5\text{mm}$ .

La solution lasergrammétrique présente donc l'avantage de répondre à toutes les contraintes opérationnelles. D'une part, le travail effectué sur la densité de points à acquérir en fonction du type de cible conçu a permis de choisir le paramétrage optimal pour le laser scanner Faro Focus X330 dont nous disposons. Ainsi, le pas et la qualité d'acquisition permettent de restreindre l'acquisition à 8min par section. D'autre part, cette acquisition au scanner laser nécessite la mobilisation d'un seul opérateur et permet de se stationner au droit de la section de mesure de convergence. Cette solution est donc beaucoup moins tributaire du niveau d'encombrement de la galerie. Enfin, la sécurité du personnel en galerie est assurée, d'autant que le capteur laser est de classe 1.

### 3 Conclusion et perspectives

L'acquisition lasergrammétrique a été développée spécifiquement pour ce chantier et permet d'atteindre des hautes précisions sur des mesures relatives effectuées en environnement contrôlé, avec le matériel disponible.

Pendant ce projet de fin d'étude, j'ai pu développer et proposer une méthodologie d'acquisition et de traitement, dont il sera bénéfique d'automatiser quelques étapes. Pour cela une étude plus poussée des variations de l'intensité du signal retour permettra de valider nos expérimentations par un modèle théorique.

Grâce à l'évolution récente des algorithmes de traitement d'image, la photogrammétrie est une solution en plein essor. FUGRO GEOID travaille déjà avec cette technologie sur une partie de ses chantiers de contrôle dimensionnel où les précisions demandées sont submillimétriques. Cependant, l'expérience du personnel sur place et les paramètres d'environnement dans les galeries de Bure sont aujourd'hui des paramètres bloquants sur lesquels il sera intéressant de travailler.

## Mise en place de procédures automatiques en vue d'accélérer la production des plans topographiques au sein de l'entreprise TECHNI DRONE

PFE présenté par : **Kévin JAVERLIAT**  
 Société d'accueil : **TECHNI DRONE**  
 Directeur de PFE : **M. Pierre-Emmanuel LECLERE**  
 Correcteurs : **M. Mathieu KOEHL**



### 1. Contexte de l'étude

TECHNI DRONE est une entreprise créée en 2013 qui propose des formations autour du drone civil. Depuis deux ans, la société élargit son champ d'activités et s'oriente vers la prestation par drone et plus spécifiquement le levé photogrammétrique. Parmi les demandeurs de ces prestations nous trouvons principalement les carrières et les centres d'enfouissement de déchets. La société dispose d'un réseau national de télé-pilotes afin d'être au plus près de l'ensemble de ses clients. Les membres de ce réseau sont seulement en charge du relevé photographique et des points de contrôle au sol, le **traitement des données et la réalisation des différents plans restant la compétence de TECHNI DRONE.**



Figure 1 - Mission de relevé photogrammétrique par drone en carrière

L'arrivée des drones dans le monde de la topographie a facilité l'acquisition de photographies aériennes à très haute résolution, permettant ainsi l'obtention de données tridimensionnelles de précision centimétriques. Les principaux résultats issus des traitements photogrammétriques sont aujourd'hui bien connus avec les nuages de points, les orthophotographies ou les M.N.S. pour Modèles Numériques de Surface. Désormais, si l'obtention de ces produits est en grande partie automatisée, ils ne constituent que **rarement la finalité des relevés**. En effet, des traitements supplémentaires sont nécessaires sur ces objets pour obtenir, par exemple un M.N.T. (Modèle Numérique de Terrain) ou divers plans. Ce sont ces dernières tâches qui vont principalement nous intéresser, car elles sont, à ce jour, entièrement manuelles.

Cette étude vise donc à trouver et mettre en place des solutions permettant d'améliorer la production de plans topographiques à partir d'acquisitions photogrammétriques par drones. Pour ce faire, il a été dressé un **état de la chaîne de traitement** en place. Puis, chacune des étapes ont été analysées afin de déterminer les évolutions possibles. Un **comparatif des différents solutions logicielles** existantes a été réalisé afin de trouver le logiciel de photogrammétrie le plus adéquat. Puis, des **extensions au logiciel QGIS** (Quantum Geographic Information System) ont été créées pour automatiser certaines tâches, et notamment la classification des lignes de rupture de pente et la réalisation de plans des stocks ou des pistes.

### 2. État de la chaîne de traitement

Un état de la chaîne de traitement en place chez TECHNI DRONE était indispensable afin d'avoir une base de travail. Il a permis de mettre en évidence **six grands groupes de traitements** en fonction des rendus clients que sont : le traitement photogrammétrique, la réalisation du plan topographique, la création des cotations, les rapports sur les volumes de stocks et les calculs de volumes exploités. Une synthèse de la chaîne de traitement obtenue est présentée en Figure 2.

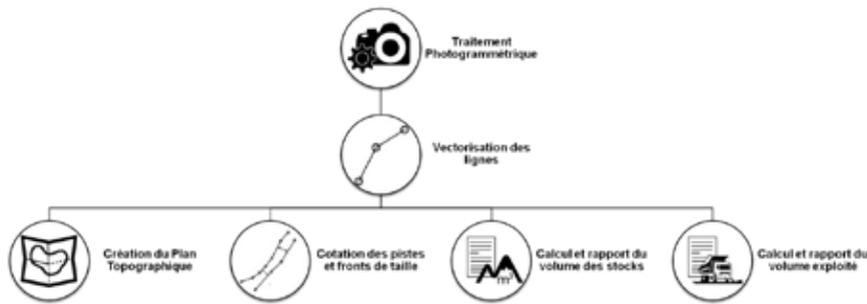


Figure 2 - Synthèse de la chaîne de traitement

Pour chacun de ces grands groupes, un état détaillé des différentes étapes est dressé, montrant ainsi leur enchaînement et dépendance. Une estimation du temps est fournie pour chacune des étapes. Celle-ci est basée sur l'expérience des traitements déjà réalisés et a pour vocation de différencier les étapes de quelques minutes à celles de plusieurs dizaines voire quelques heures. Puis, il est également renseigné s'il s'agit d'un temps « humain » ou « machine » dépendamment de la présence d'un opérateur pour effectuer la tâche en question. L'ensemble de ces éléments nous permet de déterminer le degré d'automatisme des grands groupes, ainsi comme dit précédemment, le traitement photogrammétrique est très automatisé avec environ 85% de temps machine. À contrario, la réalisation d'un plan topographique est entièrement manuelle.

Enfin, pour chaque tâche nous avons cherché les améliorations possibles et alternatives envisageables pour augmenter la productivité. Les principales remarques sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 - Principales remarques de l'analyse de la chaîne de traitement

Tâches	Améliorations proposées
Pointer des points de contrôle	Détection et pointés automatiques des cibles.
Vectorisation du nuage de points pour la création du M.N.T.	Envisager une extraction automatique des lignes de rupture de pente
Classification des lignes de rupture de pente en haut ou bas de talus	Automatiser cette classification à l'aide d'une analyse de concavité/convexité du terrain
Réalisation du plan des stocks	Automatiser l'intégration des données, car ce plan est très formaté
Réalisation du diagnostic des pistes (longueurs, largeurs, pentes et dévers)	Automatiser les calculs des différentes informations ainsi que leur mise en page

### 3. Comparatif des logiciels de photogrammétrie

L'état de la chaîne de traitement met en évidence l'importance de la partie photogrammétrique dont l'ensemble des rendus livrés au client découle. Cette importance nécessite que l'on s'attarde sur le logiciel de traitement photogrammétrique, ainsi un comparatif des différentes solutions existantes est réalisé. Le comparatif s'est appuyé sur le **degré d'automatisme du logiciel**, moins l'opérateur intervient régulièrement plus le logiciel est intéressant, car les traitements peuvent être effectués sur les temps libres, typiquement les nuits et weekends. Nous nous sommes également appuyés sur d'autres critères tels que la capacité de :

- Traiter des clichés avec ou sans géo-tag ;
- Effectuer un géoréférencement à partir de points de contrôle au sol ;
- Produire et visualiser des nuages de points, maillages et orthophotographies ;
- Tracer et exporter des polygones dans le nuage de points.

Pix4D Mapper Pro est initialement utilisé par TECHNI DRONE, ce dernier répond aux critères que l'on vient de fixer. Nous avons testés les solutions listées ci-dessous :

- Correlator 3D de Sim Active par vidéo conférence ;
- 3D Survey avec une version d'essai ;
- PhotoModeler avec une version d'essai ;
- PhotoScan avec une version d'essai ;
- Visual SFM, logiciel gratuit.

Nous nous sommes également appuyés sur des études précédentes pour exclure les solutions d'Autodesk et LPS (Leica Photogrammetry Suite). En effet, la première a un nombre très limité de fonctionnalités et la deuxième ne permet pas un degré d'automatisme suffisant.

Nous avons également survolé les possibilités des outils en ligne tels que Drone Deploy, Kespry ou Event38. Ces solutions ne permettent pas toujours d'effectuer la vectorisation ni le traitement de clichés sans géo-tag, mais le degré d'automatisme est très intéressant, c'est ce qui a justifié que nous nous y intéressions.

Finalement, nous avons conservé Pix4D Mapper Pro, car c'est un logiciel qui répond à tous nos critères et que nous possédions déjà. De plus, il est très flexible puisqu'il permet le traitement de données thermiques et multi spectrales que TECHNI DRONE acquiert régulièrement. Enfin, son système de licence est mensuel ainsi que disponible sur plusieurs postes, ce qui offre des avantages non négligeables.

### 4. Création des extensions à QGIS

Pour effectuer le développement de la chaîne de traitement et la mise en place de procédures automatiques, le choix s'est orienté vers le logiciel de S.I.G. (Système de l'Information Géographique) QGIS. Cette solution libre n'engendre aucun coût et intègre **une console du langage de programmation python** permettant la création d'extension. De plus, une forte communauté de développeurs est présente sur internet permettant d'avoir recours aux différentes aides en ligne. Enfin, l'utilisation d'un logiciel de S.I.G. permet d'orienter nos rendus vers une nouvelle forme. Ce sont trois extensions qui ont été développées et ont permis d'améliorer : la réalisation du plan des stocks, la classification des lignes vectorisées en haut ou bas de talus et la réalisation du plan des pistes.

#### 4.1. Extension : Plan des stocks

L'extension pour la réalisation du plan des stocks consiste principalement à agréger des données, à savoir l'orthophotographie de la zone de stockage au format raster, le contour des tas au format shape et la liste des volumes au format texte. Le processus de fonctionnement de l'extension est schématisé en Figure 3. Ces trois éléments proviennent du logiciel de photogrammétrie Pix4D Mapper Pro qui intègre un outil de calcul des stocks permettant d'obtenir directement les contours et la liste des volumes. L'automatisation permet, en entrant ces éléments, d'insérer ces données, d'effectuer une jointure attributaire entre les contours des tas et les volumes ainsi que définir l'aspect visuel de l'ensemble de ces données avec notamment la gestion des étiquettes. Des modèles de présentation ont été créés, afin de réduire le temps passé à la réalisation du plan mais également pour harmoniser les présentations au sein de TECHNI DRONE.

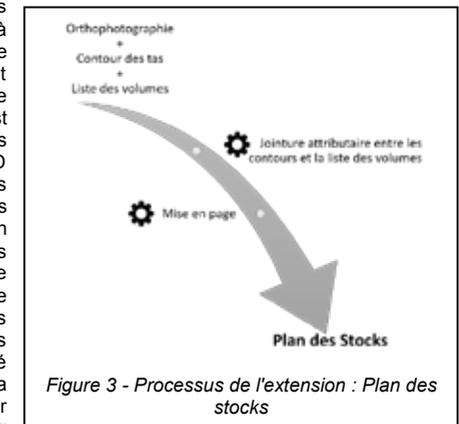


Figure 3 - Processus de l'extension : Plan des stocks

#### 4.2. Extension : Classification des lignes

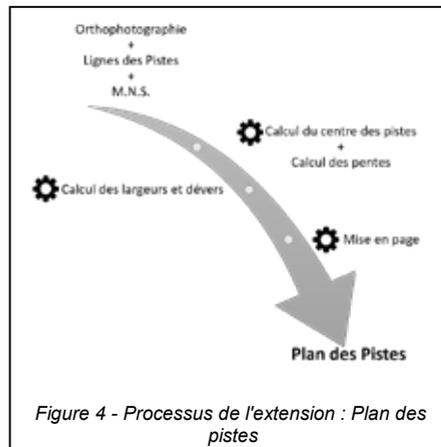
Dans le processus de traitement, le passage du M.N.S. au M.N.T. s'effectue par le tracé des lignes de rupture de pente dans le nuage de points sous le logiciel Pix4D Mapper Pro. Par la suite, ces lignes sont importées dans un logiciel de D.A.O. (Dessin Assisté par Ordinateur) et sont classées haut ou bas de talus. Cette dernière étape était **manuelle et donc chronophage**. Une extension a donc été développée pour automatiser cette classification des lignes.

L'analyse s'appuie sur le M.N.S. au format raster dont nous faisons une analyse géomorphologique du terrain. D'après cette analyse, les lignes sont classées haut ou bas de talus. Pour les cas ambigus, les lignes sont désignées comme inconnues. En sortie, nous obtenons donc trois fichiers au format shape : un pour les hauts de talus, un pour les bas et le dernier pour les lignes inconnues.

Nous avons procédé à des tests sur quatre carrières en comparant la classification automatique et la classification manuelle. L'analyse des résultats s'est faite à l'aide de la théorie des matrices de confusion et nous a montré une **exactitude comprise entre 80 % et 96 %** selon le cas étudié. Ces résultats sont intéressants d'autant plus qu'un contrôle de cette classification est nécessairement effectué dans la suite du traitement, à l'étape de dessin des barbuies.

#### 4.3. Extension : Plan des pistes

Un des rendus proposé aux clients est un plan des pistes qui renseigne sur les pentes longitudinales des pistes, leur longueur, leurs largeurs et leurs dévers (pentes transversales). Le but de l'extension est de sortir un tel plan en fournissant en entrée les lignes des pistes et le M.N.S. au format raster. La première étape consiste à associer chaque bord de piste à l'autre bord correspondant. Puis, les lignes sont échantillonnées régulièrement pour y calculer les largeurs et dévers. Ensuite, une polygone matérialisant le centre des pistes est alors calculée. Après, celle-ci est échantillonnée pour y calculer les pentes longitudinales. Le processus qui vient d'être décrit est récapitulé en Figure 4. Finalement, tout comme pour le plan des stocks, un modèle de présentation a été créé afin d'effectuer une mise en page plus rapide et harmonisée.



#### 5. Conclusion et perspectives

Pour conclure, un état de la chaîne de traitement en place a été dressé ce qui a permis de dégager six grands groupes de traitement. L'importance du logiciel de photogrammétrie a été démontrée et justifie le comparatif des solutions existantes que nous avons effectué. Ceci afin de déterminer le programme le mieux adapté à nos attentes, à savoir Pix4D Mapper Pro. Puis, dans un souci d'amélioration de la production des plans, trois extensions ont été développées et intégrées au logiciel de S.I.G. QGIS. Elles permettent de classer les lignes de rupture de pente en haut et bas de talus, d'effectuer un plan des stocks et un plan des pistes avec un minimum d'intervention de l'opérateur.

D'autres pistes d'améliorations ont été explorées telles que la détection automatique des points de calage qui permettrait d'éviter les pointés à l'opérateur. L'extraction automatique des lignes de rupture de pente a également été envisagée évitant ainsi l'étape de vectorisation manuelle pour passer d'un M.N.S. à un M.N.T.

Si la production des plans a été améliorée, des progrès restent possibles notamment à travers l'arrivée des solutions R.T.K. (Real Time Kinematic).

## Développement du BIM en tant qu'outil d'aide à la conception d'un projet d'infrastructure linéaire

PFE présenté par : **Victor Morel**  
Société d'accueil : **Setec International**  
Directeur de PFE : **Antoine Van Der Zyppe**  
Correcteur : **Mathieu Koehl**



### 1. Introduction : contexte du BIM en infrastructure linéaire

Pour commencer, il est important de clarifier la notion de BIM (Building Information Model). Le BIM est une méthodologie de travail qui s'appuie sur la création d'une maquette 3D virtuelle afin d'aider à la conception ou la planification d'un projet. La modélisation 3D du projet est composée d'objets auxquels sont associés des attributs pour pouvoir les représenter (dimension, position, texture de l'objet, etc. soit un modèle géométrique) et les décrire (nom, fonction, durée de vie de l'objet, etc. soit un modèle paramétrique). La maquette ainsi créée, servira d'outil supplémentaire aux différents départements techniques intervenant sur un projet. Faire du BIM ne se réduit donc pas à produire une maquette virtuelle, la plus esthétique possible, mais de produire un outil utile aux acteurs d'un projet.

L'idée d'une méthodologie BIM est historiquement liée au monde du bâtiment. Dès l'année 1995, des personnes ont travaillé sur comment faciliter le développement de cette méthodologie. De ces réflexions, en est résulté un format de fichiers standardisé (le format IFC) permettant de partager les données propres à l'industrie du bâtiment. Par suite, des logiciels se sont développés pour pouvoir, à partir de ces données normalisées, créer des maquettes, base de la méthodologie BIM. Aujourd'hui, l'utilisation d'un processus BIM sur les chantiers importants se généralise.

Ce n'est que très récemment que d'autres branches des travaux publics se sont intéressées à cette façon de concevoir un projet. En ce qui concerne les infrastructures linéaires (conception d'autoroutes, de lignes de chemin de fer, etc.), les outils à disposition ne sont pas encore matures pour permettre de produire des maquettes 3D facilement utilisables dans le cadre d'une méthodologie BIM. Contrairement à l'exemple du bâtiment, il n'existe pas de format standard, ni de logiciel pleinement orienté sur la production d'un modèle géométrique et paramétrique d'une infrastructure.

Malgré ces profondes entraves, le BIM semble apporter de sérieux avantages par rapport à une conception plus classique de projet linéaire. Avec l'offre actuelle en logiciels, on peut attendre d'un BIM orienté infrastructures linéaires de devenir un ou une combinaison de ces points :

1. Un outil de communication interne : La maquette est support de l'ensemble des données produites. Dès qu'un acteur du projet produit ou modifie des données, elles sont rapidement intégrées à la maquette. La modélisation se fait donc en même temps que se construit le projet et est diffusée en interne.
2. Un outil de communication externe : La maquette est outil de production de rendus et de visuels. La maquette est produite avec des données finalisées. Le but de la maquette est essentiellement de représenter le plus fidèlement et esthétiquement la réalité du projet.
3. Un outil d'aide à la conception : La maquette met en évidence les problèmes ou les solutions, via des outils développés au sein du logiciel utilisé. La modélisation se concentrera sur certains types d'objets jugés comme sources de problèmes ou éléments importants, auxquels on associera des données attributaires complètes afin d'analyser les situations rencontrées.
4. Un outil d'aide à la maintenance : La maquette sert de base de données aux opérations de maintenance qui interviendront tout au long du cycle de vie du projet. La maquette est composée d'objets très détaillés avec des données attributaires complètes.

## 2. Réflexions préalables au travail de modélisation de la maquette BIM

Comme expliqué le long de l'introduction, pour qu'une maquette BIM soit intéressante pour ceux qui la montent, il faut la rendre utile. Pour cela, il est absolument nécessaire de comprendre les enjeux du projet dans lequel s'inscrit la modélisation, pourquoi et quand est-ce que la maquette va satisfaire les attentes des acteurs du projet. En résumé, il faut réussir à donner un but à la maquette BIM, notamment parmi les quatre points évoqués en fin d'introduction. Une fois que les objectifs sont fixés, les moyens à utiliser pour les atteindre peuvent être débattus dans un certain ordre, comme synthétisé en figure 1.



Figure 1 : Etapes de la réflexion préalable au travail de modélisation du BIM

Une des premières questions à se poser porte sur les données qui vont être modélisées. Suivant les objectifs établis, certains objets constituant l'infrastructure vont devoir être modélisés ou non. En allant plus loin, certains composants vont être modélisés avec plus ou moins de détails, comme l'illustre la figure 2. Prenons en exemple le cas des canalisations souterraines. Si la maquette BIM a pour vocation d'aider à la conception d'un projet, les réseaux vont être modélisés avec le plus haut détail possible. Les canalisations, puisque souterraines, sont souvent une source de problèmes dans la conception d'un projet et doivent donc être le plus détaillées possible. A contrario, dans le cas d'un BIM ayant pour but une communication externe, et donc orienté pour un rendu esthétique, les réseaux enterrés apportent peu de plus-value à la maquette. Au final, pour chaque type d'objets, il est donc préférable de prendre le temps de définir le niveau de détail attendu dans la maquette. Cette étape peut se faire notamment en s'appuyant sur la classification LOD (Level Of Detail) définie dans ce but et utilisée internationalement dans le cadre du BIM.

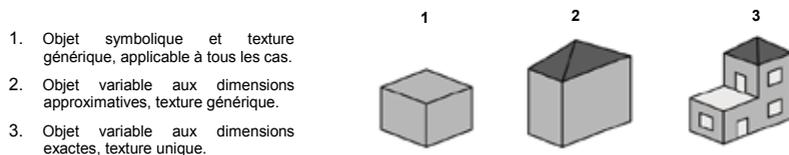


Figure 2 : Une maison représentée avec divers niveaux de détail.

Dès que ce second point est traité, l'étape d'après porte sur la gestion de l'import des données brutes. Idéalement, les données brutes (plan, nuage de points maillé ou non, etc.) sont suffisamment complètes pour pouvoir atteindre les niveaux de détail fixés précédemment. Sans surprise, il arrive que cela ne soit pas le cas, notamment lorsque l'on souhaite avoir des objets très détaillés ou lorsque la donnée est imposée (lorsque des données sont produites par des acteurs externes). La qualité des données d'entrée est donc un facteur qui peut entraver l'atteinte des objectifs du BIM. A l'opposé des sujets d'import, la question de l'accès à la lecture de la maquette par les acteurs du projet doit aussi se poser. Suivant les objectifs du BIM (notamment pour un BIM orienté communication interne), il est nécessaire de prévoir une méthode d'accès à la maquette BIM.

Enfin en dernier, lorsque toutes ces problématiques ont été balayées, le choix du logiciel utilisé pour modéliser la maquette, peut enfin être abordé. Idéalement, ce sujet arrive en fin de réflexion, afin de déterminer le logiciel qui correspond au mieux aux problématiques précédemment exposées. Comme évoqué dans l'introduction, les logiciels spécialisés dans la modélisation BIM d'infrastructures linéaires ne sont pas complets. Il n'est actuellement pas faisable de disposer d'un modèle géométrique et d'un modèle paramétrique d'une infrastructure linéaire sur une même maquette. Suivant les objectifs fixés, des logiciels vont donc être plus appropriés. Malheureusement, le logiciel est souvent imposé dès le début du processus, que ce soit par le client lui-même, ou par des impératifs logistiques et financiers (une licence de logiciel de modélisation de maquettes coûte chère). La question du logiciel utilisé doit cependant être analysée avec le plus grand intérêt, car un mauvais choix de logiciel peut entraver voire bloquer la réalisation des objectifs fixés au départ.

## 3. Application à un projet d'élargissement d'autoroute en phase d'avant-projet

Afin de compléter l'analyse du BIM au sein de projet d'infrastructure linéaire, il était aussi question de tester la mise en place d'une maquette BIM en appui d'un projet d'élargissement d'autoroute en phase d'avant-projet (niveau projet). Le projet consiste à passer l'autoroute à 2x3 voies sur 7 kilomètres, comprenant également un aménagement des bandes d'arrêt d'urgence susceptibles d'accueillir, en heure de pointe, la circulation bus. Le projet s'inscrit dans un contexte urbain dense, ce qui implique un manque de place, un grand nombre de réseaux, des échangeurs rapprochés et de nombreux ouvrages d'arts à gérer. Le but de cette phase d'avant-projet est d'établir une base viable au projet en définissant globalement le positionnement et les dimensions des éléments constitutifs de l'autoroute, en suivant les normes en vigueur et les lignes directrices imposées par le client.

La complexité du projet a poussé l'équipe du projet à s'intéresser à mettre en place une méthodologie BIM. Les objectifs du BIM étaient les suivants :

1. Devant le grand nombre d'interfaces entre les départements techniques (géométrie, assainissement, géotechnique, etc.), la maquette devait illustrer les problématiques qui seront abordées tout au long de la conception et faciliter la communication interne.
2. Face aux problèmes posés par les nombreux réseaux et équipements (caniveaux, écrans acoustiques, panneaux de signalisation, etc.) qui viendront s'ajouter à l'autoroute, la maquette devait aider à concevoir le projet en utilisant des modules de logiciels utilisés (série de logiciels produit par Vianova Systems) permettant de mettre en évidence les zones où deux types d'objets s'intersectent alors qu'ils ne le devraient pas.

Pour réussir à mettre en place une maquette BIM qui sert à améliorer la communication interne entre les départements, le travail de modélisation s'est axé sur deux points. Dans un premier temps, la maquette BIM a dû être mise à jour constamment en fonction des données produites et modifiées. Ces données étaient souvent incomplètes ou approximatives. Il a fallu donc mettre en place, en accord avec l'équipe, des choix et des règles pour représenter le plus justement possible ces données. Les données alors intégrées dans la maquette ne sont pas exactes, mais permettent tout de même aux acteurs du projet de s'en imprégner. La maquette BIM représente alors le projet à son niveau d'avancement actuel. Dans un second temps, l'accès à la maquette se faisait par deux biais. La maquette était tout d'abord en libre accès (lecture du fichier seulement) pour l'ensemble des acteurs du projet, via des exports réguliers. Ensuite, la maquette servait de support visuel aux réunions techniques, où l'ensemble des départements discutaient des points problématiques.

Afin d'atteindre le second objectif de la maquette, à savoir, mettre en évidence les zones d'interfaces non voulues entre deux objets constitutifs de l'autoroute, un classement des objets en groupes a été établie, en accord avec le fonctionnement du logiciel. La détection d'interfaces se fera entre deux groupes, en se basant sur la géométrie des objets. Pour avoir des résultats valables, la géométrie des objets devra être la plus exacte possible, ou à minima, connue en précision afin de pouvoir apporter un regard critique sur les problèmes d'intersections entre deux objets mis en évidence par le logiciel. C'est seulement après analyse approfondie que les problèmes recevables pourront être remontés aux acteurs concernés. Il est important de conserver à l'esprit que la maquette ne sera jamais totalement exacte, et d'être capable de quantifier ses inexactitudes.

## 4. Conclusion : retour d'expériences et perspectives du BIM en infrastructure linéaire

Cette application à un projet d'infrastructure linéaire a été une des premières expériences d'application de la méthodologie BIM tout au long d'une phase de projet pour Setec International, notamment sur le site de Vitrolles (13). L'expérimentation a été révélatrice de plusieurs points :

1. Les objectifs fixés en début de projet n'ont été que partiellement atteints. Si du côté de la communication interne, la maquette, présentée en figures 3 et 4, a bien joué son rôle de d'illustration du projet, notamment pendant les réunions entre départements techniques. Au contraire, le BIM n'a pas été utilisé comme outil d'aide à la conception, pour une raison majeure. Il est peut-être prématuré d'attendre d'une maquette BIM d'aider à la conception dans une phase d'avant-projet. Cet objectif est plus approprié dans des phases plus avancées du projet où l'on cherchera à dimensionner exactement l'ensemble des éléments du projet.

PFE présenté par : **Ouleymatou Pauline NGOM**  
 Société d'accueil : **ESPACE9**  
 Directeur de PFE : **M. Stéphane VASSAUX**  
 Correcteur : **M. Mathieu KOEHL**

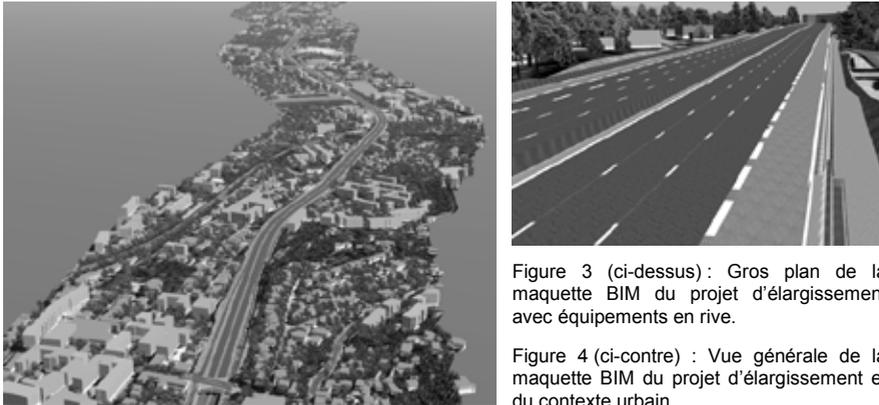


Figure 3 (ci-dessus) : Gros plan de la maquette BIM du projet d'élargissement avec équipements en rive.

Figure 4 (ci-contre) : Vue générale de la maquette BIM du projet d'élargissement et du contexte urbain.

- Mettre en place une méthodologie BIM prend du temps et n'est pas forcément efficace dès les premiers tests. Cet exercice étant une nouveauté pour la plupart des acteurs rencontrés, il est difficile de percevoir ce qui nécessite de prendre du temps, d'être représenté. Seule une réflexion approfondie avant la modélisation permettra d'éviter de perdre du temps sur des points qui semblaient importants au départ mais qui s'avèrent être secondaires.
- La vision des différents interlocuteurs sur ce qu'est capable d'apporter une maquette BIM produite sur tel logiciel, peut être erronée devant la réputation révolutionnaire et bénéfique qu'apporterait l'application d'une méthodologie BIM. Il est important de sensibiliser les différents acteurs d'un projet sur ce qu'est capable de produire une maquette BIM. Et que quelles que soit les futures évolutions du processus, la maquette BIM ne sera jamais exacte puisque issue de mesures topographiques et d'approximations de représentation.
- Le sujet logiciel est un point central, à moyen terme, des futures évolutions du BIM en infrastructure linéaire. Outre les problèmes de modélisation de la géométrie et des paramètres, un des principaux freins au développement du BIM est l'incompatibilité des formats d'échange entre les logiciels, empêchant une bonne transmission de la maquette entre les nombreuses entités qui se relaient sur un projet, comme l'illustre la figure 5.

Phase du projet	CONCEPTION			REALISATION			EXPLOITATION
	Avant-projet	Projet	Consultation des entreprises	VISA-Exécution	Direction d'exécution des travaux	Assistance aux opérations de réception	Entretien
Gestionnaire du projet	Maître d'ouvrage						Exploitant
Gestionnaire du BIM	Maître d'œuvre			Entreprises de travaux			Exploitant

Figure 5 : Déroulé classique d'une opération de travaux en infrastructure linéaire

En conclusion, les apports d'une maquette BIM orienté linéaire sont aujourd'hui limités à seulement certains points de la conception d'une infrastructure. S'ajoute à cela qu'il est impératif d'effectuer de profondes réflexions sur le sens donné à la méthodologie BIM, sous peine de voir les avantages envisagés en début de processus s'estomper devant de nouveaux problèmes uniquement dus à la mise en place du BIM. De plus, en l'absence d'une normalisation des formats de données, comme il a été fait dans le bâtiment, il restera toujours compliqué de relayer l'ensemble des informations contenues dans un BIM, tout au long du projet. Dans un cadre qui évolue rapidement, notamment à cause de l'amélioration constante des logiciels, le déséquilibre actuel entre temps passé et plus-value apportée par la méthodologie BIM pourrait tendre à se résorber. L'intérêt porté à cette méthodologie va continuer à s'amplifier, son développement ne fait que commencer : d'ici 2017, le BIM devrait devenir progressivement obligatoire en France, dans les marchés publics.

## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Les logements situés près des grands aéroports français se sont vus imposer, de par la réglementation, des normes acoustiques à respecter lors de leur construction ou étant déjà bâtis. Ainsi, les textes de référence sur le bruit (notamment les articles L.571-14 à L.571-16 du Code de l'Environnement) sont venus instituer une aide pour les travaux d'insonorisation autour des principaux aéroports français dont celui de Marseille Provence. Cette aide a été mise en place depuis plus de 18 ans et les frais en résultant sont prélevés aux compagnies aériennes sous la forme d'une Taxe sur les Nuisances Sonores Aéroportuaires (TNSA). Ce prélèvement permet aux aéroports de participer au financement des travaux d'isolation acoustique des logements exposés au bruit des avions. Ainsi, Espace9 a été mandatée par l'Aéroport Marseille Provence (AMP) afin de suivre l'étude administrative et technique de l'insonorisation des logements près de cet aéroport.

Les habitations concernées par cette insonorisation sont déterminées par le Plan de Gêne Sonore (PGS) qui comprend trois zones. Il a été publié en 2004 et constitue un document ayant pour objectif d'évaluer la gêne sonore actuelle. Les communes concernées par ce plan sont: Berre-l'Étang, Gignac-la-Nerthe, les Pennes-Mirabeau, Marignane, Marseille, Saint-Victoret et Vitrolles.



Il existe un autre document nommé PEB (Plan d'Exposition au Bruit) qui lui vise à délimiter un territoire près de l'aéroport à l'intérieur duquel les règles d'urbanisme sont soumises à un certain nombre de restrictions. Il anticipe à l'horizon 15/20 ans le développement de l'activité aérienne et l'évolution probable du bruit. Ainsi, la différence entre le PGS et le PEB réside dans le fait que le PEB

permet de fixer les contraintes d'insonorisation pour une urbanisation future alors que le PGS correspond à la gêne effective actuelle permettant la mise en place d'un dispositif d'aide aux riverains.

Pour bénéficier de l'aide, un logement doit remplir deux conditions majeures qui sont :

- Appartenir à une des trois zones du PGS,
- Ne pas être concerné par un des PEB (1975 et 2006) au moment de sa construction.

Afin de suivre l'évolution des habitations insonorisées, l'aéroport a voulu mettre en place un SIG qui permettra de représenter les bâtiments insonorisés et ceux qui ne le sont pas suivant deux états d'avancement du dossier (en cours ou soldé). Ce SIG devra être automatisé au maximum afin de produire des cartes mises à jour.

Le deuxième enjeu de ce PFE est de réaliser un outil permettant de déterminer si un bâtiment est éligible à l'aide ou pas. Le point de départ est l'adresse et les deux conditions citées plus haut sont prises en compte. Un paramétrage du logiciel est aussi requis afin de fournir un rendu visuel sur la position géographique du bâtiment par rapport au PGS et aux PEB, ce qui servira de contrôle par rapport à l'éligibilité mais permettra également d'étoffer le rapport administratif.

## 2. Suivi des dossiers d'insonorisation

L'une des premières phases du projet a été d'établir une correspondance entre les adresses de GA (la base interne de l'entreprise) et la BD ADRESSE de l'IGN couvrant les communes concernées. La BD ADRESSE est un ensemble de couches en fichier Shapefile (.shp) qui contient des ponctuels ADRESSE géolocalisés, les limites administratives et le tracé des routes. L'attribut majeur de cette base est son identifiant qui deviendra le lien avec GA.

Lorsqu'un nouveau logement à insonoriser est renseigné dans GA, les principaux champs remplis et utiles pour le projet sont :

1	Coord_adresse1	Parc Hélène Boucher
2	Coord_adresse2	Bâtiment L12
3	Coord_voienum	12
4	Coord_voietype	Rue
5	Coord_voienom	d'Isly
6	Coord_commune	13700
7	Coord_commune_nom	MARIGNANE

Cependant, les champs 1 et 2 sont ouverts à l'écriture de diverses informations : numéro d'étage, de voie ou d'entrée, nom du locataire, nom de la résidence, nombre de logements ou toute autre information servant à identifier le logement. Aussi, pour le champ 3, les numéros de voie ne présentent aucun masque de saisie

et peuvent aussi bien contenir un chiffre que du texte spécifiant la répétition de voies (Bis, Ter...) ou une information quelconque (Villa N°5 par exemple). Donc, il fallait séparer les informations primaires de tout ce qui est renseignement supplémentaire. Pour cela, le langage VBA (Visual Basic for Application) a été utilisé. Le choix du VBA réside dans le fait qu'étant déjà implémenté sous ACCESS, il permet de programmer directement depuis la gamme bureautique. Les principaux traitements effectués sur ces 3 champs sont :

- **Champs 1 et 2** : Séparation entre les noms des résidences ou de parcs et les bâtiments ou étages. Cette séparation a été faite en indiquant dans le programme un tableau de mots et de caractères indésirables appelés délimiteurs. Ce tableau de délimiteurs devait prendre en compte toutes les abréviations rencontrées dans les adresses et établir une priorisation non pas par rapport à l'emplacement du délimiteur dans ce tableau mais par rapport à sa position dans le texte de l'adresse. **Exemple de délimiteurs** : « Bâtiment », « Bât. », « Appartement », « Appart », « App. », « Porte » Cela permet de mettre dans deux nouveaux champs le texte avant le délimiteur rencontré et celui à partir de ce délimiteur.

- **Champ 3** : Séparation des chiffres et des lettres grâce à leur code ascii. Cela donne le résultat suivant pour une adresse donnée où le délimiteur considéré est « Bt ».

1	Coord_adresse1	Résidence Le Moulin	1	Coord_adresse1	Résidence Le Moulin
2	Coord_adresse2	Bt D	2	Coord_adresse2	Bt D
3	Coord_voienum	29	3	Coord_resid_detect	Résidence le Moulin
4	Coord_voietype	Avenue	4	Coord_bati_detect	Bt D
5	Coord_voienom	Du Maréchal Juin	5	Coord_voienum	29
6	Coord_commune	13700	6	Coord_voietype	Avenue
7	Coord_commune_nom	MARIGNANE	7	Coord_voienom	Du Maréchal Juin
			8	Coord_commune	13700
			9	Coord_commune_nom	MARIGNANE

Cette détection automatique a permis de déceler plusieurs pathologies au fur et à mesure des niveaux de traitement et d'homogénéiser les champs dans GA. Ainsi, sur les 4920 adresses fournies,

nous avons obtenu une correspondance de 2219 adresses de GA avec celles de la BD ADRESSE soit un ratio d'environ 45%. Le reste de la détection a été entachée par les problèmes suivants au niveau de GA :

- erreur d'écriture dans le nom de la voie,
- erreur de typage de la voie,
- près de 1000 adresses introuvables ou à correspondance ambiguë (multiple) dans la BD ADRESSE,
- adresse incomplète (pas de numéro de voie par exemple),
- adresses multiples pour un même dossier.

Ces traitements informatiques et la détermination des problèmes récurrents dans les adresses ont nécessité beaucoup de temps et afin de poursuivre sur la suite du PFE, le reste de la détection a été pris en charge par le service informatique avec des algorithmes plus poussés.

Avec les adresses corrélées, plusieurs cartes par commune doivent être éditées en fonction des couleurs qui renseignent sur l'état d'avancement des dossiers, le type de logement (collectif, individuel) mais aussi indiquer le nombre de dossiers par parcelle ou par bâtiment. Ainsi, les liens suivants ont été effectués grâce aux différentes bases :

**BD TOPO (ID\_BATI) → ADRESSE PREMIUM (ID\_BATI, ID\_ADR) → BD ADRESSE (ID\_ADR) (A)**  
 La BD TOPO contient une description des éléments du paysage tels que les bâtiments, le réseau routier, la végétation etc. en plusieurs formats (Shapefile, MIF/MID...). ADRESSE PREMIUM quant à lui, permet de relier une adresse à un bâtiment ou une parcelle grâce à sa composante LIEN Bâti-Adresse-Parcelle. La BD PARCELLAIRE, grâce à la création d'un identifiant regroupant les informations cadastrales, a également été utilisée avec le lien Bâti-Adresse-Parcelle. Les scénarii les plus fréquents que nous avons retrouvés concernant cette liaison entre le bâtiment et l'adresse sont les suivants :

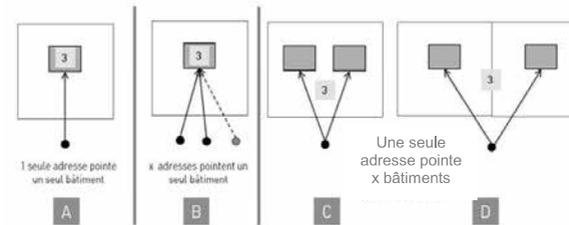
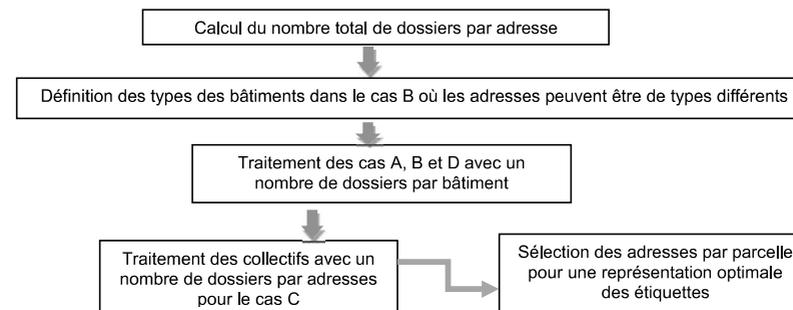


Figure 1: Relations entre bâtiment et adresse (Source: Espace9)

Comme le montre la Figure 1, la position des étiquettes pour les logements est relative à la source la plus apte à la recevoir. Ainsi dans les cas A, B et D, l'étiquette est positionnée à partir du bâtiment (un des deux bâtiments pour le D à cause des parcelles différentes) alors que pour le cas C elle sera par rapport à la parcelle. Donc, une fois le logement corrélé, un nouveau champ renseignant l'identifiant de la BD ADRESSE correspondante est rempli et des liaisons sont effectuées grâce à ADRESSE PREMIUM. La suite de la procédure dans ACCESS se déroule comme suit :



## Étude de l'application d'algorithmes de reconstruction 3D d'arbres à différentes architectures d'arbres

Pour réaliser les cartes, le logiciel utilisé dans ce PFE est Cadcorp SIS 7.0 en version Map Manager qui donne la possibilité aux utilisateurs de collecter, éditer, manipuler, voir, analyser et exporter des données spatiales. Outre son utilisation pour la représentation des données, certaines tâches dans ce logiciel vont être automatisées. Pour cela, un projet en langage VB.NET appelé **GisLink** nous a été fourni par le support de Géomod qui est le distributeur en France du logiciel. GisLink est une interface de programmation d'application (API) qui permet d'accéder à toutes les capacités de Cadcorp et de créer ainsi de nouveaux outils. Donc, avec le fichier fourni, des commandes ont été implémentées pour :

- la génération des cartes à l'échelle souhaitée avec un gabarit prédéfini,
- la connexion avec les tables dans ACCESS qui alimente le SIG pour la mise à jour des données
- les requêtes spatiales au cas où les données brutes doivent être réintroduites à la suite du changement du tracé des plans.

### 3. Outil d'aide à l'éligibilité

La première étape a été la définition des adresses contenues dans la zone du PGS et dans les deux PEB. Le ponctuel ADRESSE n'étant pas géographiquement placé à la même position que le bâtiment associé, il ne pouvait pas servir de base pour l'extraction des adresses par zones du PGS. Donc, une requête spatiale a été lancée portant sur les bâtiments de la BD TOPO contenus dans chacune des trois zones. Ensuite, les tables extraites de cette requête sont intégrées dans ACCESS afin de créer une base de données et grâce à la combinaison (A), les adresses correspondant à chaque bâtiment sont sélectionnées. Au final, les tables produites sont au nombre de deux : une pour le PGS contenant une union des trois extractions par zone et une autre pour les deux PEB avec l'information d'appartenance au PEB 1975, au PEB 2006 ou simultanément aux deux PEB.

Une fois les adresses sélectionnées, le programme pour les conditions à l'éligibilité décrites dans la partie (1) a été implémenté en langage VBA. Le raisonnement est qu'une fois l'identifiant ADRESSE fourni par la correspondance GA - BD ADRESSE, le programme regarde s'il se trouve dans la table du PGS. S'il ne s'y trouve pas, la réponse à l'éligibilité est immédiatement négative. S'il s'y trouve, la date du permis de construire est demandée afin de vérifier son ancienneté par rapport aux deux PEB et suivant la date inscrite, le logement est éligible ou pas.

Ensuite, un support visuel a été demandé afin d'appuyer le résultat de l'éligibilité. Pour cela, des menus et sous-menus supplémentaires ont été créés dans le logiciel Cadcorp SIS à l'instar de la partie (2), donc en utilisant le GisLink. Principalement, le programme permet d'effectuer un zoom par sélection dans Cadcorp sur l'adresse ainsi que le(s) bâtiment(s) associé(s) et d'extraire l'image affichée. Enfin, pour assurer la pérennité de l'outil, un programme permettant la mise à jour a été défini.

### 4. Bilan et perspectives

La mise en place du SIG pour le suivi des dossiers d'insonorisation et la réalisation de l'outil d'aide à la détermination de l'éligibilité ont été les principaux objectifs du PFE. Concernant le suivi des dossiers, la correspondance des adresses ainsi que l'établissement d'une méthode prenant en compte les différentes relations entre l'adresse et le bâtiment ont été les travaux les plus minutieux à réaliser. Même si la correspondance n'est pas finalisée, les gabarits des cartes ont été faits avec les données disponibles et pourront donc être mis à jour lorsque toutes les adresses auront été corrélées.

Les programmes écrits en langage VBA pour le traitement des données et en VB.NET pour le pilotage du logiciel Cadcorp SIS 7.0 ont permis l'implémentation d'une méthode semi-automatique de l'utilisation du SIG. Il reste à ajouter au programme la première partie du code qui fait la correspondance d'une adresse saisie avec la BD ADRESSE pour pouvoir extraire directement l'identifiant. Ce code étant le même utilisé pour le suivi des dossiers que pour l'outil, a été pris en charge par le service informatique.

Ce PFE a ainsi permis de voir que les tâches à prendre en compte pour la mise en place d'un SIG allient connaissances en programmation pour l'automatisation, le traitement de données et une sensibilité en information géographique. Concernant l'outil, un processus de géolocalisation dans le cas où l'adresse n'est pas identifiée dans la BD ADRESSE pourrait être une piste à développer.

PFE présenté par : **Marine LEMPEREUR**  
Société d'accueil : Laboratoire ICube  
Équipe Trio, INSA Strasbourg  
Directeur de PFE : **M. Georges NAJJAR**  
Encadrant : **Mme Tania LANDES**  
Correcteur : **M. Emmanuel ALBY**



### 1. Contexte de l'étude

Ce Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans un projet de recherche multidisciplinaire intitulé AVENUE (l'Arbre en ENvironnement Urbain) et qui a pour finalité de comprendre et modéliser les échanges radiatifs et d'énergie des arbres avec leur environnement. Pour réaliser cette étude sur le climat urbain, deux groupes de recherches se sont associés : TRIO d'ICube à Illkirch et PIAF de l'INRA de Clermont-Ferrand. Le rôle joué par les topographes dans cette étude consiste à fournir une modélisation d'arbres en 3D, par reconstruction à partir de données lasergrammétriques, dont les modèles climatologiques ont besoin en entrée.

En 2013, l'étude se concentrait sur un seul tilleul argenté situé dans le jardin du Palais Universitaire à Strasbourg. En 2015, l'étude a été étendue à dix arbres de ce même jardin pour généraliser l'algorithme à plusieurs arbres de même architecture. Ces dix arbres ont une architecture particulière, car ils sont taillés en forme conique encore nommée « tête de chat ». Depuis 2014, trois Projets de Fin d'Etude (PFE) ont porté sur la problématique de reconstruction 3D à partir de nuages de points, à savoir celui de Christelle Hayot en 2014, d'Elena Bournez en 2015 et celui-ci en 2016. Les résultats prometteurs ont permis de donner naissance à une thèse en cours de réalisation par Elena Bournez.

Aujourd'hui, il y a une nécessité de tester l'algorithme de reconstruction 3D développé jusqu'ici sur d'autres architectures d'arbres afin d'évaluer son adaptabilité. C'est pourquoi de nouvelles campagnes d'acquisition ont été effectuées cette année sur le boulevard de la Marne et sur le boulevard Lebois à Strasbourg (Figure 1).

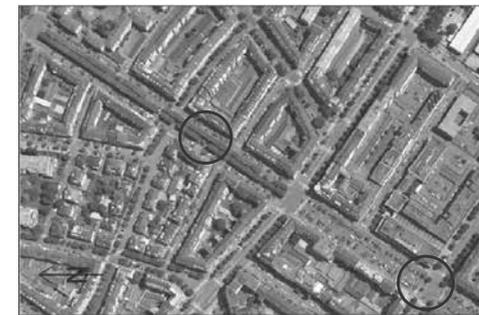


Figure 1 : Nouvelles campagnes d'acquisition en 2016

Les études précédentes ont déjà répondu à plusieurs sous-objectifs tels que celui de reconstruire la géométrie du tilleul argenté taillé en tête de chat, ainsi que celle des pousses et de déterminer le volume de la canopée par calcul d'enveloppe. A ce stade, trois nouveaux objectifs se dessinent.

Le premier objectif est la généralisation de l'algorithme existant à différentes architectures d'arbres. Le second est de compléter la reconstruction 3D afin de déduire le volume total de bois. Et le troisième

est de poursuivre notre veille technologique, en confrontant ces résultats à ceux produits par des outils apparus très récemment et mis à disposition sur Internet.

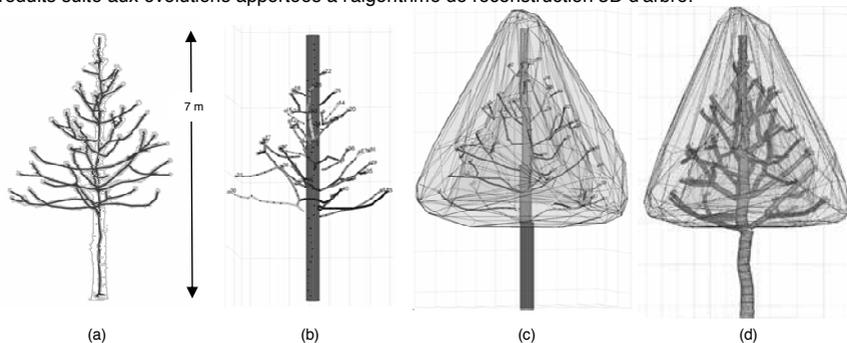
Dans les parties suivantes, nous évoquerons les améliorations apportées à l'algorithme de reconstruction 3D, puis nous comparerons nos résultats avec ceux produits par deux autres algorithmes existants

## 2. Amélioration et généralisation de la reconstruction 3D de la structure des arbres

Lors de la première étude en 2014, un choix a été fait de scinder l'algorithme en deux parties. La première s'appuie sur l'algorithme de Cao et al. (2010) et vise à squelettiser grossièrement le nuage de points (Figure 2). La deuxième partie, qui a pour fonction d'affiner la squelettisation et d'associer un tronc au résultat précédent, a été développée par Hayot (2014) et s'intitule ArbreSQUEL. Le PFE de Bournez (2015) a tout d'abord apporté beaucoup d'améliorations au modèle précédent. Ainsi, le nombre et la longueur des branches ont été corrigés par ajustement sur le nuage de points et le raccord entre le squelette des branches et le tronc a été amélioré. De plus, une nouvelle fonction ArbreVOL produisant l'enveloppe du houppier et son volume a été créée.

Dans le cadre du PFE, plusieurs développements ont été effectués et plusieurs améliorations ont été apportées à la chaîne de traitements. Premièrement, les recherches ont porté sur un développement majeur qui a été la détermination du volume de bois. La connaissance de cette donnée est primordiale pour les climatologues, les botanistes et les forestiers. Pour ce faire, entre chaque nœud du squelette est créé un cylindre qui a pour rayon la distance moyenne entre l'axe du cylindre et le nuage de points. Le modèle 3D est non seulement plus juste d'un point de vue géométrique, mais également plus fidèle à la réalité (Figure 2d). Une étude de qualité basée sur la connaissance du modèle géométrique de référence de ce même arbre a permis d'annoncer que la précision de ce modèle 3D est de 1.5 cm pour un rayon moyen des branches de 5.2 cm et de 1.6 cm pour un rayon moyen du tronc de 13.6 cm.

La Figure 2 résume, à travers l'illustration d'un tilleul argenté taillé en tête de chat, les résultats produits suite aux évolutions apportées à l'algorithme de reconstruction 3D d'arbre.

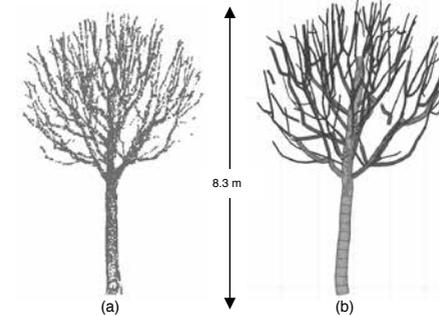


**Figure 2 :** Evolution du résultat fourni par l'algorithme de reconstruction. (a) Rendu de l'algorithme de Cao et al. (2010). (b) Rendu de ArbreSQUEL suite au PFE Hayot (2014). (c) Rendu de ArbreSQUEL suite au PFE Bournez (2015). (d) Rendu de ArbreSQUEL à la fin de cette étude (2016).

Deuxièmement, une généralisation de l'algorithme à d'autres architectures d'arbres a été souhaitée. Pour cela, des améliorations ont été apportées à l'algorithme. Par exemple, la fonction qui calcule le raccord entre les branches et le tronc a été modifiée, le fonctionnement général de la fonction a été inversé et les cylindres ajustant le tronc ont été transformés en maillages afin de permettre de nouvelles intersections.

A ce stade, l'algorithme était en mesure de produire un résultat pour tout type d'architecture d'arbres mais de qualité non satisfaisante. Pour l'ajuster davantage au modèle de référence, un état des lieux des différents seuils a été réalisé. L'algorithme ArbreSQUEL exige le renseignement de 17 seuils. Au préalable, ces seuils étaient distribués dans plusieurs fonctions de l'algorithme. Dans le cadre de ce

PFE, ils ont été regroupés au début de l'algorithme pour faciliter la tâche de l'utilisateur. Ces seuils prennent des valeurs arbitraires pour le fonctionnement des fonctions, des valeurs de bon sens au vu de l'architecture de l'arbre ou des valeurs physiques de l'arbre comme le rayon maximum du tronc par exemple. La figure 3 présente un exemple du résultat fourni par l'algorithme de reconstruction 3D actuel pour une architecture différente de celle du tilleul argenté taillé.



**Figure 3 :** (a) Nuage de points. (b) Résultat de l'algorithme de reconstruction 3D appliqué à une architecture d'arbre différente du tilleul argenté en tête de chat

Pour conclure sur cette partie, l'algorithme de reconstruction de la structure de l'arbre en 3D fournit des résultats visuels et quantitatifs satisfaisants. Cependant, il reste encore des améliorations à apporter. Par exemple, il faudrait automatiser la segmentation du tronc ou améliorer la squelettisation initiale des branches, car un squelette faux entraîne inéluctablement une reconstruction fautive.

## 3. Comparaison de la reconstruction 3D avec d'autres logiciels existants

Afin d'évaluer la qualité de production de modèles fournis par notre algorithme et de le situer par rapport à ses pairs, il a été confronté à deux algorithmes qui ressortent de la littérature et qui sont disponibles sur Internet :

- PlantScan 3D de Preuksakarn et al. (2010) qui crée un squelette et un modèle volumique 3D de l'arbre
- SimpleTree de Hackenberg et al. (2014) qui crée un modèle volumique 3D de l'arbre

Chacun des trois logiciels, si l'on considère le nôtre aussi, utilise des principes très différents, ce qui rend l'étude encore plus intéressante. De plus chacun étant créé pour répondre à une demande spécifique, les points forts de ces logiciels sont également différents. L'utilité première de SimpleTree est de déterminer le volume de bois, celle de PlantScan 3D est de créer un squelette vrai de la plante et celle de ArbreSQUEL est de déterminer des données vraies comme la longueur des branches ou la surface de la canopée.

Afin de pouvoir comparer les résultats produits par ces trois logiciels autrement que visuellement, des critères de qualité sont venus compléter le code, comme une matrice de distance entre le squelette et le nuage de points et un calcul de régression linéaire entre l'aire des branches *parents* et la somme des aires des branches *enfants*. De plus, plusieurs données produites en sortie des algorithmes peuvent être comparées entre elles, comme le « DBH » (c'est-à-dire le diamètre du tronc à 1.3 m) ou la surface de la canopée projetée sur le sol, intéressante pour un calcul ultérieur de LAI.

Deux livrables peuvent être évalués, à savoir le squelette obtenu pour l'arbre d'une part et le modèle volumique du bois d'autre part. La ligne « Squelettisation » du Tableau 1 montre trois résultats : le premier provient de PlantScan3D, le second de Cao et al. (2010) et le troisième de notre algorithme final ArbreSQUEL. Le logiciel SimpleTree crée également un squelette, mais le résultat n'est pas rendu visible à l'utilisateur. On constate que les deux premiers résultats sont très semblables visuellement, mais le pourcentage de branches détectées sur les 10 Tilleuls Argentés (TA) du jardin universitaire est différent (83% avec Cao et al (2010) ; 91% avec ArbreSQUEL et 96% avec PlantScan3D).

La partie « Reconstruction 3D » du Tableau 1 fournit, dans l'ordre, le modèle 3D produit par PlantScan3D, celui fourni par SimpleTree et le dernier par ArbreSQUEL. L'évaluation quantitative de

ces résultats est en cours de réalisation. Visuellement, les modèles volumiques de SimpleTree et de ArbreSQUEL semblent plus réalistes, tandis que celui de PlantScan 3D est plus schématique.

Squelettisation	PlantScan 3D	Cao et al (2010)	ArbreSQUEL
			
Reconstruction 3D	PlantScan 3D	SimpleTree	ArbreSQUEL
			

Tableau 1 : Comparatifs visuels des résultats des différents logiciels sur un tilleul argenté

#### 4. Conclusion

Dans le cadre de ce Projet de Fin d'Etudes, les trois objectifs fixés au départ ont pu être atteints. Dans un premier temps, le développement de l'algorithme de reconstruction 3D a été poursuivi et développé pour fournir le volume de bois. Dans un second temps, l'algorithme a été étendu et adapté à la reconstruction de plusieurs types d'architectures d'arbres. Et dans un troisième temps, ses résultats ont été confrontés à ceux produits par les seuls autres logiciels comparables et existants à ce jour, PlantScan 3D et SimpleTree.

Plusieurs perspectives d'amélioration peuvent encore être envisagées en termes de développement logiciel, comme la création d'une interface permettant de faciliter la manipulation des outils par l'utilisateur ou le rajout de contraintes allométriques dans la détermination du volume de bois.

#### Références

- Bournez, E., 2015. Reconstruction d'arbres en milieu urbain à partir de nuages de points. *Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg*, p.107.
- Cao, J., Tagliasacchi, A., Olson, M., Zhang, H. & Su, Z., 2010. Point Cloud Skeletons via Laplacian Based Contraction. *Shape Modeling International Conference*, pp.187–197.
- Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H. & Disney, M., 2014. Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: A method description. *Forests*, 5, pp.1069–1105.
- Hayot, C., 2014. Etude des solutions de modélisation d'un arbre en milieu urbain, en vue de son intégration dans les modèles météorologiques. *Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur, Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg*, p.79.
- Preuksakarn, C., Ferraro, P., Nikinmaa, E., Godin, C., Preuksakarn, C., Ferraro, P., Durand, J. & Nikin-, E., 2010. Reconstructing Plant Architecture from 3D Laser scanner data. *HAL*, p.5.

## Etude pour l'utilisation de la grille Circé Rhône en GNSS RTK et NRTK sur la concession CNR

PFE présenté par : **Camille PRADIER**  
 Société d'accueil : **Compagnie Nationale du Rhône**  
 Directeur de PFE : **Paul-Henri FAURE**  
 Correcteur : **Gilbert FERHAT**



### 1. Contexte et objectif de l'étude

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) est depuis 1933, aménageur et exploitant Hydroélectrique du Rhône. Elle se place comme le premier producteur français d'énergie 100% renouvelable. Elle se doit de surveiller les ouvrages présents le long du Rhône et également de garantir le bon état du chenal de navigation. Les équipes mesures présentes dans les quatre Directions Régionales (DR) le long du Rhône, effectuent donc des travaux topographiques et bathymétriques.

Au moment de la construction des premiers aménagements (de 1940 à 1986) les systèmes de référence légaux en France étaient le NTF Lambert Zone en planimétrie et le NGF/Lallemand en altimétrie. Depuis ce jour, toutes les données géographiques de la CNR sont exprimées dans ces systèmes. L'adoption complète du système légal en France, le RGF93 en planimétrie et le NGF/IGN69 en altimétrie, présentant un risque industriel important, la transposition n'a pas été réalisée. Néanmoins, afin de pouvoir échanger des données avec ses clients ou partenaires extérieurs, la CNR doit les exprimer dans les deux systèmes de référence. La solution utilisée avant 2012 pour convertir les altitudes, avec les abaques au 50 000<sup>ème</sup>, n'est pas assez précise pour la CNR.

A la suite d'une étude réalisée par l'IGN, une grille de correction altimétrique (abrégé ortho/normale) appelée Circé Rhône permettant le passage de l'altitude NGF/Lallemand (orthométrique) à l'altitude NGF/IGN69 (normale) a été mise en place. De plus, un modèle de géoïde (abrégé HeO) a également été calculé pour convertir les hauteurs ellipsoïdales en altitudes orthométriques. Cet outil a été implémenté dans un nouvel applicatif Circé Rhône basé sur la même structure que le logiciel Circé France.

Ce Projet de Fin d'Etudes s'inscrit dans la continuité des actions menées à la CNR pour améliorer la précision et homogénéiser ses méthodes de géopositionnement. Les levés topographiques et bathymétriques nécessitent, généralement, une précision de  $\pm 5\text{cm}$  et  $\pm 10\text{cm}$  respectivement. Les mesures GNSS sont donc principalement mises en œuvre. Cette étude a pour objectif le déploiement opérationnel de la nouvelle grille de correction altimétrique auprès des différents usagers du système GPS à la CNR.

Après une première analyse théorique, différentes mesures représentatives ont été réalisées le long de la concession afin de mettre en avant les conditions et les limites de l'utilisation de la grille.

### 2. La grille Circé Rhône

Développées en 2012, les deux grilles précédemment citées s'étendent autour et le long de la vallée du Rhône avec une emprise de  $2,2^\circ$  en longitude et  $3,1^\circ$  en latitude ainsi qu'un pas de  $0.005^\circ \times 0.005^\circ$ , soit environ 550m. Elles couvrent largement toute la concession CNR et permettent aux équipes d'effectuer des travaux sur les affluents (Figure 1).

Les deux systèmes IGN69 (normal) et Lallemand (orthométrique) possèdent le même point de référence au Marégraphe de Marseille. Les altitudes normales sont calculées à partir d'une surface de référence appelée le quasi-géoïde. Les altitudes orthométriques sont calculées à partir du géoïde. La différence entre ces deux altitudes est due à la reprise des observations, au moyen de calculs plus modernes et aux données gravimétriques utilisées lors du développement du système IGN69.

La grille de correction ortho/normale a été calculée à partir des données des 4344 repères de nivellement, répertoriés et contrôlés par l'IGN. La précision donnée par l'IGN est infra-centimétrique à  $\pm$  dans une zone de 5 km autour des repères de nivellement retenus et centimétrique au-delà. La différence de correction varie de 0 à 31 cm. Elle est faible entre Avignon et la Méditerranée (de 0 à 4cm) et augmente dans les zones montagneuses.

La seconde grille permet le passage des hauteurs ellipsoïdales aux altitudes orthométriques. Elle a été définie en interpolant l'anomalie d'altitude de la grille RAF09 à chaque nœud de la grille ortho/normale. La correction ortho/normale a ensuite été additionnée à cette valeur. Sa précision est de 1 à 5 cm. La grille HeO a une valeur moyenne de 50,3cm avec une amplitude de 5,5cm. Le modèle global présente une pente maximale de 6 cm/km au nord de Tournon.



Figure 1 : Emprise grille Circé Rhône par rapport à la concession CNR

L'IGN ayant utilisé toutes les données disponibles sur les repères de nivellement pour effectuer le calcul et le contrôle de la grille, un contrôle indépendant n'a pas pu être réalisé pendant l'étude. La cohérence des grilles a donc été examinée en calculant, pour un échantillon d'environ 15 300 points positionnés aléatoirement sur la grille, l'anomalie d'altitude donnée par la grille RAF09, la correction donnée par la grille HeO et la correction ortho/normale. La différence entre les deux valeurs de grille est calculée puis comparée à la correction ortho/normale. Les écarts calculés sont inférieurs au millimètre.

Dans les conditions de mesures GNSS réalisées par les équipes des DR, une estimation du gain en précision obtenu par l'utilisation de la grille a été effectuée. Aujourd'hui les récepteurs GPS sont configurés avec la grille de géoïde RAF09, et lors de mesures en temps-réel, l'opérateur saisit une altitude orthométrique pour le pivot. Cette base de référence est positionnée sur un point du canevas CNR. La densité de celui-ci est d'un point tous les 5km environ. La correction présente au pivot, appelée «  $\Delta$ Ortho », est alors appliquée à tous les points levés à partir de ce pivot. Une analyse avec des zones tampons de 5km autour des points de référence a permis d'observer une variation maximale de la correction de 7cm sur l'aménagement de la commune de Logis-Neuf. En analysant de la même manière, avec des vecteurs linéaires le long du Rhône, nous obtenons une variation de correction de 2 à 3 cm maximale. Ce qui signifie, lors du relevé RTK, que la correction appliquée sur le mobile ne correspond pas à la correction réelle.

### 3. Les mesures GNSS

Les mesures GNSS ont été réalisées dans les Directions Régionales de Belley, Vienne et Valence. Ces sites ont été choisis en fonction de leurs différentes caractéristiques : correction élevée, linéaire important, variation de correction importante.

En cohérence avec les méthodes utilisées par les équipes des DR, les mesures ont été effectuées en cinématique « temps-réel » et « temps-réel réseau ». Les points du canevas ainsi que les bornes physiques le long du Rhône ont été utilisées comme points de mesures. Les points ont été mesurés à 3 reprises pendant 5 positions, avec rupture d'initialisation entre chaque mesure pour s'assurer de la bonne détermination des ambiguïtés et obtenir des coordonnées moyennées. Chaque site de mesures a fait l'objet de 3 passages avec les configurations du système suivantes :

- Mesures RTK avec la grille de géoïde RAF09
- Mesures RTK avec la grille de géoïde HeO
- Mesures NRTK avec la grille de géoïde HeO

Les données ont ensuite été importées et analysées à l'aide du logiciel LGO. Celui-ci a permis de corriger certaines erreurs, de vérifier les coordonnées moyennées et d'exporter les coordonnées dans le système RG93 avec la hauteur ellipsoïdale et dans le système NTF Lambert Zone avec l'altitude orthométrique.

La comparaison des hauteurs ellipsoïdales obtenues pour un même point permet d'estimer la précision des mesures entre elles. L'écart entre les altitudes orthométriques est également calculé. Ces deux valeurs sont mises en relation par rapport au «  $\Delta$ Ortho » et à la correction effective donnée par la grille sur les zones de levés, avec l'équation suivante au signe près :

$$\text{Ecart He} - \text{Ecart Ortho} = \Delta\text{Ortho} - \text{Correction effective de la grille (1)}$$

Des mesures ont également été réalisées sur le Frédéric Mistral, le bateau d'hydrographie de la CNR, chargé de réaliser les levés bathymétriques le long du Rhône. Ces tests ont consisté à lever un même profil de 500m environ dans les 3 configurations énumérées précédemment.

### 4. Les résultats

Un bilan des erreurs du système GNSS a été réalisé. Les principales erreurs connues sont aujourd'hui modélisées par des modèles ou éliminées lors des calculs des coordonnées des points dans le système GPS. La précision théorique sur la détermination des coordonnées des points par mesures GNSS provient donc des données constructeurs et des modèles de grilles utilisés pour passer du système WGS84 au système local utilisé. Cette précision est de  $\pm 1,5 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$  en planimétrie et  $\pm 2 \text{ cm} + 1 \text{ ppm}$  en altimétrie.

Les comparaisons effectuées ont mis en jeu d'un côté les mesures RTK entre elles, puis les mesures RTK et NRTK faites avec la grille Circé Rhône. Au total, environ 75 points ont été mesurés sur la concession. Après avoir analysé chaque point individuellement pour écarter les fautes grossières, la précision interne entre les séries de mesures est obtenue à partir de l'écart moyen absolu (Tableau 1).

Sites	Nombre de points	Ecart Moyen Absolu sur He entre mesures RTK	Ecart Moyen Absolu sur He entre mesures RTK et NRTK
Pierre-Bénite	36 points	1 cm	2,2 cm
Belley	23 points	1,5 cm	3 cm
Le Pouzin	17 points	1,5 cm	1,5 cm

Tableau 1 : Ecart moyen absolu entre séries de mesures

Ces premiers résultats confirment la cohérence des données entre les mesures RTK. Nous observons également une précision moindre des observations réalisées avec le réseau Orphéon. Les résultats présentés en figure 2 concernent uniquement le site du Pouzin. La variation de correction de 3 cm est celle la plus élevée qu'on ait réussi à obtenir avec des mesures RTK UHF le long du Rhône.

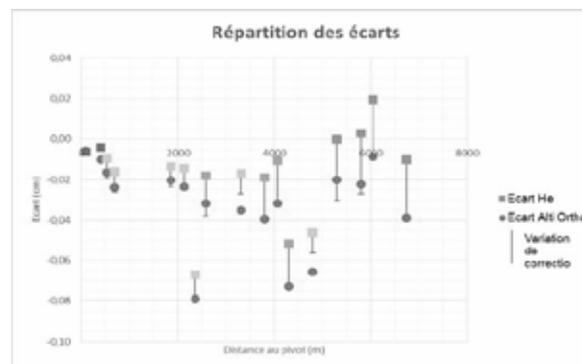
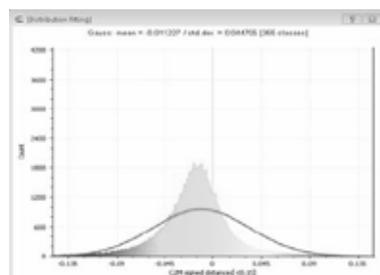


Figure 2 : Graphique Répartition des écarts sur la composante verticale en relation avec la variation de correction sur chaque point mesuré

La différence de correction entre  $\Delta$ Ortho et la correction effective de la grille est bien retrouvée dans les mesures. Tous les écarts observés sont de l'ordre du centimètre.

Concernant les mesures bathymétriques réalisées sur le FM, nous obtenons 3 nuages de points. Un maillage a été réalisé pour le nuage obtenu avec la configuration RTK RAF09. Les 2 autres nuages ont ensuite été comparés avec CloudCompare et la fonction du calcul de distance entre nuage et maillage (Figure 3). La variation de correction entre le pivot et la zone de levé est de 1 cm conformément à la grille Circé Rhône. Les résultats énumérés dans le tableau 2 coïncident avec les résultats obtenus sur terre puisque la variation de correction est égale à la moyenne des écarts.



Jeu de données	Comparaison 1 - Nuage RTK	Comparaison 2 - Nuage NRTK
Nombre de valeurs	125 752 (100% du nuage)	120 640 (100% du nuage)
Moyenne des écarts sur l'altitude orthométrique	1,1 cm	4,5 cm
Ecart-type	4,5 cm	5,2 cm

Tableau 2 : Résultat comparaison nuages maillage

Figure 3 : Répartition des écarts pour la comparaison 1

## 5. Conclusion

Ce projet de fin d'études a permis de valider l'utilisation de la grille Circé Rhône dans le cas des travaux GPS, sur le terrain de la concession CNR. Il a également permis de faire un bilan de l'utilisation du GPS en mode RTK et NRTK dans l'entreprise.

Les mesures ont été réalisées sur une majeure partie de la concession. Le mode opératoire a été mis en œuvre afin de respecter les techniques de levés des agents de la CNR.

La grille Circé Rhône, développée par l'IGN, permet un gain en précision de 2 à 3cm, dans les conditions dans lesquelles le GNSS est utilisé aujourd'hui. Ce gain n'est pas significatif par rapport à la précision de la mesure GNSS et par rapport à la précision requise pour les travaux réalisés au GPS par la CNR. Cependant, cet outil est tout de même plus précis et apporte une cohérence dans les mesures, puisque nous utilisons une altitude orthométrique au pivot. Elle doit également être déployée dans les équipes bathymétriques, et sur le Frédéric Mistral. En plus de sa précision, elle facilite le processus d'export des données et diminue la probabilité d'erreur commise par l'opérateur à ce niveau.

Les différentes mesures réalisées permettent également d'observer une moins bonne détermination de la composante verticale avec des mesures temps-réel réseau.

Outre les résultats présentés dans ce résumé, ce projet de fin d'études a également été l'occasion de s'intéresser au processus de création des grilles de transformation et aux méthodes d'interpolation existantes avec les différents paramètres qui influencent le résultat.

Par la suite, le déploiement de la grille Circé Rhône rend possible l'utilisation du GPS avec des lignes de base plus importantes avec la communication GSM en positionnement relatif. Elle permet également d'utiliser un positionnement absolu en temps-réel réseau dans le système historique utilisé par la CNR.

# Évaluation des incertitudes de mesure appliquée aux métrologies sous-marines. Étude comparative des techniques existantes



PFE présenté par : **Laure Wilhelm**  
 Société d'accueil : **TOTAL SA**  
 Directeur de PFE : **Frédéric AUGER**  
 Correcteurs : **Gilbert FERHAT**



## 1. Contexte et objectifs de l'étude

Les méthodes de métrologies sous-marines ont évolué ces dernières années, tant par l'apparition de nouvelles technologies que par la nécessité de réduire les coûts générés lors de ces opérations. Ces métrologies, qui sont des campagnes de mesures de précision, doivent impérativement respecter un seuil de tolérance maximal. Or, jusqu'à présent, ni les sous-traitants, ni TOTAL ne calculent la précision finale sur les résultats de métrologies.

La précision est au cœur du métier de Topographe, tout comme l'est la capacité de fournir la précision sur un résultat ou une mesure. C'est pourquoi le service de Topographie de TOTAL a jugé indispensable de faire développer une application en interne qui permet de calculer les erreurs finales, fournissant de ce fait un indice sur la précision des métrologies. C'est donc dans cette optique que ce projet a vu le jour.

Les objectifs de ce projet sont donc de dresser un **bilan d'erreurs** pour chacune des techniques de métrologies existantes, puis, de développer une **application de calcul d'erreur** appliquée aux campagnes de métrologie et permettant de calculer les erreurs finales sur les résultats. Cette application sera testée sur plusieurs cas concrets et récents. Nous nous intéresserons finalement à l'importance de l'impact que peuvent avoir les différents paramètres intervenant dans les calculs et ce en vue d'optimiser le temps et le coût des métrologies.

Pour établir un tel bilan, la parfaite compréhension des métrologies est nécessaire. Cela implique d'étudier scrupuleusement les méthodes de mesure utilisées ainsi que les calculs effectués.

## 2. Les métrologies sous-marines

Les métrologies sous-marines sont les opérations de mesures de précision effectuées en amont de la fabrication et de la pose des conduites rigides, les *spools* et les *jumpers*, destinées à relier les structures entre elles. À l'issue de ces campagnes de mesures, nous cherchons à connaître la position relative des structures les unes par rapport aux autres. Plus précisément, on souhaite obtenir la position des *hubs* des structures qui sont les extrémités sur lesquelles seront connectées les conduites. Les résultats obtenus à l'issue d'une métrologie et pour lesquels nous souhaitons calculer l'erreur finale sont :

- Distance horizontale séparant les centres des deux hubs
- Attitudes des deux hubs (lacet, tangage, roulis)
- Différence de hauteurs entre les centres des deux hubs
- Différences angulaires entre les directions des connecteurs et la ligne passant par les centres des hubs ( $\alpha$  et  $\beta$ )

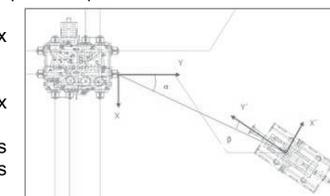


Figure 1 – Mesures requises pour une métrologie (Procédure Total)

Il existe plusieurs techniques de métrologies. Actuellement, les deux techniques les plus largement utilisées et qui font l'objet d'étude de ce projet sont la **métrologie acoustique** et la **métrologie inertielle**.

Nous parlons de métrologie acoustique lorsque la distance entre les hubs est mesurée par méthode acoustique. Un réseau LBL (*Long Base Line*) composé de transpondeurs acoustiques est déployé autour de la ligne de base que l'on cherche à déterminer et recouvre la zone où se trouvent les deux structures qui seront reliées par le *jumper* ou la *spool*. Chaque transpondeur acoustique envoie successivement des ondes sonores aux autres et le temps mis par l'onde pour parcourir le trajet aller-retour est mesuré. Cette mesure de temps, ajoutée à la mesure de la vitesse du son dans l'eau permet de déterminer la distance entre les transpondeurs. Nous utilisons alors un logiciel d'ajustement de réseau pour compenser nos observations et obtenir les coordonnées Est et Nord des transpondeurs.

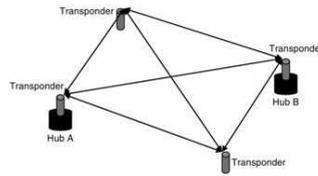


Figure 2 – Réseau LBL : Détermination des lignes de base par acoustique avec redondance de données

L'attitude des hubs est ensuite mesurée à l'aide d'un gyrocompas et d'un inclinomètre.

La métrologie inertielle tient son appellation de l'utilisation d'une centrale inertielle. Cette centrale contient une IMU (*Inertial Measurement Unit*) constituée de trois gyroscopes et trois accéléromètres deux à deux orthogonaux. Ces capteurs fournissent des données brutes de vitesse angulaire et d'accélération. Un ordinateur va ensuite traiter ces données pour obtenir les attitudes et les positions des hubs.

Pour ces deux types de métrologies, une première étape consiste à conduire un contrôle dimensionnel par méthode topographique classique pour déterminer les décalages entre le centre du hub et le centre du réceptacle qui va accueillir les instruments de mesure. Enfin, la profondeur des hubs est déterminée par mesure de pression à l'aide d'un Digiquartz (capteur de pression).

### 3. Bilan d'erreurs et application de calculs

Pour chacune des deux techniques, le bilan d'erreurs se découpe en deux parties : le contrôle horizontal, qui concerne la distance entre les hubs obtenue par conversion de coordonnées rectangulaires en coordonnées polaires, leur attitude respective (cap, tangage et roulis) ainsi que les angles  $\alpha$  et  $\beta$ , et le contrôle vertical, qui se rapporte à la différence de profondeur entre les hubs. Les calculs d'erreurs sont effectués en s'appuyant sur la loi de propagation d'incertitudes. Les résultats de métrologies résultent d'une succession de moyennes arithmétiques et de changements de repères. Chacune de ces étapes va faire intervenir des erreurs traductibles par transmission d'erreur. De manière générale, la formule matricielle de propagation d'incertitudes s'écrit comme suit :

$$\sigma_A^2 = J \cdot \Sigma_{xx} \cdot J^T$$

Avec  $J = \begin{pmatrix} \frac{\partial A}{\partial x} & \frac{\partial A}{\partial y} & \frac{\partial A}{\partial z} \end{pmatrix}$  et  $\Sigma_{xx} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 \\ \sigma_{xy}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 \\ \sigma_{xz}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{zz}^2 \end{pmatrix}$

Où J est la matrice Jacobienne des dérivées partielles de la grandeur A par rapport aux observations x, y et z et  $\Sigma_{xx}$  est la matrice des variances-covariances des observations.

Avant chaque opération, la calibration des différents appareils est effectuée de sorte à éliminer tout systématisme. Ainsi, les observations brutes sont considérées comme étant indépendantes. Du reste, la corrélation entre les pseudo-observations doit être prise en compte et ce au travers de transmissions d'erreurs généralisées.

Dans un souci de faciliter la compréhension des futurs utilisateurs et de permettre leur interaction en vue d'éventuelles modifications, l'application de calcul d'erreur a été réalisée sous le logiciel Excel. Au total, quatre fichiers indépendants ont été réalisés pour répondre aux quatre cas suivants :

- Application de calculs pour le contrôle horizontal des métrologies acoustiques orientées,
- Application de calculs pour le contrôle horizontal des métrologies acoustiques non orientées,
- Application de calculs pour le contrôle horizontal des métrologies inertielles,
- Application de calculs pour le contrôle vertical des métrologies acoustiques et inertielles.

### 4. Résultats et analyses

Les applications de calculs d'erreurs citées précédemment ont permis de calculer l'erreur finale sur les résultats de plusieurs métrologies de chaque type.

Le tableau ci-après présente les résultats obtenus sur une métrologie réalisée en décembre 2010 en Angola, sur le site d'exploitation Pazflor. Cette métrologie visait à la pose d'une conduite d'export de gaz (*Gaz Export pipeline Spool Piece*) : GESP1. Les mesures ont été effectuées entre les deux structures GEFT1 FMC et SIV (*Subsea Isolation Valve*) FMC sur les réceptacles, ou points de référence, portant les mêmes noms.

Distance Horizontale	32.220 m ± 0,025 m
$\alpha$	5.11° ± 0,11°
$\beta$	3.82° ± 0,11°

GEFT1 FMC Hub	
Heading	123.89° ± 0,10°
Pitch	-0.76° ± 0,10°
Roll	1.04° ± 0,10°
SIV FMC Hub	
Heading	305.18° ± 0,10°
Pitch	0.21° ± 0,10°
Roll	-0.28° ± 0,10°

Profondeur moyenne – Réceptacle GEFT1 FMC	776.976 m ± 0,10 m
Profondeur moyenne – Réceptacle SIV FMC	776.539 m ± 0,10 m
Différence de profondeur : SIV → GEFT1	0,437 m ± -0,020 m

Figure 3 – Erreurs finales sur les résultats de la métrologie GESP1 Spool Piece, 2010, Pazflor, ANGOLA

Les tolérances à respecter pour les métrologies conduites sur Pazflor sont de 40 mm pour la distance et la différence de profondeur et de 1.0° pour les angles. Dans le tableau présenté en figure 3, on constate que les tolérances fixées par Total sont largement respectées pour cette métrologie réalisée avec la technique acoustique.

Si l'un des buts principaux d'une métrologie est qu'elle respecte le cahier des charges, il n'en est pas moins important de le faire à moindre coût et dans des temps décent. De ce fait, la question qui se pose est de savoir si une telle précision sur les résultats est nécessaire par rapport à la précision attendue.

Pour répondre à cela, des tests ont été effectués en faisant varier indépendamment les paramètres intervenant dans les calculs d'erreurs. Par exemple, le contrôle dimensionnel, qui constitue la première étape de mesure d'une métrologie, annonce des précisions sur les décalages en x, y et z de l'ordre du millimètre, moyennant des dépenses importantes compte tenu des appareils utilisés. Or, on remarque qu'une précision de 1 cm sur les données du contrôle dimensionnel suffit pour rentrer dans les tolérances finales.

De même, si les précisions sur les mesures d'inclinaison (tangage et roulis) fournies par le gyroscope et l'inclinomètre sont bien telles qu'annoncées par le constructeur, à savoir 0,1°, il s'avère inutile de coupler les mesures effectuées avec les deux appareils. En effet, l'erreur finale sur les angles reste inchangée par l'ajout ou non des mesures effectuées par inclinomètre. La procédure de répétition de mesures mise en place garantit le respect des tolérances avec la seule utilisation du gyroscope. Nous pouvons donc songer à supprimer les étapes de mesure réalisées avec l'inclinomètre.

## 5. Conclusion et perspectives

Ces applications de calculs d'erreurs ont d'abord permis de répondre au besoin de Total de fournir une précision sur les résultats des métrologies et ce, de manière quantitative. Les tests effectués sur plusieurs cas concrets et récents sont très satisfaisants. Les métrologies testées respectent le cahier des charges auquel elles sont soumises puisqu'elles rentrent dans les tolérances fixées. Cela montre le sérieux avec lequel elles sont conduites ainsi que la robustesse des méthodes utilisées.

Au-delà de quantifier la précision des métrologies, ces applications permettent de s'interroger sur les procédures actuelles, c'est-à-dire comment les améliorer dans l'optique de réduire les coûts générés lors de ces opérations et le temps de mise en œuvre. En effet, les précisions généralement attendues sur la distance horizontale séparant les hubs ainsi que sur la différence de profondeur sont de l'ordre de 4 cm. Concernant les attitudes, on attend une précision de l'ordre du degré. Or, actuellement, les précisions effectives s'avèrent bien meilleures.

À travers les tests, nous pouvons constater que certaines opérations nécessitent l'utilisation d'un seul appareil plutôt que de deux. La mise en pratique de cette conclusion permettrait un gain de temps et donc d'argent sur le déroulement des métrologies réalisées par technique acoustique.

Un autre point qui suscite un intérêt particulier concerne le nombre de réceptacles sur les structures. Les réceptacles sont les interfaces placées sur les structures et destinées à recevoir les différents appareils de mesure lorsque le vis-à-vis entre les deux hubs est impossible. Jusqu'à présent, il y a toujours eu un réceptacle par hub. L'installation de ces réceptacles ainsi que les opérations de mesure des décalages entre le hub et son réceptacle associé (décalages en X, Y et Z et en cap, tangage et roulis) prennent du temps et ont un coût non négligeable. Dans le but d'optimiser ces dépenses, les contracteurs souhaiteraient installer un unique réceptacle pour l'ensemble des hubs d'une structure.

Néanmoins, plus le bras de levier hub – réceptacle est important, plus le risque d'introduire des erreurs augmente. L'application de calculs d'erreurs peut être utilisée ici pour prouver cette théorie.

Enfin, les feuilles de calculs Excel seront transmises aux superviseurs des métrologies présents sur les sites d'exploitation. Elles seront utilisées pour calculer les erreurs finales qui seront intégrées aux rapports de métrologies avec les résultats classiques.

Ce résumé accompagne un mémoire, plus détaillé, qui sera présenté le 21 septembre 2016.

## Etude des limites de l'orbitographie, Cas de l'altimétrie satellitaire

PFE présenté par : **David Koch**  
Société d'accueil : **Laboratoire Géoazur, Equipe Astrogéo**  
Directeur de PFE : **Pierre Exertier**  
Correcteurs : **Gilbert Ferhat, Pascal Bonnefond**



Ce projet vise à déterminer les limites actuelles de la géodésie spatiale, essentiellement vis-à-vis du calcul de trajectoires. L'altimétrie satellitaire, qui est l'observation du niveau des mers depuis l'espace, est une des techniques de la géodésie qui trouve à la fois ses limites dans l'instrumentation bord et sol et dans la modélisation des orbites. Dans ce dernier domaine, la partie consacrée à l'estimation centimétrique de l'altitude du satellite à chaque instant de mesure est prépondérante. Le potentiel de gravité terrestre représente un des principaux paramètres du modèle dynamique pouvant générer des erreurs d'orbite. L'objectif est d'étudier l'influence de sa modélisation pour la détermination de l'orbite.

### 1. L'altimétrie satellitaire

L'océan, par son immensité (71% de la surface de la Terre) et la complexité de ses processus de transport d'énergie, constitue un enjeu majeur pour le monde entier. La rapidité, la précision et la couverture géographique qu'offre l'observation par satellite sont des atouts considérables : on produit aujourd'hui plus de données sur la topographie océanique en 10 jours qu'il n'en avait été emmagasiné pendant plusieurs siècles par bateaux. Il faut cependant pouvoir intégrer ces données pendant plusieurs dizaines d'années au minimum si l'on veut estimer les changements lents et profonds qui sont liés au climat de la Terre. C'est ainsi que depuis 1992, les missions spatiales qui observent la topographie des océans se succèdent sans discontinuer. Ces missions ont pour objectif de mesurer continuellement le relief de la surface des océans, information essentielle à l'étude des circulations d'eau et donc à terme, de l'évolution climatique de la Terre.

En pratique, la distance entre le satellite et la surface de l'océan est mesurée par un radar dit altimètre, instrument à bord du satellite orbitant autour de la Terre. Cet instrument a une précision d'environ 2 cm sur la distance entre le satellite et la surface d'eau que le satellite survole.

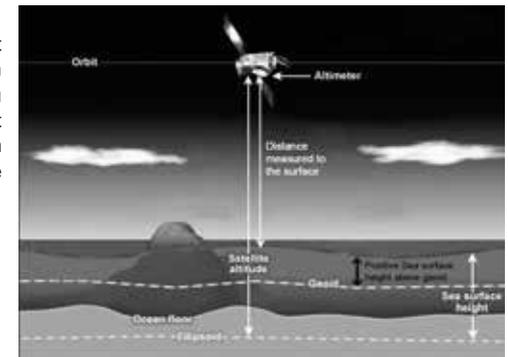


Figure 1. Schéma de principe de l'altimétrie satellitaire

Sur la Figure 1, il apparaît clairement que la connaissance de la position du satellite est essentielle pour rattacher la hauteur d'eau mesurée à une surface de référence terrestre. La trajectoire, ou orbite, fait l'objet de calculs complexes, liés à une modélisation du mouvement. Cette modélisation doit pouvoir s'adapter à plusieurs types de satellites, en orbite basse (de 160 à 2000 km) ou haute (satellites GNSS par ex., à 22000km) ; c'est le domaine de l'orbitographie.

### 2. L'orbitographie

L'altitude du satellite est donnée par le calcul de sa trajectoire, au même titre que sa vitesse. Le calcul qui est basé sur une intégration des équations de la dynamique, fait intervenir de nombreux paramètres

liés à des effets gravitationnels (ex. : attraction de la Terre, de la Lune, du Soleil) et non-gravitationnels (ex. : freinage atmosphérique, pressions de radiations diverses, etc.) qui agissent sur le satellite. De tous ces paramètres, nous nous intéressons particulièrement, dans le cadre de ce projet, à la modélisation de la gravité terrestre. En effet, le champ de gravité de la Terre, y compris ses variations temporelles et géographiques (liées aux répartitions de masses changeantes), est l'effet prépondérant. Les différents modèles existants, eux-mêmes basés sur des sources de données très différentes, ne sont pas tous cohérents entre eux et pas tout à fait exacts. Ceci provoque donc des incertitudes en orbitographie ; on aboutit alors à une limite dans l'estimation de la trajectoire. Est-elle centimétrique, millimétrique, sur quelles échelles d'espace et de temps, autant de questions qui nous sont posées ici.

#### a. Modélisation du champ de gravité terrestre

Dans la théorie Newtonienne, la force d'attraction gravitationnelle dérive du potentiel de gravité (lui-même engendré par la simple présence d'une masse : étoile, planète, etc.). Ce champ de force en 3 dimensions dirigé vers le centre des masses de la Terre, agit sur tous les objets à l'extérieur de la Terre. Il prend une forme simple, dans le cas d'une sphère homogène de masse  $M$  :  $U = GM/r$ , où  $G$  est la constante gravitationnelle.

A cause de la répartition irrégulière des masses dans la Terre solide, et de phénomènes géophysiques externes comme les marées, l'atmosphère et l'hydrologie continentale, le champ de force qui dérive de la masse de la Terre, n'est ni régulier, ni constant dans le temps. Avec un aplatissement d'environ 1/300 de la forme de la Terre, les géodésiens utilisent assez naturellement un développement du potentiel en harmoniques sphériques (Figure 2).

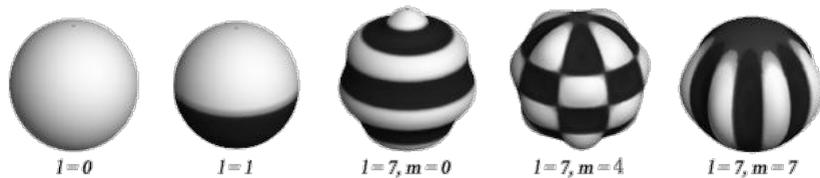


Figure 2. Représentation sur une sphère d'une harmonique sphérique pour un degré ( $l$ ) et un ordre donné ( $m \leq l$ ).

Le modèle global du champ de gravité est donc une sorte de compilation de polynômes orthogonaux de degré 0 à  $L$  pondérés par des coefficients dits géodynamiques. Le degré maximal ( $L$ ) du développement définit la Résolution Spatiale (RS) du modèle. Par exemple, si  $L = 50$ , la plus petite ondulation modélisée a une étendue de 400 kilomètres en latitude à l'équateur (si  $L = 1000$ , alors RS = 20km).

Tableau 1. Quelques exemples de solutions disponibles pour modéliser le champ de gravité : 3 modèles de champ moyen (variables ou non), et une série temporelle de résolution mensuelle.

Nom du modèle (année de publication)	Degré maximal	Variabilité	Période de validité
ITG – Goce02s (2013)	240	aucune	Autour de l'époque de référence
Eigen-51C (2010)	359	Dérive pour J2, J3, J4	Autour de l'époque de référence
Eigen-GRGS.RL03.Mean-field (2015)	260	Dérive (1/année) + termes périodiques (annuels et semi annuels) jusqu'au degré 80	Pendant la période de collecte des données (et alentours)
30-day gravity field models	100	aucune	30 jours

Aux débuts de l'ère spatiale, les modèles étaient développés jusqu'au degré 20 puis 30 (années 1970). Le lancement de satellites de type accélérométrique, comme CHAMP en 2000, GRACE en 2002, et GOCE en 2009, positionnés en 3D par GPS, a permis un accroissement spectaculaire de la résolution des modèles au plan spatial (aujourd'hui au degré maximal 300 en moyenne, voire 2000) comme au plan temporel. Avec la mission GRACE, la description permanente de la variabilité du champ par des effets saisonniers est représentée jusqu'au degré 50 (voire 80 ou 100) avec une résolution de 10 jours au mieux. La représentation du champ avec une finesse importante ( $d/o > 100$ ) est cohérente avec la prise en compte de la variabilité (effet périodiques et séculaires) puisque l'amplitude des variations des termes de bas degré a autant d'importance qu'un terme statique de degré 200 environ (eigen-6s2).

#### b. Méthodes de calcul d'orbite

Le calcul de la trajectoire repose sur l'intégration des équations du mouvement, exprimées dans un repère donné. Généralement, le système est intégré de manière numérique en coordonnées géocentriques rectangulaires ( $x, y, z$ ) sur quelques jours, 10 au maximum. Afin de faire correspondre au mieux aux données d'observation (de poursuite) disponibles et à la trajectoire calculée, des coefficients dits « empiriques » sont ajustés le long de la trajectoire dans les 3 directions de l'espace. Ces méthodes sont très performantes. Associées à l'utilisation des dernières versions du champ de gravité, elles viennent compenser les incertitudes liées aux modèles non-gravitationnels et produisent aujourd'hui une orbitographie centimétrique (<1cm ou 2-3 cm suivant les missions et les altitudes).

Dans le cadre de ce projet, nous utilisons une méthode analytique approchée, donc imprécise, ce afin de manipuler des relations de causes à effets entre coefficients de modèles et paramètres d'orbite, ce qui ne peut se faire avec l'intégration numérique. Les équations du mouvement sont intégrées analytiquement en coordonnées sphériques ( $r, \varphi, \lambda$ ) dans un repère particulier, le plan orbital moyen. La théorie utilisée est développée à l'ordre un, et les effets de couplages entre les coefficients du modèle ne sont donc pas pris en compte. Cette méthode est ici étendue à l'étude des incertitudes d'orbite en différenciant simplement la solution analytique (l'expression de chaque paramètre de la trajectoire) par rapport aux coefficients de modèles. Ceci permet donc de rapprocher incertitudes de modèles et d'orbite, dans des expressions littérales et programmées. L'étalonnage de la méthode est une opération essentielle pour l'obtention de résultats cohérents avec ceux publiés récemment. Cet étalonnage ainsi que le reste de l'étude sont menés, ici, principalement sur les satellites océanographiques SARAL/AltiKa et Jason-2 (Tableau 2). La composante radiale de l'erreur d'orbite est principalement analysée, puisque c'est la seule qui a une incidence sur la hauteur d'eau mesurée.

Tableau 2. Principaux paramètres des orbites étudiées au cours de ce projet

Nom du Satellite	Inclinaison de l'orbite	Altitude	Période de révolution	Répétabilité
SARAL/AltiKa	98,6° (rétrograde)	786-814 km	100,6 min	35 jours
Jason-2	66° (prograde)	1328-1340 km	112 min	10 jours

### 3. Les erreurs d'orbite

Malgré le fait que l'on sait aujourd'hui prévoir des orbites avec une précision de l'ordre du centimètre sur quelques jours (cas des satellites altimétriques SARAL/AltiKa et Jason-2), beaucoup d'effets très petits restent méconnus ou difficilement modélisables. Par exemple, la variabilité rapide de l'hydrologie continentale ou certains déplacements de masses dans l'atmosphère, sont autant de sources de variations du champ de gravité à prendre en compte.

Pour les besoins de l'océanographie, qui interprète les cartes de la topographie dynamique des océans fournies par l'altimétrie tous les 10 ou 35 jours suivant les missions, il faut aussi développer des méthodes de contrôle et d'évaluation de la qualité spatio-temporelle des orbites. Il est tellement important de fournir un produit géodésique (orbite et son repère de référence) stable à environ 0.1

mm/an, que l'analyse d'erreurs devient un domaine d'étude à part entière.

Parmi les travaux publiés ou en cours, il est important de signaler ce que les auteurs entendent par erreur d'orbite. Ce peut être des différences entre plusieurs solutions/éphémérides ajustées ou même calculées dans des conditions différentes (modèles, méthodes et/ou jeux de données différents). Ce peut être des résidus entre orbite calculée et mesures de poursuite (moyennes et écart-types sur une durée), etc. De plus, les mesures de poursuite étant issues d'un réseau au sol, l'observable calculée contient donc, outre l'erreur d'orbite, les erreurs des coordonnées des stations du repère utilisé (l'ITRF : International Terrestrial Reference Frame). Les analystes utilisant des méthodes numériques globales basées sur l'ajustement de l'ensemble des mesures disponibles, distinguent difficilement les sources d'erreurs en présence.

La méthode utilisée dans le cadre de ce projet offre la possibilité de caractériser une erreur d'orbite indépendamment des données d'observations. Cette méthode originale, est à même de caractériser directement, dans les paramètres de l'orbite (position et vitesse), la signature d'une incertitude sur un ou des termes de modèle, ou encore pour quantifier l'erreur d'orbite qu'entraîne la non prise en compte d'une série de (petits) termes géodynamiques.

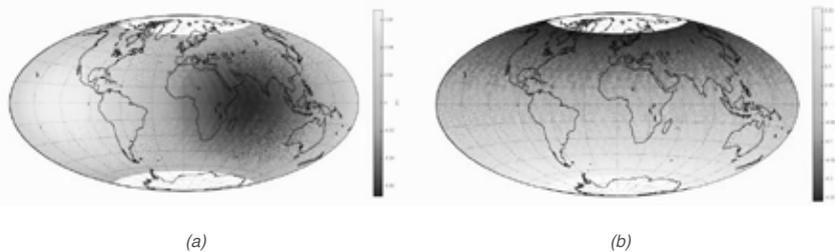


Figure 3. Exemple de signature géographique des termes  $C_{3,1}$  (a) et  $C_{3,0}$  (b) sur l'orbite de Jason-2

La Figure 4 illustre deux signatures géographiques bien différentes, la première (a) est la même pour tous les coefficients d'ordre 1 ( $C/S_{l,m}$  avec  $m=1$ ), elle marque une différence Est-Ouest, alors que la deuxième (b) marque une différence Nord-Sud, qui est typique des coefficients zonaux impairs ( $C_{l,0}$  avec  $l$  impair).

Dans ce contexte, il faut pouvoir définir proprement l'incertitude et la précision des coefficients géodynamiques d'un modèle donné ou d'une famille de modèles. C'est le point le plus délicat, sur lequel nous avons travaillé. Car l'idée est d'étalonner la méthode analytique par rapport à des études numériques publiées où les auteurs manipulent plusieurs scénarii de modèles et comparent ensuite les orbites ajustées dans chaque cas. Pour une estimation raisonnable de l'incertitude (intrinsèque ou par comparaisons) sur les coefficients d'un modèle de champ de gravité, la méthode doit donc produire une erreur d'orbite tout aussi raisonnable et donc comparable (en spatio-temporel) à celle produite par les analystes à un facteur près, son étalonnage. Nous avons testé la sensibilité de la composante radiale des orbites à trois origines différentes d'incertitude de modèle : l'erreur du modèle telle qu'elle est publiée dans le modèle (variance des coefficients à un facteur d'échelle près), les différences entre deux modèles proches, et finalement les différences engendrées par la manière de modéliser les variations temporelles du champ de gravité (voir Tableau 1). Dans les trois cas nous obtenons des valeurs de l'erreur d'orbite radiale des satellites SARAL/AltiKa et Jason-2 tout à fait réalistes et nous en donnons les cartes en terme d'erreurs moyennes géographiquement corrélées. Ces dernières sont tout aussi réalistes mais plus difficiles à comparer aux résultats numériques, dû à l'extrême complexité et richesse de ces derniers. Leurs valeurs représentent en effet la « somme » de nombre de sources d'erreurs possibles au delà de la seule erreur de modèle de champ de gravité.

## Exploitation de bases de données géomatiques globales, régionales et locales pour le développement d'un outil d'extraction de cibles « simples » à partir d'imagerie satellitaire haute résolution; application aux surfaces en eau

PFE présenté par : **Mélanie Velten**  
Société d'accueil : **Laboratoire ICube**  
**SERTIT**  
Directrice de PFE : **Nadine Tholey**  
Correcteur : **Emmanuel Alby**



### 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'arrivée de la constellation européenne Sentinel, flotte unique au monde de 6 familles de satellites, ouvre des perspectives importantes pour des outils opérationnels de suivi des territoires. En effet, le système offre une diffusion rapide et systématique d'images gratuites avec une fréquence de mise à jour élevée. Leur exploitation pose néanmoins de nombreux défis de mise en œuvre : capacité à extraire les informations utiles, gestion de volumes importants, mise à jour automatique des produits, caractérisation fine des évolutions sur de grands territoires, etc.

Afin de se préparer à l'arrivée de ce flot de données, le SERTIT (SErvice Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) met en place des outils permettant de traiter automatiquement ces images. C'est notamment dans l'axe lié à la thématique « eau » que s'inscrit le travail effectué pendant ce PFE, qui a consisté à exploiter les bases de données géographiques existantes pour le développement d'un outil d'extraction des surfaces en eau. Un tel outil permet d'optimiser les processus dédiés à la cartographie rapide des inondations, une des spécialités du Service, mais également de contribuer au suivi des surfaces en eau.

Afin d'atteindre ces objectifs d'automatisation, un projet de R&T (Recherche et Technologie) appliqué à l'extraction des surfaces en eau a été initié par le CNES (Centre National d'Études Spatiales), et est conduit par le SERTIT. Ce projet a pour but de créer une chaîne de traitement d'images, développée notamment sous Orfeo ToolBox, une bibliothèque, libre d'accès, d'outils de traitement d'images. Le but est de générer *in fine* à la volée des plans d'information « surfaces en eau » à partir de données satellitaires Sentinel-1 et 2.

L'approche pressentie pour cette automatisation de la composante optique (satellites Sentinel-2), est une classification par SVM (Support Vector Machine). Cependant, cette approche requiert que l'on fournisse en entrée de l'algorithme des échantillons des cibles recherchées (eau, et autres classes telles que l'urbain, la végétation, etc.). En effet, l'algorithme consiste à séparer l'espace des paramètres de mesure selon un hyperplan et de maximiser la distance (marge) entre l'hyperplan et ces échantillons. En l'état actuel des connaissances, cette sélection d'échantillons se fait encore de façon manuelle. Il s'agit donc d'une étape importante à automatiser. Le but de ce stage est notamment de mettre en œuvre une méthodologie de sélection d'échantillons correspondant aux surfaces en eau à partir de bases de données exogènes existantes.

L'étape préliminaire consiste donc à répertorier et évaluer les bases de données (vecteur et raster) pertinentes pour l'étude, et décrivant les thématiques liées à l'hydrographie aux échelles mondiale, régionale/continentale et locale.

La seconde étape est de mettre en place une méthodologie d'exploitation de ces bases de données : sélection d'échantillons en eau, préparation et mise en forme des échantillons. Ensuite, ces échantillons serviront de données en entrée d'une chaîne automatisée de traitement d'images. Le but de cette étude est de déterminer si une telle méthode est exploitable sur tout type de paysage et quels sont les résultats qu'elle permet d'atteindre.

## 2. Revue et qualification des bases de données en eau

Les échantillons en eau devant être créés à partir d'informations existantes, un recensement et une qualification des bases de données géographiques existantes, relatives à l'eau, ont été effectués.

En tout, ce sont plus d'une quarantaine de bases de données qui ont été cataloguées et comparées. Pour chaque base de données, une fiche descriptive a été renseignée. Celle-ci comprend des rubriques comme la source (URL), les thématiques, la couverture géographique, la résolution spatiale, les nomenclatures liées aux cibles, la fréquence de mise à jour, la distribution des données, leur format, un aperçu, les utilisateurs, la qualité et l'approvisionnement.

Puis, afin de déterminer quelle est la base de données la plus apte à fournir des échantillons en eau, une évaluation chiffrée des bases de données est effectuée selon 5 critères : sa couverture géographique, la fiabilité du producteur, l'ancienneté des données et la qualification des bases de données sur les deux sites tests : l'Alsace et le lac Poyang en Chine. Ces deux régions ont été sélectionnées parce qu'elles font l'objet depuis de nombreuses années d'un suivi par le SERTIT, et qu'elles présentent de grandes disparités, tant par la variabilité que par la quantité des surfaces en eau présentes.

Ainsi, sur l'Alsace, les données en eau de chaque base de données ont été extraites et comparées à la BdOCS CIGAL, faisant office de base de données de référence pour la région (Figure 1).

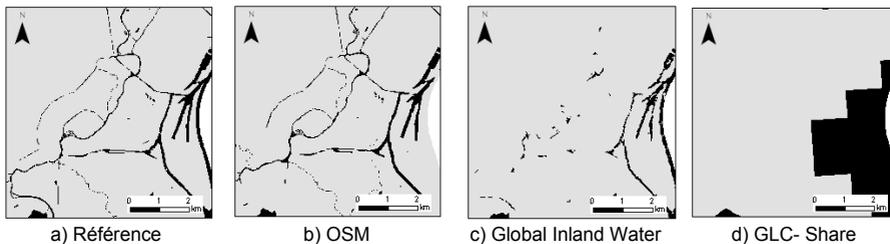


Figure 1 : Exemples de bases de données

Comme on peut le voir sur la figure 1, la représentation des surfaces en eau varie énormément d'une base de données à l'autre. Un classement des bases de données sur cette zone a été effectué en combinant les taux de justesse et de détection.

L'autre zone d'étude, le lac Poyang, ne disposant pas de base de données officielle, et sa dynamique étant telle qu'une comparaison à une unique base de données ne s'avère pas toujours pertinente, les bases de données ont alors été classées selon une analyse visuelle.

En combinant les différents critères, il ressort de cette étude que la base de données Global Inland Water se prête le mieux au guidage d'une classification supervisée.

## 3. Sélection des échantillons

Le jeu d'échantillons pour l'entraînement du processus de classification comporte deux classes : « eau » et « autre ». Les échantillons « eau » proviennent de la base de données Global Inland Water et leur processus de sélection comprend les quatre étapes suivantes (Figure 2) :

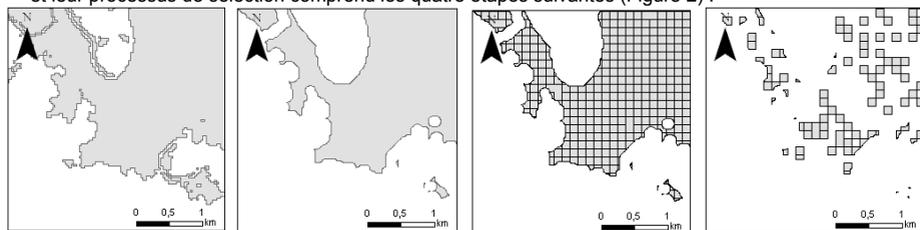


Figure 2 : Processus de sélection des échantillons

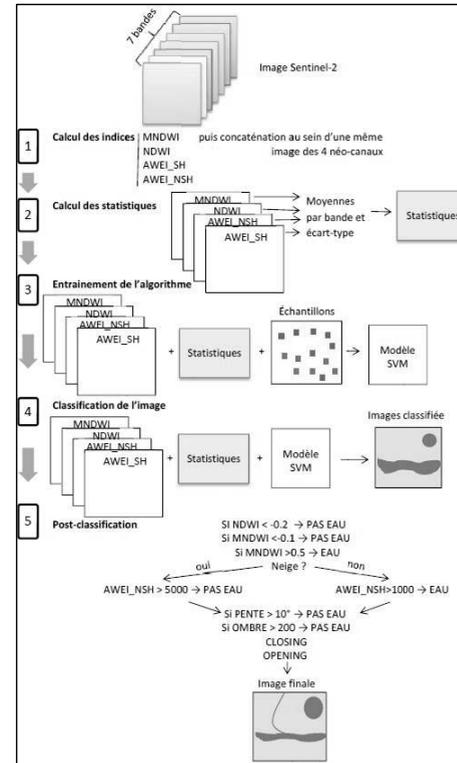
La création des échantillons de la classe « autre » suit le même principe sauf que dans ce cas-là, le travail se fait sur des zones ne comportant pas de données en eau.

Cette méthode a l'avantage de permettre à l'utilisateur de faire varier le nombre d'échantillons de chaque classe et d'être globale, du fait de la couverture géographique mondiale de la base de données fournissant les échantillons.

## 4. Processus de traitement

### a. Chaîne de traitement

La chaîne de traitement mise en place fait appel à la bibliothèque de traitement d'images satellitaires du CNES, l'Orfeo ToolBox (OTB). Celle-ci est exécutable depuis la fenêtre de commande Windows par l'intermédiaire d'un script en langage Batch.



La classification s'effectue sur quatre néo-canaux issus de l'image à traiter, à savoir, les indices NDWI, MNDWI, AWEI shadow et AWEI no-shadow.

Ces 4 indices ont pour but de contraster les surfaces en eau en combinant les canaux initiaux de l'image Sentinel-2.

Ces quatre néo-canaux couplés au jeu d'échantillons permettent l'entraînement de l'algorithme de classification par SVM.

En sortie de processus, on obtient une image binaire comportant les classes « eau » et « autre ».

Ce résultat peut être amélioré par des traitements ultérieurs, tels que des seuils de vérification sur les indices et des corrections topographiques et morphologiques.

Ces corrections permettent de diminuer la confusion qu'il peut y avoir entre l'eau et les zones ombragées, ou encore d'éliminer les pixels isolés.

### b. Jeux de données

L'algorithme est testé sur deux sites d'études :

#### Alsace

Les jeux d'échantillons ainsi que la chaîne de traitement ont été mis en œuvre sur des images Sentinel-2. Le jeu de données se compose de trois images de l'Alsace acquises en août 2015, janvier et mai 2016. Les images présentent des différences de développement de la végétation et de conditions d'éclairage, d'enneigement et de couverture nuageuse dues aux différentes dates d'acquisition (variations saisonnières). Il est intéressant de voir si de mêmes échantillons permettent de classer ces images acquises à des saisons différentes ou si, en fonction de la saison, la sélection d'échantillons doit varier et s'adapter afin d'obtenir à une même qualité de classification.

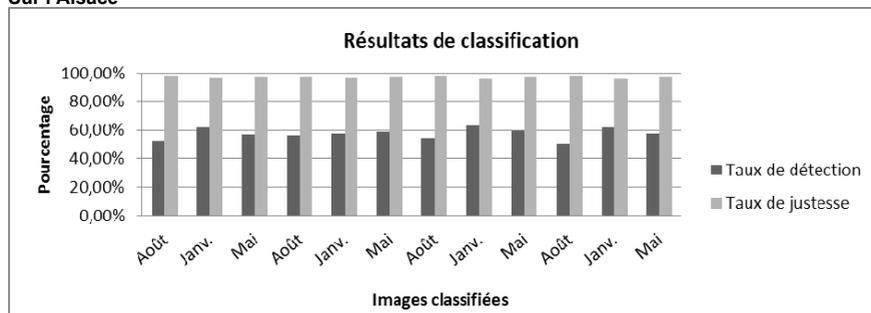
## Lacs Baidang et Poyang

De par sa localisation subtropicale, le lac Poyang est sujet à des alternances de périodes de moussons (mai-août) et de périodes sèches (novembre-avril). De ce fait, la superficie des eaux subit de très fortes fluctuations inter et intra-annuelle, variant de moins de 1 000 km<sup>2</sup> en saison sèche à plus de 3 500 km<sup>2</sup> en période humide.

Les tests sur la région du Poyang ont d'abord été menés sur deux images du lac Baidang. Celui-ci a des caractéristiques proches du lac Poyang mais sa superficie est beaucoup moins vaste et permet de tester les méthodes sur une zone réduite. Par après, un passage à l'échelle sur le lac Poyang a été effectué.

### c. Résultats

#### Sur l'Alsace



En générant plusieurs fois des jeux d'échantillons comportant le même nombre d'individus, on remarque que les résultats obtenus sont stables d'une image à l'autre, mais également d'un jeu d'échantillons à l'autre. Ainsi, sur un territoire où les surfaces en eau sont relativement stables au fil de l'année, la méthode employée s'avère efficace.

## Lac Baidang et Poyang

En raison de leur forte dynamique hydrologique, les lacs Baidang et Poyang constituent des cibles plus complexes. En effet, d'une image à l'autre les corps en eau évoluent considérablement. Les surfaces en eau contenues dans la base de données Global Inland Water étant fixes, les échantillons ne représentent en réalité pas toujours l'eau présente dans l'image. Ainsi, certains jeux d'échantillons permettent d'atteindre des taux de détection et de justesse allant jusqu'à respectivement 95% et 97%. Cependant, la méthode de sélection aléatoire des échantillons ne permet pas d'obtenir des résultats stables sur cette zone. En effet, un même jeu d'échantillons, ne donnera pas des résultats identiques sur deux images de la même zone en fonction de la saison.

### 5. Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de dresser un état des lieux des bases de données existantes recensant les surfaces en eau. La qualification de celles-ci sur deux sites extrêmement différents a permis de mettre en évidence quelles bases de données sont les plus adaptées à la prise d'échantillons « eau ».

L'automatisation de la création de jeu d'échantillons permet d'avoir une chaîne de traitement où l'intervention de l'opérateur est minime, mais aussi d'accélérer le processus de création de cartes des surfaces en eau. La méthode s'avère être efficace sur des paysages où les surfaces en eau subissent peu de changements au cours de l'année. En revanche, pour des zones plus complexes telles que celle du lac Poyang, la méthode est plus limitée. Pour tenter de remédier à ce problème, il serait intéressant d'adapter le choix de la base de données fournissant les échantillons en eau à la saison de l'année (saison des pluies vs. saison sèche).

Enfin, pour améliorer le processus, il est envisageable d'ajouter dans la chaîne de traitement des résultats d'autres R&T CNES concernant la détection automatique de la neige ou des nuages (sources de confusion avec les surfaces en eau) afin de les éliminer automatiquement.

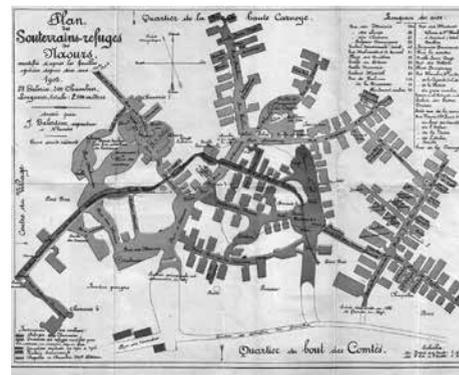
## Numérisation 3D dans le souterrain de Naours et intégration des données 3D de la base de données Graffiti



PFE présenté par : **Maxime Balland**  
Société d'accueil : **C.C. de Bocage-Hallue / Laboratoire ICube**  
Directeur de PFE : **Mathieu Beuvin**  
Correcteurs : **Pierre Grussenmeyer, Mathieu Koehl**

### 1. Contexte de l'étude

Un récent partenariat entre l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP) et l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSA) mis en place autour de la numérisation de la carrière Saingt de Fleury-sur-Orne a permis la naissance d'un projet similaire dans les souterrains de Naours. La cité souterraine de ce village picard se constitue d'un réseau de plusieurs kilomètres de galeries percées aux XV<sup>ème</sup> et XVI<sup>ème</sup> siècles. La première utilité du lieu fut l'extraction de la roche calcaire, ensuite les souterrains servirent de refuge aux villageois et de cache pour leurs récoltes. Les « mûches » ou « cachettes » en picard, oubliées durant de longues années suite à l'éboulement de l'entrée principale, furent l'objet de fouilles archéologiques initiées par l'Abbé Ernest Danicourt à la redécouverte du site en 1887. C'est au cours de ces travaux que le topographe Balesdens dresse l'unique plan topographique des souterrains.



Plan topographique de Balesdens, 1905

La sécurisation des souterrains suite aux premières fouilles archéologiques autorisa son ouverture au public. C'est au cours de la Grande Guerre que le site prit une plus grande dimension historique à travers les milliers d'inscriptions laissées par les soldats venus visiter les galeries lors de leurs permissions. Ces graffiti provenant en majorité de soldats britanniques et australiens venus combattre lors de la bataille de la Somme (1916) font aujourd'hui l'objet d'un inventaire et de recherches auprès des archives militaires. Afin de contribuer à l'étude archéologique et de valoriser le site touristique, la Communauté de Communes de Bocage-Hallue et la Cité Souterraine de Naours ont fait appel à l'INSA de Strasbourg.

### 2. Objectifs du projet

Les travaux de déblai et remblai cumulés aux éboulements occasionnels ont considérablement modifié la topographie des souterrains. La technologie du scanner laser terrestre employée pour la numérisation 3D doit permettre dans un premier temps de mettre à jour le plan topographique de 1905 mais aussi de représenter l'intégralité des souterrains à l'aide d'un modèle numérique. La réalisation de relevés du terrain environnant et le géoréférencement des données devraient nous permettre également de resituer le dédale de galeries par rapport au village et aux habitations voisines. Nous pouvons résumer ce premier objectif sous le terme « numérisation de la volumétrie des souterrains ».

La deuxième mission de ce projet s'intéresse à la production d'outils numériques pour l'avancée de l'étude archéologique des graffiti (Prilaux, 2016). L'emploi de la photogrammétrie

terrestre pour la production de modèles 3D texturés et d'orthophotos doit permettre, contrairement à une photographie unique centrée sur le graffiti, de resituer celui-ci dans son contexte. Une base de données est en cours de réalisation. Le géoréférencement des données numériques permettra de compléter cette base avec un positionnement centimétrique des inscriptions numérisées. Les images acquises, complétées des données de la volumétrie serviront de support pour la réalisation d'une visite virtuelle sous forme d'animation.

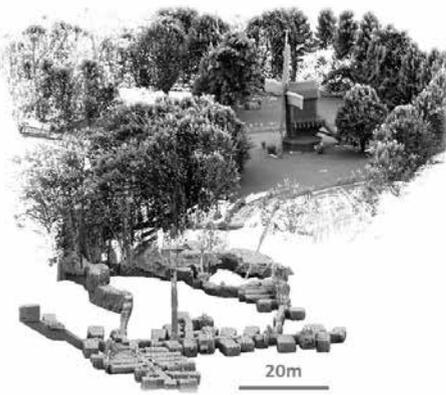
Un dernier point de ce projet porte sur le développement d'une solution open source permettant l'intégration de données 3D dans le logiciel de Système d'Information Géographique QGIS. Cette partie du projet est effectuée en collaboration avec Arnaud Breitwieser, également étudiant en PFE. Il s'agit plus concrètement d'implémenter en code Python un plugin QGIS permettant d'alimenter une base de données à partir de données de numérisation 3D et de proposer une interface graphique pour la visualisation. Dans l'idéal, les données pourront être éditées et interrogées via des requêtes SQL.

### 3. Campagne de numérisation in situ

Ce projet de fin d'études poursuit les travaux menés avec Joseph Guilleroy dans le cadre de notre projet de recherches technologiques effectué entre octobre et décembre 2015. Une première campagne d'acquisition nous avait alors permis de mettre en place un réseau de points de références pour le géoréférencement des données de numérisation. Des acquisitions par lasergrammétrie furent effectuées à partir de l'entrée des touristes et suivant le sens de la visite. Des zones de photogrammétrie ont été définies suivant un ordre de priorité proportionnel à la densité de graffiti. Deux missions d'acquisitions, effectués en mars et mai 2016, ont finalement permis de couvrir près de la moitié des souterrains.

D'un point de vue plus technique, l'emploi du scanner laser terrestre Faro Focus 3D nous a permis d'acquérir des nuages de points d'une densité moyenne d'un point tous les millimètres mais aussi des images panoramiques permettant de coloriser ces nuages. Des sphères de référence furent placées dans les scènes numérisées avec un minimum de trois sphères homologues entre stations de façon à assurer la consolidation des nuages de points. De plus, la tachéométrie a permis le géoréférencement des données par relevé de tous les éléments de référence (sphères et cibles planes). La topographie particulière et la pénombre des milieux cavernicoles a nécessité l'emploi d'une lumière artificielle diffuse et d'un plateau d'attache pour placer le scanner laser à même le sol. Ainsi, le point sensible du projet fut la numérisation d'un conduit de cheminée particulièrement étroit. Les trois campagnes de numérisation comptabilisent près de 130 nuages de points d'un poids moyen de 2Go.

La sauvegarde des graffiti par photogrammétrie s'est effectuée au coup par coup sur un total d'une vingtaine de parois. La superficie de ces parois varie de un à deux mètres carrés à plusieurs dizaines pour la plus grande : la Chapelle. Compte tenu de la luminosité très faible, nous avons effectué les photographies en employant un flash annulaire. Ce dispositif offre en effet une lumière artificielle plus diffuse qu'un flash traditionnel. La quantité des données à traiter a orienté notre choix de logiciel de traitement vers Agisoft Photoscan. Il s'agit d'une solution ergonomique et rapide pour la production massive de modèles photogrammétriques. L'algorithme de détection des points homologues de Photoscan répond particulièrement bien à l'emploi d'un objectif fixe de 40mm, c'est pourquoi nous avons principalement utilisé les Canon EOS 5D, 5DSR et 6D équipés de cette focale. Quelques jeux de photos ont cependant été réalisés avec un objectif fixe de 20mm. Les trois campagnes de numérisation ont permis d'acquérir en somme plus de 3000 photographies à haute résolution, c'est-à-dire avec une taille de pixel objet proche du dixième de millimètre.



Zone totale numérisée, Nuage de points PCV

### 4. Modélisation 3D des souterrains

La multiplication des stations effectuées au scanner et la densité élevée des nuages de points acquis (résolution moyenne de 6mm à 10m) posent un problème de poids des fichiers numériques. Bien que nous disposions de stations de travail très performantes, une modélisation totale des souterrains à partir des fichiers bruts n'est en effet pas envisageable. Un rééchantillonnage spatial uniforme fixé à 3cm permet d'alléger l'ensemble des nuages de points acquis. L'assemblage des données rééchantillonnées permet d'obtenir un unique nuage de points d'environ 6 millions d'unités constituant le support de la modélisation.

Deux logiciels ont été exclusivement employés pour la représentation de la volumétrie : CloudCompare et 3DReshaper. Le premier offre l'avantage d'être une solution open source et propose un outil de reconstruction de surface de Poisson adapté aux surfaces closes telles que les mûches de Naours. Dans l'optique d'un meilleur contrôle qualitatif, chaque pièce ou couloir est maillé indépendamment des autres puis fusionné les uns aux autres grâce aux fonctions d'édition ergonomiques proposées par 3DReshaper (fusion, soudure...). Ce dernier est également employé pour les maillages des surfaces bruitées. L'outil de maillage en plusieurs étapes permet en effet de paramétrer les caractéristiques des points à prendre en compte dans la reconstruction de la surface. L'étude qualitative comparative entre les maillages issus de CloudCompare et 3DReshaper ne permet pas de mettre en avant l'une ou l'autre solution, elles sont totalement complémentaires.

Au cours de ce projet, une méthodologie utilisant les images prises par le scanner laser FaroFocus3D au cours des acquisitions a été mise en place pour texturer la volumétrie. Le logiciel de



Modèle numérique texturé - Salle du Congrès - mur n°2002.43

traitement Scene reconstruit en effet des vues planaires à partir des images prises par le scanner. Ces vues planaires s'apparentent à des photographies sphériques qu'il est possible de projeter à partir du module de texturage de 3DReshaper. Si les premières images ont été orientées à l'aide de points de calage, les rendus ont prouvé qu'il était nécessaire d'utiliser les paramètres de position et d'orientation de la station scanner pour un meilleur ajustement des textures. Ces paramètres exportés depuis Scene sont stockés dans des fichiers réutilisables au format excam, ce qui permet d'accélérer les traitements et d'obtenir finalement un rendu très réaliste.

22 parois dont 2 mûches entières ont fait l'objet de relevés photogrammétriques. Les modèles 3D exportés depuis Agisoft Photoscan permettent une auscultation à distance des parois dans le cadre de la recherche archéologique portant sur les graffiti. Deux supports ont été retenus : le PDF 3D allégé dans le cas de parois à géométrie simple (murs en moellons) et le format standard ".obj" complété avec le fichier de définition des textures ".mtl" pour les géométries plus complexes. L'intégration de ces modèles riches en détails au sein de la volumétrie texturée a permis de réaliser une visite virtuelle réaliste sous la forme d'une animation. Cette vidéo de 5 minutes propose un aperçu intérieur et extérieur de la Cité Souterraine et offre des points de vue inédits comme le passage dans un conduit de cheminée étroit. Une clôture sur quelques graffiti de la Grande Guerre rappelle la dimension historique du site et attire la curiosité du public.

### 5. Implémentation en Python d'un visualiseur de données 3D utilisant OpenGL

En parallèle du projet de Naours, un second partenariat avec l'INRAP a permis la réalisation du PFE d'Arnaud Breitwieser portant sur la numérisation de la carrière Saingt de Fleury-sur-Orne. Des objectifs similaires concernant l'intégration de données 3D de numérisation dans le logiciel de SIG libre QGIS ont été identifiés. Une collaboration a permis d'accélérer le travail en le divisant suivant deux axes majeurs : l'intégration des données 3D dans une base de données SpatiaLite en

reprenant le format standard DXF et l'affichage de ces données depuis la console python de QGis. Ce mémoire traite principalement de la seconde partie.

L'utilisation d'un premier programme mêlant le langage Python au langage de requête SQL permet l'intégration de données 3D en temps qu'attributs dans une table de géométrie. A ce stade, il est possible d'afficher les données dans QGis suivant une projection dans le plan et d'effectuer des requêtes spatiales 2D. Un second programme s'inspire des travaux de recherches technologiques de Murtiyoso A. et Palha A. (2016) autour d'un visualiseur de type FPS pour l'affichage de données 3D en employant OpenGL. Cette bibliothèque disponible sur chaque ordinateur permet la représentation de scènes tridimensionnelles à partir de simples entités géométriques. Le script combinant le langage Python et les fonctions Pygame d'OpenGL, couramment employées pour la programmation de jeux vidéo, permet ainsi l'affichage de couches vectorielles depuis la console du logiciel de SIG.

L'emploi des « Vertex Buffer Object » qui constituent une mémoire tampon dans la carte graphique du poste de travail permet de soulager le processeur et optimise la vitesse d'affichage. La ressource de calcul disponible permet alors un affichage de données plus performant, en termes d'entités chargées (plusieurs millions de faces par maillage), ou en termes de rendus graphiques (couleurs, effets de lumière). L'utilisation des événements du clavier et de la souris rend la navigation plus interactive et permet d'obtenir un point de vue plus réaliste.

## 6. Conclusions et perspectives

Le projet de fin d'études enchaîné à la suite du projet de recherches technologiques a permis la couverture numérique de près de la moitié des souterrains de Naours. De nombreux modèles 3D et orthophotos facilitent d'ores et déjà l'étude archéologique du site et de ses graffiti. Les résultats des quelques mois de travail ont satisfait nos partenaires et justifient l'investissement fait par les différents acteurs. Nous espérons voir le projet se conclure dans le cadre de prochains PRT et PFE.

La méthode développée pour la colorisation de la volumétrie nous a permis de produire un modèle numérique réaliste valorisant le site aux yeux du grand public à travers une animation disponible en ligne sur le site officiel de la Cité Souterraine de Naours. Cette technique sera certainement réemployée et affinée lors des prochains projets de numérisations de l'INSA.

L'aspect recherche centré sur le développement d'un plugin pour l'intégration de données 3D dans QGis propose des perspectives optimistes. Nous sommes en effet parvenus à intégrer des données tridimensionnelles dans une base de données et à les afficher via QGis. Si les premiers tests se sont avérés chronophages, l'optimisation des scripts rend désormais possible l'affichage d'un grand nombre de données. Plusieurs axes de développement sont à prévoir : d'une part la représentation de détails graphiques comme la texture de maillage et d'autre part l'affichage interactif d'informations lors de la navigation dans la fenêtre OpenGL.

En conclusion, ce projet initie un processus de développement autour de la modélisation 3D et de la gestion des données de numérisation via le logiciel QGis. Nous espérons voir ces problématiques évoluer à travers les prochains projets étudiants.

### Référence :

PALHA, A., MURTIYOSO, A., MICHELIN, C., ALBY, E., GRUSSENMEYER, P. (2016). Open Source First Person View 3D point cloud visualizer for large data sets. GIS Ostrava March 16-18, The Rise of Big Spatial Data. To be published in the Proceedings as a part of Lecture Notes in Geoinformation and Cartography Series (Springer).

PRILAUX, G. (2016). Sondage archéologique préalable (avant demande d'intervention pluriannuelle) dans les souterrains aménagés de Naours. Les traces de la Grande Guerre. Vol. I et II. Picardie, Somme, Commune de Naours.

Cité Souterraine de Naours. (2016). Modélisation 3D de la cité souterraine de Naours. Page officielle Viméo. Disponible à <https://vimeo.com/169669941> (dernier accès le 05.07.2016)

## Imagerie 3D de la carrière Saingt de Fleury sur Orne et intégration de données 3D dans QGIS

PFE présenté par : **Arnaud Breitwieser**  
Société d'accueil : **INRAP**  
**Laboratoire ICUBE,**  
**INSA de Strasbourg**  
Directeur de PFE : **M. Cyril Marcigny**  
Correcteurs : **M. Mathieu Koehl**  
**M. Pierre Grussenmeyer**



### 1. Contexte et objectifs de l'étude

Ce PFE a été réalisé au sein du laboratoire ICUBE de l'INSA de Strasbourg. Ce projet s'est effectué en collaboration avec les archéologues de l'INRAP (Institut National de Recherches Archéologiques Préventives).

La Carrière Saingt se situe à Fleury sur Orne à quelques kilomètres au sud de Caen. Elle a été exploitée au XIX<sup>e</sup> siècle pour en extraire de la pierre à bâtir (Pierre de Caen), elle a ensuite été utilisée pour entreposer le stock de la brasserie Saingt dont la carrière a tiré son nom. C'est entre juin et juillet 1944 qu'elle a pris toute son importance historique. En effet, au cours de ces deux mois, de nombreux civils (plus de 1000 à certaines périodes) sont venus s'y abriter en raison des bombardements à répétitions dirigés sur Caen. Par la suite, la carrière a été condamnée par ses propriétaires et ce jusqu'à sa redécouverte en 2014 par des archéologues. Cette fermeture a notamment permis une très bonne conservation des vestiges. Sur le plan archéologique, l'objectif principal de l'étude de cette carrière est de mettre en valeur un phénomène lié à un conflit mondial : l'impact de la guerre sur les populations civiles.

Les archéologues ont donc fait appel au laboratoire ICUBE de l'INSA de Strasbourg afin de disposer de données géométriques précises et exhaustives sur la volumétrie du site. La carrière a fait l'objet de relevés 3D combinant la lasergrammétrie et la photogrammétrie lors des missions d'avril 2015 et 2016.

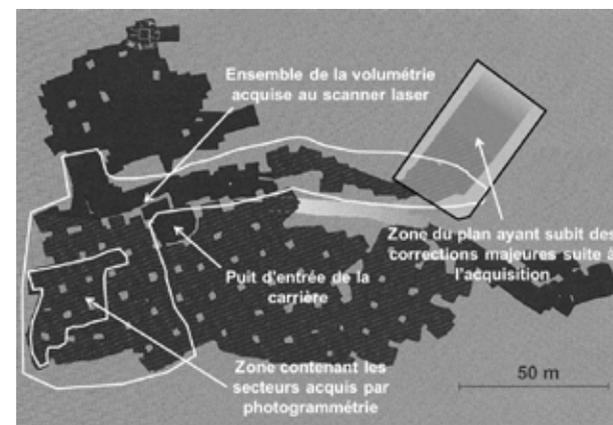


Figure 1. Aperçu (sur fond d'ancien plan) des zones de la carrière ayant fait l'objet de levés numériques 3D.

Le PFE devait remplir les objectifs suivants :

- Augmenter la portion de volumétrie déjà acquise par scanner laser lors de la mission d'avril 2015 (voir Figure 1).
- Acquérir de nouveaux secteurs d'intérêt par photogrammétrie (voir Figure 1).
- Produire des rendus 2D à partir des données 3D acquises (plan topographique, plans de coupes et courbes de niveaux)
- Production d'une vidéo de présentation de la carrière à l'aide des modèles 3D obtenus par lasergrammétrie et photogrammétrie.
- Développer l'implantation de données 3D dans QGIS.

## 2. La phase de levé terrain.

La phase de levé s'est effectuée sur une période de 3 jours dans la semaine du 18 au 22 avril 2016. Elle s'est décomposée en 3 opérations distinctes.

### 2.1 L'extension du réseau polygonal mis en place par les archéologues

Le réseau polygonal initial ne permettait pas de couvrir la nouvelle portion de la volumétrie acquise par scanner laser, il a donc été étendu. Ce réseau se trouvant dans un système de coordonnées indépendant propre à la carrière, le recalage s'est effectué sur les points du réseau existant retrouvés lors du levé. Les points pris en compte pour le recalage se situent dans le béton à l'entrée de la carrière (voir Figure 1). Le reste des points étant situés dans les sols boueux de la carrière, et donc très meubles, ont quant à eux été recalculés et utilisés comme points de contrôles. Les écarts observés entre les points acquis en 2015 et leurs homologues acquis en 2016 sont de l'ordre de 2 cm et sont donc tout à fait acceptables. Les stations mises en place ont par la suite servi au levé des sphères et des cibles photogrammétriques par tachéométrie.

### 2.2 L'acquisition d'une nouvelle portion de la volumétrie par lasergrammétrie

L'acquisition par scanner laser (FARO Focus 3D) de cette année a tout d'abord permis de compléter l'acquisition de 2015 au niveau de la grande salle et de poursuivre le levé de la volumétrie au niveau du couloir jusqu'au bassin d'eau stagnante matérialisant la fin de ce secteur (voir Figure 2). Le levé laser a été effectué à l'aide de sphères et de damiers pour effectuer le géoréférencement et la consolidation des nuages de points acquis. Des écarts entre les données laser des deux années ont également été observés, ils sont de l'ordre de 2 cm en moyenne tout comme l'étaient les écarts observés par tachéométrie et sont donc tout à fait cohérents.

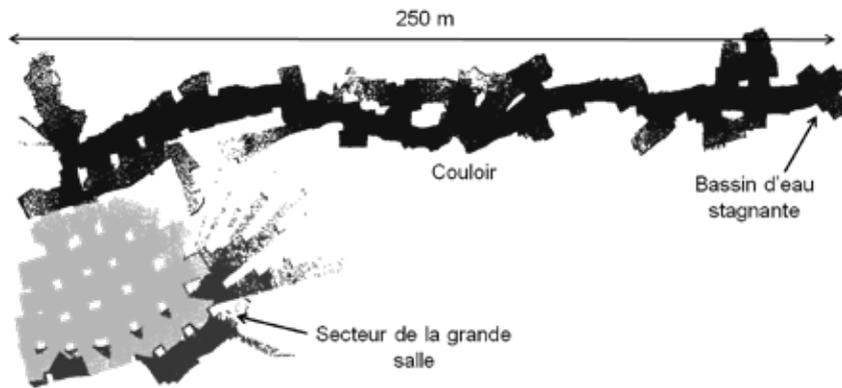


Figure 2. Aperçu des zones numérisées au scanner laser avec : les zones acquises en avril 2016 (en noir) et la zone acquise en avril 2015 (en gris).

## 2.3 Le levé par photogrammétrie

Cette année, 7 nouveaux secteurs ont été acquis par photogrammétrie, venant s'ajouter aux 4 secteurs de 2015 pour un total de plus de 2000 photographies. Les prises de vue ont été réalisées dans des conditions semblables à celles d'une campagne aérienne, à une hauteur de 1m70, un recouvrement transversal de 70% et longitudinal de 30%. Un deuxième passage dans une configuration perpendiculaire à la première série de prises de vues a également été effectué et certaines photos obliques ont également été prises. Cette configuration a permis un recouvrement total sur les zones acquises ainsi que des traitements facilités. Les secteurs de 2016 ont été acquis avec la présence de cibles photogrammétriques pour un recalage plus simple et plus précis.

## 3. Le traitement des données et la production de rendus

### 3.1 Les traitements photogrammétriques

L'ensemble des traitements a été effectué sur le logiciel Photoscan (1.2.4), de l'alignement des photos jusqu'à la production des orthophotos. Les photomodèles ont été géoréférencés grâce aux cibles à code barre circulaire, l'erreur moyenne de recalage observée est de l'ordre de 2 mm pour l'ensemble des secteurs. Les écarts entre les données photogrammétriques et lasergrammétriques ont également été calculés par comparaison nuage maillage sur le logiciel CloudCompare (2.6.3), les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 1 :

Secteur	E	F	G	H	I	J	K
<b>Ecart moyen (mm)</b>	6	5	3	3	5	5	6
<b>Ecart type (mm)</b>	11	12	14	16	14	13	13

Tableau 1. Récapitulatif des écarts entre les données photogrammétriques (nuage de points) et lasergrammétriques (maillage) sur l'ensemble des secteurs acquis par photogrammétrie.

Les faibles écarts entre les deux types de données se justifient par le fait qu'elles ont été recalées par la même méthode, à savoir la tachéométrie. Les écarts types observés de l'ordre du centimètre attestent quant à eux d'une bonne homogénéité des données obtenues par photogrammétrie.

### 3.2 Les traitements lasergrammétriques

Les données ont tout d'abord été consolidées et ont fait l'objet d'un géoréférencement indirect grâce aux cibles et aux damiers sur le logiciel FARO Scene (6.0). Les nuages ont ensuite été nettoyés sous 3DReshaper (2015 MR1) et ré-échantillonnés à différents pas pour la suite des traitements.

### 3.3 Production de rendus 2D

Le plan topographique a été réalisé grâce à deux maillages : un MNT obtenu grâce au logiciel Lastools pour la production des courbes de niveau et un maillage de la volumétrie pour obtenir les contours de la carrière par des coupes horizontales à altitudes variables. Dans un second temps des plans de courbes de niveaux ont été produits sur les secteurs photo. Enfin des plans de coupes verticales ont été produits, pour cela les modèles 3D obtenus par photogrammétrie ont été soudés au maillage de la volumétrie afin d'obtenir un niveau de détails au sol plus élevé. Les coupes et les courbes de niveaux ont été obtenues sur 3DReshaper (2015 MR1), les maillages ont été obtenus avec l'algorithme de maillage Poisson de CloudCompare, enfin les plans ont été dessinés et mis en page sous AutoCad/Covadis (2015).

### 3.4 Vidéo de présentation

Une vidéo de présentation de la carrière a été produite. Les photomodèles ont fait l'objet de traitements particuliers afin d'augmenter leur luminosité et de diminuer l'espace mémoire qu'ils occupent. Ils ont ensuite été intégrés dans le modèle laser en procédant à des découpes dans ce dernier. Cette découpe a été la principale difficulté mais elle a été rendue nécessaire pour deux raisons : les modèles laser et photo ne pouvaient pas être soudés l'un à l'autre sous peine de perdre les textures et un mauvais découpage aurait induit des scintillements ou des zones de vide affectant la qualité de la vidéo. Cette découpe a fait intervenir 3 logiciels différents (Geomagic 2012, 3DReshaper et CloudCompare). La vidéo a ensuite été produite grâce à un chemin de caméra matérialisé par une polygone 3D sous 3DReshaper.

#### 4. Intégration de données 3D dans QGIS

QGIS est un logiciel SIG multiplateforme libre et gratuit permettant la visualisation, l'édition et l'analyse de données, principalement en 2D. Le deuxième objectif de ce PFE est donc d'inventorier les principales problématiques de l'intégration de données 3D dans ce logiciel et de commencer le développement de solutions. Cette partie du PFE a été réalisée en collaboration avec Maxime Balland un autre étudiant en PFE au laboratoire ICUBE de l'INSA.

Les premières problématiques étaient l'intégration des données dans une base de données et leur affichage en 3D. Ce PFE s'est orienté sur la partie base de données et la préparation des données pour leur affichage. L'affichage quant à lui a été traité dans le PFE de Maxime Balland. L'accent a tout d'abord été mis sur le volume de données, en effet le programme développé permet de prendre en compte des maillages à plusieurs millions de faces (équivalent à plusieurs centaines de Mo de données).

L'approche développée pour l'intégration des données est détaillée dans la Figure 3 :

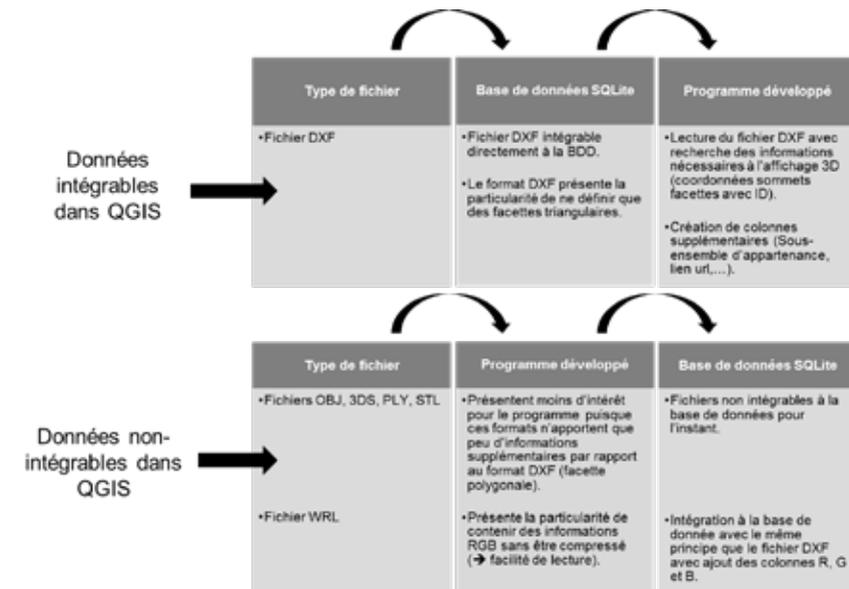


Figure 3. Approche suivie pour l'intégration et la préparation de l'affichage des données 3D

#### 5. Conclusion et perspectives

En conclusion, ce projet aura permis la gestion de données multi-sources à l'échelle d'un site archéologique. Les modèles 3D créés ont servi à la réalisation des rendus scientifiques 2D mais aussi à la production d'une vidéo permettant la visualisation du site dans sa globalité mais aussi à un niveau de détails beaucoup plus fin grâce à l'apport de la photogrammétrie. Ce genre de vidéo représente une perspective d'avenir très importante en matière de conservation du patrimoine.

En ce qui concerne le SIG 3D le projet n'en est qu'à ses débuts, le volume de données intégrables et affichables est prometteur. De nombreuses pistes d'amélioration sont explorables comme par exemple l'intégration de textures, la création d'un lien entre la base de données et l'interface 3D pour permettre la décomposition en sous ensemble ainsi qu'une visualisation simplifiée des attributs. Ce lien avec la base de données pourrait également permettre l'affichage par rapport à certaines caractéristiques comme par exemple la période d'appartenance des artefacts qui est un mode d'affichage très prisé par les archéologues.

## Utilisation des outils de la télédétection très haute résolution pour le suivi de la végétation sur la zone de compensation écologique Ile Falcon

PFE présenté par : **Clément Boutry**  
 Société d'accueil : **IRSTEA Centre de Grenoble**  
 Directeur de PFE : **M. Laurent Borgniet**  
 Correctrice : **Mme Tania Landes**



### 1. Contexte et objectifs de l'étude

L'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) est un Etablissement Public Scientifique et Technologique placé sous la tutelle des Ministères de l'Agriculture et de la Recherche. Il compte plus de 1140 chercheurs, ingénieurs, doctorants et post-doctorants répartis dans 9 centres régionaux. IRSTEA est un leader français et un acteur européen majeur de la recherche environnementale. Il répond aux principaux enjeux économiques concernant : la gestion de la durabilité des territoires, leurs ressources, leurs productions, mais aussi les flux humains, économiques et financiers, la prévision et la prévention des risques naturels et environnementaux ainsi que la préservation de la biodiversité.

Le centre de Grenoble compte 90 permanents et 85 temporaires (doctorants, post-doctorants, CDD et stagiaires) répartis en 3 unités de recherche : ETNA (*Erosion torrentielle, neige et avalanches*), EM (*Ecosystèmes montagnards*) et DTM (*Développement des territoires montagnards*).

Mon stage se situe dans l'unité de recherche EM, elle-même divisée en 3 sections : la première, intitulée « *Dynamiques et gestions des écosystèmes de montagne* », la deuxième, « *Biodiversité dans l'espace et le temps* » et enfin la troisième, « *Protection, ingénierie écologique, restauration* ». C'est au sein de cette dernière que je suis intégré.

Mon projet de fin d'études s'insère dans le projet Romanche-Gavet conventionné avec EDF. Suite à l'installation d'une nouvelle centrale hydroélectrique sur la Romanche, deux sites ont été choisis comme zones de compensation écologique : « Pont de Gavet » un site de 16,75 hectares, en rive droite de la Romanche, et un site de 40 hectares en rive gauche de la Romanche, « Ile Falcon ».

Mon projet concerne exclusivement le site de l'Ile Falcon, avec deux objectifs : d'une part, mettre en place une méthodologie de suivi de la végétation, et d'autre part, participer à la lutte contre les plantes invasives pendant le processus de renaturation du site.

En effet, la capacité de colonisation importante de certaines espèces exotiques (renouées asiatiques, buddleias) en font des espèces envahissantes. Ces végétaux modifient l'équilibre des écosystèmes dans lesquels ils s'installent : ils s'adaptent et se développent en provoquant d'importants bouleversements.

Le partenariat avec EDF sur ce projet a débuté en 2015, et se terminera fin 2017. Une première campagne de vols drone a été réalisée en 2015. Le matériel, ainsi que la méthodologie alors employée n'ayant pas permis un suivi correct sur l'ensemble de la zone, IRSTEA Grenoble a fait évoluer ses outils d'acquisition de données pour la campagne 2016 : un drone hexacoptère aux capacités d'emport augmentées (1,2 mètre de diamètre), équipé de deux caméras plein champ, dont une montée avec un filtre proche infrarouge permettant après traitement de mieux discriminer les différentes espèces végétales.

Les objectifs de ce projet de fin d'études sont multiples : (1) mettre en place une méthode robuste de levé photogrammétrique par drone, afin de produire des orthophotographies de qualité recouvrant l'ensemble de la zone ; (2) proposer une méthodologie de cartographie basée sur la classification des orthophotographies produites permettant de suivre l'évolution de la végétation ainsi que d'identifier les différentes plantes envahissantes.

## 2. Acquisition des données

L'Ile Falcon est un hameau de la commune de Saint-Barthélemy-de-Séchilienne, en Isère. Il se situe à une vingtaine de kilomètres au sud de Grenoble, dans une vallée encaissée où coule la Romanche. A quelques centaines de mètres en amont du site, se trouvent les Ruines de Séchilienne. Il s'agit d'une zone active d'éboulements menaçant de s'effondrer. Le hameau a fait l'objet d'un décret de risque majeur de catastrophe naturelle le 31 mai 1997. Expropriés, les derniers habitants ont quitté les lieux durant l'été 2011. Cette zone, inutilisable par la commune, a été laissée en gérance à EDF afin d'y créer une zone de compensation écologique. Ce site est un terrain plat et abrite aujourd'hui une flore riche. Les forêts sont composées d'un mélange de chênes, frênes, charmes et érables, tandis que le reste de la zone est recouvert de pelouses sèches, friches, haies ou encore ronciers.

Pour couvrir les 40 hectares de la zone de l'Ile Falcon, 12 vols drone sont nécessaires. Les paramètres de vol sont regroupés dans le *tableau 1*. Etant tributaire de l'autonomie des batteries, la durée de vol n'excède pas 8 minutes. Afin de respecter ces paramètres, le drone suit un plan de vol préalablement défini.

Paramètres de vol	Paramètres Ile Falcon
Recouvrement longitudinal (%)	90
Recouvrement transversal (%)	75
Hauteur vol (m)	115
Vitesse aéronef (m/s)	4
Taille pixel-objet (cm)	2

Tableau 1 : Paramètres de vol définis (DJI Ground Station) pour le levé par drone de l'Ile Falcon

Pour géoréférencer le projet, un réseau de 62 points d'appui (cibles) a été mis en place et levé à l'aide d'un récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System), permettant ainsi de travailler dans le système de coordonnées Lambert 93/RGF93. Ces cibles ont été judicieusement positionnées afin de quadriller la zone de façon homogène.

Deux campagnes drone ont été réalisées, l'une à la mi-mars et l'autre début juin. Lors des premiers vols drone, à la mi-mars, un Sony A7 préalablement calibré à l'aide de *PhotoModeler* a été utilisé pour les acquisitions photogrammétriques. Cette première campagne avait un double objectif : d'une part, mettre en place une méthodologie terrain de photogrammétrie spécifique à la zone de l'Ile Falcon, et d'autre part, réaliser un modèle numérique de terrain (MNT) sur la totalité de la zone en profitant de l'absence de végétation au sol et de feuilles dans les houppiers. Ce MNT, soustrait au modèle numérique de surface (MNS) de la seconde campagne, permet la création d'un modèle de hauteur de couvert (MHC).

Afin de discriminer plus aisément les différents végétaux présents sur la zone, un second appareil Sony A7 défiltré a été ajouté sur la nacelle (*figure 1*), afin de capter les données dans le proche infrarouge (720-1040 nm) (PIR). La surcharge due à l'ajout du second appareil photographique a été compensée par l'ajout d'une troisième batterie, afin de respecter la durée de vol définie (8 minutes).



Figure 1 : Sony A7 montés sur la nacelle du drone (source personnelle)

## 3. Traitement des données

1600 photographies sont nécessaires pour recouvrir l'ensemble de la zone de l'Ile Falcon. Les traitements photogrammétriques ont été réalisés sous le logiciel *Agisoft PhotoScan*, permettant d'obtenir des nuages de points 3D et des orthophotographies. Le logiciel *TRAITIM*, développé par IRSTEA Montpellier a été utilisé pour l'appariement des photographies visibles (R, V, B) et proche infrarouge de la seconde campagne afin d'obtenir des images en fausses couleurs (PIR, R, V).

Avant tout projet de photogrammétrie, il est nécessaire de connaître les paramètres internes de la caméra utilisée, à savoir la distance focale, les distorsions optiques et l'excentrement du point principal. Cette étape de calibration a été réalisée sous le logiciel *PhotoModeler*.

Les grandes lignes de la chaîne de traitement photogrammétrique sont présentées sur la *figure 2*. Les deux principales étapes sont l'appariement des photographies à l'aide du paramètre « VisNir2 » du logiciel *TRAITIM*, et le traitement sous le logiciel *Agisoft PhotoScan*.

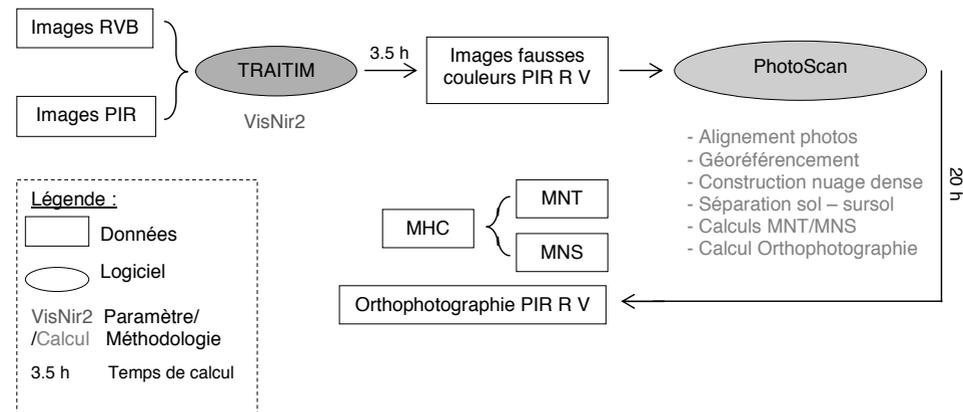


Figure 2 : Chaîne de traitement photogrammétrique permettant la réalisation d'orthophotos en fausses couleurs et de modèles numériques de terrain et de surface à partir d'un jeu de photographies dans le visible et le proche infrarouge

## 4. Qualité des données

Afin de s'assurer de la précision des modèles obtenus, un bilan des erreurs influençant les mesures photogrammétriques est dressé dans l'état de l'art. Des comparaisons entre les données issues de la photogrammétrie et des données de référence sont également effectuées. Ces données de référence ont été levées à l'aide d'un scanner laser terrestre (SLT) et d'un récepteur GNSS. Le MNT obtenu à l'aide du SLT couvre la partie nord de l'Ile Falcon, la moyenne des écarts entre ce modèle et celui créé par photogrammétrie est inférieure à 6 centimètres. De plus, l'utilisation du récepteur GNSS permet de réaliser deux MNT au centre de la zone. La moyenne des écarts entre ces deux modèles est inférieure à 10 centimètres. Ces résultats satisfaisants valident la méthodologie terrain, ainsi que les traitements photogrammétriques.

## 5. L'analyse d'images

L'analyse des orthophotographies préalablement réalisées est effectuée sous le logiciel *Trimble eCognition*. Ce logiciel a la particularité de ne pas traiter le pixel de manière isolée mais des groupes de pixels (objets) dans leur contexte et à différentes échelles : il s'agit d'une classification orientée objet. L'interprète se base non seulement sur les valeurs spectrales mais aussi sur des paramètres morphologiques et topologiques (taille, forme, voisinage des objets), ce qui améliore considérablement la qualité de l'information extraite des images à très haute résolution spatiale. Cette analyse se déroule en deux étapes : la segmentation puis la classification.

Une classification supervisée basée règles est retenue pour analyser les images de la zone de l'Ile Falcon. Les différents indices et critères (intrinsèques, morphologiques et contextuels) utilisés pour classifier les orthoimages permettent d'obtenir une carte d'occupation du sol datant de début juin 2016. L'indice de végétation par différence normalisé NDVI (TUCKER, 1979), l'indice de détection des zones d'eau NDWIF1 (Mc FEETERS, 1996) et l'indice de verdure NDGI (CHAMARD, 1991) ont servi à l'identification des différents milieux présents sur le site. Les orthoimages sont réalisées avec des prises de vue aériennes acquises dans des conditions différentes (ensoleillement, météorologie). Par conséquent, les valeurs des indices spectraux et des paramètres morphologiques et topologiques permettant d'identifier chaque classe varient. Néanmoins, la méthodologie pour réaliser cette classification est la même pour chaque orthophotographie traitée, elle est présentée sur la *figure 3*.

Une fois la classification réalisée, il est nécessaire de l'évaluer afin d'en estimer la qualité. Le coefficient Kappa (COHEN, 1960) ainsi que les exactitudes producteurs et utilisateurs calculées à partir de la matrice de confusion sont des outils statistiques permettant son évaluation. Cependant la meilleure manière de contrôler une classification reste le contrôle terrain.

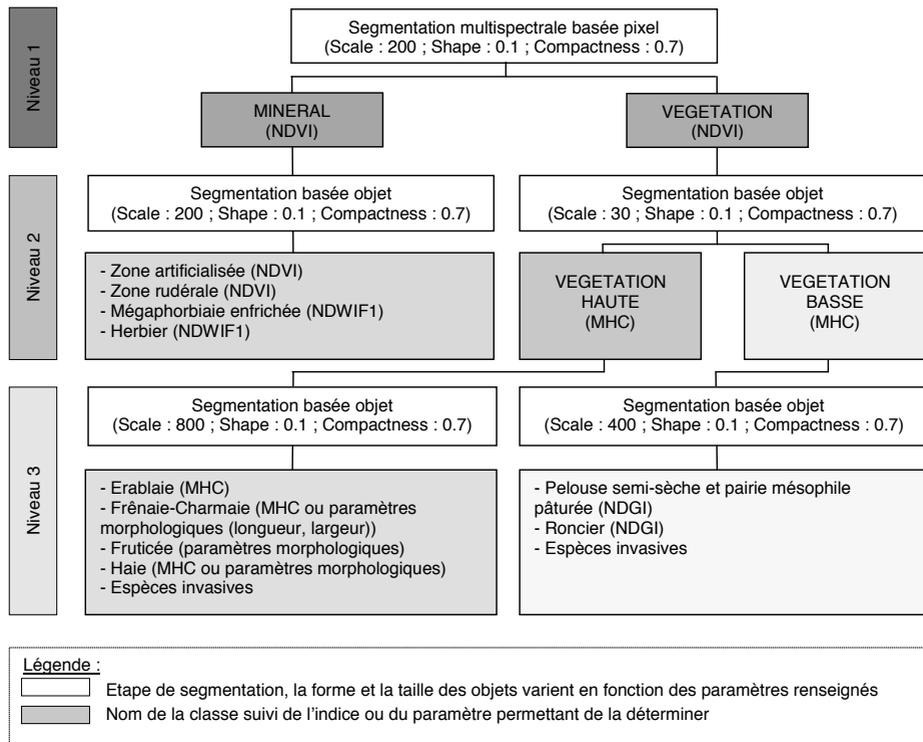


Figure 3 : Méthode de classification supervisée basée règles pour la création d'une carte d'occupation des sols sur la zone de l'île Falcon

## 6. Suivi de végétation

En 2012, une carte au 1/3000 de la zone d'étude identifiant les habitats naturels a été réalisée par EDF. Le travail effectué en 2016 assure un suivi diachronique de l'évolution de la végétation. Cette étude, permet de quantifier en deux dimensions les évolutions de végétation : on assiste au recul des milieux enfrichés et des fruticées, au maintien des zones forestières et à l'extension des milieux agro-pastoraux. Les milieux aquatiques et humides se situant sous le couvert végétal ne peuvent bénéficier d'un suivi optimal par télédétection. L'unique méthode pour identifier ces milieux reste un levé terrain.

Concernant les espèces envahissantes, seule l'identification des renouées asiatiques et des buddleias est possible, néanmoins elle reste compliquée car ces végétaux sont peu présents sur la zone. D'autres invasives sont implantées sur le site, cependant elles ne sont pas identifiables en juin en raison de leur période de floraison plus tardive.

## 7. Conclusion et perspectives

Ce projet permet la création d'une carte d'occupation des sols sur une zone de 40 hectares et assure le suivi de l'évolution de la végétation et l'identification de certaines espèces envahissantes. Les méthodologies terrain et de traitements mises en place serviront de référence pour le suivi de 2017.

IRSTEA Grenoble, en constante évolution, s'équipera pour le prochain suivi d'un nouvel aéronef embarquant un capteur hyperspectral ainsi qu'un prisme 360 suivi par une station totale pour connaître la position de l'appareil à intervalle régulier. Ce dispositif permettra l'amélioration de la méthodologie terrain : les cibles ne seront plus indispensables. Le capteur hyperspectral permettra de diviser le spectre du visible et de l'infrarouge (400-1040 nm) en quarante bandes, augmentant ainsi les probabilités d'identifier avec précision les espèces envahissantes.

## Analyse des mesures d'altimétrie satellitaire pour l'estimation des cotes d'eau sur différents types de tronçons fluviaux

PFE présenté par :

**Thomas Schaedele**

Société d'accueil :

Laboratoire d'Études en Géophysique  
et Océanographie Spatiales

Directeurs de PFE :

**Sylvain Biancamaria**

Denis Blumstein  
Frédéric Frappart  
Fabien Blarel

Correcteur :

**Emmanuel Alby**



### 1. Contexte et objectifs

L'étude des océans était auparavant limitée par les observations disponibles : quelques campagnes en mer et les marégraphes côtiers. Certaines zones océaniques n'avaient même jamais été observées et la variabilité temporelle des autres était peu connue. Pour pallier ce problème d'observation et améliorer la connaissance de la dynamique physique de la circulation océanique, les observations satellitaires se sont imposées comme l'outil idéal de mesure. En effet, cette technologie permet d'avoir une répétitivité de mesure inférieure au mois (en général) et une couverture spatiale bien plus dense que n'importe quel réseau marégraphique ou de bateaux, ce qui a conduit à une véritable révolution pour l'étude des océans. Ainsi, depuis 1978 (avec Seasat), l'altimétrie par satellite s'est fortement développée et améliorée. La capacité de mesure du niveau des océans hauturiers n'est plus à démontrer. Bien qu'initialement ces instruments ne soient pas optimisés pour observer ce type de surfaces, depuis deux décennies, les données collectées par les satellites altimétriques sont également utilisées pour le suivi des eaux continentales. Entre autres, les missions Topex/Poseidon (1992-2005) et Jason-2 (lancé en 2008), nées d'une collaboration franco-américaine (CNES-NASA) et ENVISAT (2002-2012) de l'ESA, ont fourni de très bonnes mesures de cotes d'eau sur les fleuves, lacs et réservoirs du monde entier. A présent, quatre acteurs majeurs de l'industrie spatiale, le CNES, Eumetsat, la NASA et la NOAA, ont lancé, le 17 janvier 2016, leur successeur : la mission Jason-3. Ce nouveau satellite, qui va assurer la continuité temporelle des observations, est le sujet principal du travail de recherche de ce PFE.

Le projet de fin d'étude s'inscrit dans le cadre du projet REGARD (modélisation des Ressources en Eau sur le bassin de la GARonne, interaction entre les composantes naturelles et anthropiques et apport de la télédétection), financé par le RTRA-STAE (Réseau Thématique de Recherche Avancée - Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace) pour une durée de 3 ans. Le projet REGARD a pour but de quantifier et simuler les ressources en eau du bassin de la Garonne à des pas de temps et d'espace fins, à partir d'observations satellitaires, de mesures de terrain et différents modèles. Le stage proposé se situe dans la composante télédétection de ce projet. Il a pour but de fournir les données de cotes d'eau qui seront utilisées, en complément de données in-situ et de modèles, pour la compréhension de la dynamique des eaux de surface du bassin de la Garonne. Il fait en partie suite au travail effectué par Anne-Sophie Leleu (diplômée INSA en 2015) pour ce qui est de l'estimation de cotes d'eau sur le bassin de la Garonne. Ce travail avait mis en évidence certaines limites de la mesure d'altimétrie satellitaire. Or, des améliorations à bord de Jason-3 pourraient pallier ces problèmes. De plus, avant d'opérationnaliser la mission, la NASA et le CNES ont mis à profit les premiers mois de la mission pour calibrer les instruments et valider les mesures fournies par le satellite. Ce PFE vise donc à contribuer à cet effort de validation en lien avec le CNES, et notamment concernant le nouveau mode d'acquisition de l'instrument (mode « *Open-Loop* »),

## 2. Principe de la mesure d'altimétrie satellitaire

Les altimètres radars sont des instruments de mesure transportés par des avions ou des satellites. Ils ont pour but de mesurer la distance entre l'instrument et une surface au sol. L'instrument émet une impulsion électromagnétique brève puis capte l'écho-radar du retour après réflexion sur la surface. En mesurant la différence de temps entre l'émission et la réception de l'onde ( $d_i$ ) et en connaissant sa vitesse de propagation ( $C$ , vitesse de la lumière dans le vide), on peut déduire la distance entre le satellite et la surface ( $D_{sat-surf}$ ). Les corrections liées au ralentissement de l'onde lors de la traversée de l'atmosphère sont appliquées lors du calcul de la cote d'eau.

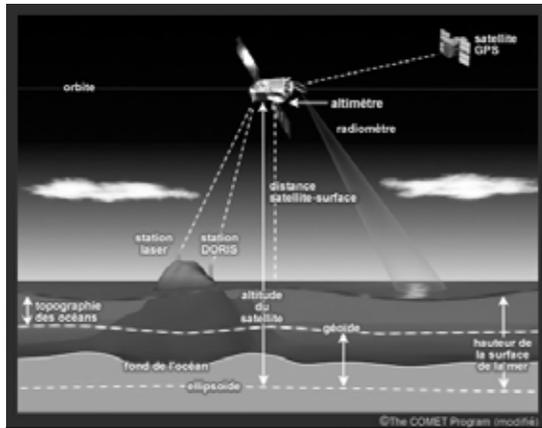


Figure 1 : Principe de l'altimétrie radar. Source : The COMET Program

Les corrections ( $C$ ) comprennent une correction par couche atmosphérique traversée (ionosphère, troposphère sèche, troposphère humide) et par phénomène de marée (marée solide ou terrestre et marée polaire). Pour connaître précisément la localisation du satellite, un système de calcul d'orbite est également embarqué à bord du satellite (Doris, GPSP, LRA).

La puissance du signal réfléchi par le sol et mesurée par le radar est discrétisée par intervalle de temps, ou portes distances. Il s'agit de la forme d'onde (Figure 2), qui dépend des caractéristiques de la scène observée par le radar. L'instrument est muni d'un système de suivi de bord, ou *tracking*, qui permet d'ajuster au mieux la fenêtre d'écoute de l'instrument. Il n'enregistre le signal reçu que pendant une faible période de temps et doit donc être correctement ajusté pour ne pas manquer la forme d'onde. Il s'agit d'une boucle d'asservissement (*CloseLoop*). Le traitement étant effectué à bord, il ne peut pas être recalculé a posteriori. Ce système est d'autant plus impactant sur les surfaces continentales, que la topographie peut varier brusquement. Cela peut avoir pour conséquences d'occulter des observations dû au mauvais positionnement de la fenêtre.

A partir de la forme d'onde enregistrée, un autre traitement, appelé « *retracking* », est appliqué au sol pour estimer plus précisément  $D_{sat-surf}$ . Il existe différents algorithmes de *retracking*, mais seul l'algorithme nommé lce-1 est utilisé durant ce projet, car plusieurs études ont montré qu'il permettait d'obtenir les meilleurs résultats pour les surfaces continentales.

$$D_{sat-surf} = \frac{1}{2} \cdot d_i \cdot c$$

Les surfaces d'eau planes réfléchissent plus que les autres surfaces, aux longueurs d'onde radars considérées. Il est donc possible de calculer la cote d'eau ( $h_{eau}$ ) qui est égale à la différence entre la position altimétrique du satellite ( $h_{satellite}$ ) par rapport à une surface de référence arbitraire (ellipsoïde de référence) et la distance satellite-surface (Figure 1).  $h_{eau} = h_{satellite} - D_{sat-surf} - C$

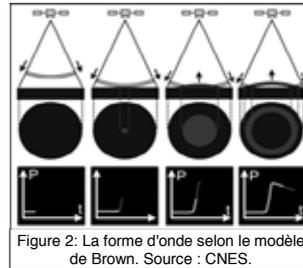


Figure 2 : La forme d'onde selon le modèle de Brown. Source : CNES.

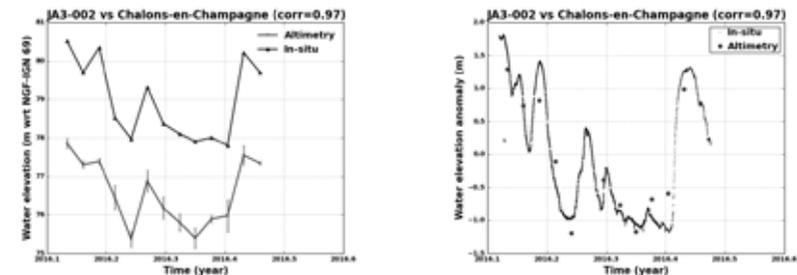
## 3. Validation du nouveau satellite Jason-3 et intérêt du mode OpenLoop

### a) Les données in-situ

Afin de valider les mesures réalisées par Jason-3, il a fallu dans un premier temps récupérer des données in-situ auxquelles elles seront comparées. Il s'agit de données que l'on considère vraies, avec une erreur sur la mesure (<10cm) plus petite que la précision de mesure du satellite en surface continentale. Pour cela, le SCHAPI, Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (service du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), administre une banque HYDRO qui stocke les mesures de cote d'eau (à pas de temps variable) en provenance d'environ 5000 stations de jaugeage. Ces données proviennent essentiellement des Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL). Toutefois, la disponibilité des données dépend de chaque service, qui doit d'abord les traiter et corriger. C'est pourquoi, pour compléter ces données, le service de vigilance des crues (Vigicrue) a également été utilisé. Il permet d'obtenir des cotes d'eau en temps quasi-réel, ce qui a été très important pour réaliser les premières comparaisons et établir un retour au CNES.

### b) Validation par comparaison des cotes issues des mesures Jason-3 et in-situ

Dans un premier temps, j'ai défini les stations virtuelles. Il s'agit de zones géographiques localisées à l'intersection entre la trace, c'est-à-dire la projection au sol de la trajectoire du satellite, et les cours d'eau. Seules les stations virtuelles ayant une station de jaugeage à proximité sont retenues. Ensuite, les mesures Jason-3 sont traitées, nettoyées puis transformées pour pouvoir être comparées aux données in-situ. En effet, au vue des zones étudiées, il est possible que certaines mesures n'observent pas que la rivière sous le satellite (effet de *hooking*, visées *off-nadir*, etc.). De plus, les cotes d'eau obtenues par Jason-3 sont référencées par rapport à l'ellipsoïde WGS84 tandis que les données in-situ sont fournies en altitude NGF-IGN69, ce qui implique une conversion. Enfin, les mesures Jason-3 sont comparées à une interpolation linéaire des mesures in-situ, pour obtenir la valeur la plus proche de la cote d'eau à chaque passage du satellite qui a une répétitivité de 10 jours. Les figures 3a et 3b sont les résultats de ce processus.



Figures 3a et 3b: Comparaison de la station virtuelle JA-002 avec la station in-situ de Châlons-en-Champagne. A gauche, les cotes d'eau sont représentées en altitude NGF-IGN69 et seulement aux dates de passage du satellite. A droite, toutes les données de cotes d'eau sont présentes et normalisées, c'est-à-dire corrigées du biais dû à la pente du fleuve.

Afin de quantifier les comparaisons entre le satellite et les stations in-situ, plusieurs paramètres statistiques ont été calculés. Pour commencer, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, compris entre -1 et 1, décrit le degré de lien entre les deux séries. Puis, l'erreur moyenne quadratique permet de calculer l'exactitude de la mesure satellitaire par rapport à la donnée in-situ. Toutefois, pour supprimer le biais constant entre les mesures et donc avoir une meilleure comparaison des données, la moyenne des écarts vrais est soustraite. Ensuite, le coefficient de Nash-Sutcliffe (dont la valeur est comprise entre  $-\infty$  et 1) permet d'évaluer la pertinence des mesures obtenues en prenant en compte les écarts entre les deux séries. Enfin, la valeur de l'amplitude (max-min) des données in-situ permet de connaître la variabilité des cotes d'eau, ce qui a pour but de nuancer l'erreur moyenne quadratique.

Le Tableau 1 résume les principaux résultats quantitatifs obtenus après comparaison des mesures satellitaires avec les données in-situ. Deux catégories d'observations sont formulées :

Jason-3 permet de mesurer des fleuves de moyennes et petites tailles (SV 002, 009, 011, 030, 032) avec des emq comparables à ceux obtenus sur de plus grandes rivières.

Sur certains cas, les emq restent trop important, et notamment en comparaison de l'amplitude de variations des cotes d'eau (SV 010, 014, 017, 020, 071). D'où de faibles corrélations et coefficient de Nash-Sutcliffe.

Tableau 1 : Résumé des comparaisons Jason-3/in-situ

SV	Fleuve	Largeur (m)	Distance SV-in-situ (km)	Biais Moyen (m)	Coef. de corrélation de Pearson	emq (m)	Emq (normalisé) (m)	Coefficient de Nash-Sutcliffe (normalisé)	Amplitude des données in-situ (m)	Nombre de cycles avec des mesures
002	La Mame	50	10,4	-2,39	✓ 0,97	2,41	0,29	✓ 0,91	2,7	13
009	La Dordogne	100	5,5	2,27	✓ 0,99	2,28	✓ 0,17	✓ 0,95	1,9	4
010	La Garonne	150	3,7	-0,72	✓ 0,81	0,82	✗ 0,4	✗ -0,01	1,1	4
011	L'Isle	50	2,3	0	✗ 0,35	0,10	✓ 0,1	✗ -0,4	0,2	4
014	L'Adour	50	5,9	3,76	0,7	3,78	0,36	✗ -0,32	1,1	11
017	L'Ognon	45	10,6	11,39	0,68	11,39	✗ 0,91	0,19	2,2	4
020	La Saône	55	4,6	1,03	0,62	1,20	✗ 0,62	0,47	2,9	12
030	La Garonne	160	4,7	2,36	✓ 0,91	2,37	✓ 0,13	✓ 0,83	1	6
	La Garonne	160	12,7	-4,28	✓ 0,89	4,29	✓ 0,15	✓ 0,79	1,1	6
032	La Garonne	160	0,9	0,37	✓ 0,93	0,39	✓ 0,13	✓ 0,83	1,1	6
071	La Sarthe	60	17,6	-7,72	0,64	7,72	0,24	✗ -1,49	0,5	13
	La Sarthe	60	10,2	3,4	0,61	3,41	0,25	✗ -1,02	0,5	13

#### c) Intérêt du mode *OpenLoop*

La grande différence entre le satellite Jason-3 et Jason-2 sur cette période est l'utilisation du mode *OpenLoop*, ou mode MNT. En effet, les altimètres classiques possèdent un système de *tracking* qui positionne la fenêtre d'écoute de l'instrument en fonction du signal reçu. Ce mode est parfaitement adapté aux océans puisqu'il n'y a pas de variations brutales de la distance satellite-sol. Au contraire, sur les surfaces continentales, il est possible que la fenêtre d'écoute du satellite soit positionnée à une certaine altitude et que brusquement, la topographie évolue, comme par exemple lors de la présence d'une vallée encaissée. La boucle d'asservissement a tendance à ne pas « voir » la vallée, qui est bien plus basse, et le satellite n'observe pas le cours d'eau. Le mode *OpenLoop* permet, grâce à des données chargées à bord de l'altimètre, de forcer la fenêtre d'écoute sur une certaine altitude. Ainsi, l'instrument peut mesurer le cours d'eau situé dans la vallée

L'importance de ce mode a été mise en avant sur les stations virtuelles 009, 010, 011 et 017. En effet, les 4 cycles où il a été possible d'observer les cours d'eau correspondent aux 4 cycles d'activation du mode *OpenLoop*. Et bien qu'il reste des incertitudes importantes sur les mesures, il a été possible de réaliser des observations.

## 4. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus par le satellite Jason-3 sont très encourageants du point de vue de l'altimétrie satellitaire en zone continentale. En effet, des mesures de bonnes qualités ont été réalisées sur des cours d'eau de petite taille et moyenne taille ce qui a permis la validation du nouvel altimètre. De plus, le mode *OpenLoop* a élargi le champ des observations à de nouvelles zones encore non mesurées.

Chaque nouvelle mesure permet de constater les performances de l'altimètre en recalculant les paramètres statistiques, et en continuant la série temporelle. Lorsque le nombre d'observations sera suffisant, il sera possible d'étudier le cycle saisonnier des cours d'eau. suffisant, il sera possible d'étudier le cycle saisonnier des cours d'eau.

## Limites de l'acquisition de nuages de points par système de cartographie mobile en intérieur

PFE présenté par : **Pierre CARREE**  
 Société d'accueil : **QUARTA**  
 Directeur de PFE : **M. Olivier LE MOIGNE**  
 Correctrice : **Mme Tania LANDES**



### 1. Introduction

A travers ses activités de topographie, la société **QUARTA** est régulièrement missionnée pour réaliser diverses prestations, telles que des plans topographiques, des levés de voies de chemin de fer ou encore des levés d'intérieurs. Afin d'optimiser la production des livrables relatifs à certains de ces travaux, QUARTA s'est dotée en octobre 2015 d'un système de cartographie dynamique Leica Pegasus Two. Cet appareil a par la suite été éprouvé lors de plusieurs campagnes de mesures, principalement en extérieur. Ainsi, la société possède un ensemble de connaissances et une expérience solides dans le domaine de la cartographie mobile. QUARTA étant actuellement en réflexion afin d'appliquer cette technologie aux levés d'intérieurs, ce **Projet de Fin d'Etudes** (PFE) s'inscrit naturellement dans la continuité des activités de développement menées par la société.

Les **systèmes de cartographie mobile** permettent l'acquisition de données à haut rendement. Cependant, bien qu'équipés de plusieurs capteurs de positionnement, la précision qu'ils offrent n'est pas toujours suffisante dans les environnements ne bénéficiant pas de couverture GNSS, tels que les tunnels, les souterrains, ou simplement l'intérieur des bâtiments. En stricte utilisation intérieure, ces appareils de mesure dynamique peuvent également être limités en termes d'accessibilité ou de mise en œuvre.

Ce Projet de Fin d'Etudes a pour objectif d'évaluer **les limites des systèmes de cartographie mobile lors d'acquisitions de nuages de points en intérieur**. De toute évidence, différentes contraintes peuvent apparaître lors de leur mise en œuvre. La qualité des données produites, leur stockage, la durée des traitements informatiques, l'accessibilité au lieu, ainsi que la dimension économique de leur utilisation sont autant de critères qu'il est nécessaire d'évaluer et de quantifier.

Afin de répondre à cette problématique, nous rédigerons dans un premier temps une présentation générale des systèmes de cartographie mobile et de leurs limites potentielles. Celle-ci sera suivie par la description de la campagne de mesure dynamique réalisée. Nous étudierons ensuite la chaîne de traitements des données nécessaire à la génération des livrables. Pour finir, nous nous pencherons sur le protocole mis en place dans le but d'évaluer les limites d'acquisition de nuages de points par systèmes de cartographie mobile en intérieur.

## 2. La cartographie mobile et ses limites

### 2.1. Présentation générale

Les systèmes de cartographie dynamique peuvent être décrits comme l'intégration d'algorithmes et de capteurs sur une plateforme rigide, permettant à celle-ci de se positionner, de s'orienter et d'acquérir des données d'imagerie et des nuages de points géoréférencés. Ces appareils de mesure peuvent ainsi être décomposés en trois segments :

1. Le segment **capteurs de perception**, généralement constitué de caméras et d'un ou plusieurs scanners laser, qui va procéder à l'acquisition des données recherchées.
2. Le segment **localisation**, composé la plupart du temps d'une centrale inertielle et d'une antenne GNSS. Elles peuvent être complétées par différents algorithmes tels que le filtre de Kalman ou la

technologie de localisation et cartographie simultanées SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*).

3. Le segment **synchronisation, enregistrement et géoréférencement des données**. Une solution logicielle est implémentée afin de coordonner les capteurs. Ce segment comprend également la suite logicielle nécessaire au traitement des données recueillies.

### 2.2. Systèmes présents sur le marché

On dénombre autant de systèmes de cartographie mobile que de concepteurs et d'applications spécifiques. Ces appareils de mesure se distinguent aussi bien par les capteurs qu'ils embarquent que par leur précision (de mesure et de positionnement), leur portée ou encore leur encombrement. Nous en avons distingué trois catégories :

1. Les systèmes du type "chariot" ;
2. Les systèmes du type "sac à dos" ;
3. Les systèmes "tenus en main".

### 2.3. Limites d'acquisition

Pour clore cette présentation des systèmes de cartographie mobile et nous rapprocher de la problématique, nous nous sommes intéressés aux limites potentielles de ces appareils. Pour ce faire, nous avons pris en compte les exigences des entreprises de topographie et de leurs clients, et avons finalement observé deux types de limites : **techniques**, et **économiques**, à nuancer selon le contexte d'utilisation et la destination des données.

Limites des systèmes de cartographie mobile en intérieur	
Limites techniques	Limites économiques
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Exactitude des mesures</li> <li>▪ Précision et bruit des mesures</li> <li>▪ Accessibilité dans les bâtiments</li> <li>▪ Acquisition des zones d'intérêt</li> <li>▪ Résolution – densité de points</li> <li>▪ Efficacité et automatisation des traitements</li> <li>▪ Stockage des données</li> <li>▪ Autonomie</li> <li>▪ Polyvalence du système</li> <li>▪ Fatigue de l'opérateur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût unitaire du système</li> <li>▪ Coût des traitements informatiques</li> <li>▪ Productivité                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Durée de mise en œuvre</li> <li>○ Durée d'acquisition</li> <li>○ Durée des traitements</li> </ul> </li> </ul>

Contexte et destination

Tableau 1 : Limites des systèmes de cartographie mobile en intérieur.

## 3. Campagne de mesures

Des acquisitions mettant en œuvre un système de cartographie mobile ont été réalisées pour produire des données nécessaires à notre réflexion, et également observer son comportement et sa mise en œuvre lors du lever.

### 3.1. Lieu d'acquisitions

Afin de réaliser nos acquisitions, un **lieu de référence** devait être choisi. Il s'est trouvé à ce moment qu'un chantier de lever d'intérieur était à réaliser par QUARTA à la Congrégation des Filles du Saint Esprit de Saint-Brieuc (22). Ce bâtiment de 6 étages présentait un certain nombre de caractéristiques intéressantes dans le cadre de notre étude, permettant de tester à la fois la dérive du système, ses capacités de mise en œuvre et d'utilisation :

- Une taille relativement importante, de l'ordre de 80 m (sens Est – Ouest) par 74 m (sens Nord – Sud) ;
- Plusieurs escaliers, rampes ou marches isolées dans les couloirs et des sols non horizontaux ;
- Une grande variété de pièces, aux caractéristiques de luminosité ou d'accès hétérogènes.

### 3.2. Système de cartographie mobile utilisé

Notre mission de cartographie dynamique a mis en œuvre le **Pegasus Backpack** développé par la firme **Leica**. Les caractéristiques générales de ce système de type « sac à dos » sont présentées en figure 1.

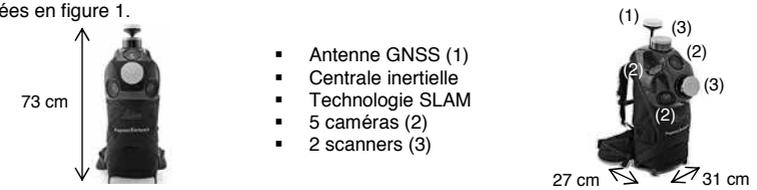


Figure 1 : Caractéristiques principales du Leica Pegasus Backpack.

Le segment contrôle est assuré par une tablette tactile. Elle va permettre de paramétrer le système en amont de l'acquisition, et suivre le déroulement de celle-ci.

### 3.3. Déroulement de l'acquisition dynamique

**Deux missions** ont été réalisées avec ce système (figure 2). La première (pistes D1 et F1) alliant acquisitions intérieures et extérieures (pour le départ et l'arrivée) au niveau R-1, la seconde (A2) se déroulant uniquement à l'intérieur du bâtiment, sur deux niveaux. La circulation à travers celui-ci s'est effectuée le long du couloir principal, en accédant à quelques pièces.

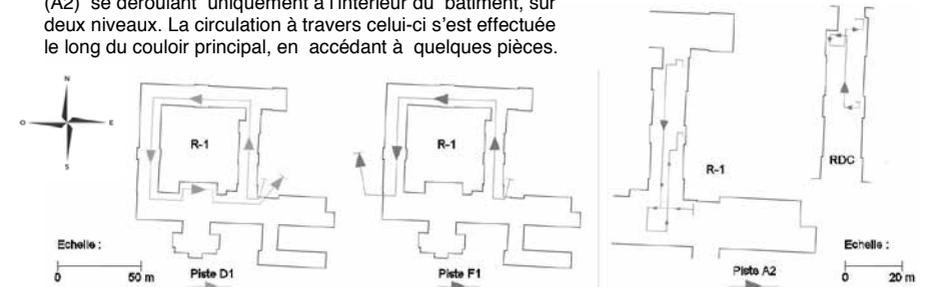


Figure 2 : Schématisation des acquisitions réalisées avec le Leica Pegasus Backpack.

## 4. Chaîne de traitement des données

Le traitement des données terrain fait intervenir plusieurs logiciels, utilisés selon le protocole suivant :

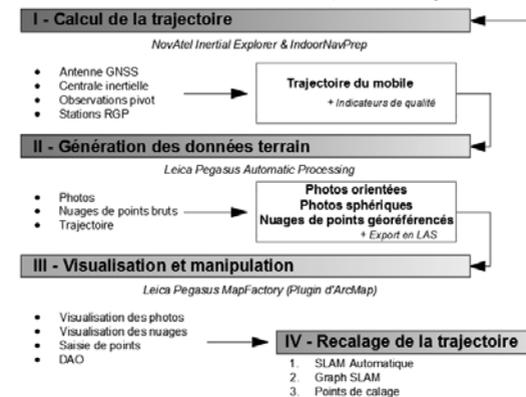


Figure 3 : Traitement des données du Leica Pegasus Backpack.

### 5. Evaluation des limites des systèmes de cartographie mobile en intérieur

Nous nous sommes penchés dans un premier temps sur l'évaluation de la précision des nuages de points obtenus. Pour ce faire, plusieurs trajectoires ainsi que leurs nuages associés ont été générés, dans le but de mesurer l'impact des critères suivants :

1. **Paramètres de calcul** de la trajectoire dans Inertial Explorer ;
2. **Méthode d'acquisition** terrain : boucle ouverte ou fermée ;
3. **SLAM automatique** (le logiciel va corriger la trajectoire du mobile en étudiant son déplacement par rapport à des éléments remarquables du nuage) ;
4. **Graph SLAM** (saisie de points homologues dans les nuages afin d'en améliorer la précision) ;
5. Insertion de **points de calage**.

Les données produites ont par la suite été confrontées à un **nuage de référence** acquis lors d'un lever au **scanner laser statique** dans le même bâtiment. Des portions de nuages ont été isolées pour manipuler des volumes de données moins importants que les nuages entiers.

La **méthode de comparaison** a été discutée, afin que les résultats soient les plus représentatifs possibles de la réalité. En effet, la dérive du système mène parfois à des écarts en position de plusieurs dizaines de centimètres (figure 4). Une simple analyse nuage/nuage n'était ainsi pas cohérente.

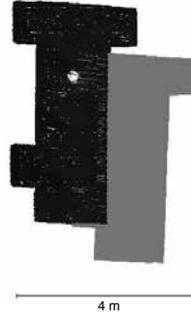


Figure 4 : Ecart en distance entre une portion de nuage dynamique (noir) et la portion statique homologue (orange). Vue de dessus.

Nous avons ensuite calculé une trajectoire finale, dans le but de nous rapprocher au mieux de la référence statique, et avons appliqué des comparaisons aux deux nuages de points. Suite à cela, nous avons étudié la **densité de points** du nuage, ainsi que le **bruit** inhérent à celui-ci, en observant la dispersion des points autour de plans moyens.

### 6. Conclusion et perspectives

Les **systèmes de cartographie mobile** permettent l'acquisition d'une **grande quantité de données** en un **temps réduit**. Cependant, en intérieur, ces appareils de mesure présentent certaines **limites**, qui peuvent rendre leur utilisation difficile, ou inadaptée à certains travaux en terme de **qualité**.

Ce Projet de Fin d'Etudes avait ainsi pour objectif d'étudier ces limites lors d'acquisitions dans les **environnements intérieurs**. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre un système de ce type dans un bâtiment de référence. Une fois la **chaîne de traitement** maîtrisée, les informations et jeux de données obtenus à la suite de l'acquisition dynamique ont pu être confrontés à des **données de référence** produites à l'aide d'un scanner laser statique.

Après avoir mis au point une méthode de **comparaison des nuages de points**, plusieurs trajectoires et leurs nuages respectifs ont été générés et comparés à la solution de référence. Nous avons ainsi étudié l'influence des **paramètres de calcul** de la trajectoire, l'apport de la technologie **cartographie et localisation simultanées SLAM**, et des **points de calage**. Une trajectoire finale a par la suite été calculée en tenant compte de ces observations. Cela nous a permis d'évaluer les limites en terme de **d'exactitude** du système mis en œuvre. D'autres études ont été menées au niveau du **bruit** et des **densités de points** relatifs aux nuages.

Les systèmes de cartographie dynamique étant en **constante évolution**, il pourrait être intéressant de se pencher sur leurs progrès à venir, en matière d'algorithmes de SLAM et au niveau de l'exploitation des photos notamment. De plus, la mise en œuvre de systèmes de types chariot ou tenus en main permettrait de confronter des jeux de données provenant d'appareils de natures différentes et ainsi prolonger cette étude.

PFE présenté par : **Romain Rouquette**  
Société d'accueil : **PANGEO CONSEIL**  
Directeur (trice) de PFE : **M. Jean-Philippe Voirin**  
Correcteurs (trices) : **M. Emmanuel Alby**



### 1. Introduction

Quatre années après la mise en place de la grande réforme DT DICT par l'arrêté du 15 février 2012, les spécialistes en matière de détection et de géoréférencement des réseaux sont toujours à la recherche d'évolutions technique et méthodologique. Le développement croissant des procédures de détection non destructives mais aussi les nouveaux moyens d'acquisitions tridimensionnels offrent toujours plus de possibilités aux prestataires pour répondre aux exigences cartographiques imposées, et notamment atteindre une précision de récolement en classe A de 10 centimètres. D'autre part, l'exonération de certification en matière de géoréférencement pour les géomètres experts, a favorisé un développement accru des opérations de récolement dans leurs cabinets, et prennent aujourd'hui une part non négligeable dans leurs chiffres d'affaires. De ce point de vue là, il est important de noter que pour le 1er janvier 2017, les géomètres devront se munir d'une autorisation d'intervention à proximité des réseaux (AIPR) ; attestation délivrée par examen sous forme de QCM. Enfin, les objectifs prévus en terme de géoréférencement des réseaux sensibles en zones urbaines d'ici 2019, puis en zones rurales d'ici 2026, approchent à grands pas et la demande ne cesse de croître.

L'entreprise Pangéo Conseil dans laquelle se déroule mon projet de fin d'études, intervient régulièrement pour des missions de récolement de réseaux en tranchée ouverte afin de bénéficier de toutes les informations sur les réseaux. Cependant, après plusieurs années de collaboration avec l'entreprise partenaire Veolia Eau, des inconvénients majeurs sur la méthodologie traditionnelle actuellement mise en place se dégagent. Pour le géomètre les problèmes sont liés à :

- la réactivité pour intervenir sur le terrain, qui dépend du planning des techniciens,
- l'intervention en tranchée fermée par le relevé de tubes directionnels qui ne permet pas de garantir la précision et d'engager la responsabilité du géomètre,
- les nombreuses pertes de temps liées à la répétition des interventions en fonction de la pose et aux rectifications de plan.

Au niveau des entreprises gestionnaires de réseaux ou exécutantes des travaux, les principaux besoins sont :

- de fermer rapidement les fouilles,
- d'avoir une cartographie précise en classe A,
- de définir les éléments constitutifs de leurs réseaux.

Les objectifs de ce projet de fin d'études sont donc de trouver un moyen permettant de répondre à l'ensemble de ces problématiques et de mettre en place des procédures d'acquisition, de traitement, d'analyse de qualité et de restitution des livrables. Notre étude a retenu une solution photogrammétrique car cette discipline présente aujourd'hui de nombreux avantages pour répondre à ces problématiques. En effet, nous envisageons à travers cette solution que l'entreprise exécutante des travaux réalise la phase d'acquisition des images, puisque la législation le permet. Le géomètre assurerait donc le géoréférencement des points d'appui sur le terrain et le traitement des données qui en découle afin de garantir la précision en catégorie A. D'autre part, les logiciels de traitement d'images se développent de jour en jour, les algorithmes de calculs se perfectionnent, les ordinateurs sont toujours plus puissants et l'augmentation des espaces de stockage permet aujourd'hui une gestion fluide des données 3D.

Dans un premier temps, nous exposerons le choix du capteur et les méthodologies de calibration de caméra, d'acquisition et de traitement des images puis de restitution. La partie suivante permettra de valider les méthodes mises en place et accordera une importance particulière à la qualification de la donnée générée. Enfin, les perspectives techniques et commerciales de la solution proposée seront présentées et permettront de déterminer à quelle échelle cette solution est viable.

## 2. Mise en place de procédures de calibration, d'acquisition et de traitement.

Avant d'aborder les différentes procédures, il convient de faire un choix parmi les différents capteurs disponibles sur le marché. Pour cela, il est primordial de se placer dans un contexte d'intervention sur chantier. L'acquisition des images doit se dérouler de manière rapide et les différents paramètres de prises de vues comme la distance focale et l'ouverture doivent être fixes tandis que le temps d'exposition doit être géré de manière automatique. L'éloignement par rapport à la scène est limité à la taille humaine, soit 1 à 2 mètres avec éventuellement l'utilisation d'une perche pour plus de recul. Par conséquent, la distance focale doit être très courte afin d'avoir un champ de vision assez important. La caméra doit avoir une bonne résolution, 12 méga pixels semblent être le minimum requis et un mode de prise de vue cadencé doit être disponible pour permettre une acquisition en mouvement. Suite à cette réflexion, nous nous sommes naturellement orientés vers des caméras sportives robustes, telle que la caméra GoPro, qui permet aujourd'hui de réaliser des rendus de qualité.

Le principe fondamental de la photogrammétrie s'intéresse aux paramètres internes de la caméra afin de déterminer précisément la distance focale mais aussi la valeur des coefficients de distorsions radiales et tangentielles de l'optique. Pour parvenir à cette connaissance, il convient de mettre en place une procédure de calibration de caméra. Le logiciel PhotoModeler expert pour ce genre d'opération, et le logiciel Agisoft Photoscan ont été retenus pour parvenir au mieux à cette opération. La procédure utilisée est basée sur l'emploi de cibles codées disposées de manière rigoureuse et photographiées selon plusieurs angles de vues.

Une fois l'étape de calibration terminée, on peut réaliser la phase d'acquisition des images. La première opération consiste à installer un réseau de points d'appui matérialisés par des spits ou des piquets, qui assureront le géoréférencement des images. Ensuite, des points de liaison sont ajoutés sous forme de marque de peinture pour diminuer l'erreur d'accumulation des images qui est à l'origine de l'effet dit "banane" (effet parabolique selon un axe). Pour restreindre ce dernier, l'orientation des prises de vues joue un rôle important. En effet, des prises de vues obliques, c'est-à-dire selon un axe parallèle à la tranchée permettent d'amoinrir ce phénomène et par conséquent de fournir de meilleurs résultats sur la composante altimétrique. Une autre série d'images, avec une orientation en vue de dessus, selon un axe perpendiculaire à la tranchée, permet d'avoir un recouvrement idéal de la zone mais aussi de disposer d'images de qualité pour la génération d'ortho-mosaïque vraie. Plusieurs chantiers tests ont permis d'aboutir aux résultats suivants où le temps d'acquisition, les espaces de stockage et le nombre de points d'appui sont exprimés en fonction de la distance linéaire du terrain.

	Projet 1	Projet 2	Projet 3	Projet 4	Total
Distance linéaire	120 m	150 m	110 m	80 m	460 m
Nombre photos	1020	1313	975	598	3907
Espace stockage	3,71 Go	4,76 Go	2,96 Go	2,14 Go	13,6 Go
Nombre de points d'appui	5	6	6	4	21
Nombre de marques	14	16	10	8	48
Temps d'acquisition	15 min	20 min	15 min	10 min	1 h

Tableau 1 : Récapitulatif des différentes interventions pour un même projet.

Ensuite, nombreux sont les logiciels de traitement d'images sur le marché. Pour définir celui qui se prête le plus à notre type d'opération, un comparatif a été mené entre les logiciels Pix4D et Agisoft Photoscan. Pix4D a été retenu pour son ergonomie et la diversité de ses fonctions. Les principaux critères de réussite d'un projet sont : le recouvrement entre les clichés, un jeu de points d'appui et de contrôle au sol idéalement répartis et dans les tolérances, ainsi que des paramètres de calibration proches de ceux définis a priori. Le traitement d'images débouche sur la génération d'un nuage de points dense avec un faible bruit de mesure, et d'une ortho-mosaïque vraie de qualité.



Figure 1 & 2 : Ortho-mosaïques vraies de réseaux de télécommunication, d'éclairage public, de gaz, d'électricité, d'eau pluviale à gauche, et de réseau d'adduction d'eau potable à droite.

Enfin, le mode de livrable retenu est un modèle filaire en 2,5D, où l'orthophotographie sert de support pour une digitalisation en planimétrie, et le nuage de points apporte la composante altimétrique de la génératrice supérieure de la canalisation. L'ortho-mosaïque est aussi livrée pour être intégrée au système SIG des gestionnaires de réseaux car elle présente un atout considérable. En effet, cette forme de livrable donne une visualisation précise de la composition et de la disposition des réseaux. C'est une archive de la fouille ouverte.

## 3. Analyse et qualification des résultats.

L'étape la plus importante du projet est la certification de la classe de précision du récolement en catégorie A de 10 centimètres. Afin de garantir cette classe, il est nécessaire de mettre en place des procédures de contrôles qui permettront de valider les différentes phases.

Dans un premier temps, une analyse de l'étape de calibration essentielle dans la connaissance des distorsions est réalisée. Compte tenu de la qualité moindre des optiques des caméras sportives, une auto calibration est préconisée, c'est à dire que les paramètres sont définis pour chaque projet. Ainsi en évoluant, un seuil de tolérance entre les paramètres **issus** de la calibration précise sur cible et ceux calculés par auto-calibration on peut garantir l'homogénéité du projet et donc de la précision. Si les paramètres sont hors tolérances alors une nouvelle calibration précise doit être effectuée et le projet en question doit être contrôlé par l'acquisition de points de contrôle sur le terrain.

Ensuite, la disposition des points d'appui a été étudiée afin de déterminer la redondance et l'espacement le long de la tranchée de ces derniers. Ainsi avec 4 points d'appui sur un linéaire de 40 à 50 mètres, nous obtenons des résidus de l'ordre du centimètre avec des écarts maximum de 2 centimètres.

Écarts moyens sur les points d'appui	Projet 1	Projet 2	Projet 3	Projet 4	Total	Écart Max
X (m)	0,007	0,012	0,008	0,005	0,008	0,027
Y (m)	0,012	0,011	0,007	0,007	0,009	0,024
Plan (m)	0,015	0,019	0,017	0,010	0,014	0,035
Z (m)	0,012	0,005	0,003	0,001	0,005	0,017

Tableau 2 : Résidus moyens sur les points d'appui des différents projets et écarts maximums.

De plus, le contrôle des points de liaison disposés par paires le long de la tranchée avec un espacement de 10 mètres maximum entre eux permet de confirmer l'homogénéité du projet. En effet, les points de liaison n'entrent en compte que pour la phase d'orientation relative et non pour la phase d'orientation externe ou phase de géoréférencement.

Enfin, un levé de référence au scanner laser terrestre a été réalisé afin d'évaluer la précision du traitement photogrammétrique. La méthode de comparaison nuage/nuage disponible sur le logiciel CloudCompare a été retenue. De plus, des coupes transversales régulièrement espacées de 5 mètres le long de la tranchée ont été réalisées, afin de confirmer les écarts. Les résultats sont de l'ordre du centimètre. En combinant cet écart sur la précision interne du traitement et celui sur la précision du rattachement ou du géoréférencement des points d'appui on obtient la précision finale du relevé. De plus, un bilan des erreurs tenant compte de la précision des points d'appui, de la précision du traitement d'images, puis des erreurs dues à la restitution des livrables notamment lors de la digitalisation, a été effectué afin de garantir la classe de précision en catégorie A de 10 centimètres.

## 4. Perspectives techniques et commerciales

Si la photogrammétrie est un système de mesure moderne et avantageux pour ce type d'opération, elle présente aussi quelques inconvénients d'utilisations dus aux conditions météorologiques. En cas d'intempéries moyennes ou de pluie peu dense, les entreprises exécutantes continuent de travailler et le déploiement de cette méthode peut donc s'avérer problématique dans l'avancement du chantier. Ainsi, nous avons réalisés des tests en conditions défavorables pour évaluer la faisabilité de la méthode. Pour assurer une qualité de prise de vue, il est impératif de protéger le système optique des gouttes. La méthodologie d'acquisition est évidemment la même. Les changements intervenant aux niveaux du tri des images et des paramètres de génération du nuage densifié pour la réduction du bruit de mesure. Les résultats obtenus sont légèrement moins précis que par temps idéal mais les classes de précisions cartographiques sont respectées et garanties. Une utilisation de cette méthodologie sous la pluie est donc possible mais elle n'est toutefois pas recommandée.

Des tests de combinaison de deux caméras dans l'optique de réduire le temps d'acquisition pour des chantiers au long linéaire ont été réalisés. Un système de fixation et d'orientation des prises de vues a été mis en place et une méthodologie de traitement d'images définie. Les résultats obtenus

sont satisfaisants, mais cette évolution est pour le moment laissée de côté compte tenu de l'aspect économique que cela représente. En effet, l'association de deux caméras double le prix d'investissement pour seulement diminuer de moitié un temps d'acquisition relativement faible. De plus, les entreprises exécutantes n'effectuent pas les travaux en une seule fois mais elles procèdent par tranches et donc plusieurs centaines de mètres sont très rarement ouverts simultanément.

Une autre partie des tests et évolutions s'est concentrée sur une modélisation 3D des réseaux comme format de livraison. Les rendus filaires 2,5D fournis aujourd'hui sont satisfaisants puisque les SIG des gestionnaires de réseaux sont encore en 2D. Toutefois, les pratiques se modernisent continuellement, et ce genre d'opération pourrait très bien s'intégrer dans les BIM. Les premiers tests réalisés à l'aide de logiciel de reconnaissance de forme n'ont pas abouti à cause d'un non recouvrement de points pour la totalité de la canalisation, la partie inférieure étant invisible sur les clichés. Cependant la piste n'est pas abandonnée et fera l'objet de recherches futures.

D'un point de vue économique, le tableau suivant permet de faire un point sur les temps passés lors des différentes étapes. Les temps humains et temps machines correspondent à la nouvelle méthodologie tandis que les temps actuels concernent la méthodologie traditionnelle. Pour effectuer cette étude, nous sommes partis du principe que l'acquisition était réalisée par nos soins. Or dans nos perspectives de développement, nous envisageons que l'entreprise exécutante des travaux réalise cette étape.

Étapes de traitement	Temps humain	Temps machine	Temps actuel
Trajet	Forfait	--	Forfait
Généralisation des points d'appui	3h	--	2h
Trie des photos et création du projet	15 min	--	--
Étape 1 : Initial processing (orientation interne et relative)	--	1 h 30	--
Contrôle de l'assemblage des images	5 min	--	--
Insertion des points d'appui et de liaison	30 min	--	--
Étape 1 : Initial processing (optimisation des paramètres d'orientation interne et relative et orientation externe)	--	1 h 15	--
Contrôle des paramètres de calibration, contrôle des résidus sur les points d'appui, contrôle visuel du nuage de points et validation de la 1 <sup>ère</sup> étape	10 min	--	--
Étape 2 : Densification du nuage de points	--	2h	--
Étape 3 : Création de l'ortho-mosaïque d'image	--	45 min	--
Restitution des livrables : DAO	2h	--	2h
Total	4h + forfait	3h 30	4h + forfait

Tableau 3 : Récapitulatif des temps passés sur un projet type.

Il est important de noter que le temps machine n'est pas compris dans le calcul des honoraires, mais une organisation précise permet de limiter ce problème. Pour une simple intervention les tarifs correspondent à ceux appliqués aujourd'hui. Toutefois, un temps énorme peut être gagné si l'entreprise exécutante collabore pour la phase d'acquisition.

Nous terminons cette partie sur un aperçu commercial de la solution pour un développement à plus grande échelle. Les investissements nécessaires en terme de moyens concernent le matériel d'acquisition, la mise en place d'une plateforme d'échanges des données, des espaces de stockage importants, l'achat d'un logiciel de traitement d'images et d'une station informatique permettant de tirer profit au maximum de ce dernier. Des procédures de travail sont également nécessaires à mettre en place pour que l'organisation des traitements soit efficace. Il est également prévu la formation de chefs de chantier sur le terrain pour la phase d'acquisition et la mise à disposition du matériel à ces derniers, sous forme de contrat de location ou de prêt avec caution.

## 5. Conclusion

La réflexion sur l'optimisation de l'opération de récolement en tranchée ouverte, compte tenu de problématiques rencontrées actuellement par l'entreprise, a abouti à la mise en place d'un procédé photogrammétrique. Les procédures d'acquisition permettent d'être très rapides sur le terrain afin que l'avancement des travaux ne soit pas altéré. En collaboration avec l'entreprise exécutante des travaux, le géomètre peut limiter ses interventions à des campagnes de géoréférencement et assurer le traitement des images pour garantir au final la classe de précision en catégorie A. L'orthophoto est une vraie valeur ajoutée aux modes de livrables puisqu'elle joue un rôle d'archive qui n'est autre qu'un témoin de la vie des réseaux.

La mise en place de cette solution est économiquement bon marché et les tarifs actuellement mis en place sont respectés. De nombreuses pistes à explorer peuvent permettre d'optimiser un peu plus la méthode notamment au niveau d'un rendu en 3D. Au final, la richesse des évolutions futures possibles rend ce sujet particulièrement intéressant et passionnant.

# Modélisation et simulation de convois exceptionnels et d'infrastructures routières pour la préparation d'itinéraires spécifiques

PFE présenté par : **Thomas Delacourt**  
 Société d'accueil : **Transports Europe Services**  
 Directeur de PFE : **Hervé Kautzmann**  
 Correcteurs : **Emmanuel Alby**  
**Mathieu Koehl**



## Introduction

En France, les convois exceptionnels se distinguent des autres véhicules par leurs dimensions et leurs masses. Les articles R.312-10, R.312-11 et R.312-4 du code de la route régissent les limites des longueurs, des largeurs et des masses de véhicules. Afin de réduire les nuisances pour les autres usagers de la route et pour la structure de la chaussée, les colis transportés doivent être réduits aux plus petites charges indivisibles. La législation exige différentes mesures de signalisation et d'accompagnement mais également les conditions de circulation.

La lourde réglementation en vigueur en France amène les entreprises de transports à externaliser les démarches réglementaires. Le bureau d'études TES assure donc les demandes d'autorisation de circulation auprès des autorités compétentes. Ce travail s'accompagne du respect des restrictions et des conditions de circulation des véhicules hors norme à l'escorte du convoi.

L'entreprise dispose d'un outil SIG développé par Marouane Boudhaim lors de son projet de fin d'études (2015), qui permet de tenir compte des contraintes pour la préparation des itinéraires de convois exceptionnels. Cette étude a mis en exergue l'intérêt pour l'entreprise d'acquiescer les gabarits des structures à emprunter. Les dossiers menés par TES nécessitent une reconnaissance et une inspection des capacités des infrastructures à être traversées par des convois exceptionnels. Les ponts, tunnels, ronds-points et les carrefours urbains sont particulièrement étudiés. Le projet de recherches technologiques réalisé avec Clément Boutry a montré un intérêt à l'application de la photogrammétrie pour les relevés d'ouvrages routiers. En effet, l'entreprise ne dispose pas d'appareils de mesure directe et suffisamment précis pour l'ensemble des infrastructures. L'attrait pour cette technique a fait germer un nouveau projet de fin d'études tourné vers la représentation du déplacement du convoi et d'imiter fidèlement le phénomène.

## 1. Objectifs

L'accroissement des constructions de parcs éoliens et les évolutions des matériaux fournissent au bureau d'études spécialisé de nouveaux défis par des trajets plus fréquents. En effet, les longueurs des pâles et les hauteurs des sections du mât ne cessent d'augmenter. Ces demandes sont actuellement limitées par l'absence d'outils fiables permettant le contrôle des capacités des secteurs étroits ou sinueux à être traversés sans encombre. De plus, des éléments cartographiques assurent au fabricant des charges et à l'entreprise de transport un acheminement sans surprise. L'outil devra aider l'entreprise à travers une interface ergonomique en vue de fournir des pièces justificatives solides et communicatives pour la préparation du parcours.

Le projet de fin d'études s'appuie donc principalement sur ce besoin de solutionner la planimétrie et de proposer des pistes pour l'étude spatiale. La première approche permettra à TES de régler la majorité des litiges à travers une interface ergonomique en vue de fournir des pièces justificatives solides et communicatives pour la préparation du parcours. L'implémentation de la simulation mathématique aura aussi la capacité à s'adapter aux parcours et aux différentes géométries des convois exceptionnels.

## 2. Epures de giration spécifiques

Les épures de giration sont une représentation de l'aire balayée par un véhicule donné sur un parcours. Lors d'un projet d'aménagement de la voirie, l'utilisation de cet outil permet de vérifier les capacités à faire circuler un véhicule par rapport aux autres usagers. Par extension, l'outil permet également de contrôler les surlargeurs nécessaires sur un tronçon. Dans un premier temps, l'analyse du comportement des véhicules articulés a été une priorité. Le comportement du conducteur est un élément essentiel dans la réalité, pour ce type de représentation, on supposera des manœuvres progressives de braquage.

### 2.1. Hypothèses et principes retenus

Les considérations sont d'une part que le véhicule circule à une vitesse faible et d'autre part sans glissement sur la chaussée. A partir de ces hypothèses, on sait qu'un véhicule ne peut se déplacer que selon ses caractéristiques et ses positions précédentes. Les valeurs essentielles pour la création d'épures d'un véhicule simple sont : l'angle de braquage maximal, l'empattement et les dimensions de la caisse. Dans le cas d'un tracteur et d'une remorque standard, le chemin du dernier essieu de la remorque est toujours le plus court pour rejoindre le point d'accroche. Cette raison explique les débordements des semi-remorques en environnement urbain étroit.

Le transport exceptionnel a su adapter ses équipements afin de limiter les surlargeurs nécessaires.

### 2.2. Cas particulier des convois exceptionnels

Le projet s'est principalement porté aux éléments composants les éoliennes. La figure 1 permet de se rendre compte des dimensions de ces générateurs et des véhicules utilisés. Les remorques de transport ont évolué dans le but d'améliorer la maniabilité et de réduire les dimensions tant que possible.

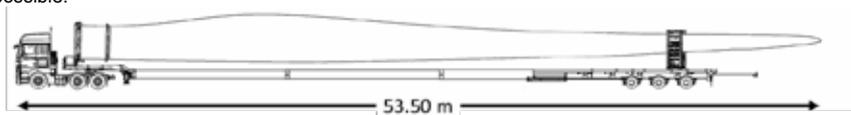


Figure 1. Convoi transportant une pale d'éolienne (Guttman)

Lorsque les charges sont particulièrement longues, l'usage de remorque à essieux orientables est particulièrement apprécié. Deux modes de pilotage sont possibles : la direction automatique et manuelle. Dans une zone dégagée de tous obstacles, la première est généralement utilisée, la seconde est quant à elle requise afin de manœuvrer les essieux de manière optimale. Le premier type de direction est facilement modélisable en considérant une relation directe reliant l'angle formé entre le tracteur et la remorque qui est répercuté sur les essieux de cette dernière. Le coefficient qui engendre cette orientation est l'opposé. Ainsi la remorque cisaille nettement moins les courbes sinueuses. L'autre possibilité ne dépend plus des relations entre les deux composants du convoi. L'assistant du chauffeur peut alors diriger les essieux dans une direction donnée. La seule contrainte est la distance entre le point d'accroche et le dernier essieu de l'élément tracté.

Il est également d'usage pour les charges volumineuses, comme les sections de mât d'éolienne, d'utiliser des remorques multiples. Le colis est utilisé comme une remorque suspendue entre deux remorques posées sur la chaussée. Ainsi, la charge affecte moins l'emprise au sol et les articulations facilitent grandement les manœuvres.

Les deux méthodes de girations des remorques ont donc été mises en équations mathématiques et implémentées dans le langage python.

### 2.3. Autres méthodes de manœuvres transcrites

Sous l'impulsion du bureau d'études, deux hypothèses ont été intégrées.

La première suppose que la remorque suit par son point d'attache au tracteur et par son dernier essieu une même trajectoire. Cette méthode constitue la meilleure configuration d'un véhicule. La surlargeur est donc réduite au minimum. Ce principe peut être réaliste lorsque le conducteur et les opérateurs sont particulièrement agiles, en outre l'entreprise peut alors vérifier les tronçons sinueux.

La deuxième est une extension de la première possibilité. En cas de dépassement arrière, le véhicule peut éviter les collisions en adaptant la trajectoire de l'essieu de la remorque. L'implémentation devra être modulable.

Ces deux principes ont été ajoutés aux fonctions python développées.

## 3. Support cartographique et données nécessaires à l'application

### 3.1. Orientation vers la solution QGIS

Le choix de QGIS comme support pour la création d'épures de giration provient du PFE de Marouane Boudhaim qui avait déjà développé une extension pour la préparation d'itinéraires pour la même entreprise. Ce logiciel SIG possède les avantages d'être libre, d'avoir un large panel de formats intégrables et d'être ajustable aux besoins par la création d'extensions en langage python.

### 3.2. Données nécessaires cartographiques à l'extension développée

L'intérêt de cette solution est la possibilité d'intégrer des fonds de cartes comme OpenStreetMap ou la base de données « ORTHO » de l'IGN selon des projections associées à des systèmes de coordonnées hétérogènes. De plus, ces données constituent aussi une aide précieuse pour une préparation de l'itinéraire. Les bâtiments, les murets et végétaux peuvent être identifiés facilement. Cependant, les ortho-photographies ne représentent pas l'état actuel de la situation puisque les acquisitions sont espacées de plusieurs années. L'inspection sur place permettra de détecter des modifications importantes. Les levés topographiques peuvent aussi apporter un niveau de détails plus élevé et daté avec des informations altimétriques et des hauteurs.

### 3.3. Géométries des convois

Comme précédemment évoqué, les épures de giration nécessitent une connaissance simplifiée de leur emprise au sol. Les convois exceptionnels sont particulièrement dépendants de la forme et du placement de la charge sur le véhicule. La solution développée a donc tenu compte de ce critère. Un générateur de fichier de géométrie permet de transcrire les informations du dossier dans le format de l'application. Les logiciels de SIG apportent également des indications par des attributs. Cette particularité a été reprise pour intégrer les hauteurs minimale et maximale du colis sur son support. La structure simple du fichier permet d'éventuelles modifications. Sans surcharger la représentation graphique, un curseur de hauteur affiche les éléments présents à cette hauteur. Les obstacles verticaux, en particulier les glissières pourront être mesurés sur place et leur démontage pourra être envisagé en cas préventif. La géométrie d'une remorque est donc décomposée selon des polygones différenciés par leurs élévations.

### 3.4. Rendus cartographiques générés par l'extension

L'extension permet en outre de représenter des convois à chaque sommet de la trajectoire lissée selon plusieurs types de giration. A partir des données attributaires des hauteurs et de la symbologie, l'utilisateur peut facilement identifier les conflits potentiels et prévoir les observations à réaliser lors de la reconnaissance. Les géo-traitements, outils d'analyse spatiale des SIG, apportent une solution de synthèse par regroupement des polygones représentés. Avec ou sans informations de hauteurs, les polygones résultants permettent de déterminer les obstacles visibles sur le fond de plan. La superposition de cette représentation prend tout son sens en plaçant des véhicules espacés.

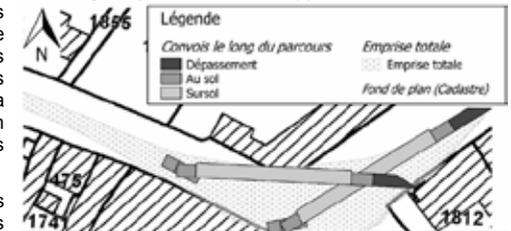


Figure 2. Exemple de rendu cartographique possible

L'entreprise doit aussi lors de ses études réaliser une étude préalable des aménagements. Le démontage des glissières, des panneaux et l'abattage d'arbres sont à préciser sur les éléments cartographiques. En cas de débordements de la chaussée sur des accotements non stabilisés, d'épaisse plaques métalliques peuvent être installées. La création d'éléments ponctuels et de polygones permet de mettre en valeur les modifications à apporter à l'environnement pour une traversée facilitée.

#### 4. Approche de la problématique en 3D

La planimétrie et les informations de hauteurs du convoi ne permettent pas de résoudre en toutes circonstances les capacités de franchissement des infrastructures à étudier. L'impossibilité de déplacer un nuage par rapport à un autre dans la majorité des logiciels commerciaux dans le cas d'une comparaison nuage-nuage ont poussé le projet à s'orienter vers une chaîne de traitements sur des supports libres.

##### 4.1. Méthodes de relevés expérimentées

Les données relevées de l'environnement doivent être des nuages de points. Ce type d'information n'est pas dégradé par la triangulation d'un maillage. Les méthodes d'acquisitions photogrammétriques dynamiques et lasergrammétriques statiques ont été expérimentées sur des différents ouvrages. Les trames régulières de points obtenus renseignent selon le capteur utilisé des informations suffisamment précises et exactes et utilisables pour les simulations. En effet, le transport exceptionnel n'exige pas une précision/décision millimétrique. De nombreux facteurs interviennent entre l'étude théorique et le cas pratique (conducteur, placement de la charge sur la remorque). L'utilisation de capteur grand public permet d'obtenir un niveau de détail suffisant pour l'analyse des distances séparant le mobile de son cadre d'évolution.

##### 4.2. Graduation des solutions

Afin d'optimiser l'étude spatiale, plusieurs scénarii ont été proposés. Ils partent de niveaux de détail grossier jusqu'à des analyses fines. Ces propositions sont les suivantes :

Tableau 1 : Méthodes envisagées pour la détection de conflits tridimensionnels

Méthodes	Segmentation verticale du nuage de l'environnement	Déplacement de la remorque		
		Primitives géométriques	Sections de nuage du mobile	Nuage du mobile
Données du convoi utilisées	Emprise totale du véhicule (2D)			
Résultats	Classification binaire l'environnement	Détermination des distances entre le mobile et l'environnement		
Avantages	Principe rapide	Identification graduée des distances		
Inconvénients	Absence d'informations de conflits verticaux	Carence d'informations d'intrusion ou non		

Ces méthodes sont encore à perfectionner. Par exemple, certains logiciels commerciaux spécialisés dans les épures de giration 3D apportent en plus une alerte de conflits entre le tracteur et la remorque lorsque les angles de roulis et de tangage sont atteints au niveau du pivot.

#### Conclusions et perspectives

Le développement de l'application métier de TES a poussé l'étude à démontrer les principes mathématiques des épures de giration. Les adaptations des remorques utilisées pour le transport de charges volumineuses sont prises en compte dans les méthodes de circulation et dans la génération des représentations. L'importance des niveaux de détails variables permet d'accroître les prévisions du déplacement du convoi. De plus, l'outil permet de générer sans difficulté des cartes probantes aux regards des clients. L'aménagement et les préparations sont intégrés à l'extension QGIS. Les premiers retours des utilisateurs sont positifs. Les demandes sont maintenant matérialisées, justifiées. L'usage atteste une simplicité et l'intégration sur une même plateforme des opérations auparavant réalisés sur plusieurs logiciels différents.

Le niveau de détails peut être affiné par une approche dans les trois dimensions. L'utilisation d'un nuage de points de l'environnement est requise pour l'ensemble des propositions. Ces données peuvent être acquises par lasergrammétrie statique ou mobile. Le PRT et PFE ont montré la possibilité de relever les secteurs par photogrammétrie dynamique. Les recherches de collisions s'organisent selon plusieurs modes opératoires. Chacune d'elle apporte des informations de plus en plus fines. L'usage de la photogrammétrie pour le relevé de convois demande à être amélioré.

Les perspectives sont principalement la détection de l'intrusion du véhicule dans l'environnement et la prise en compte du tracteur et des limites des angles du pivot. Une solution intermédiaire aux ortho-photographies et aux nuages de points serait à envisager par la suite.

## Mesures de petits objets par méthode photogrammétrique.

### Méthologie et analyse de précision.

PFE présenté par :

Arnaud Palha

Société d'accueil :

TPLM-3D

Directeur de PFE :

David Desbuisson

Correcteurs :

Emmanuel Alby et Tania Landes



#### 1. Introduction : La photogrammétrie pour mesurer de petits objets

Dans le cadre du développement de sa branche d'activité de photogrammétrie, la société TPLM-3D souhaite pouvoir utiliser les méthodes de photogrammétrie dans les configurations les plus variées. La société dispose déjà d'une grande expérience dans le domaine de la photogrammétrie aéroportée (drone) et architecturale. La société souhaite ainsi développer son savoir-faire vers l'acquisition de *petits objets*. Il est tout d'abord nécessaire de définir les *petits objets* au sens de TPLM-3D, la société considère comme un *petit objet* un élément compris entre une dizaine de centimètres (comme un artefact archéologique) et quelques mètres comportant des détails fins (comme une statue). Actuellement, TPLM-3D ne possède pas de méthodologie concernant l'acquisition de ces données et souhaite à travers ce projet trouver des solutions répondant aux besoins de ses clients.



Fig. 1 : Photographies des trois objets utilisés lors des expérimentations. (Voir le complément 1 pour les photographies en couleur)

Durant le projet, différentes problématiques seront abordées, notamment la question de la **mise à l'échelle**. Afin de pouvoir garantir la qualité géométrique des données produites, il faut pouvoir mettre à l'échelle le modèle avec une précision cohérente compte tenu des proportions de l'objet mesuré. Ce qui peut impliquer pour de *petits objets* d'acquérir des mesures extrêmement fiables.

Les textures des objets peuvent être variées, et il est ainsi possible de rencontrer deux cas particulièrement problématiques en photogrammétrie : les textures **uniformes** et/ou **réfléchissantes**. Les tests sur la pièce métallique **réfléchissante** (cf. Fig.1.droite) ou sur la baignoire à la fois **uniforme et brillante** (cf. Fig.1.bas) ont permis d'expérimenter les méthodes dans des conditions singulières et d'en déterminer les limites.

#### 2. État de l'art : Photogrammétrie et Multi-View Stereo

L'état de l'art réalisé concerne particulièrement les articles et les ouvrages traitant de *petits objets* ou d'objets présentant des caractéristiques problématiques. L'uniformité et la spécularité de certaines surfaces sont souvent les causes de complications en photogrammétrie. En effet, une partie des algorithmes utilisés s'appuie sur les variations des comptes numériques des pixels (p. ex. points homologues à partir de SIFT, corrélation épipolaire dense) et ne peut aboutir dans les configurations où les comptes numériques varient en fonction de la position des prises de vue (surfaces spéculaires) ou lorsque les comptes numériques n'évoluent quasiment pas (surfaces uniformes). Des chercheurs tels que Lovisa *et al.* (2014) acquérant des plaques de tôle ondulée contournent les difficultés liées au matériau en texturant les plaques avec un mélange hétérogène de peintures acryliques et en amatissant la surface à l'aide de féculés de maïs. Koutsoudis *et al.* (2013) étudient les performances de la photogrammétrie sur un objet relativement uniforme et se rendent compte qu'il est possible d'obtenir de bons résultats avec un protocole d'acquisition adapté. Les chercheurs concluent leur étude en proposant de projeter une texture avec un vidéoprojecteur sur les objets faiblement texturés afin d'améliorer la

qualité des produits, cette méthode a justement été expérimentée par Nicolae *et al.* (2014) dans le cadre de leur étude sur les acquisitions de *petits objets*. Cette dernière étude explore différentes problématiques liées aux *petits objets* (gestion de la profondeur de champ, spécularité, texture uniforme) cependant l'évaluation de la qualité de la géométrie n'a pas été abordée.

L'état de l'art a également permis d'étudier les algorithmes de *Multi-View Stereo* (MVS) issus du domaine de la vision par ordinateur en s'appuyant notamment sur la taxonomie de Seitz *et al.* (2006) et leur site web régulièrement mis à jour. Les algorithmes MVS servent à déterminer des informations 3D à partir d'images orientées. Les similitudes entre MVS et photogrammétrie sont donc importantes, la principale différence est d'ordre philosophique, alors que la photogrammétrie s'attache fortement à la fiabilité des résultats et à l'évaluation de la qualité des données obtenues, en vision par ordinateur la priorité tend généralement vers l'automatisation et la vitesse, parfois au détriment de la précision. Cependant, comme l'indiquent Kalantari et Kasser (2008) le dynamisme de la recherche en vision par ordinateur en fait un domaine difficilement négligeable pour le photogrammètre.

Une méthode de MVS nommée PMVS, basée sur les *patches* et développée par Furukawa et Ponce (2010), a été particulièrement étudiée dans le cadre de ce projet. En effet, d'après les évaluations de Seitz *et al.* (2016) la méthode est l'une des plus précises géométriquement, de plus la méthode est suffisamment différente de la corrélation épipolaire dense pour fournir des résultats distincts. PMVS détecte des coins d'Harris [Harris et Stephens (1988)] et des *blobs*<sup>1</sup> et les appaieille ensuite s'ils se trouvent sur la même ligne épipolaire. Cette étape engendre un nuage clairsemé et bruité, il s'ensuit une série de densifications et de filtrages permettant d'obtenir un nuage de points *orientés*<sup>2</sup>. Cet algorithme a été utilisé et évalué durant l'étude.

### 3. Acquisitions et traitements

Le projet doit servir à mettre en place des protocoles d'acquisitions et de traitements photogrammétriques adaptés aux *petits objets*. La qualité des données obtenues par photogrammétrie est dépendante des conditions d'acquisitions, ainsi cette étape doit être réalisée avec soin. Les traitements ont ensuite été réalisés avec le logiciel MicMac et avec le couple OpenMVG/PMVS.

Lors d'une acquisition, le choix du capteur et son paramétrage ont également une influence sur la qualité du modèle produit. Plusieurs appareils sont disponibles au sein de l'entreprise à savoir un capteur reflex Canon EOS 5D mII (équipé d'objectifs de 20 mm, 50 mm et 30-135mm), un appareil compact (Sony RX100 III) et un capteur grand-angle GoPro Hero 4. Les trois appareils sont adaptés à des usages différents, le Canon est le plus polyvalent, disposant du plus grand capteur et avec des objectifs à focale fixe, il permet d'obtenir des images peu distordues et stables. Il est également simple de régler les différents paramètres (ouverture, temps d'exposition, sensibilité...) afin d'obtenir des clichés exploitables. Le Sony permet avec son mode *macro* de capturer des détails très fins (inférieurs au millimètre), cependant la profondeur de champ est alors difficilement contrôlable et il est alors conseillé de travailler dans le cas normal (cf. complément 2). La GoPro est un peu moins adaptée aux acquisitions de *petits objets*, son grand-angle permet difficilement d'avoir des objets occupant la majorité de la surface du cliché même en redimensionnant l'image. La GoPro sera adaptée à des usages à de plus grandes échelles, notamment en intérieur où l'objectif grand-angle permettra d'obtenir une configuration stable même avec un faible recul.

L'appareil devra être paramétré de manière à limiter le flou et le bruit. Ainsi, il faudra diminuer le diamètre du diaphragme pour augmenter la profondeur de champ et augmenter le temps de pose afin d'amplifier l'intensité lumineuse traitée par le capteur sans modification de sa sensibilité (ce qui entraînerait une hausse du bruit). Afin de permettre un temps de pose long sans générer de flou de bougé, l'utilisation d'un trépied et d'un retardateur (ou d'une télécommande) sera conseillée pour limiter au maximum les contacts entre l'opérateur et l'appareil lors de la prise de vue.

Dans le cadre de photographies de *petits objets*, deux méthodes d'acquisition semblent s'imposer les acquisitions dans le cas *normal* et dans le cas *convergent* (cf. complément 2). Le cas normal est adapté aux objets ayant de faibles variations dans le sens des prises de vue tels que des bas-reliefs, alors que le cas convergent est plus adapté aux objets définis équitablement dans les trois dimensions.

Les problèmes liés aux textures **uniformes** et **spéculaires** peuvent être contournés lors de l'acquisition. Les textures uniformes sont éliminables en projetant un motif aléatoire sur l'objet durant les prises de vue. Ce motif doit rester stable durant l'acquisition. Afin, d'éviter les déformations liées à l'échauffement du projecteur, il est conseillé de prendre rapidement les photographies. Pour s'assurer de la stabilité du projecteur sur le trépied une interface en acier a été fabriquée afin d'augmenter la surface de contact entre le trépied et le projecteur. Les mouvements brusques doivent cependant être évités lors des prises de vue. Les textures spéculaires ont pu être éliminées à l'aide d'un aérosol amattissant, cependant l'amattissant donne une texture blanche particulièrement uniforme à la surface, il convient donc de la texturer soit à l'aide de la projection d'un motif soit en appliquant de la poudre de graphite<sup>3</sup>. Les reflets de la baignoire (Fig. 1.bas) n'ont pas été traités lors de l'acquisition, mais lors du traitement en dessinant des masques sur les zones concernées afin d'étudier la faisabilité de cette technique.

La mise à l'échelle des modèles a été expérimentée selon différentes techniques : impression de cibles à l'échelle sur du papier, détermination de cibles placées autour de l'objet soit par tachéométrie (intersections spatiales) soit un l'aide d'un scanner laser terrestre et d'un algorithme de détection de cibles automatique ou encore par l'acquisition d'un nuage clairsemé à l'aide du scanner laser terrestre et d'une mise à l'échelle à l'aide d'un algorithme ICP avec le facteur d'échelle libéré.

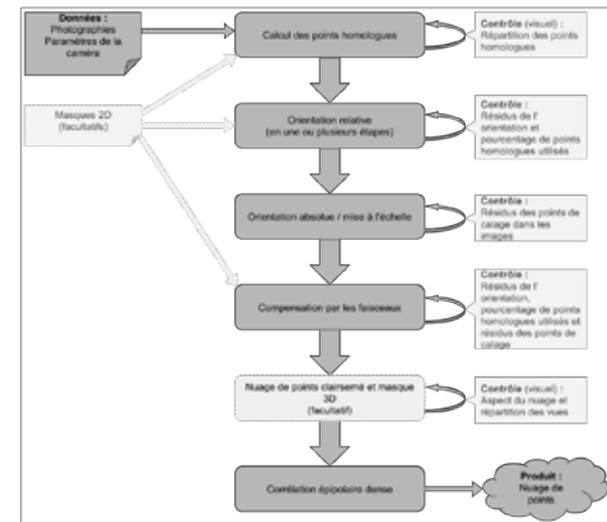


Fig. 2 : Séquence standard de traitement avec MicMac.

Le traitement des prises de vue avec le logiciel MicMac se déroule comme l'illustre l'organigramme Fig. 2. Le processus fonctionne de manière linéaire pour fournir un nuage de points de la scène<sup>4</sup>. À chaque étape, un contrôle permet de détecter les problèmes ou erreurs, les temps de calcul pouvant être longs, une détection précise des étapes problématiques accélère la recherche des erreurs potentielles. Les contrôles peuvent être visuels afin d'évaluer la cohérence globale des résultats d'un calcul ou basés sur des valeurs de résidus. Les seuils acceptables doivent être définis en fonction de la précision attendue.

Avec le couple de logiciel OpenMVG/PMVS, la méthodologie est également linéaire. OpenMVG va permettre de calculer des descripteurs (SIFT ou KAZE), de les appareiller et ensuite d'orienter ces images et construire un nuage clairsemé (*Structure from Motion*), cette dernière étape peut être réalisée en suivant deux méthodes, une séquentielle (qui ajoutera une à une les images au système de calcul) et l'autre globale (qui traitera toutes les images en un seul bloc). Ensuite, à partir de ces images orientées PMVS va permettre de densifier le nuage à l'aide de la méthode de MVS basée sur les *patches* (cf. état

<sup>1</sup> Les *blobs* sont des zones d'une image partageant des caractéristiques singulières, ils servent couramment de zones d'intérêt en vision par ordinateur car ils mettent en évidence des éléments complémentaires aux coins et aux contours.

<sup>2</sup> C'est-à-dire qu'une normale est associée à chaque point.

<sup>3</sup> De la poudre de craie colorée a également été testée, mais la matière créait des grumeaux non négligeables. Il serait intéressant de tester d'autres texturants tels que des colorants, de l'encre etc.

<sup>4</sup> Il est également possible de générer des orthophotographies avec MicMac mais ce type de produit est rarement pertinent pour de *petits objets*.

de l'art). La méthode basée sur OpenMVG et PMVS présente quelques intérêts comme la possibilité d'être simplement intégrable dans un développement interne ou d'être robuste aux valeurs aberrantes. Cependant, les tests effectués et les protocoles rédigés ne sont actuellement pas suffisamment complets pour permettre une utilisation en production. Des outils complémentaires tels que CMVS permettant de gérer plus efficacement les ressources de la station de travail devraient être étudiés et intégrés à la méthodologie.

#### 4. Évaluation des résultats

Afin d'évaluer les données obtenues lors des tests, il a été nécessaire de réaliser des modèles de référence. Dans cet objectif, des acquisitions avec un scanner à bras (FARO Edge ScanArm) des objets étudiés ont été réalisées avec l'aide M. Guillemain du laboratoire ICube. Ces données, obtenues sous la forme de nuages de points, bien plus précises que les données photogrammétriques sont considérées comme des valeurs vraies, c'est-à-dire des valeurs de référence pour l'évaluation de l'exactitude.

La comparaison des nuages a été réalisée avec le logiciel CloudCompare. Le logiciel propose deux méthodes différentes de comparaisons, une première de **nuage à nuage** et une seconde de **nuage à maillage**. La comparaison de nuage à nuage présente l'avantage de ne pas nécessiter de maillages et donc évite un traitement supplémentaire et permet un calcul relativement rapide. Le logiciel permet d'effectuer une modélisation locale du nuage de référence afin d'atténuer le systématisme lié à l'indépendance des deux nuages comparés. Cependant, la modélisation locale ne crée pas de surface orientée et les écarts sont représentés sous la forme d'une distance euclidienne et les écarts (positifs) ne peuvent être modélisés par une loi de Gauss, par contre ils le peuvent par une **loi normale repliée**. Une seconde méthode basée sur la comparaison nuage à nuage permet d'obtenir des distances algébriques en utilisant les normales des points. Cette méthode nommée M3C2 permet, s'il n'y a aucun systématisme, d'obtenir des valeurs suivant une **loi normale centrée en zéro**.

Il est également possible de calculer des distances algébriques (suivant une **loi normale**) en comparant les données à un maillage de référence. Les facettes du maillage étant orientées, les distances calculées peuvent être affectées d'un signe. Le maillage étant composé de facettes orientées, il devient possible de calculer des distances algébriques. Ces données sont plus intéressantes que les distances euclidiennes, car elles permettent d'analyser avec plus de finesse les erreurs.

Les écarts sont stockés comme des attributs associés à chaque point dans des *champs scalaires*, et les écarts peuvent ensuite être visualisés grâce à des codes couleurs (cf. complément 3). Les *champs scalaires* peuvent également être exportés sous la forme de fichiers colonnés ou avec séparateur afin d'être traités dans d'autres environnements.

#### 5. Conclusion et perspectives

Le projet a permis de développer une base de connaissances théoriques dans le domaine de la photogrammétrie et une ouverture sur le monde de la MVS. Tout en conservant une approche pragmatique, avec la mise en place de méthodes orientées à la fois vers les acquisitions et vers les traitements, l'étude s'est attachée à permettre la compréhension des bases théoriques et des concepts fondamentaux mis en œuvre durant les procédés photogrammétriques.

Les différentes expérimentations ont permis d'établir les principaux avantages et inconvénients des techniques développées dans le cadre de l'étude. L'évaluation des données obtenues a permis à TPLM-3D de connaître les précisions atteignables en fonction des configurations, ce qui permettra d'établir des devis plus fiables.

D'autres méthodes restent néanmoins à expérimenter comme l'utilisation de filtres polarisants qui permettrait d'éliminer les reflets sur des surfaces vernies ou en verre. Toutefois, ces filtres sont inefficaces sur les surfaces métalliques. Il serait intéressant d'étudier des algorithmes MVS se détachant des caractéristiques colorimétriques afin de recréer la géométrie comme, par exemple, les algorithmes calculant la géométrie à partir de silhouettes.

- **Références** : <https://db.tt/CVwtiBQ9>
- **Complément 1** : <https://db.tt/2LgcRcu8> [Photographies des objets de tests]
- **Complément 2** : <https://db.tt/uQXrTF4h> [Présentation des cas normaux et convergents]
- **Complément 3** : <https://db.tt/8yj8hQDE> [Visualisation des écarts concernant le buste]

*Remarque : En raison de la date avancée de rendu de ce résumé, les études de précisions n'étant pas totalement terminées, aucun résultat numérique n'est présenté.*

## Optimisation des procédés d'acquisition et de restitution des données structurées de réseaux enterrés.



### Application aux récolements de réseaux

PFE présenté par : **Noé Filosa**  
 Société d'accueil : **GALILÉ Détection**  
 Directeur de PFE : **Loïc Balthazard**  
 Correcteurs : **Emmanuel Alby**  
**Gilbert Ferhat**



## 1. Introduction

### Définitions :

**Récolement** : Vérification des constructions pour déterminer si les prescriptions imposées aux cahiers des charges ont été remplies (*Fédération internationale des géomètres, 1965*)

**Géoréférencement** : Détermination de la relation d'un ensemble de données géographiques à une référence géodésique (*Commission Géopositionnement du CNIG, 2016*)

**Ouvrage** : Tout ou partie de canalisation, ligne, installation [...] ainsi que les branchements et équipements ou accessoires nécessaires à leur fonctionnement (*glossaire de reseaux-et-canalizations.gouv.fr*)

### Contexte :

La bonne connaissance des réseaux enterrés représente un enjeu majeur pour les collectivités et les exploitants. Elle s'exprime par des besoins dits métiers, qui représentent les aspects techniques d'un ouvrage réseau, et par des besoins de géoréférencement précis, permettant une meilleure gestion du patrimoine existant et une diminution des dommages sur les ouvrages existants. Le contexte réglementaire actuel reflète particulièrement ce dernier besoin : en effet, l'arrêté du 15 février 2012 relatif à l'exécution de travaux à proximité des réseaux, aussi appelé arrêté DT-DICT, a fixé un certain nombre de normes et procédures pour réduire ces risques d'accidents. Il faut pour cela cartographier le linéaire existant s'il n'est pas connu, et récoiler les réseaux nouveaux durant les travaux de pose. Les problématiques diffèrent selon que l'on s'intéresse aux ouvrages existants ou neufs.



Figure 1 : détecteurs électromagnétique et géoradar

Les réseaux existants représentent un linéaire très important, et leur cartographie nécessite un lourd investissement de la part des collectivités. Leur géoréférencement est généralement réalisé à l'aide de techniques non-invasives, soit par détection électromagnétique (Fig 1G) dans le cas des réseaux conducteurs, soit par détection à l'aide d'un géoradar pour les conduites non conductrices (Fig 1D). La précision de ces méthodes dépend grandement de facteurs extérieurs, notamment de la nature du sol, de sa teneur en eau, ainsi que de l'encombrement du sous-sol. Des investigations par sondages destructifs ponctuels viennent parfois compléter ces mesures.

Le récolement en classe A des réseaux nouveaux est rendu obligatoire par l'arrêté de 2012, c'est pourquoi ces derniers ont été plus particulièrement étudiés dans le cadre de ce projet. En effet, la mesure en phase de travaux est particulièrement délicate, car le coût de l'opération ne doit pas grever le chantier, et la temporalité d'action est délicate, les tranchées ouvertes pour les travaux ayant vocation à être refermées dès que possible. Les contraintes liées à cette acquisition de données de réseaux sont fortes, tout particulièrement en contexte urbain dense, où les systèmes d'acquisitions par GNSS ne sont pas toujours pertinents (pertes de signal, phénomènes de multitrajets).

## 2. Etat des lieux

**Aspects réglementaires** : c'est principalement l'arrêté de 2012 qui régit l'acquisition des données de réseaux : il impose aux exploitants de réseaux la mise en œuvre de processus de mise à jour des données cartographiques des réseaux enterrés en service, ainsi que la réalisation d'investigations complémentaires sur les réseaux sensibles et ceux n'appartenant pas à la classe A.

Trois classes de précision sont définies, et permettent de qualifier l'incertitude maximale de localisation d'un ouvrage donné (Tableau 1). Ces incertitudes maximales de localisation représentent les valeurs à ne pas dépasser au sens de la condition c de l'article 5 de l'arrêté du 16 septembre 2003 relatifs aux classes de précision. L'exactitude tridimensionnelle moyenne recherchée sur les points de mesure (seuil a de l'arrêté de 2003), est donc plus restreinte, comme le montre le Tableau 2.

	Classe A	Classe B	Classe C
<b>Incertitude maximale de localisation (IML)</b>	IML ≤ 40 cm sur réseau rigide ; IML ≤ 50 cm sur réseau flexible	40 cm < IML ≤ 1.5 m (rigide) ; 50 cm < IML ≤ 1.5 m (flexible)	≥ 1.5 m

Tableau 1 : classes de précision des ouvrages géoréférencés, définies par l'arrêté du 15/02/2012

	Classe A	Classe B	Classe C
<b>Exactitude tridimensionnelle moyenne des points du réseau</b>	$\sigma(xyz) \leq 11$ cm (réseau rigide) $\sigma(xyz) \leq 14$ cm (réseau flexible)	11 cm < $\sigma(xyz) \leq 42$ cm (rigide) ; 14 cm < $\sigma(xyz) \leq 42$ cm (flexible)	-

Tableau 2 : exactitudes moyennes de positionnement à respecter lors des contrôles de précision

On considérera dans notre étude qu'une technique de mesure donnée sera réputée satisfaisante à la classe A si aucun point contrôlé ne dépasse un écart tridimensionnel de géoréférencement de 11 cm.

Les ouvrages existants sont géoréférencés par les concessionnaires en classe A, B ou C. Toutefois, ceux qui n'appartiennent pas à la classe A devront faire l'objet d'investigations complémentaires si des travaux sont prévus à proximité. Les ouvrages neufs, quant à eux, doivent obligatoirement satisfaire à la classe A. Le cahier des charges imposé par le maître d'ouvrage est souvent plus strict, et peut parfois nécessiter une précision de l'ordre du centimètre en altimétrie pour les réseaux gravitaires.

Toutes les données de localisation doivent apparaître sur un fond de plan géoréférencé. Les modalités de création et de mise à disposition de ce fond de plan destiné aux réseaux sont actuellement étudiées par la commission sur le Plan de Corps de Rue Simplifié (PCRS), mise en place par le Conseil National de l'information Géographique (CNIG). Parmi les pistes envisagées pour l'acquisition sont évoqués des systèmes de *mobile mapping* et de la photogrammétrie aérienne.

## 3. Mesure des réseaux nouveaux

**Encadrement des mesures de récolement** : La gestion du suivi des travaux dépend grandement des conditions des chantiers et des relations entre la Maîtrise d'Ouvrage (MO), l'entreprise de pose et le professionnel de la mesure. La volonté avérée et manifeste du maître d'ouvrage est la clef de voûte de la mise en place d'un récolement exhaustif et précis du réseau, et les règles, tacites ou portées au cahier des charges, influencent grandement la qualité de ce suivi.

**Etude des systèmes existants** : Les techniques de mesure de référence sont les mesures topographiques effectuées en fouille ouverte, à l'aide d'un tachéomètre ou d'un récepteur GNSS différentiel. D'autres techniques viennent les compléter, et sont basées soit sur l'utilisation de capteurs placés sur la conduite durant la pose de l'ouvrage, et détectés une fois la tranchée refermée, soit sur l'application des principes de photogrammétrie.

Plusieurs systèmes d'acquisition des données ont été étudiés au cours du projet, afin de mettre en évidence leurs caractéristiques et évaluer leurs limites, notamment des solutions tout-en-un de photogrammétrie terrestre, des capteurs passifs à ondes électromagnétiques (marqueurs EMS) et des capteurs passifs à radiofréquences (puces RFID) (Tableau 3).

Carac \ systèmes	Rover V10	RAPH / Photogrammétrie	Puces RFID	Marqueurs EMS	Scanner Laser Terrestrre	Drone
<b>Principe</b>	Capteurs photos couplés à un appareil de topographie	Système de photogrammétrie terrestre recalée sur cibles mesurées topographiquement après remblayage. Traitement des mesures semi-automatique	Capteurs RFID posés à même la conduite, puis mesurés en surface par détecteur spécifique	Capteur EMS posés à même la conduite, puis mesurés en surface par détecteur possédant une option de mesure de ce type d'ondes	Utilisation d'un SLT pour mesurer en 3 dimensions les éléments du réseau. Recalage sur des cibles ou sur des points particuliers présents sur la scène	Mesures par photogrammétrie aérienne. Calage sur des points d'appuis connus au sol
Ergonomie-simplicité	-	--	++	++	++	++
Fiabilité	+	+	+	+	++	+
Traitement des mesures	+	+	+	+	+	+
Rapidité	-	-	-	-	+	-
Coût	-	+	-	+	--	-
Richesse de l'information	++	+	++	++	+	+
Indépendance temporelle	--	-	+++	+++	+	+
Connaissances requises	+	+	+++	+++	+	-

Tableau 3 : Extrait du tableau de synthèse des méthodes d'acquisition existantes

**Proposition d'une méthode de mesure** : Afin de répondre aux contraintes exprimées en introduction, une méthode de mesure photogrammétrique par relèvement a été mise au point. Elle s'applique dans un contexte urbain dense, là où les solutions topographiques classiques sont moins performantes. Le principe consiste à positionner une canne surmontée d'un appareil photo sur le point dont on veut déterminer les coordonnées, et à photographier la façade située à proximité. Il est alors possible de calculer les éléments d'orientation externe (EOE) de la prise de vue ( $X_{Ci}$ ,  $Y_{Ci}$ ,  $Z_{Ci}$ ,  $\omega_i$ ,  $\phi_i$ ,  $K_i$ ).

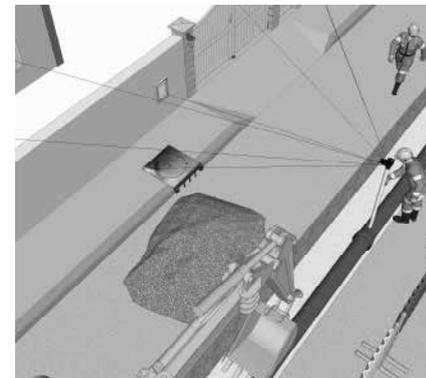


Figure 2 : principe du photorelevement

A partir des coordonnées du centre de perspective C et de l'angle  $\omega_i$ , on déduit les coordonnées du point stationné en retranscrivant les décalages de bras de levier mécanique entre le point principal de la caméra et le point de l'ouvrage. Les lignes de la figure 2 indiquent les points d'appui visés permettant de réaliser le photorelevement.

Les recherches initiales portaient sur le relèvement photogrammétrique simple d'une seule image, par résolution d'un système d'équations à 6 inconnues, formé par les équations de colinéarité, nécessitant 4 points d'appui pour chaque point d'ouvrage récolé.

La méthode finale retenue consiste à calculer par paquet un projet photogrammétrique intégrant plusieurs images pour lesquelles les EOE sont déjà connus, et quelques images dont on veut déterminer les coordonnées. Les images orientées sont obtenues au cours d'une photogrammétrie terrestre de façade, réalisée préalablement au démarrage du chantier. Ces images orientées et leurs EOE associés sont réinjectés par la suite localement pour déterminer les coordonnées des points des ouvrages récolés. Les mesures topographiques dites classiques ne concernent ainsi que le projet amont. Le suivi de chantier peut donc être réalisé sans avoir recours aux appareils de topographie.

Les points récolés par photorelevement sur le chantier d'application ont été systématiquement contrôlés par des mesures de référence, réalisées au tachéomètre. Au total, 114 points ont ainsi été contrôlés sur l'ensemble du linéaire. L'écart moyen en positionnement (EMP) tridimensionnel sur cet échantillon est de 5.5 cm, bien en deçà du premier seuil a de 11 cm mentionné au Tableau 2.

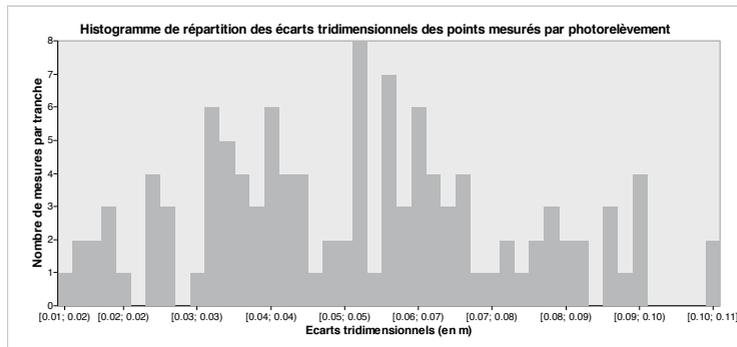


Figure 3 : histogramme des écarts constatés sur les 114 points contrôlés

Enfin, l'écart maximal tridimensionnel observé est de 10.6 cm (Fig 3). A l'issue des tests menés, la technique par relèvement photogrammétrique, utilisée avec la méthodologie adéquate, peut donc être considérée comme satisfaisant aux critères de précision de classe A requis par l'arrêté du 15 Février 2012.

Dimension considérée	E.M.P
Planimétrie (2D)	4.2 cm
Altimétrie (1D)	2.8 cm
Vecteur tridimensionnel (3D)	5.5 cm

Figure 4 : Ecart moyen en positionnement

#### 4. Restitution des données

Le format des livrables : Actuellement, les données livrées sont le plus souvent des fichiers de formes contenant des entités ponctuelles, linéaires, ou encore des polygones d'emprise. Mais les nouvelles méthodes d'acquisition permettent de fournir une plus grande variété de livrables, notamment des orthophotographies des réseaux, des PDF3D d'une zone, voire des objets 3D directement intégrables dans un système d'information géographique. Les tests ont permis de préconiser l'utilisation de certains de ces formats en fonction des besoins exprimés.

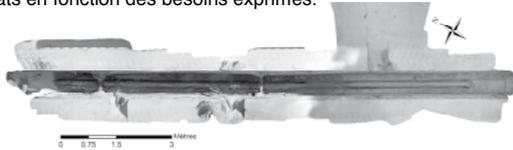


Figure 5 : exemple d'orthophotographie d'un réseau AEP

Garantie de précision : Les textes encadrant la cartographie des réseaux s'attardent sur la précision attachée aux mesures des ouvrages. Cette étude a montré qu'au delà des méthodes d'acquisition, les choix dans la façon de restituer les éléments du réseau ont un impact au moins aussi importants que ceux du moyen utilisé, sans être pour autant toujours pris en compte par les utilisateurs finaux. Il est donc proposé d'intégrer systématiquement dans les livrables non seulement la mention du moyen de mesure, mais aussi les critères utilisés pour la simplification de la représentation.

#### 5. Conclusions et Perspectives

Conclusions : Lors de ce PFE, nous nous sommes intéressés aux différentes problématiques inhérentes aux récolements de réseau, et nous avons proposé une technique simple et rapide de récolement en fouille ouverte des ouvrages en milieu urbain dense. La méthode de mesure proposée répond à tous ces critères, et la précision obtenue est en accord avec les exigences de la classe A.

Perspectives : En l'état, le photorelevement s'appuie sur la mise en place préalable d'un projet de photogrammétrie terrestre. Il est envisageable dans un proche avenir d'utiliser directement des images issues d'acquisitions par multicapteurs dynamiques comme le *Pegasus:Backpack*, qui pourraient être obtenues lors des campagnes d'acquisition pour la réalisation des plans de corps de rue simplifiés (PCRS). La procédure en serait d'autant plus simplifiée, et le coût réduit.

## Correction troposphérique des interférogrammes issus d'images radar par mesures GNSS et modèle global d'atmosphère

PFE présenté par : **Vincent Dubreuil**  
 Société d'accueil : **CNAM/ESGT, Laboratoire GeF/Equipe L2G**  
 Directeur de PFE : **Elisabeth SIMONETTO**  
 Correcteur : **Gilbert FERHAT**



### 1. Introduction

L'interférométrie d'image radar est une technique permettant de mesurer les déplacements verticaux du sol de quelques millimètres par an et sur de larges étendues. Hormis certaines limites liées à la nature des sols, les mesures doivent être corrigées de l'atmosphère. En effet, la propagation de l'onde radar dans l'atmosphère induit un retard de trajet non négligeable dans la mesure de déplacements fins.

Cette étude consiste en la mise en place d'une méthode de correction basée sur un modèle d'atmosphère. L'inconvénient de cette approche est une résolution temporelle limitée et une faible résolution spatiale de ces modèles.

Les mesures GNSS permettent d'estimer le délai troposphérique et elles peuvent aussi être utilisées pour cette correction. Cette méthode est déjà utilisée par l'équipe L2G, l'étude consistera alors à exploiter également ces mesures pour améliorer les données issues du modèle précédent.

Le contexte de cette étude s'inscrit donc dans un projet de l'équipe L2G pour corriger la mesure InSAR des phénomènes atmosphériques par estimations des retards troposphériques (ZTD). Pour cela, deux méthodes sont utilisées, une correction par GNSS et par modèle global d'atmosphère. Les problématiques qui se posent donc dans ce Projet de Fin d'Etudes sont la méthode d'interpolation des délais troposphériques issus du GNSS qui se doit d'être utilisée, la qualité qui peut être attendue sur les cartes interpolées et l'intérêt de la combinaison d'un modèle global d'atmosphère avec des mesures GNSS.

### 2. L'interférométrie radar

L'interférométrie d'images radar ou InSAR est une technologie relativement récente, son principe a été décrit en 1974 par Graham et elle a été mise en application pour la première fois avec des capteurs aéroportés en 1986 par le JPL. Cette technique de télédétection permet de déterminer des points en trois dimensions à partir de deux images RSO. A partir de là, des modèles numériques de terrain peuvent être produits et les déformations du sol quantifiables avec une précision centimétrique. Cette technique est basée sur l'exploitation des amplitudes et des phases constituant une image RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture).

La formation des images radar provient de l'émission d'impulsions micro-ondes par l'antenne du satellite vers une cible. Elle capte ensuite l'intensité de l'impulsion renvoyée et la phase, modulée de l'onde retournée. La mesure de phase renseigne sur la durée du trajet aller-retour satellite-cible. Les différences de phase pixel à pixel entre deux images RSO permettent de calculer l'altitude du terrain à condition que les images aient été acquises dans une configuration géométrique adéquate. C'est à dire que la ligne de base entre les deux antennes respecte des conditions critiques.

L'interférométrie permet de produire une image d'interférences qui contient une information topographique pertinente. Cette image est issue de la différence de phase entre l'image référence ou l'image maître et l'image esclave après un recalage sub-pixellique (au 1/10e de pixel). De cette différence de phase faite pour chaque pixel, un interférogramme possédant une phase et une

amplitude sera produit. Dans le cadre de cette étude, nous travaillons en DInSAR, c'est-à-dire que le changement de phase du signal entre deux images radar acquises sur la même zone à deux dates différentes est mesuré. A cette différence de phase, la phase topographique issue d'un MNT est retirée, ce qui permet de quantifier la déformation du sol dans la ligne de visée (notée LOS) du capteur entre ces deux dates.

### 3. La représentation de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse qui entoure la Terre, elle se compose de plusieurs couches ayant chacune leurs propres caractéristiques (composition, gradient de température). Ces différences de caractéristiques vont créer des variations du comportement du signal du capteur d'une couche à l'autre. Les principales couches à considérer dans cette étude sont l'ionosphère et la troposphère car elles vont avoir une influence sur les signaux émis par les capteurs.

- L'ionosphère est la partie ionisée de l'atmosphère qui se situe dans la couche supérieure de l'atmosphère, elle s'étend d'environ 50 km à 1000 km d'altitude. Elle englobe la mésosphère et une partie de la thermosphère et est composée d'ions et d'électrons, issus de la réaction des molécules de gaz et du rayonnement ultraviolet provenant du Soleil.
- La troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère elle s'étend du sol jusqu'à environ 8 km d'altitude aux pôles et 17 km à l'équateur. C'est dans cette partie de l'atmosphère que la quasi-totalité de la vapeur d'eau est contenue et donc que les phénomènes météorologiques (nuages, pluie) se forment. Dans le langage courant la troposphère est désignée comme étant la partie non ionisée de l'atmosphère et s'étend donc jusqu'à 50 km d'altitude et englobe la stratosphère.

La modification des conditions atmosphériques entre les dates d'acquisition des images produit une erreur d'estimation du parcours du signal radar. Il se pose alors la question de leur correction par des données externes à l'InSAR ou de la modélisation de ces milieux par le biais des modèles atmosphériques.

Un modèle atmosphérique est un modèle mathématique construit autour de l'ensemble des équations dynamiques primitives qui régissent les mouvements atmosphériques. Il existe deux types de modèles atmosphériques : les modèles globaux qui couvrent l'ensemble de la Terre et les modèles régionaux qui n'en couvrent qu'une partie. Ils sont complétés par les observations météorologiques de surface afin d'en améliorer la résolution. L'assimilation des données de surface et de satellite permettent à ces modèles de fournir des valeurs météorologiques tels que la température, la teneur en vapeur d'eau ou les vents à la surface et le long des niveaux de pression. Ainsi il est possible d'extraire depuis les modèles globaux d'atmosphère des profils verticaux de température, d'humidité spécifique et une hauteur géopotentielle sur les niveaux de pression à un point donné de la grille du modèle dans la scène radar pour corriger les interférogrammes.

### 4. Traitement des données

Au cours de ce Projet de Fin d'Etudes trois types de données ont été traités afin d'aboutir à la mesure de la déformation du sol. Il s'agit des données interférométriques issues d'images radar, des données GNSS et des données issues du modèle d'atmosphère global ERA-Interim.

Le traitement des données radar s'est effectué avec le logiciel DORIS. Il a été utilisé afin de produire les interférogrammes, le traitement se déroule selon les étapes suivantes :

- Recalage de l'image maître avec l'image esclave
- Génération de l'interférogramme
- Calcul et retrait de la phase topographique issue d'un MNT
- Déroulement de la phase avec l'outil SNAPHU (outil externe à DORIS)
- Production des données géoréférencées

Le traitement des données GNSS pour être intégrées dans la chaîne de traitement InSAR se déroule en plusieurs parties :

- Obtention des délais troposphériques (ZTD) aux dates d'acquisition des images radar. En déterminant la

composante hydrostatique (ZHD) avec le modèle Vienna ZHD et la composante humide (ZWD) par estimation.

- Interpolation de cartes de ZTD au pas de l'image radar géoréférencée
- Correction de la mesure InSAR en chaque pixel : phase initiale – phase troposphérique estimée

Le traitement des données issues d'un modèle global d'atmosphère s'est effectué avec le logiciel TRAIN. Il a été utilisé pour corriger les interférogrammes à partir du modèle d'atmosphère ERA-Interim, le traitement se déroule selon les étapes suivantes :

- Récupération des données météorologiques
- Calcul des retards troposphériques sous forme d'une carte au pas souhaité
- Correction des phases interférométriques en chaque pixel

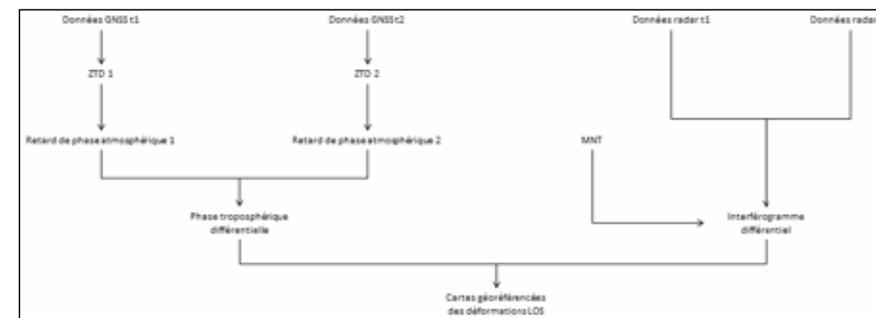


Figure 1 : Schéma de la combinaison des données pour la mesure de la déformation du sol

### 5. Exploitation des données issues des traitements

Les données utilisées lors de cette étude concernent le Piton de la Fournaise sur l'île de la Réunion. L'avantage de ce site est qu'il s'agit d'un volcan toujours en activité qui est étudié par des équipes de chercheurs depuis de nombreuses années. Il existe donc sur place plusieurs réseaux de surveillance (sismique, mesure de déformation et géochimique), ainsi qu'une grande base de données (MNT, GNSS et radar).

La première analyse qui a été réalisée concernait le traitement interférométrique.

Les résultats du traitement interférométrique ont permis de déceler sur les interférogrammes non corrigés de l'atmosphère, une déformation dans la ligne de visée du satellite de 22 à 34 cm vers le satellite au sud du cratère de Dolomieu et de 16 à 22 cm à l'est du cratère. Ces résultats ont ensuite été comparés avec des séries temporelles GPS pour en évaluer la cohérence. A partir de ces traitements et analyses, des cartes de déformations LOS ont été produites.

Puis, nous avons analysé les mesures de délais troposphériques issues du GNSS, afin de déterminer une méthode d'interpolation des ZTD adéquate.

Pour cela plusieurs tests ont été réalisés puis validés en évaluant la qualité des résultats par validation croisée :

- Détermination du pas de départ pour les interpolations successives jusqu'au pas d'arrivée souhaité
- Détermination de la zone d'interpolation, choix entre une interpolation sur toute l'île ou uniquement sur la zone d'étude
- Utilisation ou non de certaines stations très éloignées du site d'étude pour l'interpolation
- Détermination de l'interpolateur : interpolation par splines ou par krigeage

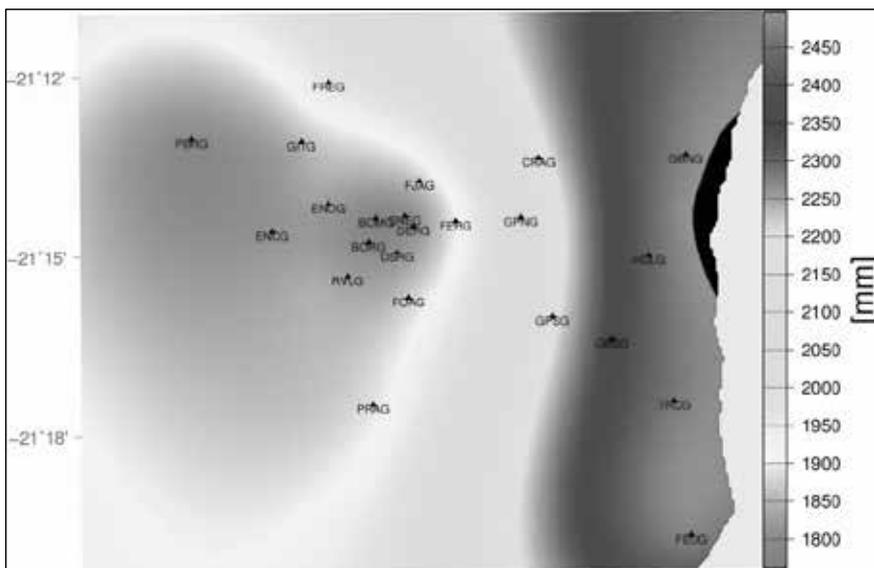


Figure 2 : Carte des ZTD interpolés

A partir de ces traitements et analyse, des cartes des ZTD interpolés ont été produites.

Ensuite nous avons analysé les délais troposphériques issus des calculs avec le modèle d'atmosphère global ERA-I. L'analyse de ses résultats consistait en une comparaison de chacune des composantes avec celles déterminées par GNSS.

Ces différents traitements amenant ensuite à la correction des interférogrammes des effets atmosphériques pour produire des cartes des déplacements corrigés de la zone d'étude

## 6. Conclusions et perspectives

Cette étude avait pour objectif d'analyser la qualité des cartes interpolées à partir du GNSS selon différentes stratégies d'interpolation, de mettre en place une méthode de correction basée sur un modèle d'atmosphère, de comparer les deux types de cartes et de produire les cartes de retards troposphériques et les cartes des déplacements corrigés sur notre site d'étude.

Dans un premier temps, il a fallu traiter les données interférométriques afin de produire les interférogrammes non corrigés. Dans un second temps il a fallu traiter les ZTD estimés par GNSS qui ont été utilisés pour établir une méthode d'interpolation, puis comparés aux données issues des calculs avec modèle global d'atmosphère.

Cette étude a permis de vérifier si le GNSS présente une utilité dans la correction des effets atmosphériques des interférogrammes et permet de juger de l'intérêt d'une combinaison d'un modèle d'atmosphère et de mesures GNSS pour la correction troposphérique des interférogrammes issus d'images radar.

## Adaptation de levé LiDAR aérien aux référentiels géodésique et altimétrique du Sri Lanka

PFE présenté par : **Benjamin Weyer**  
 Société d'accueil : **FUGRO GEOID SAS**  
 Directeur(trice) de PFE : **Jean-Louis Carme**  
 Correcteurs(trices) : **Gilbert Ferhat**



### 1. Introduction

#### 1.1. Contextualisation du projet

Ce projet de fin d'études, intitulé "Adaptation de levé LiDAR aérien aux référentiels géodésique et altimétrique du Sri Lanka" est lié au programme de développement "Climate Resilience Improvement Project", soutenu par la Banque Mondiale<sup>1</sup>. Ce programme a pour objectif de réduire la vulnérabilité des personnes exposées aux risques naturels et d'améliorer la capacité du gouvernement à répondre efficacement en cas de catastrophe naturelle.

Dans le cadre de ce projet, FugroGeoïd SAS a été retenue pour effectuer le levé LiDAR (Light Detection and Ranging) de plusieurs bassins versants, particulièrement vulnérables du Sri Lanka représentés sur la Figure 1 : DeduruOya, Gal Oya, Gin Ganga, KalaOya, Mahaweli Ganga et MalwathuOya. Ces levés LiDAR mènent à la création de différents produits finaux : modèles numériques de terrain, mosaïques orthophotos et cartes topographiques.

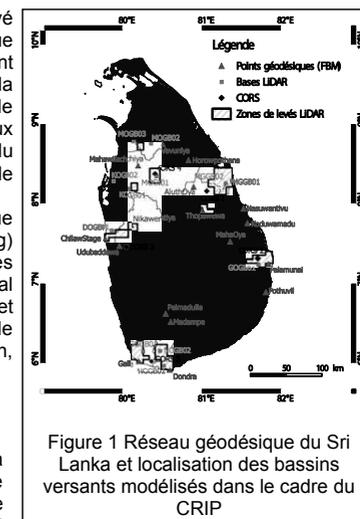


Figure 1 Réseau géodésique du Sri Lanka et localisation des bassins versants modélisés dans le cadre du CRIP

#### 1.2. Objectifs

Dans le contexte géodésique particulier du Sri Lanka (l'homogénéité de la précision du canevas géodésique n'est pas certaine et le pays ne dispose pas de modèle de géoïde national), le rattachement planimétrique et altimétrique des mesures LiDAR constitue une véritable problématique, à l'origine du sujet de ce projet de fin d'études. Cette problématique se rencontre dans de nombreux pays en voie de développement. Les méthodes étudiées ici devront être transposables à des levés LiDAR similaires exécutés, à l'avenir, dans d'autres pays.

#### 1.3. Géodésie du Sri Lanka

Le réseau géodésique se compose d'un point fondamental (ISMD, Institute of Surveying and Mapping Diyatalawa), 10 points principaux, 48 points issus de la triangulation historique, 20 repères géodésiques planimétriques et altimétriques dits FBM (Fundamental Benchmarks) et 194 points de base.

Le système géodésique en vigueur est le Sri Lanka Datum 1999 (SLD99). Les coordonnées des points connus sont données à la fois dans le SLD99 et dans la réalisation locale du World Geodetic System 1984. La réalisation locale du WGS84 n'étant pas clairement définie, ce système sera appelé WGS84 (Sri Lanka) ou WGS84 (SL).

Il s'accompagne d'un référentiel altimétrique normal-orthométrique dont l'altitude zéro est fixée par le marégraphe de Colombo et dont les mailles de nivellement sont délimitées par les FBM. Les hauteurs

<sup>1</sup><http://www.worldbank.org/projects/P146314/?lang=en>, consulté le 15 mai 2016

ellipsoïdales de ces points sont également connues mais entachées d'un biais moyen de 1.75 m déjà constaté par le passé.

## 2. Adaptation planimétrique

Le premier objectif de ce projet de fin d'études est de déterminer les coordonnées de points permettant le rattachement planimétrique du levé LiDAR. On distinguera ici des points « primaires » correspondant aux stations semi-permanentes dites CORS (Continuously Operating Reference Stations) mises en place par FugroGeoid et les points « secondaires » correspondant aux FBM existantes et aux nouvelles bornes créées pour les besoins du projet. Ces nouvelles bornes servent de points d'appui et de contrôle pour les levés LiDAR et seront intégrées au réseau géodésique sri lankais. Les points calculés (CORS, FBM et bases LiDAR) sont représentés sur la Figure 1.

### 2.1. Calcul du réseau primaire et secondaire

La première étape de l'adaptation planimétrique consiste à déterminer le positionnement absolu des CORS dans le référentiel ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame 2008) à l'aide du logiciel scientifique Bernese 5.2. développé par l'institut astronomique de l'université de Berne. Pour garantir un positionnement absolu de qualité, 31 stations permanentes du réseau IGS réparties dans un rayon de 4500 km autour du Sri Lanka sont sélectionnées. Elles sont représentées sur la Figure 2. Pour effectuer ce calcul, nous disposons de mesures GNSS réparties en 17 sessions de 24 heures. Ces sessions permettent de calculer les lignes de base reliant les CORS aux stations IGS et les lignes de base entre CORS. L'utilisation d'un logiciel comme Bernese se justifie par la longueur des lignes de bases calculées. Bernese permet d'obtenir de meilleurs résultats qu'un logiciel commercial car il prend en compte un nombre plus grand de paramètres (orbites finales des satellites, corrections d'horloge des satellites, fichiers de calibration des antennes utilisées, corrections liées aux marées océaniques et terrestres, ...). Après calcul, nous obtenons les coordonnées finales des cinq CORS dans l'ITRF2008, à l'époque 2016.32 (époque moyenne des mesures), présentées dans le Tableau 1.

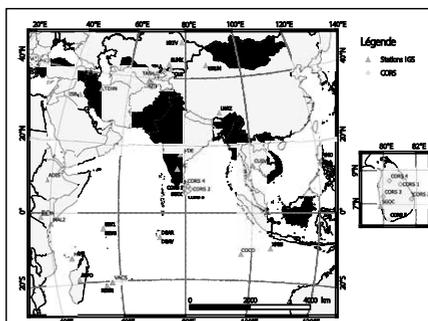


Figure 2 Localisation des stations IGS permanentes utilisées pour le rattachement du réseau de CORS à l'ITRF2008

	X (m)	Y (m)	Z (m)	$\sigma_x$ (mm)	$\sigma_y$ (mm)	$\sigma_z$ (mm)
CORS1	986589.055	6233288.434	920380.090	0.10	0.28	0.09
CORS2	897419.281	6261374.928	815490.674	0.11	0.33	0.09
CORS3	1120944.261	6222680.276	834631.934	0.12	0.36	0.10
CORS4	1050804.529	6223146.551	918339.645	0.12	0.34	0.10
CORS5	1073921.793	6251699.063	663039.208	0.12	0.33	0.10

Tableau 1 Coordonnées ITRF2008 à l'époque 2016.32 des cinq CORS installées au Sri Lanka. Calcul effectué avec Bernese 5.2.

Le Tableau 1 montre la précision des coordonnées calculées, les écart-types  $\sigma_x, \sigma_y$  et  $\sigma_z$  sont inférieurs à un millimètre. Pour la suite du projet, ces coordonnées pourront être utilisées comme coordonnées de référence.

Les lignes de base reliant les CORS aux points secondaires et entre points secondaires sont calculées avec Trimble Business Center. Afin d'intégrer l'ensemble des points dans le réseau géodésique national, le réseau est compensé au sens des moindres carrés à l'aide de Geolab.

### 2.2. Compensation et rattachement du réseau

Le réseau est calculé dans deux référentiels géodésiques, à la fois dans l'ITRF2008 à l'époque 2016.32 et dans le Sri Lanka Datum 1999.

Tout d'abord une compensation contrainte en s'appuyant sur les cinq CORS calculées précédemment est réalisée. Ce calcul crée une réalisation régionale de l'ITRF2008, à l'époque 2016.32. Les

coordonnées de ces points sont utilisées lors de l'analyse géodésique, pour appliquer différents modèles de vitesse afin de tenter de mieux définir le système géodésique WGS84(SL). L'objectif final de ce calcul de compensation est de rattacher les bornes (bases LiDAR) construites par FugroGeoid au réseau existant. Pour ce faire, les coordonnées d'une FBM (Mahawilachchiya) sont considérées comme fixes et une compensation libre est réalisée. Le calcul est réalisé dans un premier temps dans le système WGS84 (SL), puis transformé en SLD99, à l'aide de la transformation à 7 paramètres décrite par Abeyratne et al. (2010)<sup>2</sup>. La Figure 3 montre la cohérence entre le réseau calculé et les coordonnées des points connus (après suppression d'un point aberrant ayant des écarts planimétriques supérieures à 200 m). La majorité des écarts est comprise entre -2 cm et 2 cm. Sur l'ensemble des quatorze points connus, l'écart moyen constaté est de 0.4 cm en Nord et de 1.0 cm en Est, avec un écart-type de respectivement 1 cm et 4 cm. Cependant, malgré une bonne cohérence globale les écarts maximaux ne sont pas négligeables (compris entre -8 cm et 10 cm). De plus un écart moyen de -1.53 m sur les hauteurs ellipsoïdales est constaté.

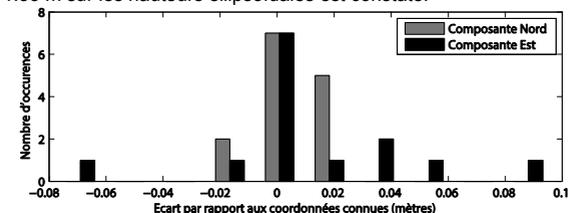


Figure 3 Histogramme des écarts entre coordonnées recalculées et coordonnées théoriques

Ainsi, la cohérence du réseau sri lankais est globalement validée (les coordonnées les moins précises sont corrigées) et les coordonnées calculées des bornes nouvellement construites sont intégrables au réseau existant.

### 2.3. Analyse géodésique

Le but de cette analyse est de mieux définir le référentiel géodésique WGS84 (SL). Pour ce faire, différents modèles de vitesse (Morvel 2010, Nuvel 1A, ITRF2000 (D&A)) et différents changements d'ITRF (ITRF2000, ITRF94 et ITRF90) sont appliqués aux coordonnées calculées dans l'ITRF2008 à l'époque 2016.32 pour essayer de se rapprocher des coordonnées WGS84 (SL).

Pour tous les points connus la différence entre les coordonnées théoriques des FBM et les coordonnées calculées précédemment dans l'ITRF2008 à l'époque 2016.32 puis transformées est calculée. La transformation qui approche le mieux les coordonnées théoriques est la transformation de l'ITRF2008 à l'époque 2016.32 à l'ITRF2000 à l'époque 2001.27 en appliquant le modèle de vitesse ITRF2000. La norme moyenne des écarts entre les coordonnées théoriques et les coordonnées calculées est alors de 30 cm, comme le montre la Figure 4.

Rien ne permet cependant d'affirmer avec certitude que le Sri Lanka Datum 1999 et le WGS84 (SL) sont rattachés à l'ITRF2000 à l'époque 2001.27. L'écart minimum ne correspond vraisemblablement pas au rattachement ITRF du WGS84 (SL). En effet, le Sri Lanka Datum est officiellement entré en vigueur durant l'année 2000. On se heurte ici à l'un des problèmes récurrents pour tout travail de géodésie, à savoir la documentation associée aux différents travaux antérieurs souvent insuffisante et imprécise.

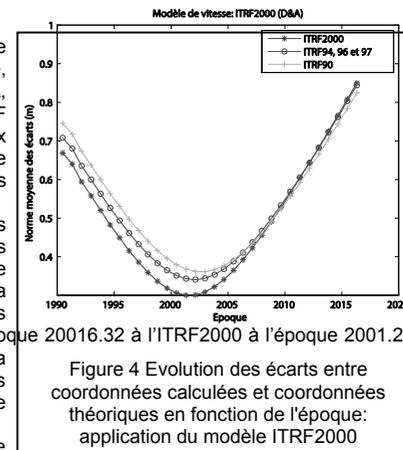


Figure 4 Evolution des écarts entre coordonnées calculées et coordonnées théoriques en fonction de l'époque: application du modèle ITRF2000

<sup>2</sup>Abeyratne, P. G. V., Featherstone, W. E., & Tantrigoda, D. A. (2010). On the geodetic datums in Sri Lanka. *Survey Review*, 42(317), 229-239.

### 3. Adaptation altimétrique

La deuxième partie de ce projet de fin d'études est consacrée à l'adaptation altimétrique. Nous cherchons ici à améliorer un modèle géopotential global (par exemple EGM2008) sur l'ensemble des zones levées. Cette amélioration permet de rendre le modèle global cohérent avec le référentiel vertical en usage (ici le MSL Colombo) et sa réalisation, tout en permettant d'avoir une estimation plus fine des ondulations du géoïde. Ainsi, nous obtenons des altitudes déterminées à partir de mesures GNSS plus exactes, et améliorons l'exactitude altimétrique du nuage de points obtenu lors des acquisitions aériennes.

#### 3.1. Méthode

L'amélioration du modèle de géoïde s'effectue en deux temps principaux.

On calcule tout d'abord les anomalies d'altitude engendrées par le terrain résiduel (irrégularités topographiques à la surface de la Terre) :

- Calcul du modèle de terrain (MNT) en grille régulière sur la zone d'étude à l'aide du développement en harmoniques sphériques du DTM2006.0 (utilisé pour la détermination de l'EGM 2008.0). Pour chaque point de la grille de longitude  $\lambda$  et de latitude  $\varphi$  une altitude  $z^{DTM2006.0}(\lambda, \varphi)$  est déterminée.
- Calcul du modèle de terrain résiduel par soustraction du MNT calculé précédemment au MNT plus précis et plus fin SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) :  $z_{RTM} = z^{SRTM} - z^{DTM2006.0}$ . Le MNT issu de l'expression en harmoniques sphériques est utilisé tel un filtre passe haut.
- Calcul des anomalies d'altitudes résiduelles par la méthode d'intégration par prisme.
- Correction du modèle géopotential global par addition des anomalies d'altitudes résiduelles. On obtient des ondulations du géoïde plus fines sur la zone d'étude.

Puis on applique la méthode de retrait-restauration aux ondulations géoïdales issues des points GPS nivelés :

- Retrait des ondulations du modèle géopotential corrigé de la contribution du terrain résiduel.
- Interpolation des anomalies d'altitude résiduelles par la méthode du krigeage.
- Restauration des ondulations précédemment retirées.

L'interpolation après retrait des grandes longueurs d'onde du modèle géopotential corrigé permet de diminuer l'influence de la méthode d'interpolation en grille choisie car le retrait réduit la valeur absolue des hauteurs interpolées.

L'ensemble des étapes de calcul est implémenté dans un programme développé en Python.

#### 3.2. Résultats provisoires

Le calcul du modèle de terrain résiduel est conforme aux attentes, on retrouve des écarts plus importants dans les parties montagneuses de l'île que dans les parties de plaine. Ceci mène à des anomalies d'altitude également plus importantes en zone montagneuse qu'en zone de plaine. Par exemple, sur une zone de test située dans la partie montagneuse, au Sud de l'île, les anomalies liées au terrain résiduel sont proches de 10 cm alors que sur une zone de plaine au Nord de l'île, les anomalies sont de l'ordre du centimètre.

Ces résultats permettent maintenant de corriger le modèle géopotential global sur le territoire sri lankais et d'appliquer la méthode de retrait-restauration sur les quatorze points GPS nivelés à notre disposition.

### 4. Conclusion

Ce projet de fin d'études a permis d'élaborer une méthode de rattachement d'un levé LiDAR aérien dans un pays en voie de développement. Cette méthode se décompose en deux temps. Tout d'abord, l'élaboration d'un canevas planimétrique de points d'appui précis et homogènes grâce à des mesures GNSS de qualité (temps d'observations conséquent, choix judicieux des points mesurés) couplé avec l'emploi de logiciels scientifiques de calcul et de compensation (ici Bernese et Geolab). Puis, dans un second temps, l'amélioration du modèle de géopotential global (ici EGM2008), grâce à la modélisation d'ondulations résiduelles liées à la topographie. Cette amélioration permet d'adapter le modèle global au référentiel en vigueur et à sa réalisation et d'obtenir des ondulations du géoïde plus fines, améliorant ainsi l'exactitude des altitudes déterminées par mesures GNSS et donc du nuage de points obtenu par levé LiDAR.

Cette étude est, conformément aux objectifs, transposable à des projets futurs. La méthode d'adaptation planimétrique et les procédures d'utilisation des logiciels employés ont été décrites et l'adaptation altimétrique a été automatisée grâce au développement d'un logiciel dédié.

## Évaluation des mesures de fils tendus par photogrammétrie en vue de l'automatisation des mesures d'écartométrie pour l'accélérateur de particules LHC au CERN.

PFE présenté par : **Camille Venduvre**

Société d'accueil : **CERN**

Directeur de PFE : **Dirk Mergelkuhl**

Correcteur : **Pierre Grussenmeyer**



### 1. Contexte de l'étude

L'alignement des aimants dans l'accélérateur de particules LHC est fondamental pour assurer le passage et la stabilité des faisceaux sur leurs orbites. Les faisceaux sont maintenus au centre de leurs tubes par de puissants électroaimants refroidis par hélium liquide. Cet ensemble est fiducialisé<sup>1</sup> à l'aide de repères fixés au cryostat. L'alignement vertical est assuré par nivellement direct.

L'alignement planimétrique est quant à lui assuré par écartométrie. L'écartométrie, qui consiste à mesurer la distance orthogonale entre une référence (un fil tendu dans notre cas) et un point, permet de remplacer des mesures d'angles sur de longues distances par des mesures de distances courtes.

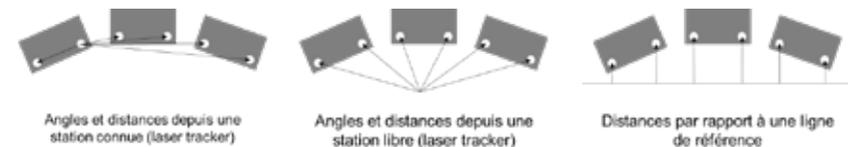


Figure 1: Remplacement d'angles et distances par des distances courtes

La mesure de distance pour l'écartométrie est actuellement réalisée avec des règles optiques Sylvac. La mesure est entièrement manuelle et donc assez longue. Grâce aux récentes évolutions technologiques dans la photogrammétrie, et tout particulièrement l'amélioration des résolutions, il nous est possible de réaliser des mesures de fils par photogrammétrie. La mesure du fil et des cibles permet une éventuelle automatisation qui sera nécessaire d'ici une dizaine d'années au vu de la radioactivité croissante dans le tunnel.

### 2. Étude de précision de la mesure photogrammétrique

La première partie de l'étude consiste en une évaluation de la précision. Pour cela un banc de test a été fabriqué puis mesuré par une machine à mesurer tridimensionnelle du CERN. La construction de ce banc de test ne permet que l'exploitation de la planimétrie pour les fils. Les mesures ont été réalisées avec un appareil photo professionnel D3X de Nikon et le logiciel Aicon 3D Studio pour le traitement photogrammétrique. De nombreux paramètres logiciels (méthode de détection, nombre de photos, nombre de points calculés sur la ligne etc.) et matériels (fil, éclairage, Iso, ouverture couleur etc.) ont été testés et une configuration optimisée a été déterminée. La mesure de répétabilité et d'exactitude permet d'évaluer la précision accessible lors des mesures de photogrammétrie. Pour se rapprocher de l'écartométrie, les précisions seront calculées sur les distances radiales. Dix projets ont été réalisés

<sup>1</sup>La fiducialisation est le fait de relier la géométrie de référence d'un composant (axes, plans, points etc.) à des références extérieures. Il s'agit d'un changement de repère qui facilite les mesures étant donné que l'assemblage des composants empêche la mesure de ces géométries.

dans un temps restreint d'une demi-heure. Chaque projet a permis de calculer 50 distances (5 distances par ligne pour 10 lignes).

L'erreur moyenne quadratique s'élève à  $6 \mu\text{m}$  pour une précision de  $5 \mu\text{m}$  et une moyenne des erreurs de  $-3 \mu\text{m}$ . Ces erreurs sur les distances prennent en compte l'erreur sur la détermination du fil et l'erreur sur la détermination de la cible elle-même de  $2 \mu\text{m}$ .

La mesure présente une meilleure précision que celle de l'écartométrie qui est de  $20 \mu\text{m}$ . Cependant, ces résultats correspondent à des conditions de laboratoire et doivent être confirmés par des mesures à taille réelle par la suite.

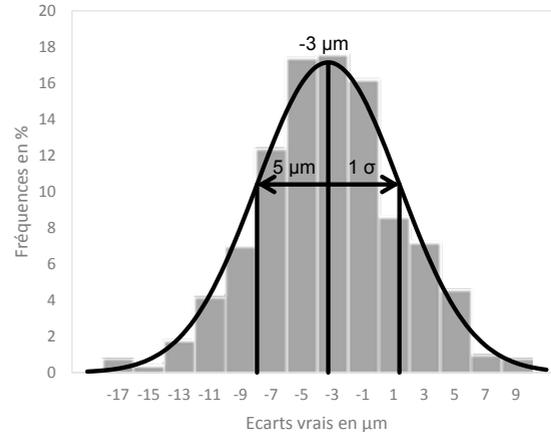


Figure 2 : Répartitions des erreurs sur les distances fil-point

### 3. Faisabilité et répétabilité de la mesure à taille réelle

Après ces mesures sur banc de test, des mesures ont été réalisées sur une maquette taille réelle d'un cryostat du LHC. Ces tests ont pour but de prouver la faisabilité de la mesure dans des conditions géométriques proches de la réalité.

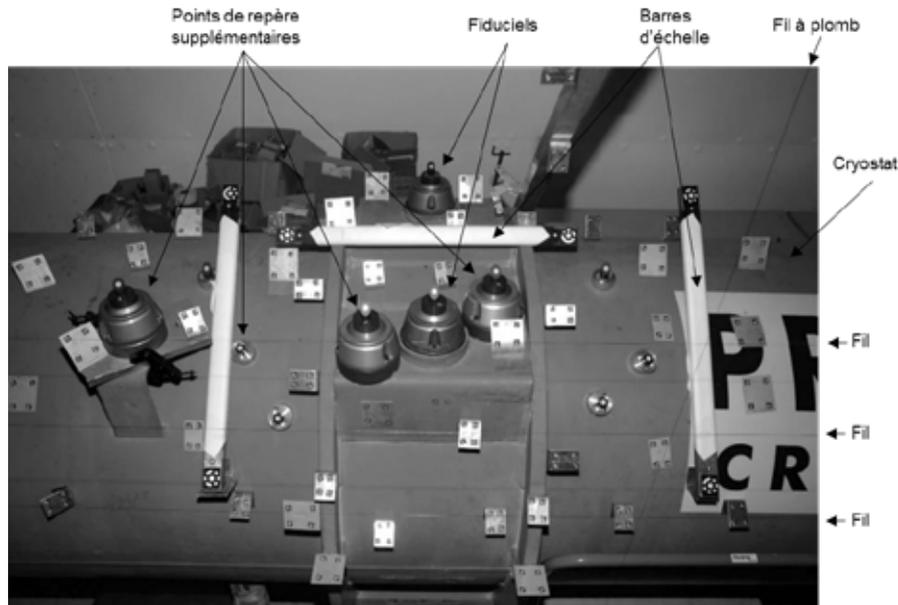


Figure 3: Configuration du test à taille réelle

Le cryostat visible ci-dessus permet de tester la nouvelle méthode de mesure à échelle réelle. L'orientation est réalisée à l'aide de cibles réparties sur la zone de prise de vue. La mise à l'échelle

quant à elle est effectuée avec trois barres d'échelles mesurées par machine à mesurer tridimensionnelle. Un fil à plomb permet de déterminer la verticale du lieu afin de calculer les distances radiales.

Les points principaux sur le cryostat sont le point sur le repère central et le point sur le repère en profond. Ces deux repères sont identiques sur tous les aimants mais d'autres points ont été ajoutés sur l'aimant. Une mesure par théodolite permet de comparer les résultats avec un autre moyen de mesure totalement indépendant tout en réduisant l'introduction d'erreurs puisque les mêmes cibles sont mesurées.

### 4. Développement d'une procédure alternative de mesure des fils

La procédure de mesure a été validée dans le cadre d'une mesure de distance d'un fil à un point de référence. Cette mesure est pour l'instant dépendante de la solution AICON 3D studio. Le CERN souhaite s'affranchir de cette dépendance à un logiciel commercial dont le code et l'algorithme ne sont pas sous son contrôle (évolution du logiciel, coût de la licence, compatibilité). De plus, l'utilisation contraint l'immobilisation d'une licence dans le cas d'une automatisation totale. La solution algorithmique d'Aicon requiert l'intervention de l'utilisateur pour la détection approximative du fil. Dans le but d'une automatisation, le développement d'une nouvelle méthode de détection de fil totalement automatique est ainsi nécessaire.

Le CERN dispose déjà d'une solution pour l'orientation et la calibration de photos avec le logiciel MoveInspect d'AICON qui a démontré sa robustesse dans des applications précédentes.

Une nouvelle méthode pour la détection et le calcul des fils est nécessaire. Ce processus doit s'affranchir de l'intervention de l'utilisateur et démontrer sa robustesse pour être validé.

Une méthodologie simple regroupant des algorithmes éprouvés a été développée et testée lors de l'étude.

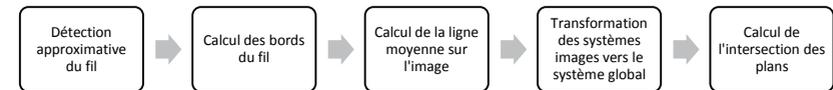


Figure 4 : Processus de mesure de fil tendu par intersection de plans

La détection approximative du fil est nécessaire pour trouver sur chaque image la zone d'intérêt où calculer la ligne représentant le fil. La détection du fil est réalisée à l'aide d'un algorithme de RANSAC appliqué à une photo sur laquelle ont été positionnés des masques.

Dans le cadre d'un développement, de nombreuses droites peuvent être détectées sur une photo à l'aide d'une transformée de Hough ou par RANSAC. Cependant, de nombreuses contraintes peuvent permettre de trier ces droites. La droite recherchée est approximativement horizontale, elle traverse toute la photo et elle est encadrée de deux droites parallèles (une pour chaque bord) avec un écart connu.

Le calcul des bords de la ligne est réalisé par l'opérateur edge de Trujillo-Pino et al<sup>2</sup>, un opérateur de détection de bords subpixelaire.

Le calcul de la ligne moyenne sur l'image est réalisé par régression linéaire orthogonale. Cette partie provient de l'adaptation du programme de calcul des fils en 3D réalisée plus tôt dans l'étude.

Il faut ensuite projeter la ligne de l'image vers l'espace objet. La méthode consiste à choisir deux points de la droite (de préférence les deux extrémités) et de projeter ces points dans l'espace objet grâce aux équations de colinéarité.

Le calcul d'intersection des plans est ensuite à réaliser par un calcul en bloc.

<sup>2</sup> Trujillo-Pino, A., Krissian, K., Alemán-Flores, M. & Santana-Cedrés, D., 2013. Accurate subpixel edge location based on partial area effect. Image and Vision Computing, 31(1), pp.72–90.

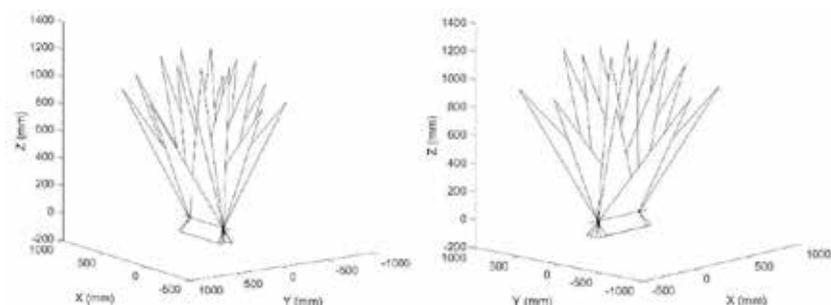


Figure 5: Représentation de l'intersection des plans formés par la ligne sur l'image et le centre de perspective

La figure ci-dessus présente le résultat de cette nouvelle méthode. Les 16 plans représentent les mesures de fils sur les 16 photos. Le centre de perspective de chaque photo est au sommet des triangles. La base d'un triangle correspond à la projection de l'image d'un fil vers l'espace objet. Les différents plans se coupent théoriquement en une ligne.

Pour vérifier l'efficacité de la méthode, ces plans ont été comparés à la ligne calculée avec le logiciel Aicon 3D Studio utilisé lors de la première partie de l'étude. Les résultats sont contenus dans le tableau ci-contre. Les deux distances orthogonales en 3D correspondent aux distances calculées aux extrémités du fil, là où les écarts sont les plus importants.

Ces résultats permettent de confirmer cette nouvelle méthode par une autre déjà validée. Les photos 7, 11 et 15 sont entachées d'une erreur due aux ombres portées ce qui explique des écarts plus importants par rapport à la ligne de référence.

Ce test nous permet de valider cette nouvelle méthode de calcul de fils par intersection de plans. Tous les algorithmes sont accessibles en open source.

photo	distances à la ligne théorique en $\mu\text{m}$	
1	0.6	1.3
2	3.8	15.1
3	6.4	-2.3
4	-16.2	14.1
5	-3.3	-7.9
6	-4.3	2.6
7	-37.6	-32.9
8	2.3	-6.8
9	-2.5	-3.3
10	4.7	-6.2
11	14.4	18.9
12	-2.4	0.5
13	7.7	2.1
14	-1.1	5.1
15	-75.7	-78.9
16	0.4	2.0

Tableau 1 : Distances orthogonales entre la ligne de référence (Aicon 3D studio) et les différents plans aux extrémités de la ligne

## 5. Conclusion et Perspective

L'écartométrie est un processus important de l'alignement des accélérateurs au CERN. De nouvelles contraintes forcent à réfléchir en amont à de nouveaux moyens de mesures permettant une automatisation accrue et réduisant l'exposition des hommes à l'activation progressive du tunnel.

L'étude a permis de souligner des résultats très prometteurs pour le calcul de distances et la détection de fils. Une précision de 10 à 20  $\mu\text{m}$  sur la détermination des distances permet de démarrer un processus de tests plus poussé pour une éventuelle automatisation de la mesure. Cependant, ces résultats sont toujours proches des conditions laboratoire.

Le test d'une nouvelle méthode pour le calcul des fils valide de nouvelles possibilités pour gagner en indépendance vis-à-vis des logiciels commerciaux.

L'étude d'automatisation est longue et comporte des tests à grande échelle, allant jusqu'à la mesure d'un huitième de la distance du LHC. De même, la concertation avec d'autres équipes du CERN chargées de la téléopération dans le tunnel est nécessaire. Néanmoins, une telle automatisation pourra permettre d'éviter l'exposition du personnel à des conditions dangereuses tout en garantissant la qualité d'alignement nécessaire au bon fonctionnement du LHC.

## L'apport des nouvelles technologies dans la réalisation des divisions en volumes au regard de l'état de l'art, des pratiques en vigueur et de la jurisprudence.

PFE présenté par : **Antoine CREMMEL**  
 Société d'accueil : **Cabinet JG. LAMBERT et Associés**  
 Directeur de PFE : **M. Régis LAMBERT**  
 Correcteur : **M. Jacques LEDIG**



### 1. Introduction

#### Définition :

La division en volumes est une technique juridique qui consiste à diviser un immeuble en fractions distinctes, définies géométriquement en trois dimensions.

Ces fractions forment des volumes privatifs d'espace dont la définition repose sur des plans, des coupes et des cotes altimétriques dans le système NGF-IGN 69.

Dans le cadre de la loi du 7 mai 1946 instituant l'ordre des géomètres-experts, seule cette profession est habilitée à fixer les limites de l'unité foncière supportant la division en volumes ainsi que les volumes.

#### Contexte :

Elaborées initialement pour des cas particuliers d'aménagements urbains avec imbrication de domaine public et privé, les divisions en volumes se sont développées aux ensembles immobiliers comportant des affectations et des modes de gestion différents et sont en cours de démocratisation. S'agissant d'un montage relativement complexe, généralement réalisé dans des zones à forte valeur économique, les enjeux économiques sont potentiellement importants.

Par ailleurs, le développement des technologies de mesure en trois dimensions (Scanner Laser Terrestre (SLT), Maquette numérique, ...), utilisées de manière adéquate, apporte des outils parfaitement adaptés à la division en volumes d'ensembles immobiliers complexes.

En partant de ce constat, le cabinet JG Lambert et associés souhaite améliorer ses pratiques en matière de division en volumes afin de **conseiller** les différents acteurs de manière efficace en utilisant tous les outils permettant une meilleure compréhension des enjeux. Cette **valorisation** du travail du géomètre-expert permet de **garantir** et de sécuriser ces opérations en limitant le risque de contentieux.

### 2. La division en volumes : une technique peu réglementée, née de la pratique

Aussi surprenant que cela puisse paraître, la division en volumes ne se base sur aucun texte de référence. Cette organisation de la propriété immobilière a été élaborée uniquement en s'appuyant sur la notion de droit de superficie existant dans le code civil et en l'extrapolant.

Ce procédé est un mode d'organisation purement conventionnel. Ceci implique qu'aucune disposition supplétive n'existe et que les praticiens, géomètres-experts comme notaires, ne peuvent négliger aucun élément lors de l'établissement des documents.

#### La division en volumes dans la législation :

L'absence de base légale engendre une faible présence dans les textes de lois. Une mention est faite dans les décrets 55-22 et 55-1350 respectivement des 04.01.1955 et 14.10.1955 relatifs à la publicité foncière, concernant la méthodologie de désignation des fractions d'immeubles.

En Alsace-Moselle, en raison du droit local, le cadastre présente des particularités de fond comme de forme. L'existence d'une notice sur l'établissement des esquisses d'étages ou relatives à des droits de

superficielles est l'une de ces particularités. Cette notice, bien que succincte concernant notre sujet, précise les documents nécessaires et exige notamment la création de plans et coupes annexés à l'état descriptif de division, lors du dépôt du document aux services fonciers.

#### Les règles de l'art ordinaires

Afin d'harmoniser la pratique de volumétrie de ses membres et de sécuriser leur utilisation, l'ordre des géomètres-experts a rédigé les règles définissant les bonnes pratiques à respecter pour éviter tout problème déontologique.

### 3. Les risques juridiques de la division en volumes

La première partie de mon étude a consisté en la recherche des différents risques de contentieux existant lors de la division d'un ensemble immobilier en volumes. Je me suis appuyé sur les jurisprudences des différentes juridictions pour cette étude.

Les cas les plus fréquents de jugements concernent la rédaction d'états descriptifs de divisions pour contourner l'application obligatoire du statut de la copropriété ou pour passer outre l'obtention des autorisations d'urbanisme qui s'appliquent en cas de division foncière.

Dans le premier cas, pour pouvoir déroger au statut de la copropriété, il ne doit pas exister de parties communes et la construction doit posséder les caractéristiques d'un ensemble immobilier complexe. Par ailleurs, outre le respect de ces conditions, il est obligatoire de prévoir une organisation contractuelle répondant à la nécessité d'une « convention contraire » telle qu'exigée au deuxième alinéa de l'article 1 de la loi du 10 juillet 1965 fixant le statut de la copropriété des immeubles bâtis. La question de la qualification de l'ensemble immobilier est elle-même source d'insécurité juridique. En effet pour qu'on puisse considérer un groupe d'immeubles comme un ensemble immobilier complexe, il est nécessaire :

- qu'il existe un élément fédérateur (terrain, aménagement, services),
- que la complexité de l'ensemble soit prouvée (juxtaposition de volumes aux fonctions spécifiques, absence de parties communes, pluralité des maîtres d'ouvrages)
- qu'un critère d'hétérogénéité soit reconnu. Ce critère en particulier peut être source à interprétation et fragilise le montage. En effet, cette hétérogénéité peut résulter de la nature du foncier, du régime juridique des propriétaires (domanialité publique, personnes morales de droit public, ...).

Cette obligation d'être en présence d'un ensemble immobilier complexe tend à se réduire. De nombreux praticiens considèrent en effet que la division en volumes est un outil courant, expressément prévu par le deuxième alinéa de l'article 1 de la loi du 10 juillet 1965 et qu'il est par conséquent utilisable tant que l'immeuble ne peut être requalifié en copropriété.

Dans le second cas de mésusage, la réponse judiciaire est plus ambiguë. S'il est en effet admis par une jurisprudence constante qu'une division qui se résume au découpage vertical de volumes, sans limitation de hauteurs ou de profondeurs et sans imbrication, soit requalifiée en division foncière, la question est moins tranchée pour des montages plus subtils. Ainsi dans l'arrêt « Ville de Strasbourg », le Conseil d'Etat refuse la requalification d'une division en volumes en découpage parcellaire, considérant qu'en l'espèce il n'y avait pas transfert de jouissance exclusive sur le volume créé vu qu'un volume d'assiette comportant le sol a été créé en plus des volumes à bâtir. Cet arrêt ouvre une voie dans l'utilisation de la division en volumes, mais il serait risqué de s'y aventurer sans confirmation de ce premier jugement.

Enfin un point important qui n'a pas encore été porté devant les tribunaux concerne la définition des volumes. Il est en effet courant que deux définitions des volumes coexistent. Une première, géométrique, qui provient de points définis dans le système de projection planimétrique en vigueur et un système altimétrique (IGN-NGF 69) et une seconde définition littérale qui se trouve dans l'état descriptif de division, qui se rattache aux éléments de la construction.

Des écarts ou des incohérences entre ces deux définitions peuvent apparaître, et bien qu'une tolérance existe sur les limites des volumes, la question de la valeur relative de ces deux désignations des volumes n'a jamais pu être tranchée.

Cette réalité est d'autant plus vraie pour les divisions en volumes réalisées en ventes en l'état futur d'achèvement où le géomètre-expert conseille fortement le récolement qui n'a lieu que dans de rares cas.

On peut supposer que tant que la construction supportant la division en volumes existe, puisque la définition géométrique correspond aux tolérances de constructions, ce soit la définition littérale qui fasse foi et que la définition géométrique aura pour principal rôle la localisation des volumes en l'absence de construction (avant construction, pour les zones non construites et en cas de destruction de l'ensemble immobilier).

### 4. Les nouvelles technologies du géomètre-expert

La première étape de cette étude technique a consisté en l'audit des pratiques actuelles du cabinet.

Pour l'ensemble de mes travaux, j'ai décidé de distinguer deux cas de figures : celui où la division s'appuie sur un ensemble immobilier construit et celui où l'état descriptif de division est basé sur un projet d'architecte pour un bâtiment à construire.

Pour le premier cas, j'ai constaté l'utilisation des outils classiques du géomètre (Disto®, Station totale, Measurix®) et un travail manuel nécessitant de bonnes capacités de réflexion en trois dimensions. Dans le second cas, le géomètre ne peut se baser que sur les plans et coupes fournis par l'architecte.

Mon travail a consisté, à partir de ces constats, à proposer de nouvelles solutions afin :

- de faciliter et d'automatiser la création des divisions en volumes,
- de garantir l'absence d'erreurs dans les documents livrés,
- d'améliorer le conseil au client en facilitant la compréhension du montage juridique en général et les imbrications de volumes en particulier.

Le cabinet Lambert étant équipé d'un scanner laser terrestre Faro Focus X330, j'ai mis en place une procédure d'utilisation, adaptée aux divisions en volumes. S'appuyant sur un relevé géoréférencé de l'ensemble des bâtiments et de la totalité de l'assiette foncière de l'opération, ce relevé sera la base de travail pour l'ensemble des opérations de générations ultérieures de plans de niveaux, de coupes et de plans de servitudes.

Dans l'attente de la généralisation du BIM, j'ai proposé la réalisation d'une maquette de travail. Cette maquette reprend les éléments utiles à la rédaction des documents, à savoir :

- la structure des immeubles (mur, cloisons, toiture, ...)
- les zones de circulation piétonne et véhicule
- la position des réseaux
- les portes et fenêtres

La maquette ainsi constituée permet une approche globalisée de la division en volumes sans restriction liée à l'absence d'informations fournies par l'architecte. Par ailleurs la génération de plans est quasiment instantanée une fois les gabarits de dessins réalisés.

Enfin pour ce type de chantier, j'ai proposé une procédure de récolement rapide au scanner 3D. Une fois le chantier de construction réalisé, il s'agit de relever au scanner 3D l'extérieur complet de l'ensemble immobilier, les limites de volumes ainsi que les parties qui ne sont pas conformes au projet d'architecte support de la division.

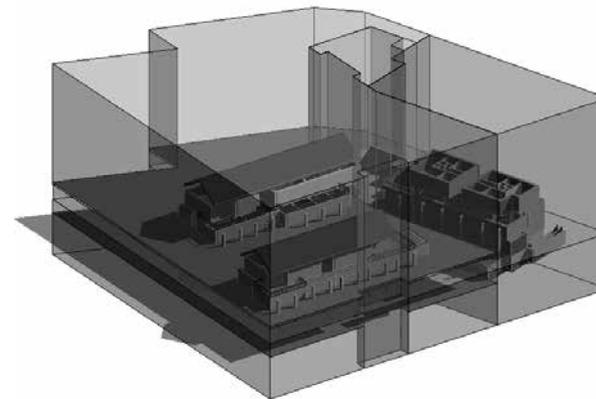


Figure 1 : Division en volumes réalisée sous Revit

## 5. L'apport des nouvelles technologies

Les nouvelles procédures vues précédemment ont été comparées aux méthodes conventionnellement utilisées sur des chantiers tests.

Ceci nous a permis de quantifier les bénéfices et pertes de chacune des méthodes que nous pouvons résumer dans le tableau ci-dessous.

Méthode de travail Critère d'évaluation	Division en Volumes en VEFA			Division en Volumes sur construction existante		
	Méthode conventionnelle	Maquette de travail	Maquette BIM	Méthode conventionnelle	Tripod Measurix	Scanner Laser Terrestre
Risque d'erreur	++	++	+	++	++	++
Temps global nécessaire	++++	+++	+	++++	+++	+++
Temps de terrain				++	+++	++
Temps de traitement				++++	+++	+++
Temps pour modification de la division en volumes	++++	++	++	++++	++++	++
Cout spécifique (logiciels, formation, ...)	+	+++	++++	+	++	++++

Tableau 1 : Comparaison des méthodes de division en volumes

## 6. La division en volumes : des attentes juridiques pour les praticiens

Afin d'améliorer la sécurité des futures divisions en volumes il est nécessaire pour le législateur d'envisager une modification du code civil reconnaissant de manière non équivoque la division en volumes. Ce besoin est exprimé par de nombreux praticiens qui souhaiteraient même un élargissement du champ d'application de la division en volumes.

Par ailleurs avec l'émergence du BIM, le géomètre-expert disposera d'un outil fiable et interopérable dans lequel intégrer une division en volumes amènera une information complémentaire pour la gestion de l'immeuble.

Il faut cependant également envisager des modifications règlementaires afin de régler les questions de :

- valeur juridique de la maquette
- précisions d'établissement de la maquette
- garantie de fiabilité de la maquette

## 7. Conclusion et perspectives

Ce PFE nous a permis d'adapter les nouveaux outils qui sont à la disposition du géomètre-expert pour que l'élaboration des documents soit facilitée et rendue plus efficace.

La division en volumes est amenée à se développer de manière croissante dans les prochaines années en raison de la densification urbaine. Pour cela une évolution du cadre règlementaire est attendue par la profession.

L'incorporation dans la maquette BIM de l'ensemble des données juridiques relatives à l'immeuble, états descriptifs de division, règlement de copropriété, limites foncières donnera au géomètre-expert son rôle de garant de la propriété foncière.

Comme l'a souligné l'ordre des géomètres-experts lors de son congrès de juin dernier, le géomètre-expert a toute sa place dans ce travail collaboratif qu'est le processus BIM, la place de l'expert juridique et foncier.

## Publicité foncière et pratiques professionnelles du géomètre-expert en cadastre fiscal, juridique et Alsace-Moselle



PFE présenté par :

**David SCHERRER**

Société d'accueil :

Conseil Régional de Strasbourg de l'Ordre des Géomètres-Experts

Directeur de PFE :

M. Claude SCHALLER

Correcteur :

M. Jacques LEDIG



## Introduction

Le Conseil Régional de Strasbourg est l'antenne locale de l'Ordre des Géomètres-Experts qui a pour mission de surveiller l'exercice de la profession de géomètre-expert en France.

La loi du 7 mai 1946, en son article 1-1°, confère à l'Ordre des Géomètres-Experts le monopole de pouvoir exercer les études et travaux topographiques qui fixent les limites des biens fonciers et à ce titre de lever et dresser à toutes les échelles et sous quelque forme que ce soit, les plans et documents topographiques concernant la définition des droits attachés à la propriété foncière.

En Alsace-Moselle, cette activité professionnelle est particulière puisqu'elle s'exerce dans le cadre spécifique du droit local, conformément aux dispositions de la loi du 31 mars 1884, sur le renouvellement et la conservation du cadastre.

Ce Projet de Fin d'Études (PFE) intervient après que le Conseil Régional de l'OGÉ ait décidé d'organiser un colloque. Prévu pour le 18 novembre 2016, il aura pour but de présenter les spécificités du cadastre d'Alsace-Moselle aux élus locaux qui ont permis, en injectant les sommes nécessaires, la numérisation en cours des croquis cadastraux.

Le projet vise à comparer les principales pratiques professionnelles du géomètre-expert en Europe en matière de publicité foncière en cadastre à vocation juridique, fiscal et de type Alsace-Moselle. À cet effet, les systèmes fonciers européens sont étudiés, d'abord au niveau des régimes de publicité foncière et des vocations des cadastres, puis à travers de cas pratiques rencontrés par les géomètres-experts en France.

La publicité foncière est un outil qui permet de mettre à la connaissance de tous, des actes et des droits portant sur des immeubles, ce qui a pour effet de les rendre opposables. Elle est généralement associée au cadastre, qui lui, identifie et représente graphiquement les parcelles sur un territoire donné. Cependant, la valeur juridique et la fidélité des limites dessinées dépendent de l'objectif du cadastre lors de sa création. Dès lors, nous distinguons trois types de cadastres dans ce projet : le cadastre fiscal, le cadastre juridique et le cadastre à force probante d'Alsace-Moselle.

Le premier est avant tout un outil fiscal qui permet de répartir équitablement les impôts fonciers en décrivant la propriété apparente. Il ne garantit donc pas la propriété, contrairement au cadastre juridique qui a été créé pour représenter les limites réelles des propriétés. Mais pour qu'il soit juridique, il faut qu'il soit également adossé à un livre foncier ou à un autre régime de publicité qui garantisse le droit de propriété.

Enfin, la spécificité du cadastre d'Alsace-Moselle émane des limites indiquées sur le plan cadastral et des informations du livre foncier qui possèdent une force probante. Ainsi, sans détenir une valeur juridique, les juges locaux et ses utilisateurs reconnaissent tout de même la fiabilité des renseignements issus du système cadastral.

## 1. La récupération des informations

Les travaux effectués pour ce projet se résument par la recherche d'informations concernant les systèmes fonciers en Europe. Celles que j'ai pu regrouper ont différentes origines. Elles viennent de manière générale des études menées par des institutions européennes mais également d'un questionnaire créé pour le PFE et envoyé à des professionnels étrangers.

### 1.1. La recherche bibliographique

Il existe d'une part différents organismes européens qui opèrent des enquêtes sur les régimes de publicité foncière, les cadastres et de façon plus générale, sur les moyens de sécuriser la propriété immobilière. Cette sécurité est importante pour l'ensemble de l'économie européenne puisqu'elle permet d'assurer les banques sur les propriétés qui servent de garantie pour le remboursement des emprunts menés par des propriétaires pour investir.

Ainsi, le Comité Permanent du Cadastre dans l'Union Européenne, la Commission Économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU), ou encore des services nationaux tels que le livre de propriété anglais Land Registry font partis des institutions qui ont réalisées des études en lien avec le cadastre.

D'autre part, des associations de professionnels mettent en ligne des données provenant de leurs membres. La Fédération Internationale des Géomètres (FIG) en fait partie grâce au site internet intitulé « Cadastral Template 2.0 »<sup>1</sup>, ou encore l'association ELRA (European Registry Association)<sup>2</sup> qui informe sur les régimes de publicité foncières utilisés par les pays membres.

Cependant, il arrive que certaines informations se contredisent. En effet, elles proviennent généralement de questionnaire dont les questions sont parfois mal posées, et leurs réponses sont traduites par des termes qui n'ont pas la même signification.

### 1.2. La création d'un questionnaire

La nécessité de produire un questionnaire est alors le résultat de l'étude bibliographique qui s'est avérée être insuffisante pour publier des renseignements exacts.

Le questionnaire traite par conséquent les éléments manquants des études précédentes, les parties dont les informations se contredisaient en fonction des sources mais également les aspects pratiques du métier de géomètre-expert.

L'envoi du questionnaire s'est limité aux pays limitrophes à la France pour des raisons de temps de traitement. Des géomètres d'Espagne, d'Italie, de Suisse, d'Allemagne et du Luxembourg l'ont donc reçu. Pour que tout le monde puisse le comprendre, il a été rédigé en français pour les francophones et en anglais pour les autres. De même, pour des raisons de compatibilité, le questionnaire a été transformé en formulaire au format PDF.

Malheureusement, tout le monde n'y a pas répondu et certaines réponses ont un peu tardé.



Figure 1 : Capture de la page de présentation du questionnaire

<sup>1</sup> <http://cadastraltemplate.org/>  
<sup>2</sup> <http://www.elra.eu>

## 2. Etat des lieux des cadastres en Europe

Un système cadastral est formé d'un cadastre et d'un régime de publicité foncière qui enregistre et publie des actes ou des droits relatifs à la propriété immobilière en identifiant la parcelle concernée sur le plan cadastral.

### 2.1. Les régimes de publicité foncière

Une multitude de régimes de publicité foncière existe en Europe, mais ils peuvent se regrouper suivant quatre catégories de système : la conservation des hypothèques, le livre foncier, un système nordique et enfin un système britannique appelé *Land Registry*

La répartition de ces régimes au niveau européen est représentée sur la figure 2.

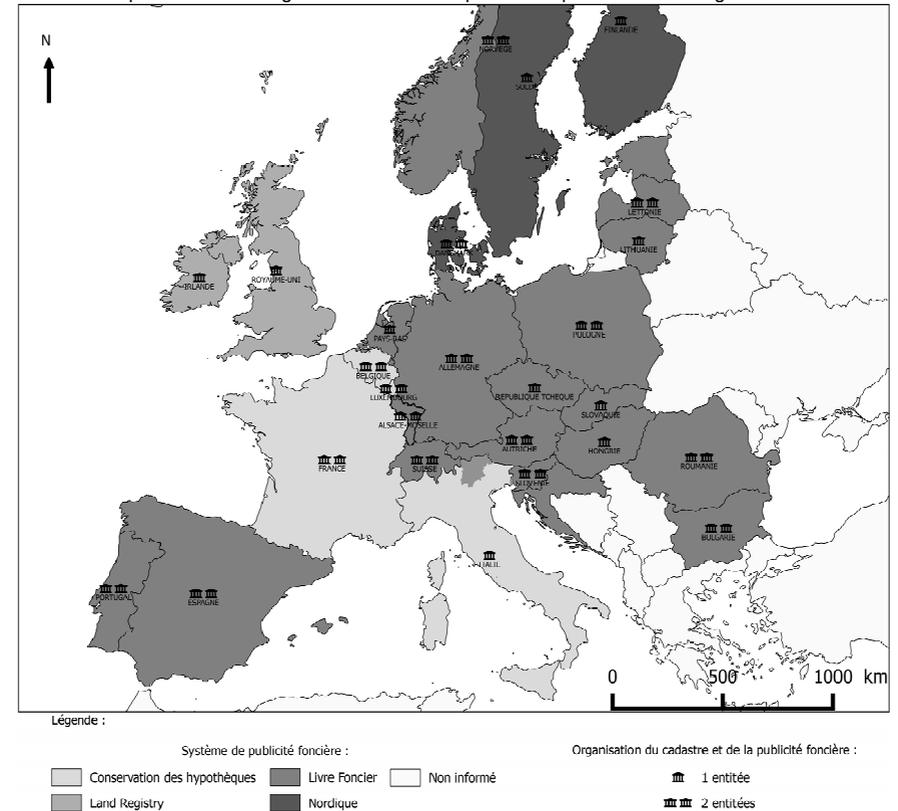


Figure 2 : Répartition des régimes de publicité foncière

Tout comme l'Alsace-Moselle, une région italienne possède la particularité d'utiliser un autre système de publicité foncière que le reste du pays. En effet, cette région était autrefois annexée à l'Empire austro-hongrois qui a créé un livre foncier au XIX<sup>ème</sup> siècle. Des situations de cohabitation de régimes de publicité foncière existent donc ailleurs qu'en France.

La majorité des pays en Europe se servent alors du livre foncier tandis qu'une poignée utilise le système de conservation des hypothèques. Le système nordique est très ressemblant au livre foncier mais c'est surtout l'associativité avec le cadastre qui se diffère des autres. Enfin, le régime britannique est un système à part entière puisqu'il n'existe pas réellement de cadastre qui se joint avec le livre de propriété.

## 2.2. La qualité des cadastres

La qualité des plans cadastraux n'a pas de lien avec le régime de publicité foncière utilisé, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas forcément « précis » si le cadastre est adossé à un livre foncier. Il y a par exemple le cadastre fiscal d'Espagne accompagné d'un livre foncier.



Figure 3 : La qualité des plans cadastraux

Des situations intermédiaires résident également en Europe. Certains pays sont par exemple en train de mener une campagne de mesure des parcelles. En Alsace-Moselle, des communes ayant un cadastre napoléonien existent toujours.

Donc un système de publicité foncière garantissant la propriété n'est pas automatiquement capable de délimiter l'étendue des droits sur un bien immobilier.

Le terme « précis » signifie en réalité que les limites sont connues par coordonnées de façon précise.

Le fait que certains pays ont des plans cadastraux qui ne connaissent pas l'emplacement des limites indique déjà que leur cadastre est purement fiscal.

En revanche, le fait d'avoir un cadastre « précis » n'implique pas obligatoirement que les limites dessinées soient juridiques. Cela peut par contre indiquer la volonté de l'état de posséder les moyens techniques pour définir les limites juridiquement dans un avenir plus ou moins proche.

Des situations intermédiaires résident également en Europe. Certains

## La prescription acquisitive appliquée au bornage amiable

PFE présenté par : **Rémi TEUMA**  
 Société d'accueil : **Alpha Géomètre**  
 Directrice de PFE : **Marie BERTAUD**  
 Correcteur : **Jacques LEDIG**



### 1. Introduction :

Selon Frédéric BASTIAT (1863), économiste et homme politique français du 19<sup>ème</sup> siècle, la propriété est un droit antérieur à la loi, puisque la loi n'aurait pour objet que de garantir la propriété. Il est donc vain de rechercher les origines du droit de propriété qui, à n'en point douter, s'inspire du droit romain dans sa conception.

Notre conception moderne de la propriété emprunte au droit romain trois caractères visant à différencier le droit de propriété des autres droits réels. Pendant l'époque médiévale, la propriété a fait l'objet d'une construction théologique selon laquelle Dieu, créateur du monde, en est le seul maître. De ce fait, les hommes ne pouvaient, au mieux, que se prévaloir d'un usage concédé. Ainsi, Dieu concède des terres aux seigneurs qui les concèdent à leur tour aux vassaux. Par conséquent, la majorité des hommes n'avait qu'un droit d'usage ou d'exploitation qui ne saurait être, ni absolu, ni exclusif. C'est pour lutter contre cet élitisme que la révolution française a aboli cette conception de la propriété et revient au concept du droit romain qui caractérise la propriété d'absolue, d'exclusive et de perpétuelle. (ROBAYE, 1997)

La déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789 sacralise le droit de propriété par son article 17 : « La propriété est un droit inviolable et sacré, nul ne peut en être privé, si ce n'est lorsque la nécessité publique, légalement constatée, l'exige évidemment, et sous la condition d'une juste et préalable indemnité ». Puis, la déclaration de 1793 le définit « comme le droit qui appartient à tout citoyen de jouir et de disposer à son gré de ses biens, de ses revenus, du fruit de son travail et de son industrie ». Le code civil et ses commentateurs vont continuer à mettre la propriété sur un piédestal, DEMOLOMBE écrit en 1870 : « Droit absolu, la propriété confère au maître sur sa chose un pouvoir souverain, un despotisme complet »

Aussi sacré et absolu soit-il, le droit de propriété est, dès la première déclaration des droits de l'homme et du citoyen, entaché de limitations. En effet, le caractère absolu de la propriété est limité dès lors que l'état impose aux propriétaires de ne pas faire de leur droit un « usage prohibé par les lois et règlements » (Code civil, art. 544). De plus, l'état admet une autre limitation considérable : l'expropriation pour cause de nécessité publique (cf. ci-dessus).

En ce qui concerne les caractères exclusif et perpétuel de la propriété, il existe aussi des mécanismes les limitant. Par exemple, les démembrements de propriété comme l'usufruit ou la copropriété vont à l'encontre du principe d'exclusivité que les français voulaient retrouver après la révolution. Il en est de même pour sa perpétuité, le code civil reconnaît que dans certains cas, et sous certaines conditions, la possession prolongée d'un bien par un tiers puisse entraver le droit de propriété d'autrui. C'est la prescription acquisitive.

Malgré ces limitations, particulières et peu nombreuses par rapport au régime précédent, la France connaît une montée de l'individualisme qui, couplée avec l'état d'esprit laissé par l'élitisme de l'ancien régime, rend le statut de propriétaire très prisé. René ROBAYE (1997) écrit d'ailleurs, qu'à l'époque, « il n'est pas rare que l'on invoque avec fierté ce seul titre sur sa carte de visite ».

Le corollaire des aspects individuel et exclusif de la propriété est l'exclusion d'autrui. Ainsi, le code civil consacre le droit de clore sa propriété, de la protéger contre l'intrusion des tiers (Code civil, art. 647). En plus d'affirmer son titre de propriétaire aux yeux de tous, le fait de clore sa propriété, empêche la prise de possession des tiers et sécurise donc ce titre. En conséquence, le XIX<sup>e</sup> siècle est marqué par de nombreux débats et procès autour de la question des limites de propriétés.

A ce stade, plusieurs questions se posent à propos, des limites de propriétés, de la possession et de la prescription acquisitive. La première partie de ce document va donc s'attacher à la définition du

mécanisme du bornage, permettant de fixer juridiquement les limites du droit de propriété, et aux conditions nécessaires pour passer du statut de possesseur à celui de propriétaire par l'usage de la prescription acquisitive.

Pour aborder la possession, concept transversal entre le droit de propriété, la prescription acquisitive et l'action en bornage, nous continuerons cette introduction en reprenant les définitions données par Gabriel SEIGNALET dans son article intitulé : « *Droit : la notion de possession et la prescription acquisitive* ».

La possession est subordonnée à la réunion de deux éléments, l'*animus* et le *corpus*. Elle est un rapport de fait entre une chose et une personne qui permet à cette dernière d'accomplir sur la chose des actes qui, vus de l'extérieur, correspondent à l'exercice d'un droit.

L'*animus* est un élément subjectif de la possession, il traduit la volonté du possesseur d'agir et d'être reconnu comme le véritable propriétaire. S'agissant d'un élément psychologique, il fallait redouter des difficultés d'ordre probatoire. C'est pourquoi le législateur a institué une présomption simple sur cet élément. Ainsi, sauf preuve du contraire, l'existence du *corpus* suffira à prouver celle de l'*animus*.

En matière immobilière, le *corpus* correspond à l'accomplissement d'actes matériels sur le bien. Ces actes peuvent prendre la forme de constructions, d'entretiens, de cultures ou simplement d'usages. Dans l'immense majorité des cas, la possession et le droit de propriété d'un bien se rapportent à la même personne ce qui place cette dernière en position d'entière maîtrise de la chose. (REVET, 2008) Cependant, si ce n'est pas le cas, le possesseur peut faire valoir sa possession qui, si certains critères sont réunis, sera plus probante du droit de propriété qu'un acte authentique. C'est l'effet de la prescription acquisitive.

Le problème qui se pose alors, est la reconnaissance administrative de cette prescription. Aujourd'hui en France, il n'est pas possible de devenir pleinement propriétaire d'un bien immobilier par l'utilisation de la prescription acquisitive sans passer par une action contentieuse en revendication de propriété. En cas de conflit, il semble logique que possesseurs et propriétaires soient départagés par la justice mais qu'en est-il en cas d'accord ? Si le propriétaire reconnaît qu'il a été négligeant et que le possesseur a, conformément à la loi, obtenu son droit de propriété, comment pouvons-nous régulariser la situation ? STREIFF et POMMIER (2016) répondent : « *il n'existe [...] aucun procédé non contentieux sécurisé permettant de constater une acquisition par prescription.* ». L'objet de la deuxième partie sera donc d'étudier une procédure visant à faire reconnaître de façon amiable le droit de propriété du possesseur.

Notons tout de même que le mécanisme de la prescription acquisitive est resté sans changement pendant plus de deux cents ans. Emettre des propositions de changement à ce sujet est donc délicat car, au vu de sa stabilité, nous pouvons penser que ce système est parfaitement fonctionnel. Cependant, il anime les débats de certaines communautés de professionnels et nous retrouvons dans les objectifs 2015-2017 de la commission foncière de l'ordre des géomètres experts, la production d'une note d'analyse sur la prise en compte de la prescription acquisitive dans les opérations de bornage.

## 2. Le bornage et la prescription acquisitive

L'action en bornage ne traite pas du droit de propriété en lui-même mais seulement de sa délimitation, elle n'a pas pour but de définir qui est propriétaire des parcelles étudiées mais seulement de déterminer et matérialiser la limite entre deux propriétés. Cependant, il est expressément demandé aux géomètres experts, responsables de l'action en bornage, de prendre en compte les marques de possession et donc, dans certains cas, un droit de propriété qui n'est pas « complet », puisqu'il ne fait pas l'objet d'un acte authentique.

Cette possession ne peut contredire les titres et descriptifs de propriété sur l'emplacement de la limite séparative, que si, par le mécanisme de la prescription acquisitive, elle est constitutive du droit de propriété. C'est-à-dire, si elle est utile, et exercée depuis suffisamment longtemps. Une possession dite utile est celle qui respecte l'article 2261 du code civil. Elle se doit donc d'être : « *continue, non interrompue, paisible, publique, non équivoque et à titre de propriétaire* ». Le délai de droit commun fixé par le code civil pour l'acquisition d'un bien par sa possession est de trente ans. Cependant, si l'acquéreur se trouve être de bonne foi et qu'il possède un juste titre ce délai peut être abrégé à dix ans. (Code civil, art. 2272)

La jurisprudence reconnaît aux juges du fond le pouvoir souverain d'apprécier si la possession est continue et non équivoque (Cass. 3<sup>e</sup> civ., 29 avril 1969, 06 mai 1970 et 19 juin 1973). Par conséquent, le géomètre expert ne peut pas apprécier si une possession est constitutive de droit ou non. Il est donc difficile pour lui de privilégier les marques de possession face aux titres ou aux descriptifs de propriété pour déterminer l'emplacement d'une limite séparative.

Cependant, l'action en bornage n'impose pas aux intervenants de prouver qu'ils soient réellement propriétaires et, lorsque les titres et descriptifs de propriété sont inexistantes ou muets sur l'emplacement de la limite, ce sont les marques de possession qui font le mieux la preuve de cet emplacement. De plus, dans les cas où les marques de possession contredisent d'autres éléments de preuve de l'emplacement de la limite, comme les plans cadastraux, sa détermination reste à l'appréciation de l'expert.

Ainsi, cette appréciation, ne saurait être faite sans l'analyse de la durée et de l'utilité de la possession. S'ajoute à cela que, dans la quasi-totalité des conflits ou la prescription acquisitive immobilière est soulevée, les juges se tournent vers un géomètre expert, expert de justice pour produire une analyse des éléments permettant de positionner les limites. De ce fait, les géomètres experts sont bien reconnus compétents pour rassembler et fournir une analyse de l'utilité de la possession mais, seuls les juges peuvent apprécier la validité de cette analyse. En effet, ils n'ont pas obligation de juger dans le sens du rapport d'expertise.

Dans le cadre d'un bornage amiable, il semble donc difficile pour un géomètre expert de prendre en compte la revendication de celui qui invoquerait le bénéfice d'une prescription acquisitive. Cependant, le but de cette étude est d'essayer de trouver des solutions à ce problème et nous allons voir dans la partie suivante que des propositions peuvent être avancées.

## 3. La reconnaissance amiable de l'acquisition par prescription acquisitive

En cas d'accord entre les parties, il est possible de contredire efficacement des titres de propriété par une possession lors des opérations de bornage amiable. Cependant, le processus n'est pas des plus simples. En effet, une fois la prescription acquisitive invoquée, le possesseur se doit de fournir des preuves de l'utilité et de la durée de sa possession afin de convaincre le géomètre expert de la création de son droit de propriété.

Dans le cas où, les actes matériels et les marques de possession, sont suffisamment probants pour le géomètre expert alors le bornage est possible. Cependant, le géomètre devra faire preuve de prudence car, la validité de ce genre de bornage ne tient que sur son interprétation de l'utilité et de la durée de la possession. Si un tiers venait à prouver que cette possession n'était pas utile, et donc, non constitutive du droit de propriété alors, le procès-verbal de bornage deviendrait caduc. Il serait donc utile de rajouter une clause à ce type de procès-verbal de bornage qui le rendrait sans objet jusqu'à la reconnaissance juridique de la création du droit de propriété du possesseur.

Cette reconnaissance juridique passe par la consolidation de ce droit de propriété qui fera l'objet d'un acte de notoriété acquisitive. Cet acte notarié, ayant pour but de faire la preuve de l'établissement du droit de propriété du possesseur, est peu utilisé et non reconnu réglementairement. De ce fait, il n'est pas constitutif de la propriété. Néanmoins, il est représentatif de la volonté du possesseur de devenir propriétaire et rassemble une nouvelle fois les actes matériels prouvant l'utilité et la durée de la possession étudiée. Ainsi, couplé au procès-verbal de bornage déjà établi, il constitue une présomption importante de l'existence du droit de propriété du possesseur.

Pour faire reconnaître cette présomption, il est nécessaire de faire homologuer ces documents par le tribunal de grande instance. L'acquisition du bien par le mécanisme de la prescription acquisitive ne sera effective qu'après jugement rendu. Le processus d'homologation peut passer par un accord de médiation entre les parties, rédigé par un avocat. Le travail de l'avocat sera ensuite de saisir le tribunal par une requête conjointe, pour que ce dernier statue sur l'utilité et la durée de la possession. Le jugement, donnant suite à cette requête, s'il homologue l'accord de médiation, sera alors constitutif du droit de propriété et vaudra titre. Pour respecter le principe d'exclusivité de la propriété, le droit de l'ancien propriétaire sera éteint. Le jugement pouvant ainsi être considéré comme translatif du droit de propriété. La dernière étape sera la publication de ce jugement aux services de la publicité foncière afin de rendre le droit de propriété, ainsi créé, opposable aux tiers. Cette publication est rendue obligatoire par le décret du 4 janvier 1955 qui oblige la publication de tout acte portant mutation ou constitution d'un droit réel immobilier.

Par cet ensemble d'actes et de procédures mené par géomètres, notaires, avocats et magistrats, nous avons donc développé une méthode amiable permettant de faire reconnaître un droit de propriété acquis par prescription acquisitive. Cependant, l'application de cette méthode sera soumise à l'interprétation des textes juridiques par les juges et à la volonté des professionnels d'engager leur responsabilité dans la rédaction de ce type d'acte au vu des conditions particulières de cette acquisition.

#### 4. Avis des professionnels et évolutions envisageables

Cette dernière partie vise à transcrire les avis, sur la méthode développée dans cette étude, d'au moins un professionnel de chaque corps de métier intervenant. A ce jour, la description de la méthode proposée est sur le point d'être transmise aux professionnels en question, il est donc difficile ici d'anticiper sur leurs réponses.

Il est toutefois possible d'imaginer certaines évolutions et certains effets de cette procédure de reconnaissance amiable de l'acquisition par la prescription acquisitive. Tout d'abord, cette proposition de procédure, utilisant le concept de médiation, peut facilement être associable à la volonté du législateur de promouvoir les modes alternatifs de règlements des conflits.

De plus, en comparaison avec la procédure actuelle permettant de faire reconnaître l'effet de la prescription acquisitive, celle proposée dans cette étude est plus rapide et moins coûteuse. En effet, l'homologation de l'accord de médiation peut être donnée par un juge unique (Code de procédure civile, art. 794), sans obligation de débat (Code de procédure civile, art. 1566), contrairement à l'action en revendication qui implique une collégialité de juges et débats entre les parties. La justice fera donc des économies, mais ce sera aussi le cas pour les justiciables, puisque tous seront représentés par un seul et même avocat médiateur, contre deux dans l'action en revendication.

A moyen terme, nous pouvons imaginer que la procédure amiable de reconnaissance d'une acquisition par prescription acquisitive soit simplifiée. Dans la procédure proposée ici, l'avocat tient plusieurs rôles. Le premier est de garantir par son contreseing que les parties sont bien informées sur la portée des actes contractés. Le deuxième est le rôle de médiateur qui permet de saisir le tribunal et d'ouvrir l'accès à l'homologation des actes passés entre les parties. En février 2013, M<sup>me</sup> La Garde des Sceaux, Ministre de la Justice, a confié à Didier MARSHALL, premier président de la cour d'appel de Montpellier, la mission de conduire les travaux d'un groupe de travail chargé de réfléchir, entre autres, à l'organisation judiciaire du 21<sup>ème</sup> siècle. C'est en décembre 2013 que le groupe de travail rend ses conclusions et, parmi elles, la proposition d'unifier les tribunaux de premières instances. Ainsi, les greffes des tribunaux d'instances et de grandes instances disparaîtraient pour donner naissance à un greffe de première instance unique. (Union syndical des magistrats, 2013) Selon, le syndicat de la magistrature (2013) la création de guichets uniques de greffe doit « permettre la réalisation de tous les actes, avec à terme une compétence universelle, ne nécessitant pas la représentation par avocat... ». Nous pouvons donc penser que la requête conjointe pourra être déposée par les parties auprès d'un guichet unique de greffe. Ainsi, il serait possible de faire homologuer l'acte de notoriété, sans forcément passer par l'intervention d'un avocat.

Pour finir, à plus long terme, nous pouvons imaginer que les notaires soient reconnus compétents par le législateur pour juger de l'utilité d'une possession. Cette reconnaissance de compétence donnerait la possibilité de reconnaître l'acquisition d'un bien par prescription acquisitive par l'établissement d'un acte notarié. Cet acte devrait alors revêtir un caractère translatif de propriété à la date du lendemain de la prise de possession du bien par le possesseur, l'acquisition par la prescription acquisitive étant rétroactive (Cass. 3<sup>e</sup> civ., 10 juillet 1996). Du fait de la constitution d'un droit de propriété, l'acte devra obligatoirement être publié au service de la publicité foncière (Cf. décret du 4 janvier 1955) et assurera l'opposabilité aux tiers. Dans l'hypothèse où cet acte verrait le jour, il ne devrait pas prendre la forme d'un acte synallagmatique car les parties ne s'obligent pas l'une envers l'autre. Il serait davantage semblable à un acte unilatéral établi pour le possesseur et reconnu par le propriétaire. Cette reconnaissance par le propriétaire serait semblable à un abandon de propriété.

## Mise en place d'une méthode de détection de changement orientée objet sur une série temporelle d'images satellites optiques



PFE présenté par : **Mai-Linh Ruiz**  
Société d'accueil : **ICUBE, plateforme SERTIT**  
Directeur de PFE : **Arnaud Durand**  
Correctrice : **Tania Landes**

### 1. Contexte et Objectif de l'étude

Le SERTIT, Service Régional de Traitement d'Images et de Télédétection, est spécialisé dans la production d'informations géographiques à partir de données d'observation de la Terre. Ce centre de transfert participe à de nombreux projets qui ont pour but de produire des outils et méthodes opérationnelles afin d'assurer le passage entre les avancées technologiques et les applications. C'est dans ce cadre que déroule cette étude.

Les lancements des plateformes satellitaires optiques Sentinel-2 mise en place par l'ESA (European Spatial Agency) s'inscrivent dans le cadre du programme européen Copernicus de surveillance mondiale pour l'environnement et la sécurité. La première plateforme optique Sentinel-2A a été mise en orbite avec succès le 23 juin 2015. Le lancement de la seconde plateforme optique Sentinel-2B est prévu pour la fin de l'année 2016. Ces deux plateformes permettront l'acquisition en continu d'images optiques à haute résolution spatiale, couvrant la totalité de l'Europe tous les cinq jours. La mission Sentinel-2 va permettre de disposer d'une masse considérable de données gratuites d'observation de la Terre. Le traitement et l'exploitation de ces données constituent un défi scientifique et technologique.

Ainsi, l'exploitation des Séries Temporelles d'Images Satellitaires (STIS) à haute résolution temporelle est un domaine de recherche en plein essor et offre de nouvelles opportunités pour la gestion des ressources naturelles, la prise de décision pour l'aménagement du territoire, ou encore pour la prévision et la gestion des situations de crise.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est d'expérimenter une méthode de traitement orientée objet dans le but de détecter des changements en se basant sur les relations et les comportements d'objets au sein de séries temporelles d'images satellites comme celles produites par la constellation Sentinel-2. Cette approche est implémentée en développant des applications en C++, sur la base de la librairie ORFEO Toolbox et du gestionnaire de base de données PostgreSQL, en vue d'une automatisation complète de la chaîne de traitement, seule solution techniquement et économiquement pertinente pour exploiter des STIS à haute fréquence temporelle d'acquisition.

### 2. Données expérimentales

Le lancement récent du premier satellite Sentinel-2A au moment de l'étude ne permettait pas de disposer d'une série temporelle d'images. L'étude a été réalisée à partir d'une série temporelle d'images test acquise par le satellite Landsat-8.

La radiométrie et la géométrie des images de la STIS ont été préalablement corrigées par le fournisseur. Les caractéristiques techniques (radiométrie, résolution) de Landsat-8 et de Sentinel-2 sont proches, permettant d'assurer la compatibilité des traitements pour ces deux systèmes d'acquisition.

Caractéristiques	Sentinel-2	Landsat-8
Principe de mesure	pushbroom	pushbroom
Altitude (km)	786	705
Fauchée (km)	290	185
Temps de revisite (jour)	5	16
Résolution VNIR (m)	10 / 20 / 60	15 / 30
Bandes spectrales	13	8 + 1 (panchromatique) + 2 TIRS

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques Sentinel-2 et Landsat 8

La zone d'étude est centrée sur la région péri-urbaine de Colmar à forte dominance agricole. La STIS expérimentale est constituée de 46 images acquises entre avril 2013 et avril 2015. Sur ces images, 10 présentent une couverture nuageuse totale sur la zone d'étude et ne sont donc pas exploitables. En revanche, 13 sont exemptes de nuage et 13 présentent une couverture nuageuse partielle de la zone d'étude.

### 3. Méthodes de traitement de la STIS

La chaîne de traitement illustrée par la Figure 1 est appliquée à chaque image de la STIS et permet d'obtenir une décomposition de l'image en objets homogènes et comparables. Ces étapes sont fondamentales pour analyser une série temporelle d'images par une approche objet. La méthodologie de segmentation a pour but de faciliter le suivi des objets d'une observation à l'autre.

#### a. Masque de nuages et d'ombres

La présence de nuages et de leurs ombres est inévitable dans une série temporelle d'images. En revanche, même si des nuages sont présents sur une image, la zone d'étude ne peut être que partiellement cachée, et une partie reste visible. La description de l'évolution temporelle d'un objet nécessite une grande quantité d'observations, il est donc important de prendre en compte toutes les observations disponibles.

Pour traiter les images, même partiellement nuageuses, et éliminer les zones de nuages et d'ombres, un masque de nuage et un masque d'ombre sont appliqués aux images et au parcellaire utilisé pour la segmentation.

#### b. Objets et segmentation des images

Dans le cas de l'étude d'une STIS orientée objet, la difficulté majeure réside dans la définition même des objets. Dans cette étude, un objet correspond à une région de pixels adjacents présentant une homogénéité radiométrique et correspondant à une entité géographique.

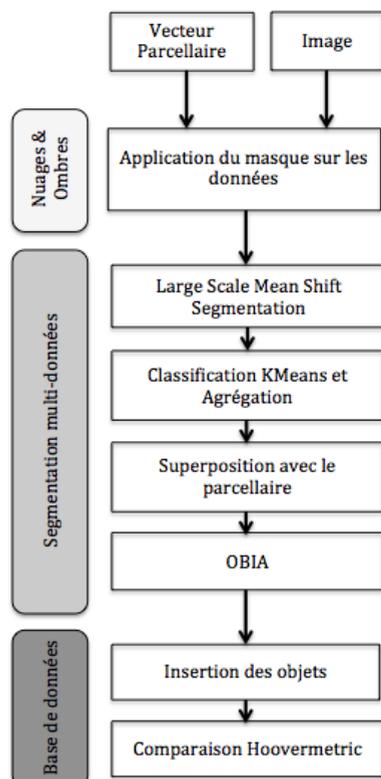


Figure 1 : Schéma de la méthodologie

Pour pouvoir explorer des collections d'objets présentant une variabilité suffisante rapportée à la fréquence des observations disponibles, nous avons choisi de suivre les changements au sein des cultures.

Dans un premier temps, l'utilisation seule d'un parcellaire issu d'une source exogène, comme le parcellaire cadastral, a été envisagée pour extraire de l'image les objets d'intérêt. Les objets présentent ainsi une forme identique à l'entité géographique étudiée et pérenne dans le temps. Toutefois, la segmentation par le parcellaire manque de souplesse, ne confère pas d'homogénéité radiométrique aux objets et ne permet pas de détecter les changements partiels survenus sur une parcelle de cultures.

Par ailleurs, l'utilisation seule d'une segmentation suivant des critères radiométriques présente une grande disparité de forme des objets. Le manque de conservation des formes des objets rend difficile la comparaison des objets en vue d'une détection de changement.

Pour pallier à ce problème, la méthode de construction des objets utilisée se base conjointement sur une segmentation radiométrique et sur une segmentation par un parcellaire (connaissance *a priori*) :

- l'utilisation des algorithmes de segmentation MeanShift couplée à une classification non supervisée par la méthode des K-Means partitionne l'image en régions homogènes
- une sur-segmentation par le parcellaire cadastrale permet de réduire considérablement la disparité géométrique des objets.

Les objets présentent ainsi une homogénéité radiométrique et une certaine stabilité géométrique de par leur appartenance à une parcelle. Les attributs radiométriques sont calculés par l'application OBIA (Object Based Image Analysis) permettant de calculer la moyenne et la variance radiométrique des pixels composant l'objet dans chaque bande spectrale de l'image.

#### c. Stockage et mise en relation des objets

Les objets identifiés sur les différentes images de la série temporelle sont stockés dans une base de données spatiale PostgreSQL-PostGIS. La base de données permet d'accéder aux objets par le biais de requêtes SQL. Les objets sont insérés en conservant leurs attributs géométriques, temporels et radiométriques.

Les objets issus des différentes segmentations des images sont alors mis en correspondance par une comparaison Hoovermetric. Ainsi, la superposition des objets d'une acquisition à l'autre permet de définir si les objets ont conservé leur forme, ont subi une division, une fusion, ou s'ils ne correspondent à aucun des cas précédents. Les résultats de la comparaison permettent de créer un lien temporel entre les objets de la série, qui est stocké dans la base de données.

### 4. Détection de changement

Deux méthodes de détection de changement ont été explorées. Ces méthodes donnent des pistes d'exploitation de la base de données pour la détection de changement orientée objet. La première méthode présentée est une détection de changement bi-date basée sur le principe d'analyse de vecteur de changement. La seconde est une détection de changement de classe des objets basée sur une classification *a priori* des parcelles.

#### d. Détection de changement bi-date

La détection de changement bi-date se base sur un traitement par paires d'objets. Les paires d'objets sont constituées d'un objet visible à une date donnée et du ou des objets correspondants issus d'une observation précédente. Elle se base sur l'analyse d'un vecteur de changement (CVA : Change Vector Analysis), caractérisée par sa magnitude (intensité du changement) et ses angles (type de changement).

Les résultats de la détection de changement par cette méthode ont confirmé les doutes émis sur le choix du seuil de tolérance. En effet, il est impératif de déterminer manuellement le seuil de tolérance

à appliquer pour chaque comparaison bi-date. Cette méthode de détection de changement n'est pas adaptée pour la détection de la variation de densité de végétation sur des parcelles de cultures, mais pourrait être adaptée à la détection de changements rapides et notables.

#### e. Détection de changement de classes

La seconde méthode vise à détecter les changements de classe des objets qui sont radiométriquement différents des autres objets de la même classe, suivant une classification *a priori* du parcellaire. Cette méthode permet de détecter si la totalité ou seulement une petite partie de la parcelle a changé d'occupation du sol, en supposant que peu d'objets de l'image ont changé de classe.

L'analyse des résultats de la détection de changement par rapport à une classification *a priori* a permis de mettre en relief les problèmes de détection liés au nombre réduit d'objets visibles issus d'une acquisition partiellement nuageuse. De plus, la détection de changement et l'association à une nouvelle classe devraient être basées sur les profils temporels des objets et les profils temporels estimés des classes.

## 5. Conclusion générale et perspective

L'élaboration d'une segmentation dite « multi-données » permet l'extraction d'objets sur chaque image de la STIS. Les objets segmentés sont homogènes en termes d'occupation du sol, et appartiennent à une sur-région définie par une segmentation pérenne au cours du temps, provenant d'une source exogène. Dans le cas de cette étude, c'est le parcellaire cadastral qui a été retenu car l'application a été menée sur une zone à dominante agricole. Chaque objet peut donc être identifié au cours du temps par son appartenance à une parcelle cadastrale. Toutefois la mise en place d'un paramétrage unique pour la segmentation de toutes les images de la STIS se heurte à des problèmes d'hétérogénéité de qualité de segmentation. Il faudrait alors mettre en place une recherche des paramètres idéaux pour la segmentation de chaque image.

Toute la chaîne de traitement est articulée autour d'une base de données spatiale, qui conserve l'état de chaque objet à chaque date, ainsi que les informations radiométriques extraites des images. Ceci permet de centraliser les données dans un seul lieu et de faciliter leur accès et leur exploitation par l'élaboration de requêtes SQL. Cependant, l'exploitation à grande échelle de la base de données, pour une longue série temporelle ou une vaste zone géographique, pourrait être pénalisée par la conception-même du système de base de données et du langage SQL. Pour passer à l'échelle supérieure, il serait nécessaire d'étudier une intégration des dernières technologies issues du domaine "Big Data".

Les méthodes de détection de changement qui ont été expérimentées n'ont pas abouti à des résultats satisfaisants d'un point de vue statistique. Mais d'un point de vue méthodologique, il a été prouvé qu'articuler des méthodes autour d'une base de données unique était non seulement possible, mais essentiel dans le cas du traitement d'une STIS. La méthode la plus intéressante reste la méthode de détection de changement de classe, qu'il faudrait approfondir pour extraire le profil temporel des objets et le comparer au profil temporel de tous les objets de la classe, et ainsi détecter les comportements anormaux.