

# *Mesures automatiques de points d'appui à partir de nuages de points 3D*



Projet développement réalisé par :

Julie Marcuzzi, Anthony Magnetti et Loïc Messal

Commandité par :

Jean-Pierre Papelard, Jean-François Hangouet et Arnaud le Bris

# Table des matières

Introduction.....	4
Présentation du projet .....	4
• Contexte scolaire.....	4
• Contexte métier.....	4
• Objectifs.....	5
• Les ressources .....	5
• Clients.....	5
• Equipe.....	6
• Outils utilisés .....	6
Gestion du projet.....	7
• Distribution des rôles .....	7
• Déroulement d'une séance : .....	7
• Relation avec nos commanditaires : .....	8
• Réflexion sur les étapes du projet.....	8
○ Prise en main / Modélisation .....	8
○ Développement.....	8
• Planning PERT et GANTT (voir Annexe) .....	9
Déroulement du projet.....	11
• Prise en main .....	11
• Analyse .....	11
• Développement.....	13
○ Technique utilisée .....	13
○ Lecture des fichiers.....	13
○ Cas 2D.....	14
○ Cas 3D.....	17
○ Fichier de sortie .....	22
• Résultats : .....	22
○ Cas 2D : .....	22
○ Cas 3D : .....	23
Difficultés rencontrées .....	24
Amélioration du projet.....	24
Bilan.....	24

Conclusion .....	25
Annexe.....	26

## Table des illustrations

Figure 1 : Exemple de cibles.....	12
Figure 2 : Diagramme de fonctionnement général.....	12
Figure 3 : Diagramme de lecture des fichiers .....	13
Figure 4 : Diagramme de détection du plan .....	14
Figure 5 : Détection du plan par rapport aux points.....	15
Figure 6 : Diagramme de création de l'ortho-image .....	15
Figure 7 : Exemple d'orthoimage .....	16
Figure 8 : Diagramme de corrélation .....	16
Figure 9 : Exemple d'image de référence .....	16
Figure 10 : Exemple d'image à corréler.....	16
Figure 11 : Exemple de corrélation .....	16
Figure 12 : Exemple d'une sphère en couleur .....	17
Figure 13 : Diagramme des Moindres Carrés .....	19
Figure 14 : Diagramme de la transformée de Hough .....	21
Figure 15 : Diagramme d'écriture .....	22

# Introduction

Dans le cadre des stages terrain en photogrammétrie et lasergrammétrie, le Département Imagerie Aérienne et Spatiale (DIAS) de l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) réalise des acquisitions à l'aide d'un scanner laser terrestre. De nombreuses stations laser sont généralement nécessaires pour modéliser l'intégralité d'un lieu ou d'un monument. Ces données sont ensuite traitées pour être assemblées dans un même système de coordonnées terrain, il s'agit du géoréférencement. Pour cela, il est nécessaire de connaître des points entre le système « en l'air » et le système terrain. Ces points sont appelés points d'appui. Leurs coordonnées dans le système terrain sont déterminées par des levés topométriques. En scannant trois points d'appuis, c'est-à-dire en mesurant leur distance les séparant du laser, il est possible de résoudre la position du laser, et même son orientation. De ce fait, tous les autres points scannés ont désormais accès à leurs coordonnées terrains par propagation. Notre projet consiste à détecter de manière automatique les centres des cibles utilisées comme points d'appuis pour faciliter le géoréférencement.

## Présentation du projet

- **Contexte scolaire**

Ce projet s'inscrit dans la formation du cycle ingénieur sous la désignation de projet développement. C'est un projet de développement s'effectuant traditionnellement durant le second semestre de la seconde année. Il permet d'appliquer et d'approfondir les notions vues durant notre cursus. C'est aussi l'occasion de mettre en pratique les éléments de gestions de projets qui nous ont été présentés. Dans notre cas, les notions utilisées concernent majoritairement la photogrammétrie. L'École a souhaité valider la gestion des coûts, du délai et de la qualité lors d'un comité de pilotage. Une présentation le 17 mai 2016 concernant la tenue du projet et une démonstration le 20 mai 2016 sont également attendues. De plus, un rapport expliquant le déroulement du projet et détaillant les choix techniques était demandé.

- **Contexte métier**

Notre projet fait suite à un projet réalisé l'année dernière par des étudiants du master Photogrammétrie, Positionnement et Mesures de Déformations (PPMD). Leur projet

consistait à scinder des nuages de points laser complets en des plus petits centrés autour des points d'appui grâce à des coordonnées approchées. Ils ont alors, pour chaque nuage 3D complets, créé des sous-nuages de  $1\text{m}^3$ , centrés aux coordonnées approchées des points d'appui. Ces sous-nuages seront notre matière première.

- **Objectifs**

Jusqu'à présent, le géoréférencement nécessite une action de l'utilisateur. En effet, à l'aide d'un logiciel, il faut cliquer manuellement sur le centre des cibles pour permettre un géoréférencement de meilleure qualité. Cela peut prendre un certain temps dans le cas d'un très grand chantier. Certains d'entre nous ont d'ailleurs pu l'expérimenter à Forcalquier. Le but de notre projet est alors d'automatiser la détermination des coordonnées exactes de points d'appui dans un nuage 3D.

- **Les ressources**

Pour ce projet, il est prévu 26 séances de 3h pour parvenir à une solution dans le cadre imposé. La première séance a lieu le 2 Mars et la date limite est le 17 Mai, jour de la présentation de la gestion de projet, et le 19 Mai, jour de la démonstration dans le hall de l'école. Le comité de pilotage est planifié le 30 Mars au matin.

Concernant les ressources humaines, nous sommes un groupe de trois étudiants ayant tous fait notre première année à l'ENSG. Les facilités spécifiques de chacun ont été discutées dès le début du projet afin de répartir au mieux le travail. L'intérêt étant de profiter des capacités du trinôme pour monter en compétence dans les domaines qui nous sont les plus étrangers.

A propos du matériel, nous disposons de nos ordinateurs personnels et d'un accès à l'École. Les données nécessaires pour développer la solution sont issues d'un scan laser de Forcalquier 2015. Elles ont été fournies par notre commanditaire.

- **Clients**

Notre projet est commandité par deux clients bien distincts. Le premier est l'École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) qui attend surtout une bonne gestion de projet. Le second est Jean-Pierre Papelard (DIAS) qui attend de nous le développement des méthodes qu'il nous a proposé pour répondre à la problématique. Il a été suppléé par Arnaud Le-Bris à partir de mai suite à son départ pour Forcalquier.

- **Equipe**

Le projet est réalisé par un groupe de trois élèves de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) composé de Julie Marcuzzi, Loïc Messal et Anthony Magnetti. Nous sommes tous issus de classes préparatoires et l'un d'entre nous est un étudiant fonctionnaire destiné à l'IGN.

- **Outils utilisés**

Pour notre projet développement, nous avons utilisé différents outils :

- Asana : utile à la gestion de projet, en particulier pour l'affectation des différentes tâches
- Github : pour faciliter le versionning et l'échange de code
- VisualStudio 2013 : environnement de développement C++ utilisé par le commanditaire

# Gestion du projet

La gestion de projet est un élément essentiel du projet développement. Une bonne gestion permet de répondre correctement et efficacement aux attentes de notre commanditaire ainsi qu'à celles de l'École. La répartition des différentes tâches doit être stratégiquement attribuée entre tous les élèves afin que la commande soit réalisée dans les délais impartis. La manière d'interagir avec nos commanditaires (École/Matis) fait également partie de la gestion de projet.

- **Distribution des rôles**

Au début du projet, un chef de projet a été désigné par le groupe. Il s'agit d'Anthony Magnetti. Ce dernier doit encadrer l'équipe, définir le planning des tâches à effectuer durant le projet et les attribuer au reste du groupe. Il agit également comme intermédiaire entre les commanditaires et l'équipe. Il doit veiller à une bonne cohésion ainsi qu'au maintien de la communication au sein du groupe. Les autres sont davantage consacrés au développement, bien que le chef de projet y participe également. Ils doivent en outre suivre les tâches qui ont été fixées ainsi que les délais, tout en restant ouvert à d'autres possibilités. Les développeurs doivent expliciter les fonctions qu'ils conçoivent afin de faciliter la compréhension de celles-ci par les personnes extérieures. La description doit être claire pour que le chef de projet puisse transmettre l'information au commanditaire, la communication se faisant dans les deux sens.

- **Déroulement d'une séance :**

Au début de chaque séance, un briefing a lieu pour établir l'ordre du jour et répartir les tâches à effectuer. Ce briefing est mené par le chef de projet. Durant le reste de la séance, chacun, y compris le chef de projet qui reprend son rôle de développeur, implémente une ou des fonctions élémentaires, corrige des bogues ou effectue une tâche qui lui est affectée. Lorsqu'une tâche est terminée, la personne en charge doit la valider sur Asana et passer à la suivante. A la fin de la séance, un débriefing a lieu pour faire le point sur l'avancement du projet, les difficultés rencontrées, les tâches non terminées. L'objectif étant de faire émerger de nouvelles idées et de désigner les tâches à effectuer lors de la séance suivante en fonction des priorités. Pour finir, un compte-rendu est envoyé aux commanditaires pour leur exposer l'avancement du projet et leur poser d'éventuelles questions.

- **Relation avec nos commanditaires :**

D'un accord commun, nous avons décidé de fonctionner en méthode Agile avec nos commanditaires. Cela nous a permis, notamment lors des premières séances, d'échanger en face à face avec notre commanditaire Jean-Pierre Papelard sur la problématique, l'objectif réel du projet, les objets à manipuler, les attentes et des méthodes de résolution. Ces discussions se déroulaient en général avant la pause repas. Il nous a également consacré du temps pour nous expliquer le fonctionnement du projet PPMD.

Par la suite, nous avons gagné en autonomie et allions plutôt le rencontrer pour les questions techniques. Toutefois, l'échange et le suivi était maintenu par le mail comportant le compte-rendu de la séance.

Puis Jean-Pierre Papelard a dû s'absenter pour le stage à Forcalquier à la fin d'Avril. Nous avons donc été en contact avec Arnaud Le-Bris, en plus de Jean-Pierre Papelard.

- **Réflexion sur les étapes du projet**

- **Prise en main / Modélisation**

La première étape consiste à s'approprier le sujet, se familiariser avec les logiciels utilisés par nos commanditaires et réfléchir sur la solution à mettre en œuvre. Cette partie est indéniablement un élément structurant du projet. C'est dans celle-ci que sont posés tous les fondements qui mènent à la réussite de ce projet. Ce fut le cœur des discussions des premières séances. Elle sera accompagnée par une décomposition du problème en fonctions élémentaires pour faciliter le développement.

- **Développement**

Lors de la phase de développement, toutes les tâches élémentaires prévues par le diagramme de fonctions sont à implémenter en C++.

En parallèle du développement, une gestion de projet est nécessaire. En effet, la répartition des tâches entre les différents membres du groupe doit être effectuée tout au long du projet.

De plus, un comité de pilotage se tenant le 30 mars 2016, permet de présenter notre avancement et notre méthode de gestion de projet. Il nous permet également de remettre un nouveau cap sur notre gestion et de redéfinir des termes de notre projet avec nos commanditaires. C'est pourquoi il doit être préparé de manière à présenter notre projet de manière succincte. Il permet aussi de voir si les attentes des commanditaires sont satisfaites. Le développement devrait alors suivre la partie « communication » et vice-versa.



Enfin, notre rapport est avancé au fil des séances par les différents membres du groupe.

- **Planning PERT et GANTT (voir Annexe)**

Nous avons commencé par créer un planning sommaire dans lequel trois séances sont prévues pour l'analyse du sujet et le reste des séances consacré plutôt à la programmation tout en gardant une séance à la fin pour préparer la soutenance finale.

Après avoir défini toutes nos tâches à réaliser durant notre projet, deux diagrammes ont été créés : un PERT et un GANTT. Cela a permis de visualiser la répartition en fonction du temps et des ressources disponibles des tâches élémentaires. La phase d'analyse a été estimée à 8 séances (1/3 des séances planifiées). Cette phase importante permet de comprendre le sujet et de le modéliser afin que la phase de développement prenne en compte le plus de cas possibles. Durant cette phase, la première journée est consacrée exclusivement à la compréhension et la reformulation du sujet, en échangeant les commanditaires. Après cet entretien, nous devons définir la problématique et commencer à réfléchir sur nos choix à faire. De plus, l'organisation interne et la distribution des rôles et les compétences du groupe sont effectuées à ce moment-là. Le chef de projet est également élu.

Lors de la deuxième séance, nous avons pris en main les données et les différents logiciels nécessaires. Nous avons également prévu du temps pour configurer ces outils. Notre commanditaire nous a expliqué le projet précédent des PPMD ainsi que le paramétrage de Visual Studio 2013. Ensuite, un premier planning plus détaillé a été fait pour définir les tâches à effectuer pendant le projet.

Les deux dernières journées de l'analyse sont consacrées à la création des différents diagrammes utiles à la gestion de projet ainsi qu'à la modélisation précise du sujet. De plus, un modèle de données devra être créé durant la dernière séance de la phase d'analyse.

Ensuite, nous entamons la phase de développement qui s'étale sur 18 séances. Durant cette phase, deux cas sont traités simultanément : le cas cible et le cas sphère. Pour le cas cible, chaque séance sera consacrée à une tâche élémentaire : création d'un plan, changement de référentiel, construction d'une ortho-image, corrélation et reconstruction. Pour le cas sphère, deux méthodes ont été choisies. La méthode avec la couleur est l'idée initiale exprimée par notre commanditaire. La méthode utilisant la transformée de Hough, un outil mathématique qui permet de retrouver des formes, a été envisagé dans le but d'optimiser notre programme. Plus technique, elle sera développée seulement si le temps nous le permet.

Durant la phase de développement, du temps sera consacré pour prendre en main des bibliothèques qui peuvent s'avérer utiles. Cela évitera d'avoir à réinventer la roue. Le rapport avancera à un rythme régulier tout au long du projet.

Enfin, le 13 mai 2016 aura lieu une préparation à la soutenance du 17 mai 2016. Le 18 mai 2016 est réservé à la préparation de la démonstration de notre projet dans le hall de l'école qui a lieu le 19 mai 2016. Ces séances sont alors destinées en majorité à la communication externe.

# Déroulement du projet

- **Prise en main**

Lors de la prise en main du sujet, nous avons découvert la structure de l'ancien projet PPMD. Nous avons également découvert l'environnement de développement Visual Studio 2013 utilisé par Jean-Pierre Papelard et avec lequel nous avons dû nous familiariser. Nous avons récupéré quelques nuages contenant chacun une cible, soit une ciblette papier, soit une sphère.

Pour modéliser notre projet, nous avons fait un brainstorming en se demandant ce que nous devons faire et comment y arriver. Pour cela, nous avons décomposé le sujet en un maximum de tâches puis en sous-tâches jusqu'à ce que chacune des fonctions nous paraisse triviale. Ainsi, un diagramme de fonctions a été modélisé avec les tâches élémentaires dans le but d'aider à la compréhension et au déroulement du projet. La première analyse a fait émerger ces différentes fonctions à programmer pour notre projet : retrouver le type de cible, trouver un plan, construire une ortho-image, corrélérer l'ortho-image avec une image de référence pour le cas 2D et filtrer selon la couleur pour le cas 3D.

Parallèlement à cela, un planning, et par conséquent, un diagramme de PERT et de GANTT ont été conçus. Ils ont pour objectif de modéliser la gestion des tâches en fonction des ressources humaines disponibles dans le temps imparti.

Une formation au logiciel Visual Studio 2013 a été réalisée par notre commanditaire pour pouvoir prendre en main cet outil de développement. Une explication du code préalablement réalisé par les PPMD a été faite.

De plus, un apprentissage avancé du C++ a été réalisé afin de se familiariser avec les pointeurs notamment, indispensables dans notre projet.

- **Analyse**

La phase d'analyse est une première phase importante de notre projet. Elle permet de lancer le développement de la manière la plus optimale possible, d'analyser et de modéliser notre sujet. Pour cela, un brainstorming a été effectué. Notre sujet consiste à rechercher les coordonnées exactes des points d'appui sur un nuage de points 3D dans le repère du laser. Pour cela, nous avons besoin de spécifier quels types de cible il faut rechercher. En effet, pour quel type de cible est-on capable de retrouver les coordonnées exactes sur le nuage de points 3D ?

Il existe différents types de cibles utilisés pour les points d'appui sur le terrain : des mini-ciblettes, des black & white, des cibles HDS, des balles de ping-pong et des boules de céramique.



Figure 1 : Exemple de cibles

Tout d'abord, nous avons différencié deux cas pour les cibles : le cas 2D ou plan (mini-ciblette, black & white, HDS) et le cas en 3D ou sphère (balle de pingpong et sphère). Ces deux cas distincts seront traités avec des méthodes différentes car on recherche respectivement un cercle et une sphère. Pour le cas 2D, à partir du nuage de point, on doit y extraire un plan, créer une ortho-image, effectuer une corrélation et obtenir la reconstruction des coordonnées exactes du point d'appui dans le repère laser. Cependant, pour le bon fonctionnement de notre programme, il faut que les cibles soient fixées droites pour qu'il n'y ait pas de problèmes pour la corrélation. Pour le cas 3D, nous avons proposé deux méthodes permettant de définir les coordonnées exactes du centre d'une sphère. La première utilise la couleur de la sphère que l'utilisateur aura définie au préalable. Pour cela, on doit détecter la couleur et en extraire la sphère associée, sur le nuage de point. Puis, par calcul par moindres carrés, les coordonnées exactes des points d'appui sont trouvées. La seconde méthode consiste à utiliser la transformée de Hough, qui permet également de trouver les coordonnées exactes de la sphère, en se basant sur la géométrie.

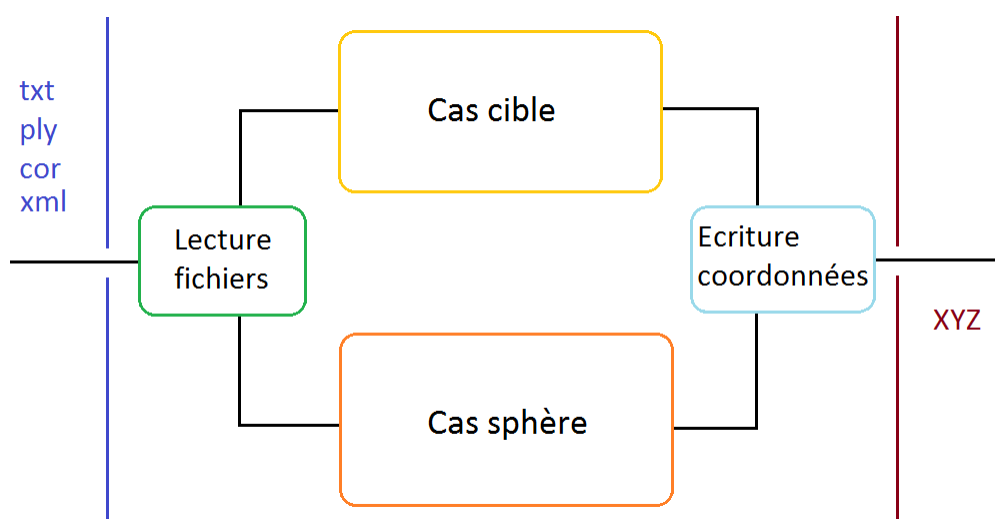


Figure 2 : Diagramme de fonctionnement général

Ensuite, les différents cas sont regroupés sur le diagramme de fonction qui montre toutes les tâches à effectuer. Pour chaque tâche, les données en entrées et en sorties sont

mentionnées. Ce diagramme permet de montrer l'enchaînement des tâches qui doivent être faites successivement ou qui peuvent être implémentées simultanément. Ainsi, après avoir lu les fichiers d'entrée, le cas plan et le cas sphère peuvent s'effectuer parallèlement.

Enfin, un modèle xml a été réalisé pour sauvegarder chaque type de cible. Tous leurs paramètres y sont intégrés. Ainsi, chaque cible sera connue de notre programme et pourra être détectée automatiquement par la suite. Pour la détection de la couleur dans le cas sphère, c'est à l'utilisateur du programme de mentionner la couleur utilisée sur la sphère en question.

- **Développement**

- **Technique utilisée**

Au début de notre projet, nous devons appréhender le projet antérieur réalisé par les PPMD. En effet, on a dû apprendre à manipuler les nuages de points 3D et se familiariser avec sa gestion en mémoire.

Par la suite, chacun va développer des méthodes permettant la résolution de chaque problème élémentaire.

- **Lecture des fichiers**

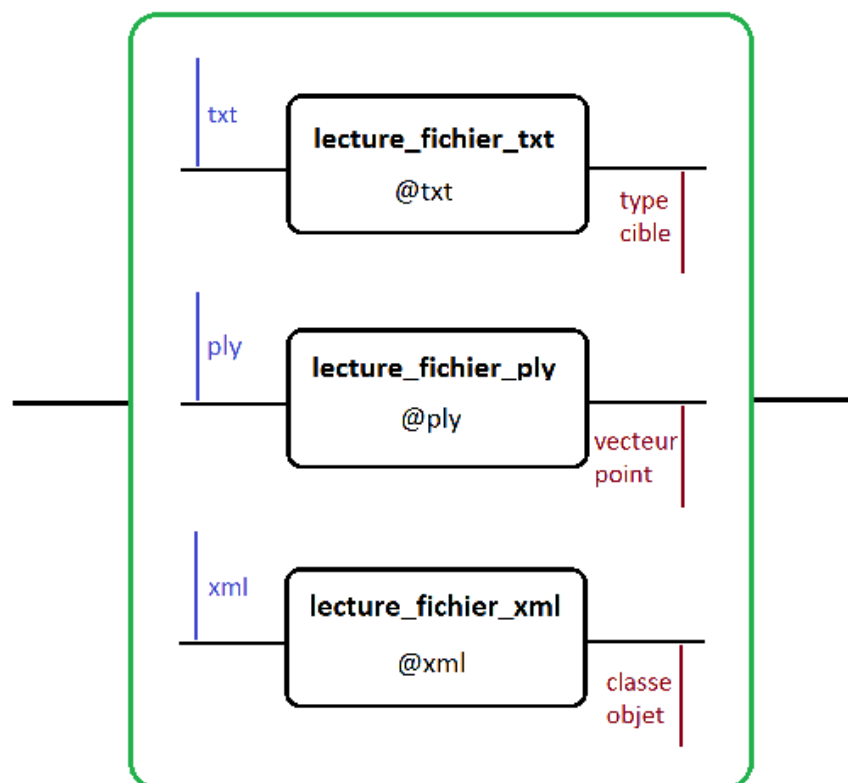


Figure 3 : Diagramme de lecture des fichiers

Notre programme doit lire différents types de fichiers en entrée :

- un fichier texte contenant le type de cible utilisé ;
- un fichier ply contenant le nuage de point 3D du point d'appui recherché ;
- un fichier model xml contenant les paramètres sous forme de classe de chaque cible possible.

#### ○ Cas 2D

Pour détecter les coordonnées exactes des points d'appui en 2D, c'est-à-dire les mini-ciblettes, black & white et cibles HDS, différentes fonctions élémentaires sont implémentées. Tout d'abord, la fonction détection du plan cherche un plan moyen qui passe par la majorité des points du nuage. Ensuite, une projection du nuage est effectuée sur le plan, ce qui permet la création d'une orthoimage - après un changement de référentiel. Cette orthoimage contient a priori l'information du centre de la ciblette. Ce centre est détecté par corrélation. Cela permet de remonter au point du nuage correspondant au centre de la cible et ainsi récupérer ces coordonnées dans le repère du laser.

#### *Détection du plan*

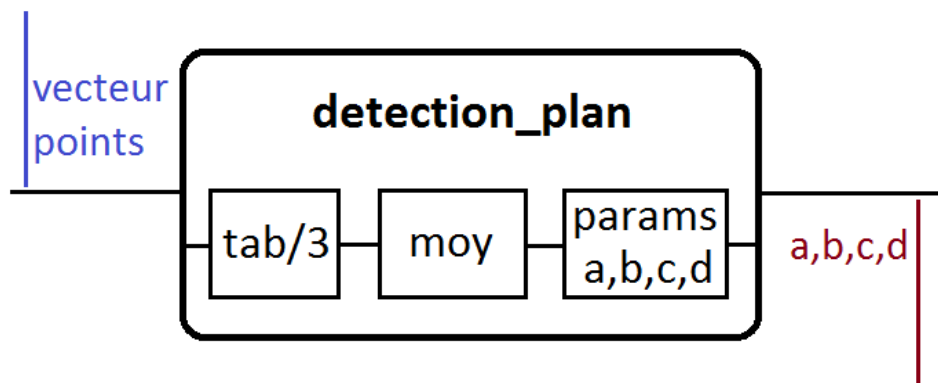


Figure 4 : Diagramme de détection du plan

Cette fonction cherche le meilleur plan passant au travers du nuage de points 3D. Initialement, nous divisons le nuage en 3 sous-nuages selon le nombre de points. Puis nous calculons leur barycentre ce qui donnait 3 points distants, à partir desquels on calculait les paramètres du plan. Nous avons été confrontés à de multiples reprises au cas où les 3 points étaient alignés. Par conséquent, le plan cherché possédait un degré de liberté de trop autour d'un de ses vecteurs directeurs. Pour corriger ce souci, nous sommes passés à une estimation des paramètres du plan par moindres carrés.

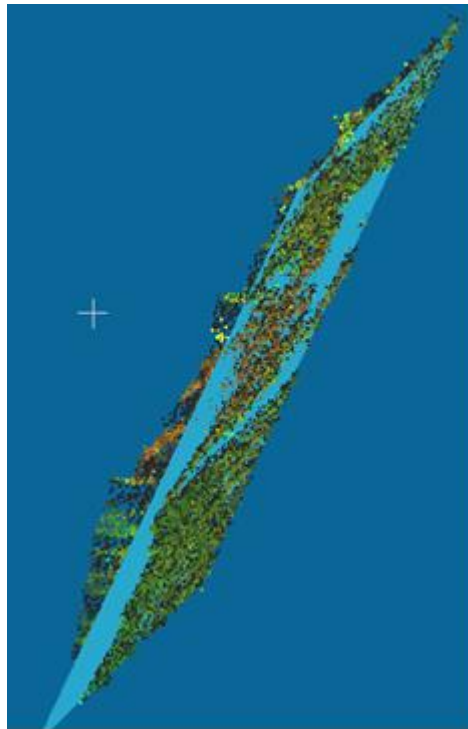


Figure 5 : Détection du plan par rapport aux points

### Orthoimage

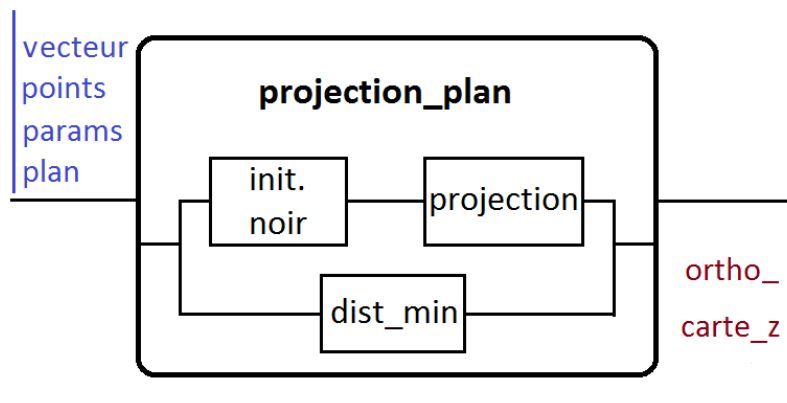


Figure 6 : Diagramme de création de l'ortho-image

La création de l'orthoimage repose sur la projection du nuage de point sur le plan créé précédemment combiné à un changement de repère. Nous étions partis sur l'idée d'une carte de profondeur pour conserver la composante z de chaque point. En effet, une fois sur l'orthoimage, chaque point perd une dimension et ne permet plus d'accéder à ses trois composantes. Nous avons préféré retrouver cette troisième coordonnée grâce aux coordonnées du pixel sur l'orthoimage. En effet, en connaissant le numéro de ligne et de colonne, nous pouvons appeler la fonction qui a permis de trouver l'identifiant du point qui a été dessiné sur l'orthoimage. Ainsi on remonte à ses coordonnées tridimensionnelles.

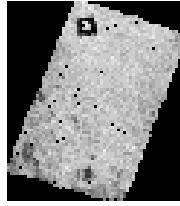


Figure 7 : Exemple d'orthoimage

### Corrélation

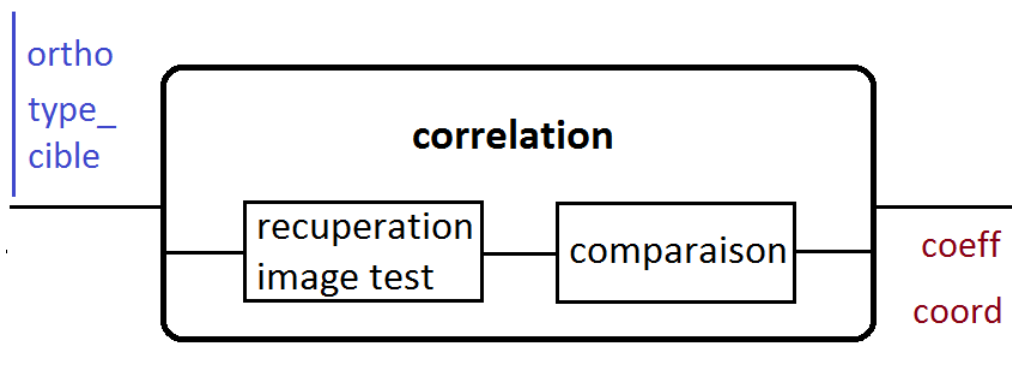


Figure 8 : Diagramme de corrélation

La corrélation compare l'orthoimage générée à l'étape précédente avec une image de référence contenue dans le modèle de données. L'image de référence va parcourir l'orthoimage. Plus la zone d'intersection « ressemble » à l'image de référence, plus elle aura un score élevé. La zone avec le plus grand score est celle ressemblant le plus à l'image de référence. Le centre de cette zone correspond au centre de la cible, puisque l'image de référence est un patron de la cible recherchée. On connaît donc les coordonnées du pixel central, et comme dit précédemment, on remonte à ses coordonnées tridimensionnelles.



Figure 9 : Exemple d'image de référence



Figure 10 : Exemple d'image à corrélérer



Figure 11 : Exemple de corrélation



### ○ Cas 3D

Comme nous avons pu le voir, les points de géoréférencement peuvent être constitués de balles de ping-pong ou de sphères en céramique. Nous nous retrouvons alors dans le cas d'une étude en 3D. Deux méthodes ont été envisagées, l'une par extraction de couleur de la sphère et par moindres carrés, l'autre à l'aide de la transformée de Hough.

Pour le cas de la méthode par extraction de couleur, nous avons gardé les points du nuage ply d'entrée suivant des conditions sur la couleur. Nous avons utilisé les coordonnées des points filtrés pour en calculer un centre approximatif. Nous avons tenu compte du vecteur directeur entre la station laser et le rayon de la sphère fixé à l'aide du modèle, pour obtenir les coordonnées approchées du centre de la sphère. En appliquant la méthode des moindres carrés, nous obtenons les coordonnées exactes de la sphère.

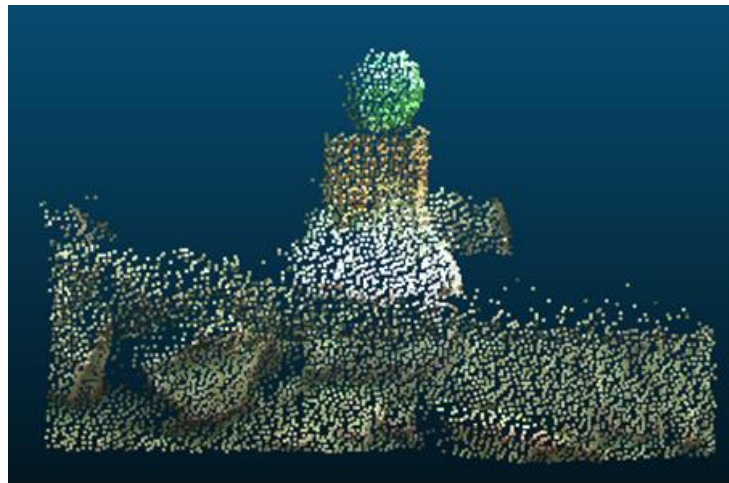


Figure 12 : Exemple d'une sphère en couleur

### *Détection de la couleur*

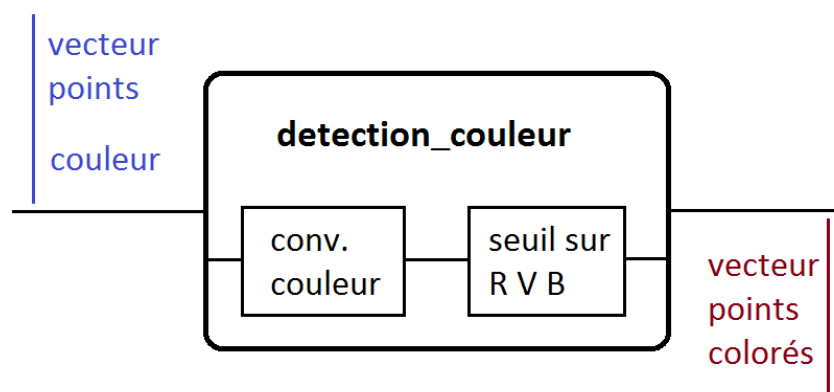


Figure 7 : Diagramme de détection de couleur

Cette fonction permet de détecter la couleur de la sphère en faisant des conditions sur les taux rouge-vert-bleu et de garder uniquement les points colorés de la sphère qui répondent aux conditions.

### *Calcul des coordonnées approchées*

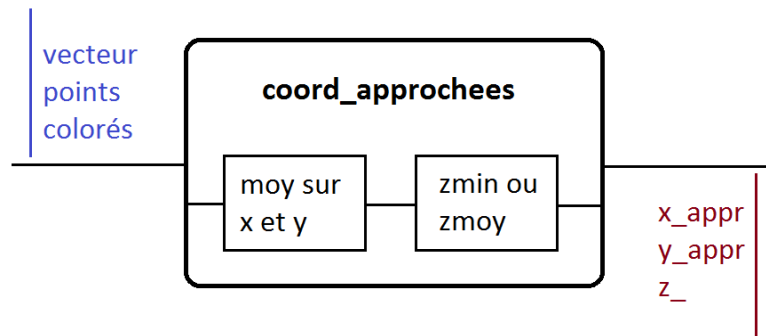


Figure 8 : Diagramme de coordonnées approchées (1/2)

A partir du vecteur de points colorés de la sphère, on peut déterminer les coordonnées approchées du centre de la sphère. Nous faisons la moyenne des coordonnées.

### *Calcul de la distance approchée*

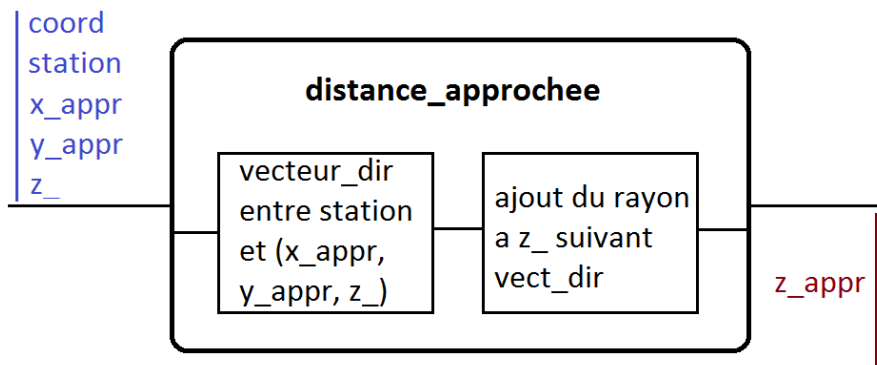


Figure 9 : Diagramme de coordonnées approchées (2/2)

Cette fonction permet de calculer un vecteur directeur entre la station laser et le centre approché de la sphère. Ensuite, on ajoute le rayon de la sphère, contenu dans le fichier modèle xml chargé, suivant le vecteur directeur.

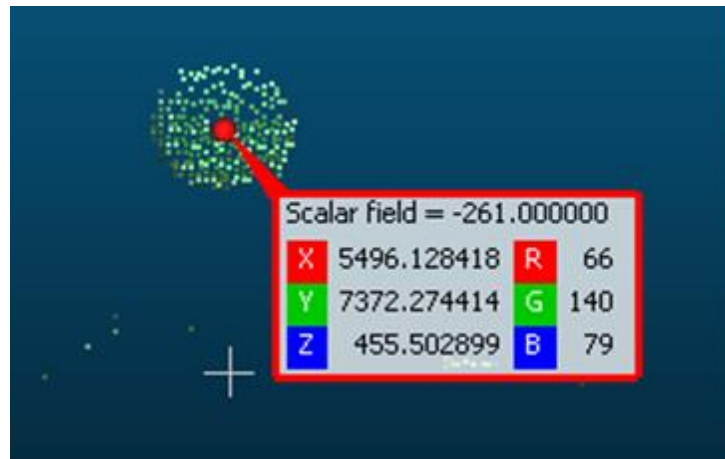


Figure 10 : Résultat de filtrage par la couleur et du centre approximatif

### Moindres carrés

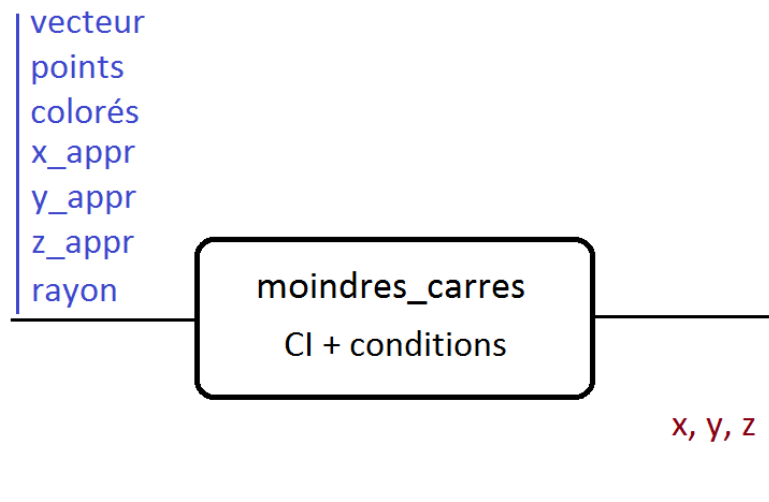


Figure 13 : Diagramme des Moindres Carrés

A l'aide de la méthode des moindres carrés, nous pouvons calculer les coordonnées exactes du centre de la sphère en effectuant plusieurs itérations à partir des coordonnées approchées.

Nous avons l'équation d'une sphère de la forme :

$$d(x, y, z) = \sqrt{(xi - xs)^2 + (yi - ys)^2 + (zi - zs)^2}$$

En dérivant, on obtient :

$$\begin{aligned}\frac{\partial d}{\partial x} &= \frac{(xi - xs)}{\sqrt{(xi - xs)^2 + (yi - ys)^2 + (zi - zs)^2}} \\ \frac{\partial d}{\partial y} &= \frac{(yi - ys)}{\sqrt{(xi - xs)^2 + (yi - ys)^2 + (zi - zs)^2}} \\ \frac{\partial d}{\partial z} &= \frac{(zi - zs)}{\sqrt{(xi - xs)^2 + (yi - ys)^2 + (zi - zs)^2}}\end{aligned}$$

On obtient alors le système :

$$d(x, y, z) = d(x, y, z)|_{x_0, y_0, z_0} + \begin{pmatrix} \frac{\partial d}{\partial x}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d}{\partial y}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d}{\partial z}|_{x_0, y_0, z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix}$$

Sous forme matricielle, nous avons le système  $Y = AX$  où :

$$Y = \begin{pmatrix} rayon - d(x_1, y_1, z_1)|_{x_0, y_0, z_0} \\ \dots \\ rayon - d(x_n, y_n, z_n)|_{x_0, y_0, z_0} \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial d(x_1, y_1, z_1)}{\partial x}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d(x_1, y_1, z_1)}{\partial y}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d(x_1, y_1, z_1)}{\partial z}|_{x_0, y_0, z_0} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial d(x_n, y_n, z_n)}{\partial x}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d(x_n, y_n, z_n)}{\partial y}|_{x_0, y_0, z_0} & \frac{\partial d(x_n, y_n, z_n)}{\partial z}|_{x_0, y_0, z_0} \end{pmatrix}$$

Nous estimons  $X$  par  $\hat{X} = (A^t P A)^{-1} A^t P Y$  où  $P$  est une matrice de poids. Puis par itération, en tenant compte du facteur de variance, nous arrivons au résultat voulu.

Nous obtenons le résultat suivant de manière imagée. Le point rouge correspond aux coordonnées initiales avant les Moindres Carrés et le point bleu correspond aux coordonnées après.

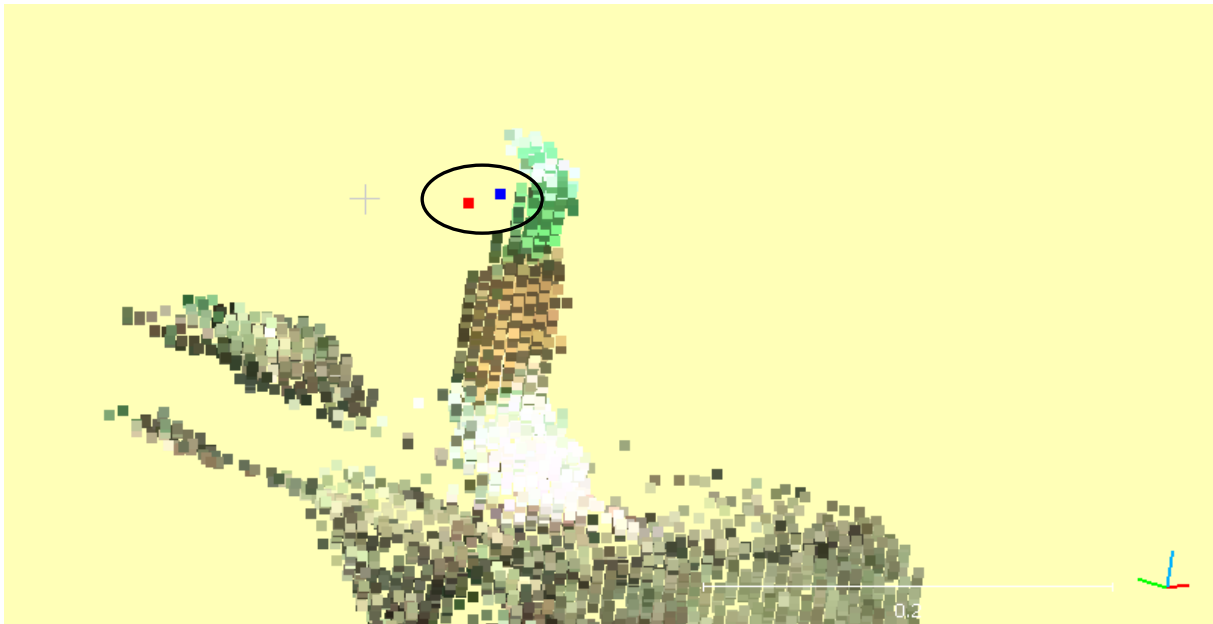


Figure 14 : Exemple de comparaison avant-après Moindres Carrés

L'autre méthode consiste juste à implémenter la transformée de Hough pour obtenir directement les coordonnées exactes de la sphère.

### Hough

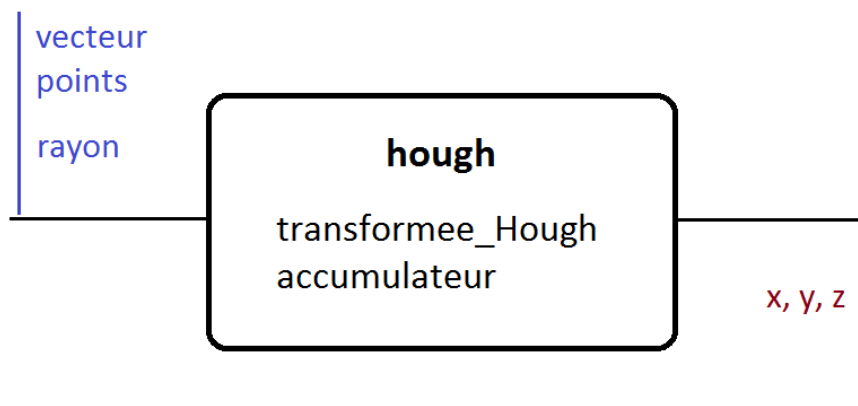


Figure 15 : Diagramme de la transformée de Hough

La transformée de Hough est un outil de morphologie mathématique. L'objectif ici est de trouver une sphère dans un espace de points en se basant uniquement sur leur géométrie. Une sphère nécessite 4 paramètres pour être définie : les coordonnées de son centre et son rayon. La transformée de Hough va parcourir chacun des points du nuage. Sur chacun des points du nuage, on génère une sphère dont on fait changer les paramètres sur une plage de données, et on incrémente un tableau multidimensionnel (4D) à chaque nouvelle sphère. Les cellules de ce tableau dont la valeur est la plus élevée correspondent

aux paramètres de la sphère qui est la mieux représentée dans le nuage. On a ainsi directement accès aux coordonnées 3D du centre de la sphère.

- **Fichier de sortie**

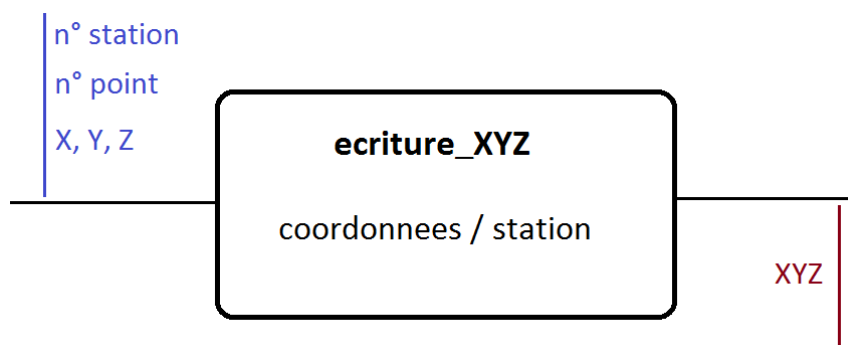


Figure 16 : Diagramme d'écriture

Un fichier de sortie est généré par station. Celui-ci contient d'une part les informations relatives à la station, c'est-à-dire ses coordonnées dans le système terrain issues du fichier cor. D'autre part seront enregistrées les écarts en coordonnées entre le centre de la cible trouvé par nos méthodes, et les coordonnées de la station.

## Résultats

- **Cas 2D :**

La méthode par corrélation est fonctionnelle sur les tests unitaires réalisés. Elle permet de remonter au centre de la cible dans certains cas des données que nous disposons. Nous avons remarqué plusieurs éléments qui influencent les résultats de manière sensible pour être considérés :

- La qualité du nuage en entrée. Un nuage peu dense ne génère pas une orthoimage suffisante pour corrélérer dessus.
- L'estimation du plan. Bien qu'on soit passé aux moindres carrés, cela pose certains problèmes qui sont liés ensuite à la projection et donc à la génération d'orthoimage où l'on ne voit même pas la cible à l'œil...

- La résolution de l'orthoimage change sensiblement les résultats de la corrélation, même si la résolution de l'image de corrélation suit.
- L'orientation des cibles sur le nuage de points.
- Le nombre de plans dans les nuages en entrée.

Cela nous amène à dire que la corrélation n'est pas la solution idéale pour détecter les cibles planes. De plus, il réside une ambiguïté liée à l'orthoimage. En effet, lors de sa génération, on considère le premier point rencontré dans la colonne orthogonale au plan de l'orthoimage et centré sur le pixel en cours de traitement. Le centre de la cible pourrait très bien être le deuxième ou troisième de la colonne orthogonale, notamment s'il s'agit d'un laser multi écho. Le passage en deux dimensions est donc une méthode qui ne garantit pas le résultat à la sortie.


#### ○ Cas 3D :

La méthode de filtrage par couleur et par moindres carrés permet de trouver exactement les coordonnées du centre de la sphère, et par conséquent celles du point d'appui recherché. Cette méthode a parfaitement fonctionné sur les nuages en notre possession et son résultat est satisfaisant. Cela répond bien à la problématique.

## Difficultés rencontrées

Lors de notre projet, nous avons eu des difficultés dans la prise en main de l'ancien projet PPMD. En effet, le code était techniquement compliqué, et très peu documenté ... Un apprentissage du langage C++ a été nécessaire durant les premières séances, notamment en ce qui concerne les pointeurs. Aussi, le changement de commanditaire est arrivé dans une période délicate du projet, au moment où les bogues minimes se sont fait sentir. Néanmoins, nous avons su les corriger avant la démonstration. Le manque de données test est aussi un élément à soulever. Très peu de nuages de points ont permis de tester notre projet sur des données réelles avec nos contraintes, mise à part les nuages tests fictifs que nous avons créés nous-même. Les solutions développées répondent parfois à la problématique, et d'autrefois il est difficile d'en tirer une explication logique.

## Amélioration du projet

Notre programme permet de trouver les coordonnées exactes des points d'appui dans le cas 3D. Cependant, pour ce qui est du cas 2D, la corrélation n'étant pas optimale, nous ne trouvons pas parfaitement les coordonnées du point d'appui. Pour améliorer cela, il faudrait, par exemple, disposer d'un échantillon d'images de référence plus important ou de disposer de ce type de cible : 

Sur cette cible, on peut facilement déterminer le point de son centre en déterminant l'intersection entre les deux droites grâce au fort contraste entre les triangles de la cible. Une démonstration d'un constructeur de laser à Munich procéder à la détection de ce type de cible en temps réel.

## Bilan

Dans l'ensemble, le projet s'est bien déroulé. Il s'est effectué dans la bonne entente et dans la bonne humeur. Chacun a pu exposer ses idées sur le projet. Les tâches ont été réparties équitablement entre les différents membres de l'équipe et nous a permis à tous de travailler sur chacun des aspects du projet. Aussi, ce projet nous a permis de manipuler du C++ avancé, ce qui est un excellent point en amont des stages pluridisciplinaires.



## Conclusion

Ce projet a permis la mesure automatique de points d'appui à partir de nuages de points 3D. L'acquisition des coordonnées des points 3D fonctionne correctement pour le cas 3D. Concernant le cas 2D, la corrélation fonctionne mais elle ne permet pas d'obtenir de résultats satisfaisants pour la problématique. Toutefois, il s'agit d'un résultat en soit (le fait que ça ne marche pas). Nous espérons avoir ainsi rendu service à nos commanditaires. Nous en profitons pour les remercier de leur disponibilité et l'autonomie qu'ils nous ont accordée.

# Annexe

	Prévisionnel															Final																
	Mars							Avril		Mai						Mars						Avril		Mai								
	2	9	14	15	16	23	30	6	13	3	4	9	13	17	18	19	2	9	14	15	16	23	30	6	13	3	4	9	13	17	18	19
Logiciel	■																■															
Analyse	■	■	■	■													■	■	■	■	■											
Reformulation du sujet	■																■															
Prise en main des données		■	■															■														
Planning		■	■															■	■		■											
Diagrammes/Pert/Gantt			■															■	■		■											
Modèle de cibles				■															■	■												
Diagramme de fonctions				■																■	■											
Apprentissage C++			■	■	■														■	■	■											
Développement				■	■	■		■	■	■	■	■	■	■								■	■		■	■	■	■	■	■		
Lecture des fichiers				■	■																								■			
Cas 2D				■	■	■		■	■	■	■	■	■	■								■	■		■	■	■	■	■	■		
Détection de plan				■	■																	■	■									
Changement de référentiel						■																	■									
Création de l'orthoimage							■	■																■	■							
Corrélation									■	■															■			■	■	■		
Reconstruction											■																					
Cas 3D												■	■	■											■	■	■	■	■	■		
Couleur												■	■												■	■						
Coordonnées initiales												■	■												■	■						
Moindres carrés													■	■													■	■	■			
Hough												■	■	■																		
Ecriture fichiers													■																■			
Suivi du projet	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Comité de pilotage							■															■										
Préparation à la soutenance													■															■				
Soutenance														■	■														■	■		
Préparation de la démonstration																■														■	■	
Présentation oral (hall de l'école)																■															■	