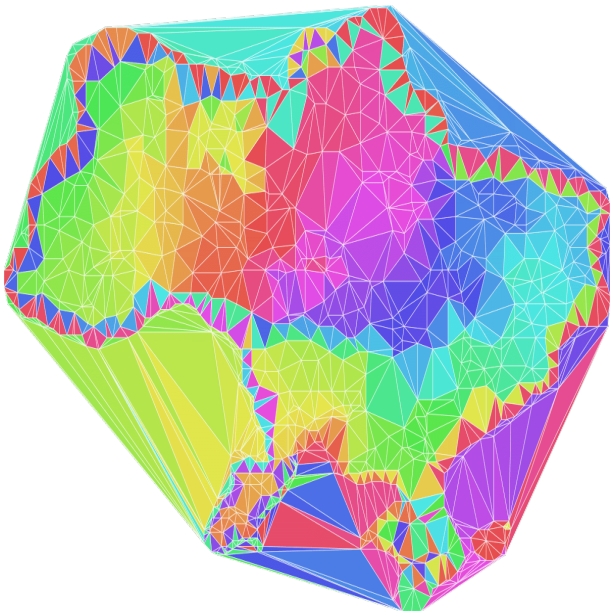
h e p i a
département I T I
ingénierie des technologies
de l'information

Hes·SO GENÈVE
Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale

Application de triangulation de points lidar sur le canton de Genève



Thèse de Bachelor présentée par

Jérôme CHÉTELAT

pour l'obtention du titre Bachelor of Science HES-SO en

Ingénierie des technologies de l'information avec orientation en logiciels et systèmes complexes

Septembre 2020

Professeur-e HES responsable

Orestis MALASPINAS

Légende et source de l'illustration de couverture : Une triangulation de Delaunay des points aléatoires. Source : tiré de https://github.com/mapbox/delaunator

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier monsieur Orestis Malaspinas, qui m'a encadré tout au long de ce travail de bachelor et qui m'a fait partager ses intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité et pour ses nombreux encouragement.

Je remercie monsieur Gabriel Strano pour son aide dans la rédaction du code et la relecture de mon mémoire ainsi que ses précieux conseils pour la rédaction du mémoire.

Je tiens à remercier également madame Emmanuelle Moreau pour la relecture de mon mémoire ainsi que pour son soutien et ses nombreux encouragements qu'elle m'a prodiguée tout au long de mon travail.

h e p i a
département I T I
ingénierie des technologies
de l'information

Printemps 2020
Session de bachelor

APPLICATION DE TRIANGULATION DE POINTS LIDAR SUR LE CANTON DE GENÈVE

ORIENTATION : LOGICIELS ET SYSTÈMES COMPLEXES

Descriptif :
Les nuages de point lidar aériens sont une technologie de récolte de topographie qui a émergé durant les vingt dernières années. Ces données sont difficiles d'utilisation sans un traitement préalable. Nous proposons ici plusieurs outils de traitement de données lidars ainsi que de maillage. Dans un premier temps, les outils devront être implémentés ensuite un client web permettant de parcourir les fichiers et de les visualiser dans un navigateur web devra être implémenté.

Travail demandé :

Dans les limites du temps imparti, les tâches suivantes seront réalisées :

- Explorer des manières de sous-échantillonner, filtrer des données lidar et les implémenter.
- Explorer des manières efficaces de créer un maillage à la volée à partir de données lidar.
- Explorer des manières de combiner plusieurs maillages, de les décimer ainsi que de les sous-échantillonner. Par la suite, les implémenter.
- Création d'un client web permettant de parcourir et de charger des maillages ou des données lidar dans un navigateur web.

Candidat :

CHÉTELAT JÉRÔME

Filière d'études : ITI

Professeur responsable :

ORESTIS MALASPINAS

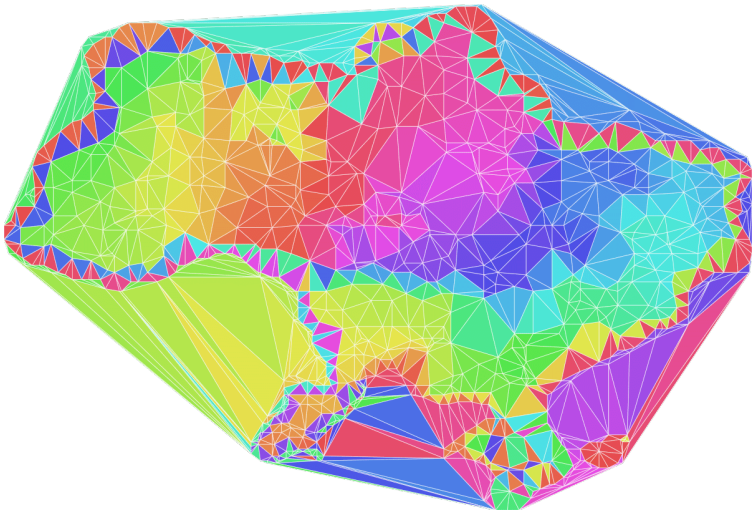
En collaboration avec :

Travail de bachelor soumis à une convention de stage en entreprise : non

Travail de bachelor soumis à un contrat de confidentialité : non

RÉSUMÉ

Depuis l'antiquité à nos jours, les cartes sont le reflet des premières formes de données récoltées par l'Homme. La cartographie a aidé l'humanité à définir des chemins à travers le monde et à naviguer. Cependant avec les fortes avancées technologiques des dernières décennies, les données récoltées ont augmenté massivement et notablement dans la cartographie avec les données LIDAR. Ces dernières représentent une des informations collectées des plus massives. Elles sont utilisées dans l'étude topographique de régions, dans les géosciences, dans la science environnementale ou bien encore elles viennent en aide au guidage automatique de véhicule terrestre. Un problème fréquent lié à ces données est le traitement réalisé avant leurs utilisations dans des applications, qui est souvent nécessaire afin de filtrer tout ce qui ne présente aucune utilité et pourrait même fausser les résultats. Il reste cependant difficile de les traiter manuellement due à la quantité de données importante. Pour ce faire, des méthodes analytiques sont employées afin d'accélérer ce processus au travers de systèmes automatisés. Un autre problème présent est leurs utilisations pour reconstruire des surfaces. Les méthodes automatisées n'étant pas à 100% fiables, il est nécessaire de vérifier la cohérence des données ainsi que la qualité des maillages produits. Ce travail se focalise principalement sur la création d'outils de transformation et de nettoyage de données LIDAR et l'affichage de maillages produit par les transformations au travers d'un client web. Il est également focalisé sur la conception d'outils de traitement de maillage résultant d'un traitement de données LIDAR.



Candidat-e :

JÉRÔME CHÉTELAT

Professeur-e(s) responsable(s) :

ORESTIS MALASPINAS

Filière d'études : ITI

Travail de bachelor soumis à une convention de stage en entreprise : non

Travail soumis à un contrat de confidentialité : non

LISTE DES ACRONYMES

API Application Programming Interface. 24, 25

ASPRS American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 3

CAO Conception Assistée par Ordinateur. 8

CORS Cross-Origin Resource Source. 24

GPS Global Positioning System. 3, 7

LAS Laser Format. xi, 3, 4, 6

LIDAR Light Detection And Ranging. 3, 10, 12, 27

REST Representational State Transfer. 18, 24

SITG Système d'information du territoire à Genève. 1

STL Stéréolitographie. 8, 19, 21, 25, 26

WASM WebAssembly. 18, 24, 25, 27

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Références des URL

— URL01 https://www.ti.inf.ethz.ch/ew/Lehre/CG13/lecture/Chapter%206.pdf

— URL02 https://hackaday.io/project/20628-open-simple-lidar

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

Contexte

Depuis l'antiquité à nos jours, les cartes sont le reflet des premières formes de données récoltées par l'Homme. La cartographie a aidé l'humanité à définir des chemins à travers le monde et à naviguer. Cependant avec les fortes avancées technologiques des dernières décennies, les données récoltées ont augmenté massivement et notamment dans la cartographie avec les données LIDAR. Ces dernières représentent un nuage de points dense qui sont actuellement une des informations collectées des plus massives. Elles sont utilisées dans l'étude topographique de régions, dans les géosciences, dans la science environnementale ou bien encore elles viennent en aide au guidage automatique de véhicule terrestre. Un problème fréquent lié à ces données est le traitement réalisé avant leurs utilisations dans des applications, qui est souvent nécessaire afin de nettoyer tout ce qui ne présente aucune utilité et pourrait même fausser les résultats. Il reste cependant difficile de les traiter manuellement due à la quantité de données importante. Pour ce faire, des méthodes analytiques sont employées afin d'accélérer ce processus au travers de systèmes automatisés. Un autre problème présent est leurs utilisations pour reconstruire des surfaces. Les méthodes automatisées n'étant pas totalement fiables, il est nécessaire de vérifier la cohérence des données ainsi que la qualité des reconstructions de surface.

Ce travail de bachelor est une continuation d'un projet de semestre effectué sur la reconstruction de surface à partir de données lidar. Les données lidar sont misent à disposition par le Système d'information du territoire à Genève (SITG) et sont utilisés avec la triangulation de Delaunay pour créer des maillages reconstruisant les surfaces des régions.

Buts

Le but principal de ce travail est de créer une panoplie d'outils de traitement de fichiers lidar ainsi que de fichier stl. Ils doivent permettre à un utilisateur de reconstruire des surfaces grâce à une triangulation sur un nuage de points, nettoyer des données lidar provenant d'un aéronef ainsi que d'afficher un fichier stl dans un navigateur web. Un objectif supplémentaire est de mettre en oeuvre ces outils grâce au langage de programmation Rust sur un stack d'application entier (un seul langage pour le serveur et le client).

Méthodologie

Dans un premier temps nous avons recherché des algorithmes de traitement de données lidar. Nous avons par la suite implémenté ceux que nous pensions judicieux d'être présent dans l'application. Enfin nous avons testé ces algorithmes sur un jeu de données et fait des mesure de performance.

Dans ce mémoire, nous allons en un premier détailler les formats de fichier rencontrés dans l'application. Ensuite nous détaillerons les méthodes algorithmiques misent en oeuvre pour réaliser des traitements sur lesdits fichiers. Enfin nous allons voir comment ces dernières ont été implémenté dans l'application et comparer leurs résultats. Les sources des implémentation sont disponible à l'adresse : https://githepia.hesge.ch/jerome.chetelat/meshtools

CHAPITRE 1 : DONNÉES ET FORMAT DE FICHIER

Dans ce chapitre nous allons aborder les différents formats de données qui seront et utilisé dans la suite de ce document.

1.1. NUAGE DE POINT

Un nuage de points est un ensemble de points de données dans un système de coordonnées à trois dimensions. Il est généralement produit à partir d'un instrument de Light Detection And Ranging (LIDAR) ou en français détection et estimation de la distance par la lumière. Il s'agit une technique de mesure de distance où la lumière réalise un aller-retour entre sa source et un objet. On chronomètre le temps entre le moment où une impulsion de lumière est émise par un laser et son retour vers un capteur. En connaissant la vitesse de propagation de la lumière dans l'environnement où elle évolue, il est possible de déterminer la distance qui sépare l'objet du capteur. Plus précisément, il s'agit de la distance séparant le dispositif de mesure et un point de l'objet frappé par la lumière émise. Cette opération effectuée à de multiples reprises en changeant par petit pas l'angle du laser, créer des points qui une fois réunis, constituent un nuage de points profilant l'environnement autour de l'instrument. Si l'instrument de mesure est placé sur un aéronef et que la source de lumière est dirigée vers le bas, il est ainsi possible de capturer, sous forme d'un nuage de points, une région du globe. Ce cas nécessite de connaître la position Global Positioning System (GPS) du véhicule au moment de la capture d'un point afin de mettre en relation tous les points à la fin de la mesure. Il existe différentes versions de la spécification et ce document va se concentrer sur la version un point deux.

a. Format LIDAR

Le format de stockage des nuages de points de données LIDAR, est un format binaire dont les spécifications sont définies par l'American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Le format LAS est composé de trois sections, respectivement : L'en-tête de fichier, les enregistrements à longueur variable et les données liées aux points récoltés.

En-tête
Enregistrements à longueur variable
Données des points

TABLEAU 1.1 – Sections composant un fichier au format LAS, Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 2)

Dans toutes les sections, on définit les types de données dans le tableau 1.2

Type de donnée	**Nombre d'octets**
char	1
unsigned char	1
short	2
unsigned short	2
long	4
unsigned long	4
double [1]	8

TABLEAU 1.2 – Type de données de la définition du format LAS. Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 2-3)

b. En-tête public

L'en-tête public comporte les métadonnées du fichier. Il est composé de tous les champs du tableau 4.1 présent dans l'annexe 1. Ils sont tous encodés en mode little endian. Tous les champs inutilisés doivent être remplis par des bits nuls. La signature de fichier doit obligatoirement contenir les quatre caractères "LASF" et celle-ci est requise par la spécification. Un programme lisant le fichier doit vérifier cette signature pour déterminer qu'il s'agisse bien d'un fichier LAS.

Parmi les champs, les facteurs X, Y et Z scale sont utilisés avec les valeurs X, Y et Z offset pour obtenir des coordonnées cartésiennes des axes. Ces valeurs sont globales au fichier. Voici la formule pour chaque coordonnée :

$$X_{coordinate} = (X_{record} * X_{scale}) + X_{offset}$$

$$Y_{coordinate} = (Y_{record} * Y_{scale}) + Y_{offset}$$

$$Z_{coordinate} = (Z_{record} * Z_{scale}) + Z_{offset}$$

Les champs min et max X, Y, Z sont les valeurs minimales et maximales non mises à

1. selon le standard IEEE 754

l'échelle des données des points présents dans la dernière section du fichier.

c. Enregistrements à longueur variable

Ce bloc suit directement l'en-tête de fichier et peut avoir une ou plusieurs entrées. Le nombre total d'entrées est spécifié dans le champ "Number of Variable Length Records" de l'en-tête de fichier. Ce bloc doit être lu de manière séquentielle, car chaque entrée est de taille variable. Chaque entrée est débutée par un en-tête de 54 octets selon le tableau 1.3

Champ	Type de donnée	Taille (Octets)	Requis
Réservé	unsigned short	2	
User ID	char[16]	16	*
Record ID	unsigned short	2	*
Record Lenght After Header	unsigned short	2	*
Description	char[32]	32	

TABLEAU 1.3 – Champs de l'en-tête des enregistrements de longueur variable. Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 6)

Les enregistrements peuvent provenir de sources différentes. Elles sont identifiées par le champ "User ID" qui est une chaîne de caractères unique et enregistrée auprès d'un organe d'identification des producteurs de données lidar afin de prévenir que deux sources différentes aient la même séquence.

Chaque utilisateur dispose de 65536 enregistrements au maximum qu'il gère de manière indépendante. Les identifiants des enregistrements sont renseignés dans le champ "Record ID" de l'en-tête. Il peut également, s'il le souhaite, publier une signification liée aux identifiants choisis.

"Record Lenght After Header" : il s'agit d'un offset en nombre d'octets qui indique l'endroit où commencent les données après l'en-tête de 54 octets. La source des données peut renseigner des informations supplémentaires dans l'en-tête, mais elles ne suivront pas le standard de la spécification.

d. Données des points

Les données des points commencent à l'adresse du champ "Offset to Point Data" de l'en-tête de fichier. Il existe quatre formats pour les entrées de point.

Le format zéro contient les champs communs à tous. Les informations présentées sont dans

le tableau 1.4

Champ	Format de donnée	Taille	Requis
X	long	4 octets	*
Y	long	4 octets	*
Z	long	4 octets	*
Intensity	unsigned short	2 octets	
Return number	3 bits (bits 0, 1, 2)	3 bits	*
Number of returns (given pulse)	3 bits (bits 3, 4, 5)	3 bits	*
Scan Direction Flag	1 bit (bit 6)	1 bit	*
Edge of Flight Line	1 bit (bit 7)	1 bit	*
Classification	unsigned char	1 octet	*
Scan Angle Rank (-90 to +90) – Left side	char	1 octet	*
User Data	unsigned char	1 octet	
Point Source ID	unsigned short	2 octets	*

TABLEAU 1.4 – Information d'un point présent dans un fichier LAS, Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 6)

Les points sont collectés à partir des impulsions de laser envoyées et détecter par un capteur le tout depuis un aéronef.

Un exemple d'appareils est celui de la figure 1.1

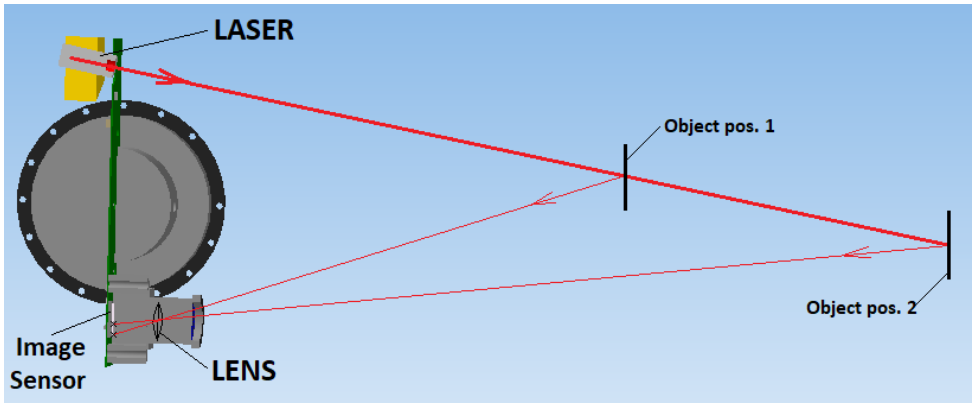


ILLUSTRATION 1.1 – Schéma représentant un instrument de mesure LIDAR. Source : tiré de réf URL02

On peut considérer une entrée dans le fichier comme une impulsion de lumière émise lors de la mesure des points. Chaque impulsion peut recevoir plusieurs retours d'où le champ "Number of returns (given pulse)". Il est aussi nécessaire de connaître l'angle de l'appareil par rapport à l'horizon afin de corriger la position du point récolté, car seul l'angle de l'instrument de mesure ne suffit pas. Cet angle est en degré et allant de -90° à +90° à partir de l'aile gauche de l'aéronef dans le sens du vol.

Le format un ajoute simplement des informations concernant le temps GPS à laquelle le point a été enregistré. Il est de même des autres format cependant ces information ne sont pas utiles pour ce travail.

e. Classification des points

Les points collectés sont généralement classés selon le type de sol rencontré. Les valeurs se trouvent au tableau 1.6. Toutes les informations concernant le classement sont contenues en un octet et en quatre sections. Elles sont expliquées dans le tableau 1.5.

Les cinq premiers bits correspondent à une table standard des classifications. Si le bit cinq à un, le point a été créé par un logiciel de manière synthétique et si le bit sept est aussi à un, le point ne doit pas être pris en compte. Il est considéré comme étant supprimé.

0	1	2	3	4	5	6	7
N° de classification					Synthétique	Point clé	Retenu

1 octet

TABLEAU 1.5 – Représentation des bits dans l'octet de classification. Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 8)

N° de classification (bit 0 à 4)	**Signification**
0	Créé, jamais classé
1	Non classé
2	Sol
3	Faible végétation
4	Végétation moyenne
5	Végétation dense
6	Bâtiment
7	Bruit
8	Point de masse
9	Eau
10-11	Réservé
12	Point superposé
13-31	Réservé

TABLEAU 1.6 – Signification des valeurs de classification. Source : adapté de LAS Specification Version 1.2 (2008, p. 8)

1.2. MAILLAGE

Les maillages sont une modélisation géométrique d'un domaine spatial continu par des éléments proportionnés finis. Les maillages simplifient donc un système par un modèle représen-

tant ce système ou son environnement. Ils permettent notamment de réaliser des simulations ou bien d'avoir une représentation graphique numérique.

a. Fichier Stéréoligraphique

Le format de Stéréolitographie (STL) est conçu par la société 3D System pour contenir des maillage d'objets tridimensionnels. Il a été pensé pour permettre un prototypage rapide dans les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ce format ne décrit que la géométrie de la surface d'un modèle. Il existe un format binaire et un format ASCII, le dernier laissant une empreinte dans la mémoire morte plus conséquente.

On y stocke les triangles composant le modèle où chaque sommet du triangle est décrit par ses coordonnées cartésiennes (x, y, z). Chaque triangle partage, sans exception, deux sommets avec un triangle voisin. La coordonnée dans l'axe z est considérée comme l'axe vertical, ceci peut être gênant pour les programmes considérant l'axe y comme l'axe vertical.

b. Format ASCII

Le format commence par la séquence de caractères : "solid *nom*" où *nom* est une séquence correspondant au nom du modèle qui est facultatif. Si le nom est vide, l'espace après "solid" est obligatoire. Un triangle s'écrit de la manière suivante :

```
facet normal nx ny nz
    outer loop
        vertex v1x v1y v1z
        vertex v2x v2y v2z
        vertex v3x v3y v3z
    endloop
endfacet
```

Les sommets sont définis à l'aide du mot clé "vertex" qui sont contenus dans un bloc loop. Les n et les v sont des nombres à virgule flottante. Ils s'écrivent dans le format "signe-mantisse-e-signe-exposant", par exemple "6.248000e-003". La fin du fichier ASCII est définie par la séquence : "end solid".

c. Format binaire

Le format binaire présente un avantage considérable par rapport au format ASCII, il est beaucoup moins volumineux.

Les 80 premiers octets sont un commentaire. Les quatre suivants sont un entier 32 bits qui indique le nombre de triangles présent dans le fichier. Chaque triangle est encodé sur 50 octets. Comme le format ASCII, les nombres sont encodés conformément à la spécification IEEE-754 et en mode little endian.

Le format dans le fichier est le suivant :

```
unsigned char[80] - header
unsigned int - total number of triangles

foreach triangle:
    float - normal vector
    float - vertex 1
    float - vertex 2
    float - vertex 3
unsigned short - control word
end
```

CHAPITRE 2 : ALGORITHMES

Ce chapitre contient les différents algorithme rencontré lors de l'application

2.1. NETTOYAGE

L'utilité de réduire la quantité de données sauvegardées de nos jours au vu des moyens de stockage moderne employés n'est plus une occupation majeure. Cependant, certains systèmes d'informations restent limités en mémoire et en puissance de calcul notamment les smartphones ou encore les ordinateurs portable. Dans ces cas, Le nettoyage des données LIDAR est aussi utile sur des systèmes plus puissants pour accélérer l'utilisation ultérieure des fichiers par la quantité réduite d'information. Les méthodes présentées ici ne sont pas exhaustive et peuvent être utilisées de manière indépendante ou bien combinées ensemble.

a. Lidar

Les données brutes provenant des instruments LIDAR contiennent souvent des informations bruitées et inutile. Ces dernières peuvent fausser les résultats finaux et prennent de la mémoire de stockage supplémentaire.

a.1. Nettoyage par point pondéré

Une autre manière de réduire la quantité de données est de remplacer plusieurs points par un seul où l'élévation de celui-ci équivaut à la moyenne des élévations des voisins. En d'autres termes

$$P_{\bar{y}} = \frac{1}{n}\sum_{i=0}^{n} p_{iy}$$

où n est le nombre de voisins d'un point P. Le choix de l'endroit où l'on créera le point peut être déterminé à l'aide d'une condition, p. ex.

$$\sum_{i=0}^{n} dist(P, p_i) \geq \varepsilon$$

Un effet de bord de cette méthode est le lissage des surfaces plates. Un exemple serait les illustrations 2.1 et 2.2 où l'on peut observer qu'après une reconstruction de surface, on aperçoit que les points on une tendance à moins osciller dans l'axe vertical.

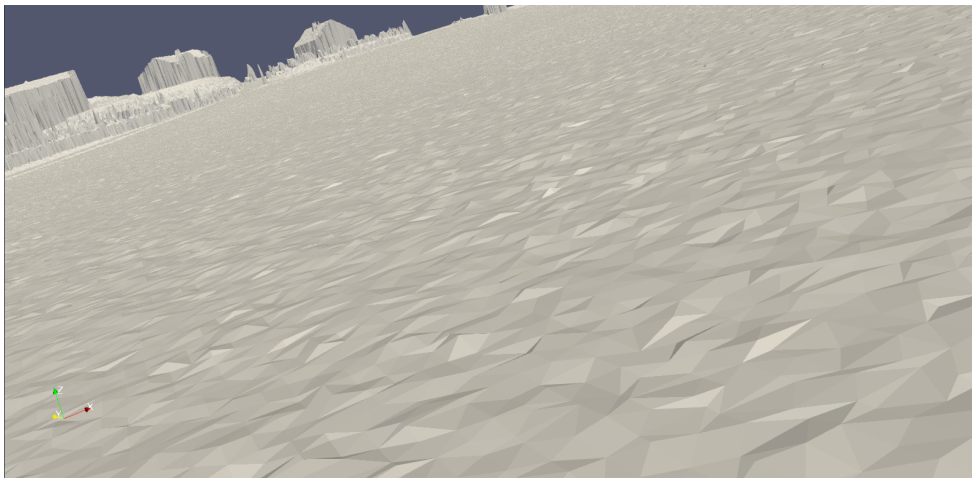


ILLUSTRATION 2.1 – Surface plane avant le nettoyage. Source : réalisé par Jérôme Chételat

ILLUSTRATION 2.2 – Surface plane après le nettoyage. Source : réalisé par Jérôme Chételat

a.2. Nettoyage par point moyen

Ce filtre se base sur l'utilisation de l'intensité de retour d'une impulsion. Les points à retour multiple peuvent être nombreux en présence d'arbres. Au lieu d'avoir plusieurs points de retour, on les remplace par un seul point qui prend une moyenne de toutes les positions de retour de la même impulsion. En terme mathématique, on a donc :

$$P = \begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{pmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n} \begin{pmatrix} p_{i_x} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{pmatrix}$$

Où n désigne le nombre de retour d'une impulsion et p les points de l'impulsion.

a.3. Nettoyage par classe de point lidar

Une méthode différente pour nettoyer les données est de se baser sur la classification des points présentée au chapitre 1.1. En connaissant le type de points qui nous intéresse, il est possible de charger en mémoire uniquement le ou les types de points voulus.

La manière de procéder est la suivante. Lors de la lecture du fichier lidar, la catégorie du point est testée.

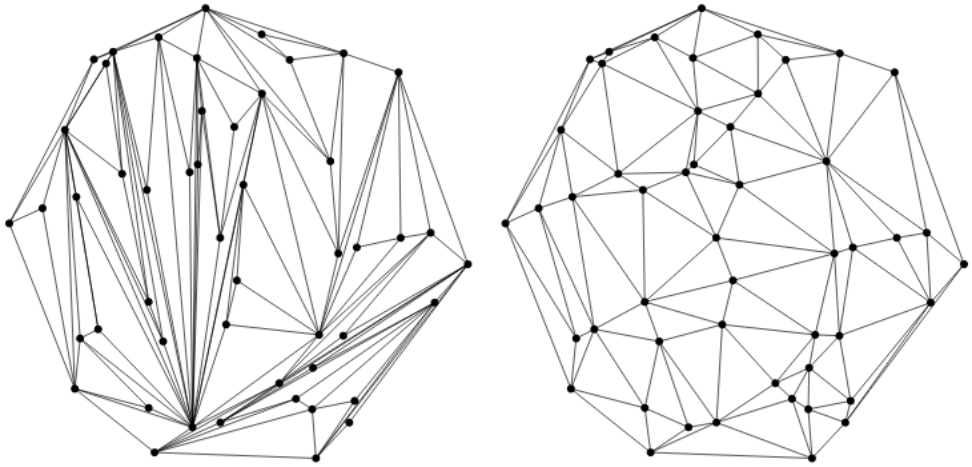
Une fois la lecture terminée, on réécrit la liste des points gardés dans un nouveau fichier LIDAR. Le fichier original peut être supprimé ou conservé.

b. Maillage

c. Nettoyage de maillage

2.2. Triangulation de Delaunay

Dans cette section, on détail les algorithme de reconstruction de surface. Il existe plusieurs manière de créer le même résultat mais une méthode utilisée est la triangulation de Delaunay. La triangulation de Delaunay est une manière de créer des triangles entre des points dispersés dans l'espace. Cette manière de trianguler les points permet de créer un résultat plus homogène que d'autres méthodes. On peut observer des résultats différents dans la figure 2.3



(a) Scan triangulation. (b) Delaunay triangulation.

ILLUSTRATION 2.3 – Deux triangulations du même jeu de données. Source : tiré de ref URL01

a. Bowyer-Watson

Il existe plusieurs algorithmes pour créer des triangles entre des points. Un algorithme conceptuellement simple est celui de Bowyer-Watson. C'est un algorithme itératif découvert par Adrian Bowyer et David Watson. Le principe de ce dernier repose sur l'ajout progressif de points dans la triangulation. Après chaque ajout, de nouveaux triangles sont formés à partir du point ajouté et des sommets du triangle contenant le point.

Soit $\mathscr{P} \subset \mathbb{R}^2$ l'ensemble des points à trianguler et $\mathscr{T}$ les triangles appartenant à la triangulation. On construit dans un premier temps, un triangle $S \in \mathscr{T}$ tel que $\mathscr{P} \subset S$. On nomme ce triangle le "super-triangle". Il doit contenir en son sein l'ensemble des points $\mathscr{P}$. On ajoute donc trois points, les sommets de S dans $\mathscr{P}$.

On prend ensuite un point de $\mathscr{P}$ puis on détermine dans quel triangle il se situe. Pour connaître l'appartenance d'un point dans un triangle, on détermine si un point est contenu dans le cercle circonscrit dudit triangle. La condition qui permet de déterminer si un point D est contenu dans le cercle-circonscris de $\triangle ABC$ est la suivante :

$$\begin{vmatrix} A_x - D_x & A_y - D_y & (A_x - D_x)^2 + (A_y - D_y)^2 \\ B_x - D_x & B_y - D_y & (B_x - D_x)^2 + (B_y - D_y)^2 \\ C_x - D_x & C_y - D_y & (C_x - D_x)^2 + (C_y - D_y)^2 \end{vmatrix} \geqslant 0$$

Si la condition est vraie, le point est relié au sommet du triangle qui le contient. Les arrête créées forment de nouveaux triangles appartenant désormais à la triangulation $\mathscr{T}$.

On répète les opérations d'ajout de points et de création de triangles jusqu'à ce qu'on ait parcouru tous les points de P

Pour finir, on identifie les arrête reliées au sommet du super-triangle puis on les supprime de la triangulation $\mathscr{T}$. On supprime également les sommets du super-triangle ainsi que ses arrêtes de $\mathscr{P}$ et de $\mathscr{T}$.

Le résultat est un ensemble de triangles $\mathscr{T}$ représentant la géométrie des surfaces. Cette dernière est appelée triangulation de Delaunay. Ce résultat est unique pour un ensemble de points $\mathscr{P}$ donné. Voici un exemple de triangulation finale dans la figure 2.4.

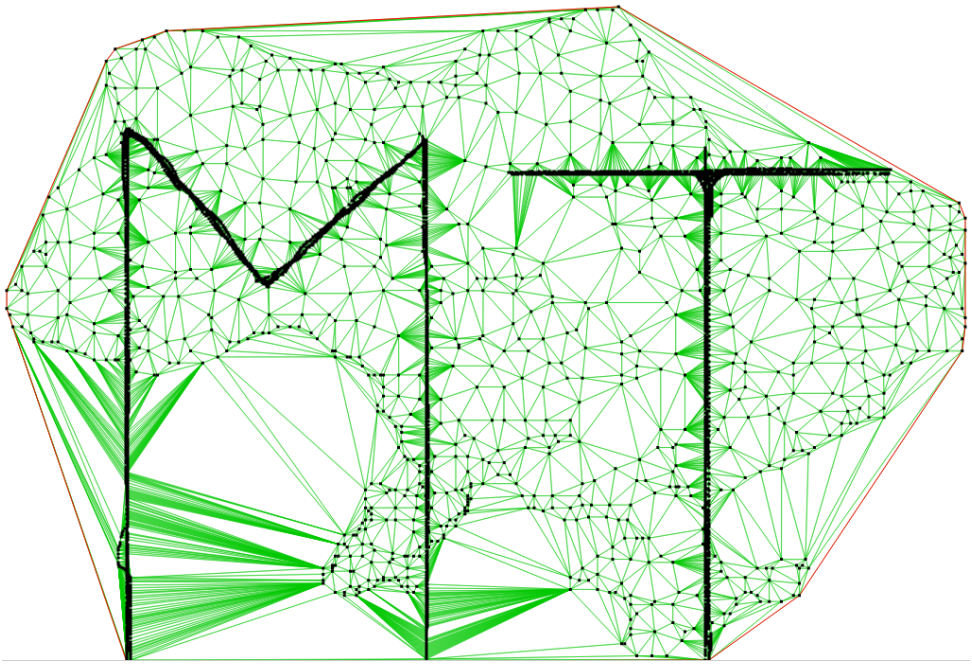


ILLUSTRATION 2.4 – Maillage résultant d'une triangulation de delaunay. Source : réalisé par Jérôme Chételat

b. Lee & Scachter

L'algorithme de Lee et Scachter est basé sur le principe de "Divide and conquer". Le principe consiste à former des petites triangulations à partir d'un espace divisé selon un axe. On applique une triangulation pour la première itération. Ensuite, on fusionne les triangulations entre elles et l'on répète ces étapes jusqu'à ne plus pouvoir en fusionner. Le résultat final est un maillage considéré comme étant triangulation de Delaunay.

2.3. FUSION DE MAILLAGE

L'algorithme présenté dans cette section concerne la fusion de maillage. Dans l'application du travail de bachelor, il se peut que l'on ait déjà des triangulations existantes et que l'on souhaite afficher un résultat de la fusion des deux triangulations. Il s'agit en réalité que d'une partie de l'algorithme de triangulation par Lee et Scachter basé sur le principe de "Divide and conquer".

Soit deux triangulations M_L et M_R linéairement séparable par une droite g. On cherche en premier les sites aux extrémités inférieures selon l'axe y et on les relie par une arrête coupant la droite g. L'arrête créée est nommée "base LR". On a donc une situation similaire à l'illustration 2.5

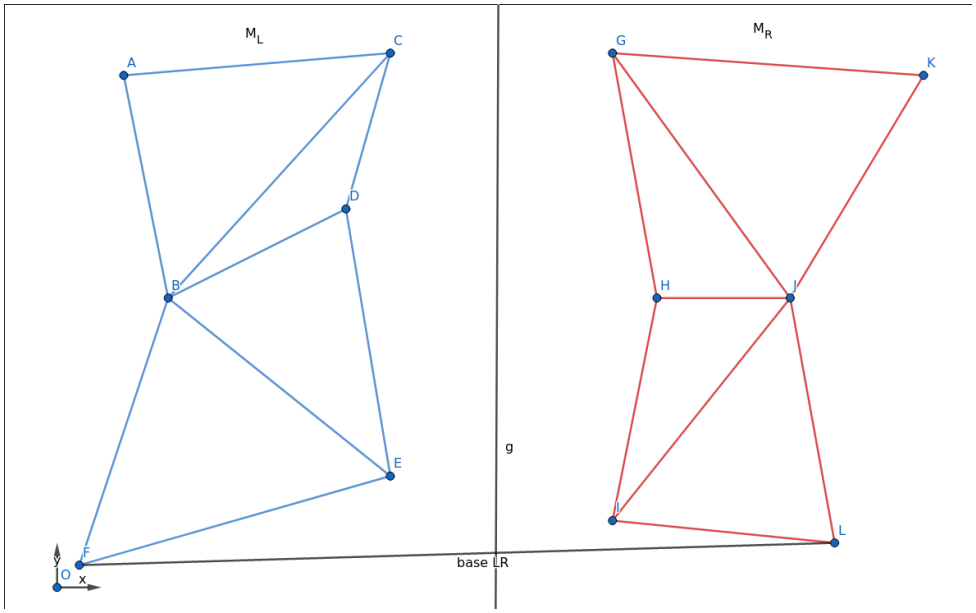


ILLUSTRATION 2.5 – Création de la base LR entre les deux maillages. Source : réalisé par Jérôme Chételat

On poursuit par la recherche d'un site candidat voisin d'une des extrémités de la base LR qui respecte les conditions suivantes :

1. L'angle ,dans le sens antihoraire pour un site de M_R et dans le sens horaire pour un site de M_L, par rapport à la base LR est inférieur à 180°.
2. Le cercle circonscrit défini par les deux extrémités de la base et l'une des extrémités avec un candidat ne contient pas un prochain candidat potentiel en son sein.

Si les deux conditions sont satisfaites, le site devient un candidat final pour le maillage en

question. Si la première condition n'est pas respectée, aucun candidat pour le maillage n'est choisi et l'arrête reliant le candidat actuel avec la base est supprimé de la triangulation.

Le processus de choix d'un candidat se poursuit tant qu'aucun candidat final ne soit choisi ou qu'on détermine qu'aucun candidat ne peut être choisi.

Les illustrations 2.6 et 2.7 représente le choix d'un candidat final pour chaque maillage. Cela ne représente que la première itération.

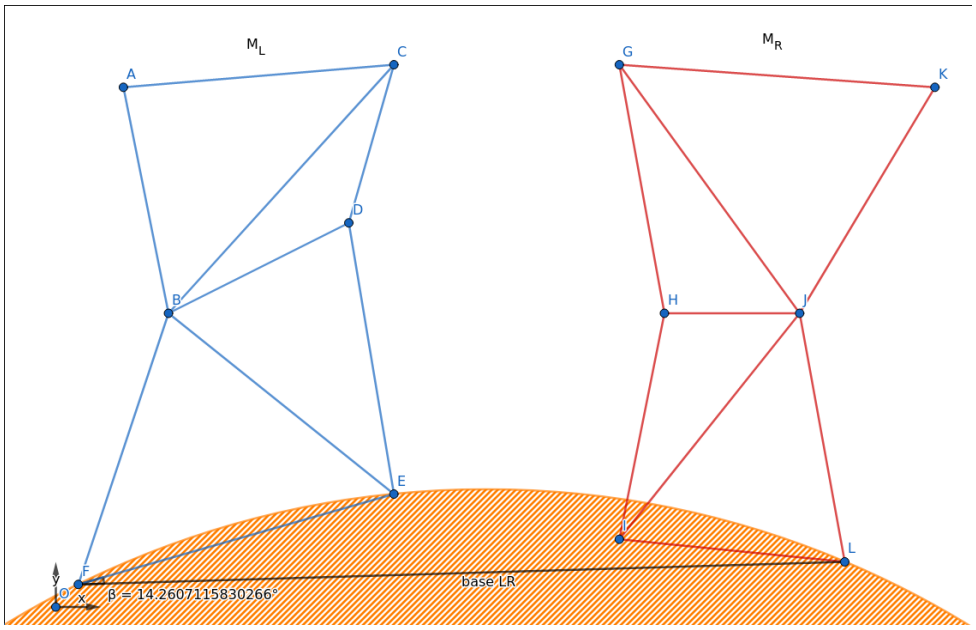


ILLUSTRATION 2.6 – Candidat final du maillage M_L. Source : réalisé par Jérôme Chételat

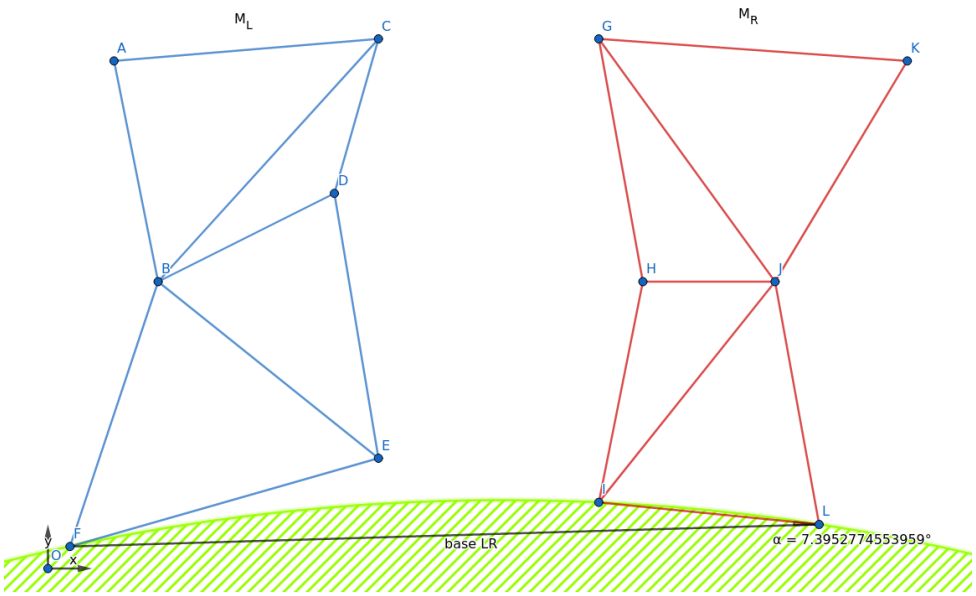


ILLUSTRATION 2.7 – Candidat final du maillage M_R. Source : réalisé par Jérôme Chételat

Une fois que les candidats pour chaque maillage ont été déterminés, si un seul candidat final est présent, on lie le candidat par une arête avec le site de la base du maillage opposé. Dans le cas où deux candidats sont choisis, on détermine un dernier test. On vérifie qu'un candidat final n'est pas contenu dans le cercle circonscrit de l'autre. Si c'est le cas, le candidat qui contient le site dans le cercle circonscrit est alors abandonné et celui qui n'en contient pas est utilisé pour créer une nouvelle base. On peut observer que dans le la figure 2.6 le site I est contenus dans le cercle circonscrit formé par les points F, E et L. Dans ce cas, le site E n'est pas maintenu en tant que candidat final et une arrête entre I et F est créée. Celle-ci devient alors la nouvelle base.

Les opérations de recherche de candidat et de création d'arêtes continuent jusqu'à ce que plus aucun candidat final ne soit obtenu.

CHAPITRE 3 : IMPLÉMENTATIONS

Dans ce chapitre, on détaillera l'architecture du projet ainsi que les technologies et les bibliothèques utilisées pour développer les différentes parties de l'application.

3.1. RUST

Rust est un langage de programmation système à usage général [2]. C'est un langage moderne et mutiparadigme. Grâce au principe de *ownership* ou propriété des données, Rust empêche un grand nombre de bogues lors de l'écriture du code. Dans la nomenclature de Rust, le mot "crate (" désigne un paquet ou une bibliothèque externe. Une particularité de Rust est le **ownership** ou la propriété des données. Ce langage permet une compilation vers les plateformes Windows, MacOS et Linux.

a. Rust is the new JavaScript

Le choix du langage Rust n'est pas anodin. Un des buts de ce projet était d'expérimenter un stack web applicatif utilisant un seul langage et jusqu'à présent un langage règnait dans ce domaine. Il s'agit de JavaScript car depuis la naissance des sites web dynamique, il n'avait pas de concurrent. Cependant depuis l'apparition du WebAssembly (WASM) dans les navigateurs, il n'est plus le seul. D'autre langage telle que le Rust compile désormais en WASM. Cependant le support de cette plateforme, au moment de l'écriture de ce mémoire, reste encore expérimental.

3.2. ARCHITECTURE

L'application est composée de quatre modules principaux.

— Une bibliothèque regroupant des fonctions et des structures communes.
— Des utilitaires, ce sont les outils en ligne de commande qui implémentes les pipelines
— Un serveur web, celui-ci expose des fichiers pour le client web à travers une api Representational State Transfer (REST)
— Un client web permettant à un utilisateur de visualiser des maillages dans un navigateur web.

En ce qui concerne le module *utilitaire*, l'architecture en pipeline est utilisé pour tout les binaires. Il est composé de 4 étapes.

2. Peut être utilisé dans l'écriture de kernels ou d'applications

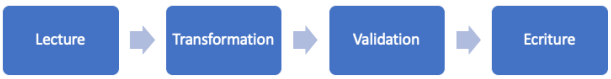


ILLUSTRATION 3.1 – Structure de fichier présent dans le module de la librairie de l'application. Source : réalisé par Jérôme Chételat

Chacun des utilitaires adapte ce pipeline pour traiter des données spécifique.

3.3. BIBLIOTHÈQUE

La bibliothèque contient les outils de lecture et d'écriture de fichiers pour les formats du chapitre 2.

Elle a comme dépendance principale les crates *stl-io* qui implémentes les structures pour écrire les fichiers STL et *las-rs* qui expose les structures et méthodes liées aux données lidar.

a. Nettoyage

Les implémentations des filtres sont dérivées du trait **MeshFilter** ou du trait **LidarFilter**. Leurs définitions sont les suivantes :

```
pub trait MeshFilter {
    fn apply(&self, mesh: IndexedMesh, epsilon: f32) -> IndexedMesh;
}

pub trait LidarFilter {
    fn apply(&self, points: Vec<Point>) -> Vec<Point>;
}
```

Les traits sont ensuite spécialisés dans le type de filtre voulu.

b. Triangulation

La librairie contient un module de triangulation. On y trouve les implémentations des algorithmes de triangulation réalisés lors du projet de semestre, mais également un algorithme de

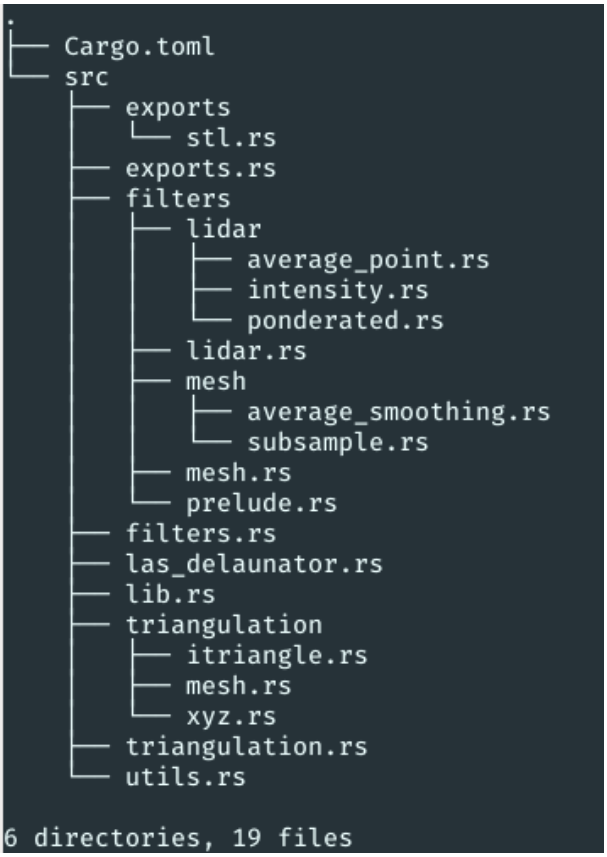


ILLUSTRATION 3.2 – Structure de fichier présent dans le module de la librairie de l'application. Source : réalisé par Jérôme Chételat

fusion de triangulation.

b.1. Triangulation de Bowyer-Watson

Cette implémentation est celle du projet de semestre. Actuellement l'algorithme a une complexité temporel de $O(n^2)$ à cause de la recherche d'appartenance d'un point à un triangle. Cependant la complexité pourrait théoriquement être réduite à $O(n\log(n))$ en utilisant un dictionnaire.

b.2. Fusion de triangulation

Pour ce qui est de la fusion, une structure propre à la librairie était nécessaire en plus des structures de données offertes par la crates stl-io. Elle est définie de la manière suivante :

```rust
pub struct Mesh {
    /// Vertices composing the mesh
    pub vertices: Vec<XYZ>,
    /// Indexed triangles of the mesh
    pub faces: Vec<usize>,
    /// Indexed vertices part of the convex hull of the mesh
    pub hull: Option<Vec<usize>>,
    /// The neighbourhood of each indexed point
    pub neighbourhood: Option<Vec<HashSet<usize>>>,
}
```

La particularité de cette structure est qu'on y trouve un champ pour le voisinage du maillage qui est "neighbourhood" et second champ pour l'enveloppe convexe "hull". Ils sont optionnels pour maintenir une compatibilité avec les crates utilisées dans la librairie. Une des raisons vient du fait que lors de la lecture d'un fichier STL, on ne retrouve pas ces champs.

Une méthode utile pour s'assurer de la présence d'un voisinage est d'appeler la fonction neighbourhood. Elle renvoie le voisinage d'un maillage s'il est déjà présent, le cas échéant est de calculer les voisins.

Son implémentation est disponible dans l'annexe 3. Elle parcourt les différents triangles du maillage et pour chaque point présent du triangle, on ajoute ses deux voisins dans une liste.

Cette dernière peut cependant être améliorée car actuellement, une copie du voisinage est renvoyée à l'appelant. Ce qui à pour effet de créer des données dupliquée. Ce choix a été fait car l'utilisation du voisinage dans un algorithme de fusion nécessite de muter certaine partie. Une solution pour éviter ces duplications serait de créer une structure indiquant les parties qui ont mutés et de rendre la structure Mesh immutable. Lors d'un prochain appel de la fonction, cette dernière pourrait renvoyer un voisinage ayant les changements appliqués à partir de la structure précédemment décrite.

Concernant le champ hull, aucune méthode n'est disponible dans la librairy pour en calculé. Il est possible de le calculé au travers de la crate "ncollide" qui expose une version de quickhull, un algorithme de calcule d'enveloppe convexe.

Une fonction intéressante est la recherche d'un candidat final dans un maillage. Voici la signature de la fonction :

```
fn get_side_candidate(
        mesh: &mut Mesh,
        lr_indexed_point: usize,
        other_lr_point: &XYZ,
    ) -> Option<usize>;
```

Elle prend en paramètre un point indexé par un entier non signé dans le maillage passé en argument et une structure de point pour effectuer la recherche et retourne éventuellement un index pour le site choisi.

Une grosse partie de la fusion est réalisée dans la méthode **merge** avec comme signature :

```
/// Returns a Ok(Mesh) containing the fusion of two meshes togheter.
/// It needs the convex hull of each mesh.
pub fn merge(&mut self, other: &mut Mesh) -> Result<Mesh, &'static str>;
```

La méthode renvoie un maillage dans le cas où toute la fusion se serait bien déroulée sinon elle renvoie un message d'erreur.

Une partie intéressante de l'implémentation est la création des arêtes entre la base et un candidat.

Un point intéressant est l'utilisation de pattern matching provenant de langage de programmation fonctionnel pour vérifier les conditions énumérées dans le chapitre 2.3. Si un candidat final est choisi, il est ajouté a une liste d'arrête **edges** et à la fin de l'opération, cette liste est

utilisée afin de construire les nouveaux triangles entre les deux maillages.

3.4. UTILITAIRES

Ce module contient les binaires en ligne de commande pour traiter les données du chapitre 1. Chaque binaire utilise l'architecture en pipeline car c'est ce qui s'applique le mieux pour l'utilisation des outils.

Chaque utilitaire utilise une crate pour vérifier et extraire les arguments donnés à ce dernier. La crate se nomme *clap* et grâce à une macro de la crate, il est possible de définir simplement les arguments acceptés par l'utilitaire.

Voici la liste des commandes disponibles :

— las-delaunator : Triangulation par l'algorithme quickhull

— las-geometry : Triangulation par l'algorithme de Bowyer-Watson

— las-filtering : Nettoyage de points lidar

— las-sample : Prendre les n premiers points d'un fichier lidar

— las-map-geometry : Triangulation d'un ou plusieurs fichier simultanément

— mesh-merge : Fusion de maillage

— mesh-smoothing : Nettoyage de maillage

— mesh-subsample : Prendre qu'une partie des triangles du maillage

— to-txt : Transforme un fichier lidar en simple points ascii dans le format $x\ y\ z$

a. mesh-smoothing

Le binaire ici produit permet de nettoyer le bruit qui est généré par les points lidar aprés une triangulation. Il agit sur les triangles d'un maillage.

La commande prend en argument un fichier d'entré et un fichier de sortie. Il prend également en option un paramètre ε qui sert de critère pour appliqué le moyennage d'un point par rapport à ses voisins.

Pour réaliser le nettoyage, on itère à travers la liste des sommets du maillage. Pour chaque sommet, on vérifie si la différence entre la hauteur moyenne des voisins et le sommet actuel est inférieur au ε. Si la condition est vrai, dans ce cas on assigne la hauteur moyenne des voisins au sommet actuel. Le cas échéant, le sommet est simplement ignoré.

L'itération se fait sur une copie des sommets du maillage pour éviter d'avoir des incohérences de hauteurs avec les points voisins dans le cas où un sommet voisin d'un autre est modifié

avant ce dernier.

b. mesh-subsample

La commande permet de récupérer une partie des triangles d'un maillage. Elle prend en argument un fichier STL d'entré et un fichier STL de sortie.

On crée un itérateur sur les sommets du

c. mesh-merge

3.5. Stack Web

Cette section présente la partie concernant le web. On y détail l'implémentation de deux modules : le client et le serveur. Ces derniers forment le *stack web*.

a. Serveur

Le serveur consiste en un binaire Rust utilisant le framework actix-web. Le choix de l'utilisation de ce framework a été fait pour délégué la gestion des requêtes reçues de bas niveau ainsi que l'utilisation simple de fonctions asynchrones pour gérer ces dernières. Il a aussi été choisi car il est le seul, au moment de l'écriture de ce mémoire, à utiliser que des fonctionnalités stable du langage de programmation.

Le serveur est une Application Programming Interface (API) REST comprenant une route pour chaque fichier d'un dossier. Elle expose au web, les fichiers appartenant au dossier nommé *regions*. Ce dernier pouvant être donné en argument au serveur, à son lancement.

Concernant les mécanismes de Cross-Origin Resource Source (CORS), on utilise une crate de actix s'appelant *actix_cors*. Il s'agit d'un middleware actix s'ajoutant sur une ou plusieurs routes pour activer les mécanismes CORS.

La lecture et le découpage en paquet d'un fichier est réalisée par un autre module de actix.

b. Client

Le client web a été écrit en Rust et compilé en WASM. Il permet une visualisation de maillage au travers d'un navigateur web grâce à la bibliothèque graphique WebGL.

Cette partie utilise grandement une crate appelée "web-sys" qui expose des bindings pour le JavaScript. On utilise également la crate "nalgebra" qui propose des fonctions pour manipuler

des matrices 4x4 utilisées dans WebGL.

Lorsqu'on écrit du code Rust ciblant les plateformes web, plusieurs contraintes doivent être respectées. La première est que WASM étant un format sur 32 bits, la mémoire adressable par le programme n'est que de quatre gigaoctets. Une seconde contrainte est que les threads n'existe pas pour une application web et sont remplacés par les WebWorkers [3].

Lors du chargement de la page web, la première étape est de récupérer le fichier qui doit être affiché. Ceci est fait à partir de l'API *fetch* des navigateurs. On forge un objet requête en donnant le lien de téléchargement du fichier. Une fois téléchargé, on transforme la réponse en *blob*. Ce dernier est ensuite casté en tableau Rust à travers la crate *JsCast*. Enfin la lecture du fichier STL en binaire est déléguée à la crate *stl-io*.

3. Technologie des navigateurs web permettant l'exécution de code dans un processus en arrière plan de manière indépendante

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS

Dans ce chapitre, nous allons détailler les résultats obtenus par les différentes partie de l'application.

4.1. TRIANGULATION

La triangulation de Delaunay provient en grande partie du projet de semestre. Seule la partie fusion de maillage a été créer en supplément dans ce travail.

a. Algorithme de Bowyer-Watson

b. Fusion de triangulation

4.2. NETTOYAGE

4.3. STACK WEB

a. Serveur Web

Le serveur actuel permet les téléchargements de fichiers STL présent dans un dossier spécifique.

b. Client Web

Les tests suivants ont été effectué sur le navigateur Firefox version 81. Le client web permet actuellement de faire un rendu d'un maillage dans un navigateur web. Un fichier STL est téléchargé à l'aide de l'api *fetch* du navigateur au chargement de la page web.

Amélioration possible

Le chargement des vertex du maillage se faisant dans un seul file d'exécution, la page lors du chargement reste figée et peut ne plus répondre (cela. Il serait possible dans un futur proche de faire ces opérations dans des WebWorkers. Au moment de l'écriture de ce mémoire, les possibilités d'utiliser des WebWorkers en Rust est encore expérimental.

CONCLUSION

Ce travail avait pour objectif de créer et de mettre à disposition des outils pour manipuler les données LIDAR ainsi qu'une interface web pour les afficher. Les outils devaient pouvoir filtrer des données LIDAR et les trianguler de manière efficace, de filtrer et fusionné des maillages et pour cela, un travail de recherche sur les formats de données a été réalisé pour tiré meilleure partie des informations à disposition. Les fonctionnalités ont été implémentées dans le langage Rust et grâce à cela, les différents outils bénéficient d'une garantie de ne pas avoir de fuites mémoires. L'interface web a été implémentée aussi en Rust et compilée en WASM afin de bénéficier de performances supplémentaires pour l'affichage des jeux de données. La réalisation de ce travail, m'a permis, en plus de mettre en oeuvre l'enseignement reçu lors de ma formation, mais encore d'avoir pu enrichir mes connaissances dans le domaine de la topographie et du langage de programmation Rust que je compte désormais approfondir encore plus. Un challenge particulier lors de ce travail était le confinement dû au covid19. Mon environnement de travail n'était pas propice à la productivité due aux bruits des personnes vivant sous le même toit me gênant dans ma concentration. Ce fut un gros challenge de devoir travailler uniquement à la maison sans pouvoir avoir du calme.

Le travail n'étant pas complètement terminé, notamment au niveau du client web, un futur travail pourrait reprendre le projet et continuer de l'améliorer avec des fonctionnalités stables. Des outils supplémentaires peuvent être ajoutés pour compléter la panoplie de l'application notamment au travers de services web.

ANNEXE 1 : TABLEAU DES CHAMPS DE L'EN-TÊTE DE FICHIER LAS

Champ	Type de donnée	Taille (Octets)	Requis
File Signature (“LASF”)	char[4]	4	*
File Source ID	unsigned short	2	*
Global Encoding	unsigned short	2	
Project ID - GUID data 1	unsigned long	4	
Project ID - GUID data 2	unsigned short	2	
Project ID - GUID data 3	unsigned short	2	
Project ID - GUID data 4	unsigned char[8]	8	
Version Major	unsigned char	1	*
Version Minor	unsigned char	1	*
System Identifier	char[32]	32	*
Generating Software	char[32]	32	*
File Creation Day of Year	unsigned short	2	
File Creation Year	unsigned short	2	
Header Size	unsigned short	2	*
Offset to point data	unsigned long	4	*
Number of Variable Length Records	unsigned long	4	*
Point Data Format ID (0-99 for spec)	unsigned char	1	*
Point Data Record Length	unsigned short	2	*
Number of point records	unsigned long	4	*
Number of points by return	unsigned long[5]	20	*
X scale factor	double	8	*
Y scale factor	double	8	*
Z scale factor	double	8	*
X offset	double	8	*
Y offset	double	8	*
Z offset	double	8	*
Max X	double	8	*
Min X	double	8	*
Max Y	double	8	*
Min Y	double	8	*
Max Z	double	8	*
Min Z	double	8	*

TABLEAU 4.1 – Champs de l'en-tête d'un fichier LAS

ANNEXE 2 : IMPLÉMENTATION DE LA RECHERCHE DE SITE CANDIDAT POUR LA FUSION

```
loop {
    let candidate_right = Mesh::get_side_candidate(
        other,
        r_bs,
        &self.vertices[l_bs]);
    let candidate_left = Mesh::get_side_candidate(
        self,
        l_bs,
        &other.vertices[r_bs]);
    let candidates = (candidate_left, candidate_right);
    match candidates {
        (Some(l), Some(r)) => {
            // Check that one of these does not contain the other one
            let left_candidate_inside = self
                                        .vertices[l]
                                        .inside_circum_circle((
                                        &self.vertices[l_bs],
                                        &other.vertices[r_bs],
                                        &other.vertices[r],
                                        ));
            let right_candidate_inside = other
                    .vertices[r]
                    .inside_circum_circle((
                        &self.vertices[l],
                        &self.vertices[l_bs],
                        &other.vertices[r_bs],
                    ));
```

```
            match (left_candidate_inside, right_candidate_inside) {
                // If both are contained in each other
                // it is a degenerate case and there
                // is no possible outcome
                // to have a good Delaunay triangulation
                (false, false) =>
                        return Err(
                        "Edge case found about 4 co-circular points"
                        ),
                (true, false) => {
                    edges.push(l);
                    edges.push(r_bs);
                    l_bs = l;
                }
                (false, true) => {
                    edges.push(l_bs);
                    edges.push(r);
                    r_bs = r;
                }
                _ => break,
            }
        }
        (Some(l), None) => {
            // Connect it to the lr base,
            // push the new triangle and move the l_bs reference
            edges.push(l);
            edges.push(r_bs);
            l_bs = l;
        }
        (None, Some(r)) => {
            // Connect it to the lr base,
```

```
59              // push the new triangle and move the r_bs reference
60              edges.push(l_bs);
61              edges.push(r);
62              r_bs = r;
63          }
64          _ => {
65              // The merging is done if it doesn't exists anymore candidates
66              break;
67          }
68      }
69  }
```

ANNEXE 3 : IMPLÉMENTATION DU VOISINAGE D'UN MAILLAGE

```rust
pub fn neighbourhood(&mut self) -> Option<Vec<HashSet<usize>>> {
        if self.neighbourhood.is_some() {
            return self.neighbourhood.clone();
        }
        let mut dict: Vec<HashSet<usize>> =
            vec![HashSet::new(); self.vertices.len()];

        // Iterating over all triangles in the mesh
        self.faces
            .iter()
            .enumerate()
            .step_by(3)
            .for_each(|(i, _): (usize, &usize)| {
                // Adding the neibours of the first vertex
                dict[self.faces[i]].insert(self.faces[i + 1]);
                dict[self.faces[i]].insert(self.faces[i + 2]);

                // Adding the neibours of the second vertex
                dict[self.faces[i + 1]].insert(self.faces[i]);
                dict[self.faces[i + 1]].insert(self.faces[i + 2]);

                // Adding the neibours of the third vertex
                dict[self.faces[i + 2]].insert(self.faces[i]);
                dict[self.faces[i + 2]].insert(self.faces[i + 1]);
            });

        self.neighbourhood = Some(dict.clone());
        Some(dict)
}
```

BIBLIOGRAPHIE

COMPUTING CONSTRAINED DELAUNAY TRIANGULATIONS IN THE PLANE, [p. d.] [en ligne] [visité le 2020-06-16]. Disp. à l'adr. : http://www.geom.uiuc.edu/~samuelp/del_project.html.

DESNOGUES, Pascal, 1996. *Triangulations et quadriques* [en ligne] [visité le 2020-04-06]. Disp. à l'adr. : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00771335. Thèse de doct. Université Nice Sophia Antipolis.

LEMAIRE, Christophe, [p. d.]. Triangulation de Delaunay et arbres multidimensionnels, p. 227.

LIDAR Filters, 2018 [en ligne] [visité le 2020-04-23]. Disp. à l'adr. : https://www.alluxa.com/optical-filter-applications/lidar-filters/. Library Catalog : www.alluxa.com Section : Learning Center.

MÄKELÄ, I, [p. d.]. Some Efficient Procedures for Correcting Triangulated Models, p. 9.

Streaming Delaunay : I/O and memory efficient Computation of Delaunay Triangulations, [p. d.] [en ligne] [visité le 2020-05-22]. Disp. à l'adr. : http://www.cs.unc.edu/~isenburg/sd/.

TATE, Nicholas ; BRUNSDON, Chris ; CHARLTON, Martin ; FOTHERINGHAM, Alexander ; JARVIS, Claire, 2005. Smoothing/filtering LiDAR digital surface models. Experiments with loess regression and discrete wavelets. *Journal of Geographical Systems*. T. 7, p. 273-290. Disp. à l'adr. DOI : 10.1007/s10109-005-0007-4.