

# Maillage vs nuage de points: analyse comparative

Clara STAVUN, Anatole MAURER, Charles FARHAT, Haga RANDRIANALY

February 11, 2022

# Contents

<b>1 Etude comparative : Nuages de points et Mesh</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Définitions et propriétés . . . . .	2
1.3 Méthodes d'acquisition . . . . .	5
1.3.1 Acquisition de nuages de points . . . . .	5
1.3.2 Acquisition de maillages 3D . . . . .	6
1.3.3 Méthodes hybrides . . . . .	7
1.3.4 Conclusion . . . . .	10
1.4 Méthodes de stockage . . . . .	10
1.4.1 Maillages 3D . . . . .	10
1.4.2 Nuages de points . . . . .	11
1.5 Domaines d'applications et utilisation . . . . .	12
1.5.1 Maillages 3D . . . . .	12
1.5.2 Nuages de points . . . . .	14
1.6 Conclusion . . . . .	16
<b>2 Etude de cas : Les Smart Cities</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction . . . . .	18
2.2 Modélisation 3D . . . . .	18
2.2.1 Acquisition 3D . . . . .	18
2.2.2 Transformation en maillage 3D et format spécialisé . . . . .	21
2.3 Utilisation de la donnée 3D . . . . .	23
2.3.1 Simulation . . . . .	23
2.3.2 Visualisation . . . . .	23
2.4 Conclusion . . . . .	24

# Chapter 1

## Etude comparative : Nuages de points et Mesh

### 1.1 Introduction

- Aujourd’hui, la modélisation d’objets 3D est devenu fondamentale dans de nombreux domaines tels que la robotique et les systèmes embarqués, l’animation, l’industrie ou encore les modèles à plus grande échelles permettant d’étudier le comportement d’un environnement. Or, la modélisation d’objets 3D est un problème complexe au centre de recherches. Les techniques les plus utilisées sont les nuages de points et les mesh 3D, aussi appelés maillage 3D. Nous allons dans un premier temps comparer ces deux méthodes de modélisation en les définissant et en explicitant leur principes, puis en étudiant leurs différentes limitations et enfin en analysant leurs domaines d’applications respectifs.

### 1.2 Définitions et propriétés

- Il convient dans un premier temps de définir ce qu’est un nuage de points et ce qu’est un mesh, aussi nommé maillage 3D. Nous allons voir dès la définition que ces deux objets sont très différents et ne peuvent être considérés de la même façon, ce qui va nous mener à une étude comparative de ces deux moyens de représentation d’objets 3D.

#### Nuages de points

- Nous allons dans cette partie nous attarder sur la définition des nuages de points. Dans sa représentation la plus basique, un nuage de points est un type de données simple : dans la plupart des cas, un nuage de points n’est qu’une liste de points représentés par leur coordonnées 3D (i.e. une liste de coordonnées 3D).

On peut donc représenter un nuage de points comme l’ensemble :

$$P = \{x_i \in \mathbb{R}^3\}_{i < N}$$

Une représentation possible dans l'espace 3D :

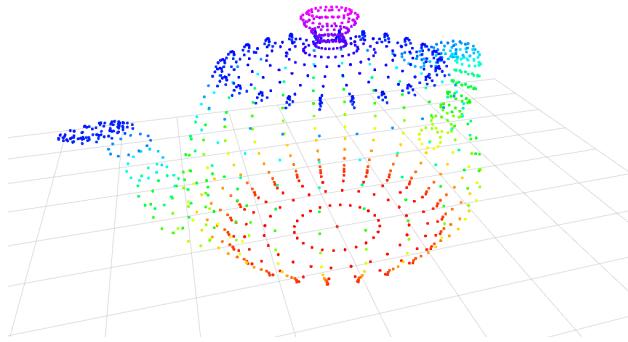


Figure 1.1: représentation d'un nuage de points dans l'espace

Dans notre cas ici  $P$  est un ensemble de points sans lien logique et non ordonnés. Mais notre vision actuelle est limitée par rapport à ce qui est possible de faire avec un nuage de points. En effet, rien ne nous empêche d'ajouter, en plus des informations spatiales (les coordonnées), d'autres informations, telles que la couleur des points ou encore la direction de la normale associée (très utile pour le passage de nuages de points vers mesh 3D par la méthode de reconstruction de poisson que nous verrons plus tard). Dans ce cas, le nuage de points obtenu est dit "augmenté" et on peut le représenter comme l'ensemble :

$$P_F = \{(x_i, f_i) | x_i \in \mathbb{R}^3, f_i \in \mathbb{R}^D\}_{i < N}$$

Où  $D$  est la dimension des informations liées à un point. On utilise généralement des nuages de points colorés (c'est-à-dire avec des informations de dimension 3 : RGB) :



Figure 1.2: Nuage de points colorés

En récapitulatif :

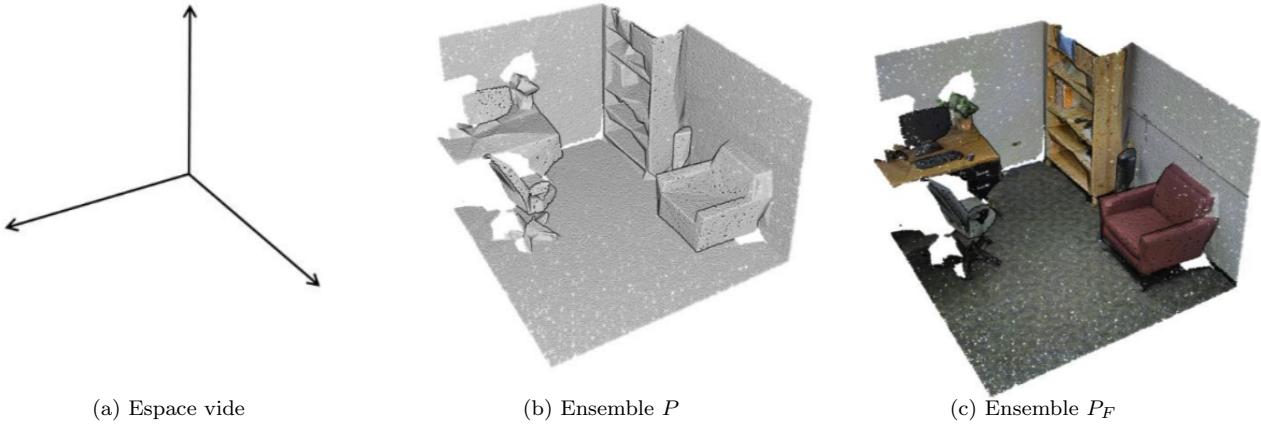


Figure 1.3

les nuages de points obtenus sont donc une représentation discrète et non-ordonnée de points de l'espace.

### Maillages 3D

- Nous allons maintenant nous attarder sur la définition des maillages 3D, aussi appelés mesh 3D. Un mesh 3D, de par sa plus grande complexité par rapport aux nuages de points, peut être défini de plusieurs façons. Nous allons ici nous focaliser sur sa version la plus commune.
- Un modèle 3D représente une collection de points (appelés vertex) dans l'espace, connectés par des liens géométriques. On peut par exemple citer les liens sous forme de triangles, lignes ou surfaces. Ce type de représentation permet donc à l'inverse des nuages de points d'avoir un ensemble de points ordonnés et donc liés les uns avec les autres pour former une forme géométrique. Il est alors possible d'en extraire des informations plus riches que les nuages de points. On peut par exemple obtenir la surface du modèle ou encore son orientation.

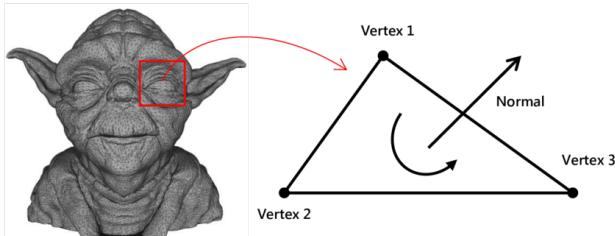


Figure 1.4: Exemple de mesh 3D

On ne donne pas de définition mathématique des maillages 3D (possible mais cela sort du contexte de ce rapport). En effet, pour avoir une définition exacte il faut préciser le type de maillage : mesh structuré, mesh structuré par blocs ou mesh non-structuré. Nous nous contenterons donc ici d'une approche plus générale.

Ainsi, les nuages de points peuvent être vus comme une vision discrète non-ordonnée du monde 3D alors que les maillages 3D nous donne une vision continue ordonnée et donc plus riche.

### 1.3 Méthodes d'acquisition

Nous allons maintenant étudier les différentes façons dont il est possible d'obtenir une représentation 3D du monde réel sous forme de nuages de points ou de mesh 3D. Nous allons pour ce faire présenter 3 catégories de méthodes d'acquisition différentes : la première qui permet l'acquisition de nuages de points (scanner laser), la deuxième permettant d'obtenir des volumes 3D sous forme de mesh (caméra avec vison de profondeur, IRM...) et finalement des méthodes dites hybrides qui permettent l'obtention de mesh et de nuages de points (photogrammétrie, stéréographie...).

Il est important de noter que l'obtention de mesh 3D est très difficile, car il demande une lecture continue de l'espace 3D. Cela est souvent uniquement possible dans un espace restreint et durant un temps limité. Par opposition, l'obtention de nuages de points est beaucoup plus simple et permet une reconstruction du mesh 3D. C'est souvent cette dernière méthode qui est utilisée lors de la construction de mesh 3D, car elle est plus simple à mettre en place.

### 1.3.1 Acquisition de nuages de points

Principe

- La méthode d'acquisition la plus représentative lorsque l'on parle de nuages de points et la plus répandue aujourd'hui est celle dite des scanner laser. Dans ce cadre les LiDAR (Light Detection And Ranging) sont les capteurs les plus privilégiés. Bien que les LiDAR peuvent être fondés sur différentes technologies, ils partagent le même principe : il s'agit d'un "Radar électromagnétique", un émetteur émet une pulsation électromagnétique qui se réfléchie sur un sujet, pour ensuite être captée par un récepteur. La durée entre l'émission et la réception de l'impulsion permet de déterminer la distance à l'objet.

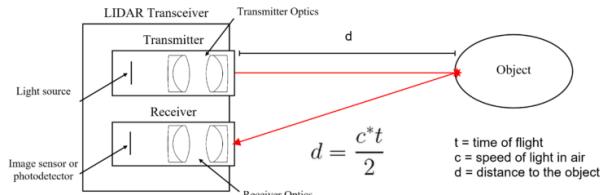


Figure 1.5: Principe de fonctionnement d'un LiDAR

Cette méthode permet alors d'obtenir des nuages de points de très grande qualité, ci-dessous quelques exemples :

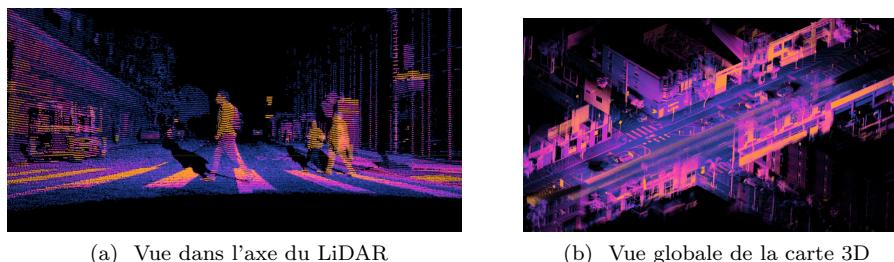


Figure 1.6: Nuages de points obtenus d'un LiDAR Ouster OS1-128

Nous verrons ensuite comment ces nuages de points peuvent être traités pour permettre la génération de maillages 3D. Cette méthode peut être appliquée ici pour permettre l'obtention de maillage 3D à partir des données LiDAR.

## Capteurs

Le LiDAR nécessite des équipements spécifiques et coûteux. Cependant, leur coût de production diminue avec la démocratisation de la technologie (avec l'intégration de scanner LiDAR dans plusieurs smartphones flagships par exemple).



Figure 1.7: Gamme de capteur LiDAR Ouster

### 1.3.2 Acquisition de maillages 3D

#### Principe

- En pratique, l'acquisition des maillages 3D est beaucoup plus complexe que celle des nuages de points. En effet les maillages 3D comportent une information continue et précise de la géométrie 3D. En d'autre termes, une représentation exacte de la surface du modèle. Or être capable de précisément déterminer le volume et la surface de l'environnement réel nécessite des technologies très complexes. On peut, néanmoins, citer certaines de ces technologies et leurs limitations. On a notamment les scanneurs IRM qui permettent d'obtenir une information volumétrique (à partir de plusieurs tranches mises bout à bout et interpolées) mais ne sont opérationnels que sur de petits volumes.

D'autre part avec l'apparition de méthodes plus modernes, qui utilisent l'intelligence artificielle, on peut aujourd'hui reconstruire un modèle 3D à partir d'une simple information 2D. Nous allons nous attarder ici à l'état de l'art actuel, pifuhd développé par facebook reasearch lab [9]. La solution proposée permet de générer un mesh 3D à partir d'une image 2D d'une personne.



Figure 1.8: Etapes de génération de pifuhd

Le logiciel utilise une méthode d'optimisation implicite à partir d'une analyse de l'image 2D à plusieurs niveaux (Multi-Level Pixel-Aligned Implicit Function optimization). On peut se représenter cette méthode

comme une méthode utilisant des templates. En effet, ici, nous partons d'un modèle 3D universel représentant une personne. Puis, on déforme ce modèle pour le faire correspondre aux proportions de l'image.

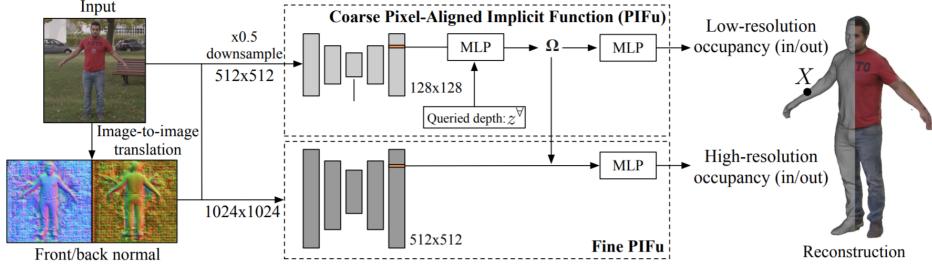


Figure 1.9: Fonctionnement interne de pifuhd

Ces méthodes de génération de modèles 3D à partir d'une information de dimension inférieure (i.e. image 2D) sont vouées à être de plus en plus utilisées. En effet elles permettent l'obtention d'un modèle 3D de meilleure qualité et avec une complexité moindre qu'en passant par la génération d'un nuage de point. Ce genre de méthode, bien qu'ici réduite à la simple modélisation de personnes, a été aussi étendue à d'autre domaines, comme l'imagerie médicale ou la génération de surfaces topographiques (DSM : Digital elevation terrains)[12].

### 1.3.3 Méthodes hybrides

- Pour le moment nous avons vu comment obtenir des nuages de points et des maillages 3D directement et indépendamment les un des autres. Mais dans la pratique, il n'est pas rare de passer par des méthodes hybrides où l'on génère en premier lieu un nuage de points, puis, à partir de ce nuage de points, on génère le maillage 3D à l'aide de différentes méthodes de reconstruction. Il existe deux méthodes très largement utilisées :

#### Photogrammétrie

La photogrammétrie consiste à utiliser des collections de prises de vue 2D d'un sujet pour en recréer une représentation tridimensionnelle. La Photogrammétrie se fait en trois grandes étapes : il faut d'abord positionner les photos prises dans l'espace afin d'obtenir les positions et orientations du capteur lors de la prise, on appelle cette étape bundle adjustment; puis vient l'étape de projection d'un ensemble de points (appelé features) dans l'espace. C'est avec cet ensemble de points projetés que l'on peut finalement densifier le nuage de points jusqu'à obtenir un nuage de point dense). Ces méthodes sont appelées sfm (structure from motion) [11] [5] :

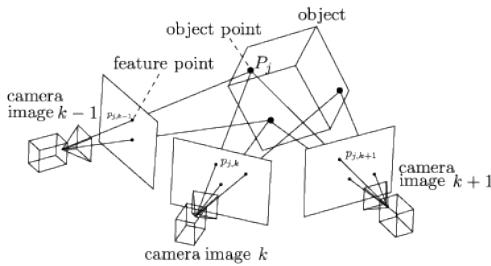


Figure 1.10: Structure From Motion

On peut alors obtenir sous forme d'un nuage de point dense la représentation de l'environnement :



Figure 1.11: Nuage de points reconstruit à partir des images

Il est alors possible à partir de ce nuage de point d'obtenir un maillage 3D. Il existe plusieurs méthodes le permettant. La plus connue est celle dite de reconstruction de poisson [4], mais elle demande la connaissance des normales associées à chaque point (ce qui ajoute une étape de calcul). Nous allons donc ici présenter une méthode plus générale : Advancing Front Surface Reconstruction [2]. En effet cette méthode, avec un peu de pré et post-traitement, permet l'obtention d'un maillage 3D de très bonne qualité à partir d'un nuage de points dense.

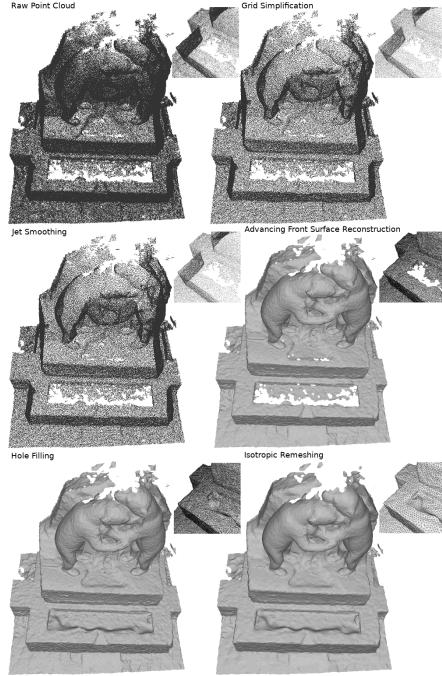


Figure 1.12: Exemple de reconstruction utilisant cette méthode à l'aide de CGAL

### Depth map

De plus, nous pouvons présenter les caméras à profondeur de champ (depth cameras). Elles ne permettent pas directement d'obtenir un mesh 3D, mais elles fournissent une surface pouvant être utilisée pour la

reconstruction du mesh 3D. Similaire à la photogrammétrie, elles sont constituées de deux cameras qui permettent d'obtenir une vision stéréoscopique, on peut alors extraire une information de profondeur sous forme de nuage de points, puis d'image 2D associant à chaque pixel sa profondeur relative par rapport au capteur, qui peut être utilisé par la suite pour générer un mesh 3D de la surface située en face de la caméra (Stéréoscopie) [6] .

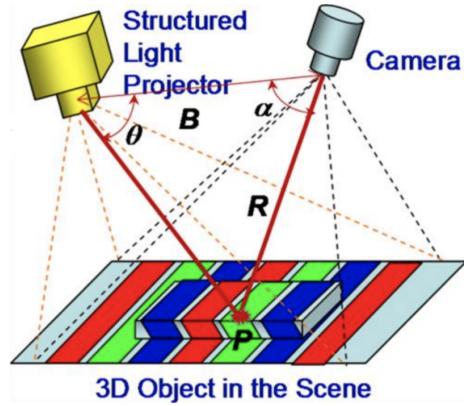


Figure 1.13: Fonctionnement de la Stéréoscopie

On obtient alors une carte de la profondeur vu par la caméra (depth map) :

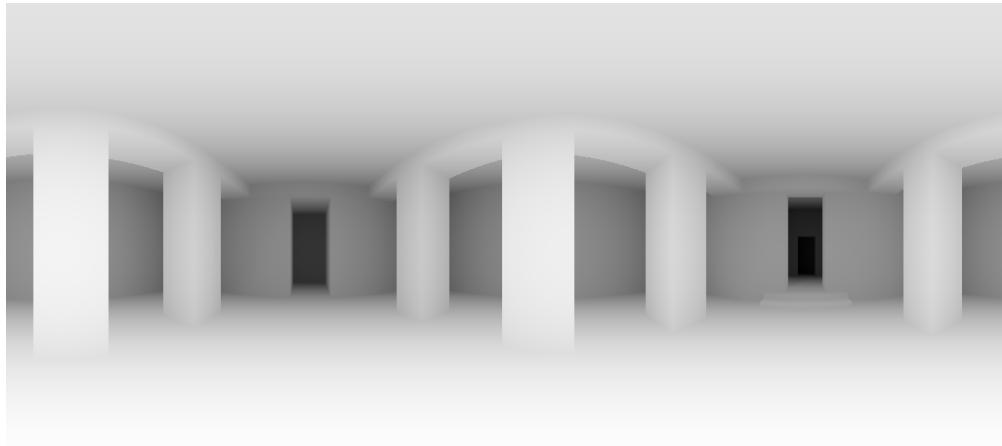


Figure 1.14: image obtenue, noir = loin, blanc = près

Pour obtenir un modèle 3D fermé représentatif, il faut alors se déplacer autour de l'objet pour le scanner.

En pratique le processus est plus complexe que cela : il faut utiliser une carte globale et enregistrer chaque image 2.5D (depth map), un framework tel que supereight [3] permet de réaliser ce genre de carte 3D. On récupère alors l'environnement sous forme de mesh 3D :

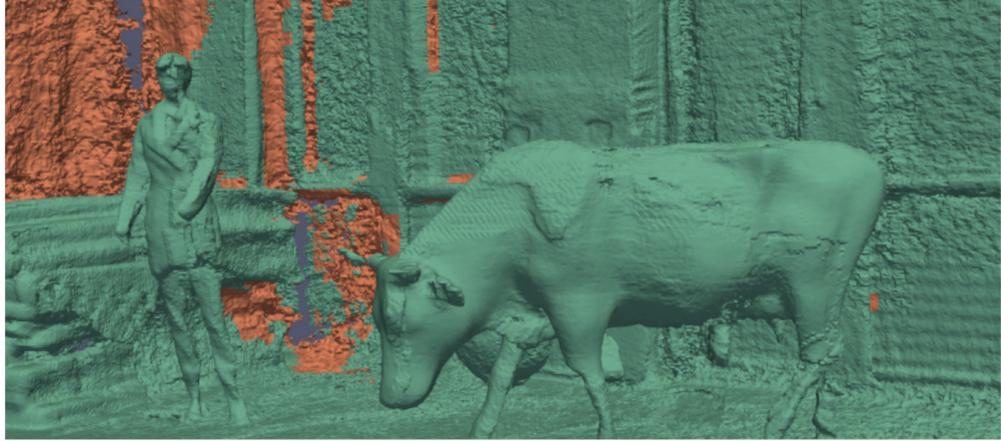


Figure 1.15: Modèle 3D de l'environnement obtenu

### 1.3.4 Conclusion

Le LiDAR permet une très grande précision qui peut même être améliorée avec la variation ou la modulation des longueurs d'ondes. Cependant, cette précision est étroitement liée à la nature de l'objet. En effet, les objets de couleur foncée réfléchissant moins les ondes électromagnétiques et les niveaux de bruits, entraîne une précision accrue. De la même manière, en fonction de la longueur d'onde, les sujets transparents ou à effet miroirs rendent donc la modélisation pratiquement impossible. Dans le cas de la photogrammétrie, la précision est encore plus susceptible de varier. En effet, en fonction du type d'utilisation (de la photographie aérienne aux sujets d'échelle humaine) la résolution varie. En effet, comme cette méthode repose sur l'analyse de photographies, l'algorithme de traitement ainsi que la qualité des photos influent grandement sur le résultat final. De plus, on retrouve les mêmes problèmes qu'avec le LiDAR c'est-à-dire avec les faibles contrastes et objets transparents.

## 1.4 Méthodes de stockage

### 1.4.1 Maillages 3D

Nous commenceront par le cas des maillages 3D car plus simple à décrire. Il faut pour ce faire représenter les liens entre chaque vertex. Il existe une multitude de formats avec quelques variantes, nous nous concentreront ici sur le format gTIFF. Ce nouveau format compte permettre l'apparition de la 3D sur le web. Il faut pour décrire un mesh 3D l'ensemble de ses vertexes, avec leur position dans l'espace ainsi que la matrice des faces du mesh, qui en fonction du mode de rendu souhaité, peut contenir les adresses des 3 ou 4 sommets qui la compose. En fonction des formats on peut aussi ajouter d'autres informations relatives à chaque face du modèle, comme la texture, la couleur, la normale associé (ou pointe de la face)... Le stockage, la lecture, la compression et le traitement des maillages 3D sont donc facilités par toutes ces informations qu'on peut associer.

### 1.4.2 Nuages de points

Le cas des nuages de points est beaucoup plus complexe. En effet la seule information dont on dispose ici est la liste de points, avec des informations uniquement liées aux points eux même; aucune information liant les points entre eux n'est disponible. Les formats les plus classiques sont donc uniquement une liste de points avec leur informations spatiales et les caractéristiques supplémentaires (couleur, normale...). Mais les possibilités de traitement se voient limités (ce que l'on retrouve lorsque nous parlerons de l'utilisation des maillages et des nuages de points). On se trouve confronté à un problème simple en apparence qui se révèle complexe lorsque le nombre de points augmente : trouver les voisins d'un point. En effet bien que ce soit une étape essentielle pour tout traitement sur les nuages de points, elle peut s'avérer très difficile.

#### K-nearest neighbour

L'un des problèmes le plus fréquent : comment trouver les  $k$  points voisins (appartenant à  $P$ ) les plus proches du point considéré  $y_0$  :

$$N_{KNN}(y_0, P, k) = \{x_i \in P \mid \|y_0 - x_i\| \leq \|y_0 - x_{i+1}\|, i < k\}$$

la complexité de ce problème, sans changer notre vision du nuage de points, évolue de manière exponentielle par rapport à la taille du nuage de points. On est alors dans l'incapacité de résoudre ce problème pour de grands nuages de points.

Il a alors été mis en place des structures plus optimisées de représentation et de stockage du nuage de points pour permettre leur traitement :

#### Grilles

Les grilles volumétriques sont les structures les plus basiques utilisées pour accélérer le traitement des nuages de points (surtout pour les problèmes de voisins). Elles consistent en une répartition de l'espace en de petits cubes 3D appelés voxels. Nous allons alors assigner les points situés dans chaque voxel. Puis lorsque nous voudrons calculer leurs voisins on travaillera uniquement avec les points associés au voxel où se trouve notre point.

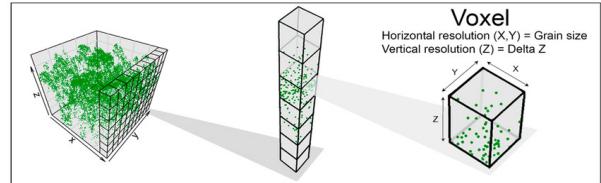


Figure 1.16: Grille volumétrique

#### Octrees

Représentation assez similaire aux grilles volumétriques, les octrees développent le principe en ajoutant une composante : On partitionne toujours l'espace en voxels, mais on utilise un arbre hiérarchique à la place d'une grille simple. La racine de l'arbre correspond à un cube qui contient tout le nuage de points. Puis ce cube est divisé en sous cubes deux fois plus petits que le cube d'origine. On répète cette étape récursivement jusqu'à une taille minimale définie. Les cubes les plus petits sont donc les feuilles de notre arbre. lorsque l'on essaye de résoudre le problème KNN on part alors des feuilles et on remonte dans la zone autour du point de travail.

Cette représentation est particulièrement adaptée pour les nuages de points de forme géométrique. Elle a la particularité de consommer peu de mémoire et d'être particulièrement efficace. C'est pour ces raisons que cette méthode est très utilisée dans le cadre de nuages de points très grands. Mais la principale limitation des Octree est leur optimisation : pour les espaces euclidiens 3D, si l'on augmente la dimension de l'espace ils perdent en efficacité.

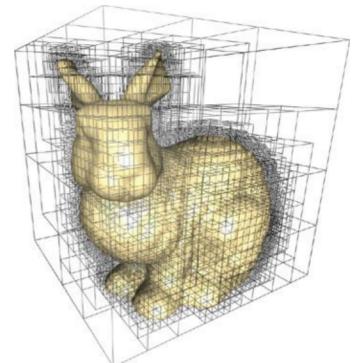


Figure 1.17: Octree Représentation

## KdTrees

Dernière représentation possible, les Kd-Tree. Ils peuvent être considérés comme une généralisation des octrees à toutes les dimensions. Ils partitionnent eux aussi l'espace, mais cette fois ci chaque demi-espace est défini à l'aide d'hyperplans.

## 1.5 Domaines d'applications et utilisation

Dans cette section nous étudierons les différents domaines d'application relatifs aux deux méthodes.

### 1.5.1 Maillages 3D

Il vient tout d'abord de présenter le cas des maillages 3D. En effet, dans la pratique ce sont eux que l'on utilise le plus. Nous allons retrouver leur utilisation dans tous les domaines visuels (Jeux vidéos, simulation 3D), mais aussi scientifique (Simulation numérique, analyse...) tout comme dans l'ingénierie (CAO, simulation physique...).

#### Rendu 3D

L'utilisation massive des maillages 3D peut s'expliquer par leurs propriétés. En effet pour permettre le rendu 3D et afficher à l'écran une image des modèles 3D les GPU (les cartes graphiques) ont besoin des informations géométrique du maillage 3D (les triangles, les liens entre chaque vertex). De même pour coloriser ou texturer nos mesh 3D, il faut avoir un système de coordonnées sur le modèle 3D pour ensuite projeter la texture. Les programmes qui sont ensuite exécutés sur la carte graphique sont capables (et optimisé) afin de réaliser ce type d'opérations, mais demandent également des primitives géométrique sous forme de vertexes et de triangles.

Il existe plusieurs types de rendu (Forward rendering ou Deferred Rendering), mais leurs présentations dépassent le cadre de ce rapport. Nous présenterons ici une version simple mais universelle d'un rendu 3D pour montrer l'importance de la structure des maillages 3D :

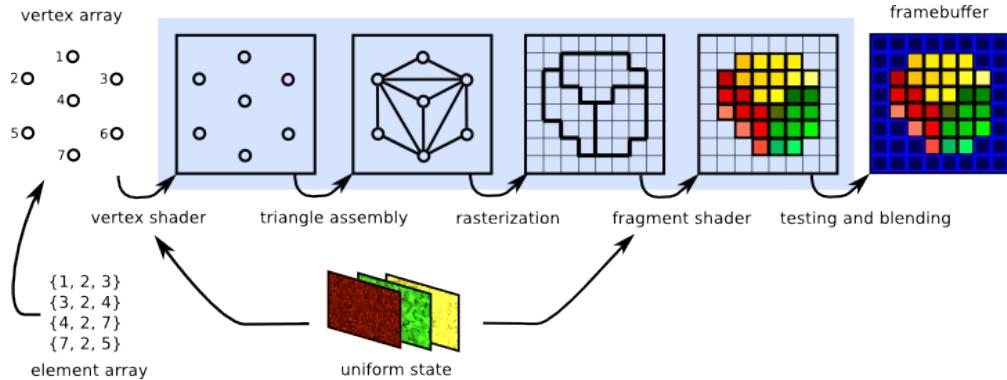


Figure 1.18: Etapes de rendu

Avec la complexité des moteurs de rendu aujourd’hui nous arrivons à faire des rendus de très bonne qualité :



Figure 1.19: Exemple de rendu du moteur Unreal Engine 5, avec les technologies Nanite (virtualisation des maillages 3D) et Lumen (Real time global illumination)

## Ingénierie

Dans le domaine de la CAO et de la simulation pour l’Ingénierie, les maillages 3D jouent un rôle central. En effet les ingénieurs ont besoin de connaître la topologie des objets sur lesquels ils travaillent. De même pour la simulation de déformation des pièces ou la simulation de fluides :

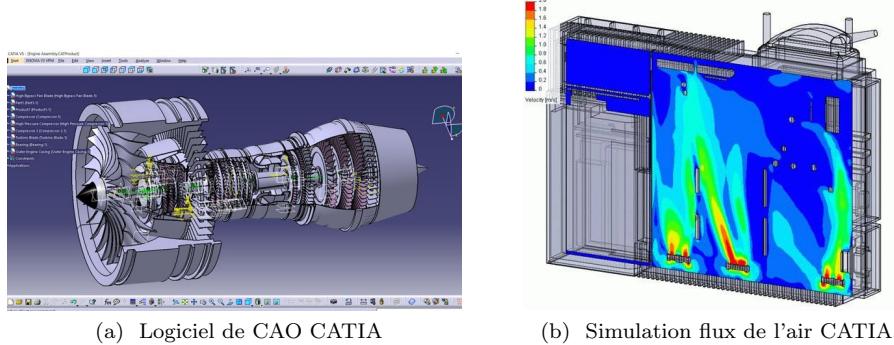


Figure 1.20: Différentes utilisations des maillages 3D en CAO

Ces deux parties font office d’exemple, les maillages 3D ont de nombreux autres domaines d’application. Cependant, la nécessité d’utiliser pour obtenir des rendus 3D leurs, favorise l’utilisation de mesh 3D dans de nombreux cas.

### 1.5.2 Nuages de points

Les nuages de points étant moins riches au niveau de l'information qu'ils portent, cela les rend moins complexe à traiter. En effet, il n'y a pas besoin de considérer leurs topologies. Ils sont aussi, comme nous avons pu le voir dans le chapitre sur les méthodes d'acquisition, un type de données brutes facile à obtenir. Nous allons voir quelques domaines d'application représentatifs.

#### Robotique et drones

Dans le cadre de la robotique les nuages de points jouent un rôle central. Souvent équipé de capteur laser type LiDAR, le robot à donc accès en temps réel à son environnement proche sous forme de nuages de points. C'est donc cette représentation qui sera utilisée pour faire les traitements les plus critiques (qui doivent être fait en temps réel), on peut notamment citer :

- Analyse de l'environnement
- Détection

Nous pouvons donner comme exemple : la voiture autonome où la détection des personnes et autres voitures se fait au niveau du nuages de points :

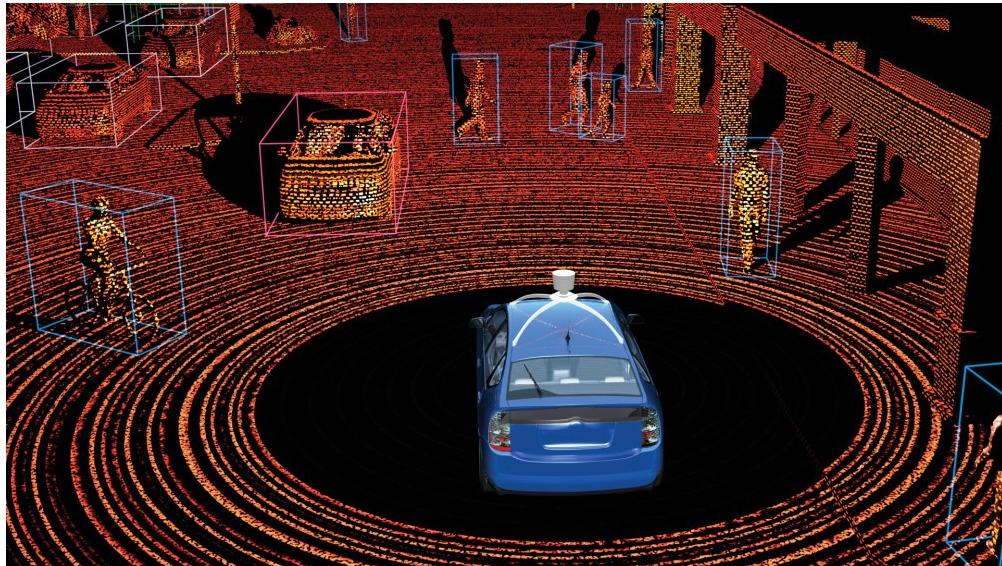


Figure 1.21: Voiture autonome avec LiDAR, détection des voitures et piétons

Même si les nuages de points permettent une analyse de l'environnement du robot, il est souvent aussi nécessaire d'obtenir une version en maillage 3D afin de faire par exemple du path planning. Pour ce faire dans la majorité des cas c'est à partir du nuage de points que l'on générera un mesh 3D.

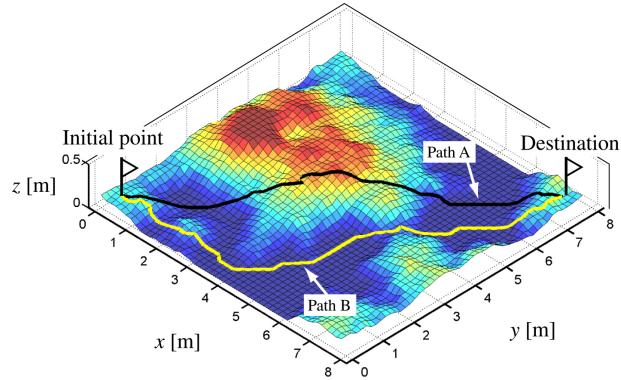


Figure 1.22: Vérion en maillage 3D du sol d'un environnement pour du path planning

### Topographie

L'acquisition simple des nuages de points par LiDAR ou photogrammétrie permet des collectes topographiques par avion ou par capteur au sol simple. Puis, après traitement, on obtient des cartes 3D sous forme de nuages de points. Il est alors possible de les convertir sous forme de maillages 3D, pour faciliter le rendu et l'affichage.

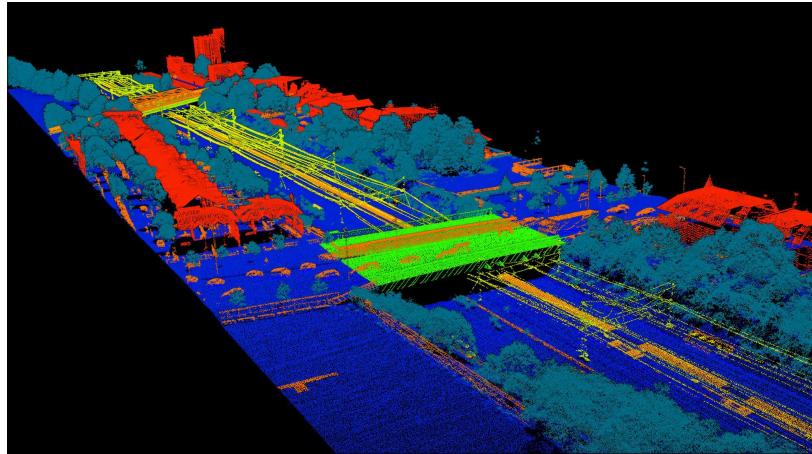


Figure 1.23: Nuages de points après collecte

Lorsque l'on parle de relevé topographique, il est possible de générer plusieurs types d'informations sous forme de maillages 3D :

- DSM (Digital Surface Elevation)
- DEM (Digital Elevation Model)
- DTM (Digital Terrain Model)

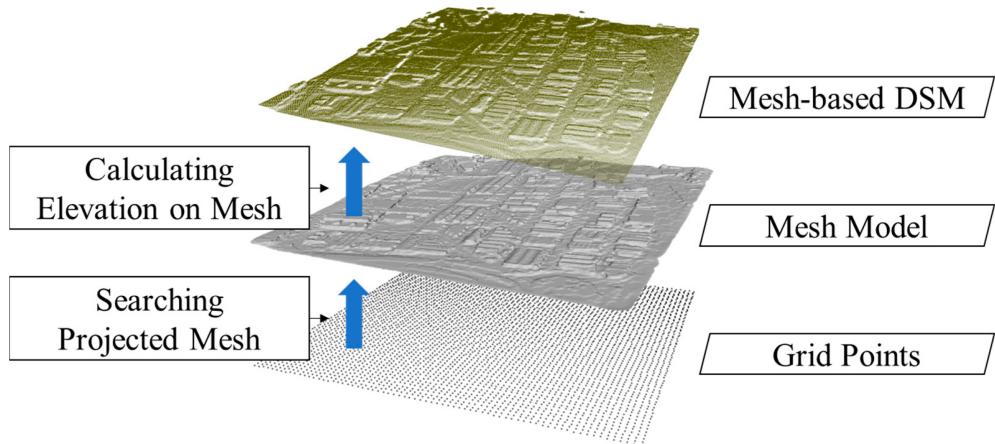


Figure 1.24: Transition entre nuages de points et maillages 3D

Les nuages de points sont donc souvent utilisés comme moyen de transition. Faciles à obtenir, ils permettent une analyse de l'environnement, mais sont surtout utilisés comme moyen transitoire pour obtenir un maillage 3D de l'environnement qui permet un rendu 3D et un traitement plus poussé (path planning, occupancy grid...).

## 1.6 Conclusion

- Pour conclure, le Séminaire : Image et Multimédia et Application, nous a permis de découvrir deux technologies de numérisation et de visualisation 3D : nuage et maillage de points. En particulier, les enseignements suivis nous ont permis de comprendre les spécificités et similitudes de ces deux méthodes, et donc de réaliser une étude comparative.
- Tout d'abord, bien que les nuages et les maillages de points ont le même objectif (permettre de représenter fidèlement des éléments en 3D dans l'espace), la première disparité entre ces deux méthodes est leurs définitions et propriétés. En effet, un nuage de points est défini comme une liste de coordonnées non-reliées et non-ordonnées d'un espace en 3D. Tandis qu'un maillage de points fait communément référence à une liste de points précisément ordonnés et géométriquement reliés. Par conséquent, la complexité supérieure de la définition et des propriétés des maillages de points permet de fournir plus d'informations que les nuages de points.
- Or, puisque les maillages de points fournissent davantage d'informations, construire un maillage de points nécessite des méthodes plus complexes. En effet, son acquisition nécessite une lecture continue de l'espace 3D. C'est pourquoi, la méthode souvent privilégiée pour la construction d'un maillage de points est une méthode hybride consistant à construire un mesh à partir d'un nuage de points (qui est plus facile à établir) comme l'Advancing Front Surface Reconstruction. Toutefois des méthodes d'acquisition telles que l'utilisation de

scanner IRM ou utilisant une intelligence artificielle permettent de construire un maillage de point directement. De même, les technologies de Lidar permettent de construire des nuages de points directement. En particulier, la démocratisation des Lidar et leur coût de plus en plus abordable pour les startups, mais également pour les particuliers, pourraient permettre une utilisation de plus en plus importante des nuages 3D, et des méthodes hybrides pour obtenir des mesh 3D, bien plus coûteux à construire directement.

- Par ailleurs, ces différences de définition et d'acquisition impliquent également des disparités concernant le stockage des données. En effet, la quantité plus importante d'informations fournies par les mesh permet de faciliter le stockage, la lecture, la compression et le traitement des maillages 3D. Au contraire, puisque seules quelques caractéristiques et le positionnement des points sont stockés dans un nuage de points, les possibilités de traitement sont alors réduites. En particulier, déterminer les points voisins d'un autre est difficile avec un nuage de point, contrairement au cas des mesh puisque les points sont reliés et ordonnés par l'intermédiaire de formes géométriques.
- Enfin, toutes ces spécificités impliquent des champs d'application différents. En effet, les maillages 3D sont souvent utilisés pour améliorer l'affichage graphique de modèles 3D sur un écran, ainsi que pour mieux représenter la topologie des objets en ingénierie. D'un autre côté, les nuages de points sont davantage utilisés pour des situations et projets ne nécessitant pas une précision accrue, mais plutôt une vitesse de traitement rapide notamment en robotique et pour l'usage de drones.

# Chapter 2

## Etude de cas : Les Smart Cities

### 2.1 Introduction

Le concept de Smart City est fondé sur les intérêts qu'auraient les métropoles à utiliser les technologies d'information et de communication pour y booster l'efficacité des différents flux et minimiser les pollutions. En effet, l'objectif est de remplacer les prises de décision politiques par des choix basés sur des masses de données récoltées par un grand nombre de capteurs situés partout dans la ville. Cela nécessite l'utilisation d'un modèle 3D poussé : les informations obtenues en temps réel par les capteurs ne prennent un sens que lorsqu'ils sont mis en relation et en contexte. En outre, certaines études ne peuvent en pratique se faire qu'avec un modèle 3D. Par exemple l'étude des écoulement et drainage des eaux.

### 2.2 Modélisation 3D

La première étape pour obtenir une version jumelle d'une ville dans le monde 3D est d'obtenir sa copie. En effet, il nous en faut une représentation 3D. Cependant, il est nécessaire d'avoir une représentation particulière : il nous faut une représentation qui puisse être ensuite utilisée de façon complexe. Il nous faut donc une version enrichie de la ville, une version qui ne soit pas juste de la donnée géométrique mais qui puisse contenir les interactions de chaque composant les uns avec les autres (par exemple les feux de circulation avec la gestion de flux...) Nous allons étudier comment obtenir cette représentation 3D en plusieurs étapes : il faut tout d'abord en obtenir une version 3D sous forme de nuage de points, puis la convertir en mesh, avant d'intégrer cette vision dans un moteur de calcul et si possible de rendu graphique.

#### 2.2.1 Acquisition 3D

Ce rapport portant sur la notion de nuages de points et de maillages 3D, nous avons pu précédemment expliciter les différences et les liens entre ces deux représentations de données 3D. La reconstruction dans le monde virtuel d'une ville passe donc en premier lieu par une acquisition sous forme de nuage de points denses à plusieurs niveaux des données géométriques de la ville. En effet, comme nous avons pu le voir, les relevés laser permettent une acquisition simple des nuages de points et avec une grande précision sur de longues distances. Dans la plupart des cas, la collecte est faite à deux échelles : des scanners terrestre et aérien sont utilisés. De même une combinaison de méthodes devra être utilisée; dans notre cas le plus souvent on retrouve la photogrammétrie et les scanners LiDAR.

##### Scan au niveau du sol

La collecte des données 3D au niveau du sol se fait très souvent à l'aide de scanner LiDAR, leur grande précision et leur capacité de scanner rapidement permet une plus grande flexibilité. Pour ce faire il est

nécessaire d'utiliser des algorithmes de SLAM (Simultaneous Localisation And Mapping) [?] qui permettent de suivre le capteur et de projeter les nuages de points obtenus dans une carte 3D globale qui peut ensuite être combinée avec d'autres cartes pour obtenir la ville :

Pour ce faire il nous faut un rig avec un LiDAR et des cameras RVB pour obtenir un nuage de points colorés :



Figure 2.1: Exemple de rig de scan au sol

Puis l'utilisation d'un algorithme de SLAM pour enregistrer le nuage de points. On peut alors, pour obtenir une carte avec une position absolue, combiner des données GPS et inertielles dans le SLAM directement :

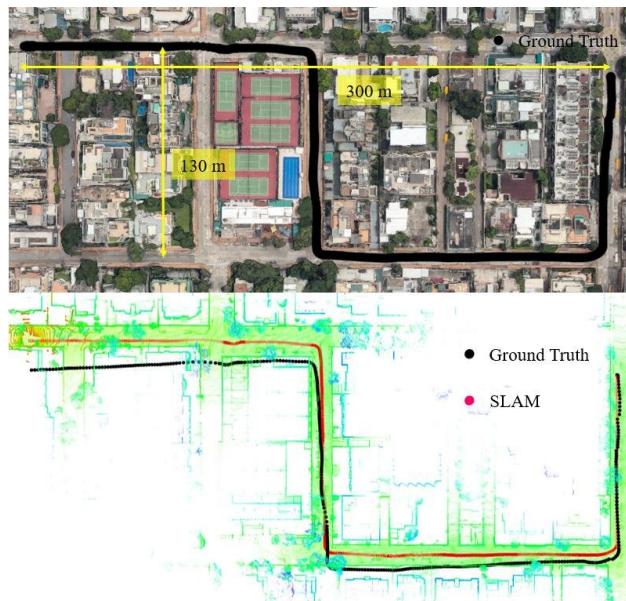


Figure 2.2: Chemin du capteur retrouvé par l'algorithme de SLAM

Finalement après avoir scanné la ville, on obtient un nuage de points au niveau du sol précis de celle ci :

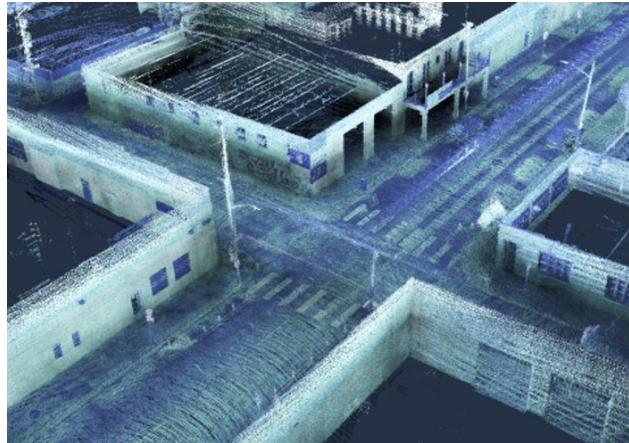


Figure 2.3: Vision en nuage de points au niveau du sol

### Cartographie 3D aérienne

Il faut maintenant obtenir une vue plus globale de la ville pour, une fois combinée avec notre scan au sol, obtenir l'ensemble de la ville. Pour ce faire nous allons combiner les méthodes de photogrammétrie et de scan laser à bord d'un avion : le scan laser permet d'avoir avec précision les distances, tandis que le scan photogrammétrique permet d'avoir la couleur associée ainsi que certains détails.



Figure 2.4: Fusion des données LiDAR et Photogrammétiques

Une fois ces deux types d'acquisitions terminées, il faut ensuite combiner les nuages de points obtenus pour récupérer une carte de nuage de points dense.

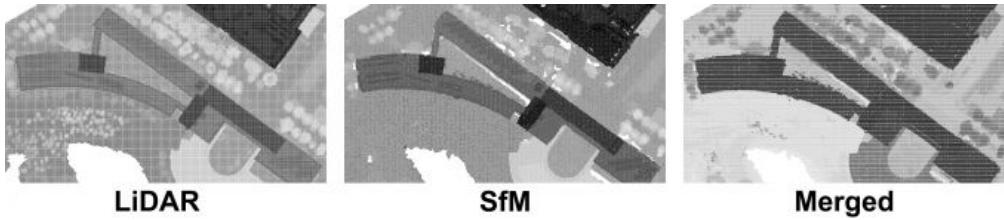


Figure 2.5: Combinaison des deux cartes : sol + aérien

C'est à partir de ce nuage de points dense que nous travaillerons dans la suite.

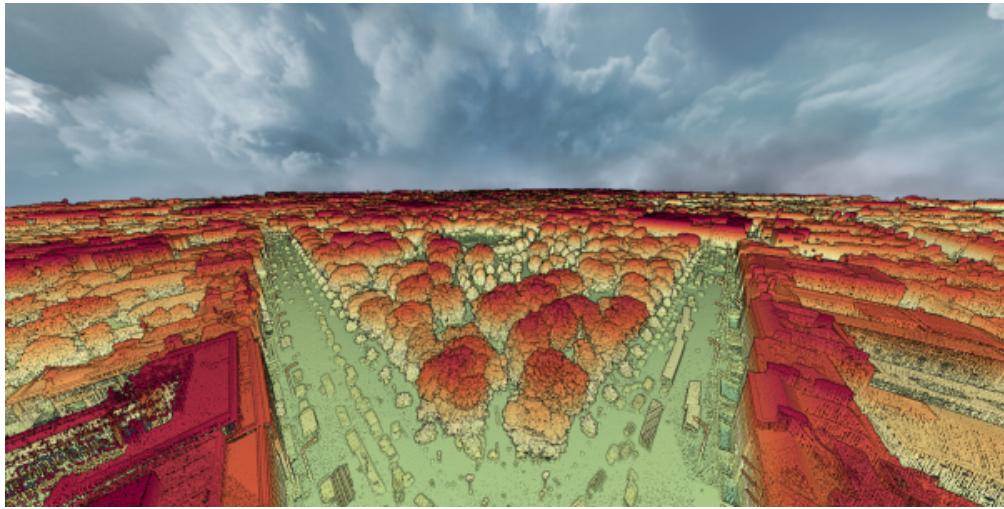


Figure 2.6: Résultat final de la ville en nuage de points

**Pour aller plus loin** Nous n'avons ici fait que présenter la surface du sujet. Cependant, il y a beaucoup de recherche dans ce domaine; Que ce soit au niveau du SLAM : comment arriver à faire des slam de très grande envergure en limitant l'erreur [7] ou comment réaliser des slam avec différents types de données (GPS, IMU...), mais aussi sur de la photogrammétrie de grandes étendues [1]. Tout comme la gestion des nuages de points, la fusion de nuages denses est un champ actif de recherche. Cependant, la présentation de tous ces domaines sortirait du cadre de ce document.

### 2.2.2 Transformation en maillage 3D et format spécialisé

Une fois le nuage de points obtenu, il est maintenant question de le transformer en maillages 3D qui, si possible, pourront être utilisés par la suite dans une application spécialisée pour associer à chaque catégorie d'intérêt un traitement spécifique : centrale électrique, résidences, immeubles...

Pour réaliser cette différenciation nous allons devoir classifier le nuage de points. La recherche dans ce domaine est la aussi très dynamique. Pour ce faire, des méthodes de classification algorithmique seront généralement utilisées : Support Vector Machine, K nearest search ou random forest. Cependant, les méthodes par machine learning deviennent de plus en plus concluantes. On peut par exemple citer : kpconv

net [10] ou encore pointnet++ [8].

Grâce à ces différentes méthodes, on peut alors segmenter notre nuage de points :

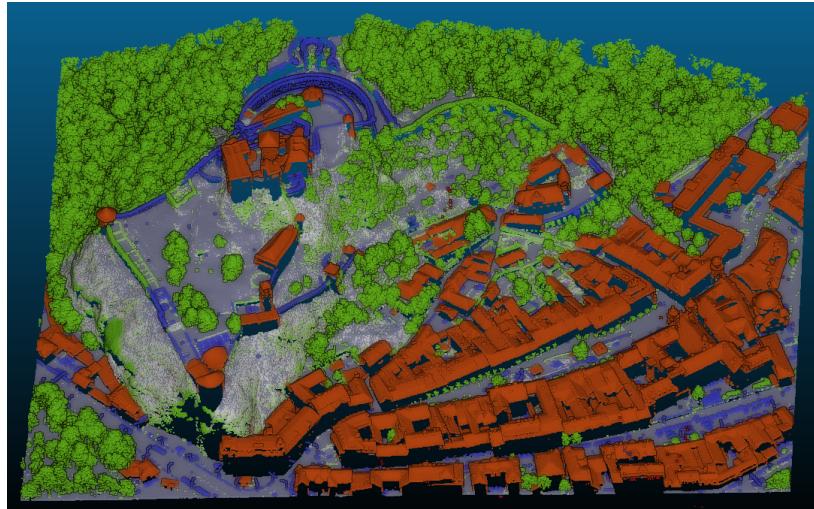


Figure 2.7: Nuages de points classifiés

A partir de ce nuage classifié, il vient alors la reconstruction de modèle sous forme de maillage 3D. Ici aussi, en fonction du type de donnée que l'on veut récupérer à la fin la reconstruction ne sera pas la même. Par exemple les bâtiments devront être convertis sous le format de données BIM (Building information modeling), le sol sous forme DST (Digital Surface Terrain), etc. Cette étape sera ici considérée comme une étape de conversion du nuage de points en maillages 3D. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, pour permettre un rendu visuel optimisé, pour le traitement et l'analyse de ces données, l'utilisation de maillages 3D est nécessaire (impossible d'obtenir des résultats concluant sous forme de nuages de points). Nous obtenons alors un modèle 3D sous forme de maillages 3D très précis de la ville :



Figure 2.8: Jumelle virtuelle de notre ville

## 2.3 Utilisation de la donnée 3D

Une fois les données traitées et la ville virtuelle jumelle obtenue, nous pouvons maintenant l'utiliser pour visualiser, analyser ou simuler ses états : nous avons construit une représentation globale de la ville.

### 2.3.1 Simulation

La ville jumelle obtenue peut être utilisée dans le cadre de simulation grandeur nature avec une très grande complexité. Aujourd'hui les besoins de simulation sont de plus en plus grands : simulation des flux de personnes, des flux d'air sur les bâtiments, de l'eau, des voitures... Tout ceci est permis de par le fait que la ville virtuelle jumelle est une copie presque parfaite. De même pour le monitoring en temps réel : cette copie virtuelle peut être utilisée.

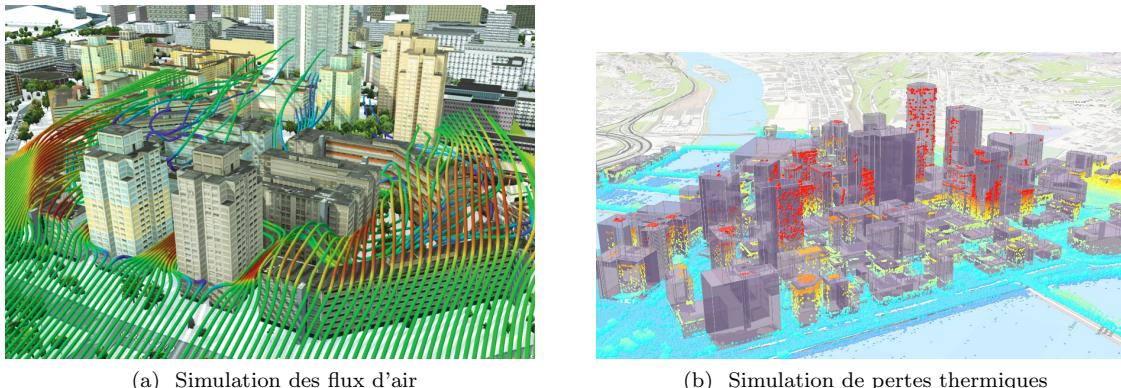


Figure 2.9: Utilisation de la copie virtuelle pour la simulation

### 2.3.2 Visualisation

Nous avons ainsi la possibilité de l'implémenter dans un moteur graphique temps réel pour visualiser la ville et ses différents états ou évolutions (par exemple de travaux) de façon graphique et en réalité virtuelle. Certain moteurs graphiques sont spécialisés dans ce domaine, ici nous présentons Unigine :



Figure 2.10: Moteur de rendu Unigine en mode présentation



(a) Simulation d'une centrale

(b) Simulation de la circulation

Figure 2.11: Moteur de rendu Unigine utilisé pour la simulation

## 2.4 Conclusion

Pour conclure, la modélisation 3D et en particulier les maillages 3D jouent un rôle majeur pour le développement des smart cities. En effet, le développement des smart cities nécessitent une représentation 3D particulièrement fidèle à la réalité. De plus, cette représentation doit être suffisamment complexe afin de modéliser des actions et/ou événements hypothétiques. Ainsi, la représentation doit permettre de modéliser les interactions entre les différents composants de la future smart city. Par conséquent, la méthode la plus adaptée est l'acquisition d'un mesh 3d à partir d'une méthode hybride, après avoir construire au préalable un nuage de point (de préférence dense). Pour ce faire, l'usage d'un scanner Lidar est recommandée au sol en raison de sa flexibilité et efficacité d'utilisation. Cela permet en effet d'obtenir un nuage de point au sol précis. Dans un second temps, l'usage de la photogrammétrie pour associer les couleurs des objets au scan laser permettant de modéliser précisément les distances, permettront de construire un nuage de point dense de la vue aérienne de la ville. Enfin, une classification des nuages de points et différents traitements de la donnée permettent de construire un mesh 3D représentatif de la ville. Finalement, cette représentation fidèle et complexe de la ville permet de visualiser, analyser et simuler différents événements virtuellement tels que la comparaison d'un fort ou faible afflux de personnes et/ou de véhicules, les travaux et leur évolution. Ainsi, ces simulations permises par les modélisation 3D permettront d'anticiper et réduire la consommation d'énergie, la pollution tout en améliorant l'économie et la qualité de vie des habitants grâce à la collecte et l'analyse des données virtuelles. En particulier, les risques d'inondation dans les villes côtières et/ou portuaires peuvent être réduit grâce à un croisement entre les données et propriétés de la ville, et les informations météorologiques locales.

# Bibliography

- [1] Sean P. Bemis, Steven Micklethwaite, Darren Turner, Mike R. James, Sinan Akciz, Sam T. Thiele, and Hasnain Ali Bangash. Ground-based and uav-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69:163–178, 2014.
- [2] David Cohen-Steiner and Frank Da. A Greedy Delaunay Based Surface Reconstruction Algorithm. Technical Report RR-4564, INRIA, September 2002.
- [3] Nils Funk, Juan Tarrio, Sotiris Papatheodorou, Marija Popovic, Pablo Alcantarilla, and Stefan Leutenegger. Multi-resolution 3d mapping with explicit free space representation for fast and accurate mobile robot motion planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, PP:1–1, 02 2021.
- [4] Hugues Hoppe. Poisson surface reconstruction and its applications. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Solid and physical modeling*, pages 10–10, 2008.
- [5] Lionel Moisan, Pierre Moulon, and Pascal Monasse. Automatic homographic registration of a pair of images, with a contrario elimination of outliers. *Image Processing On Line*, 2:56–73, 2012.
- [6] Royal Society of London. Philosophical transactions. In *Royal Society of London*, number 128, 1838.
- [7] Pedro Pinies, L.M. Paz, and Juan Tardos. Ci-graph: An efficient approach for large scale slam. pages 3913–3920, 05 2009.
- [8] Charles R. Qi, Li Yi, Hao Su, and Leonidas J. Guibas. Pointnet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space, 2017.
- [9] Shunsuke Saito, Tomas Simon, Jason Saragih, and Hanbyul Joo. Pifuhd: Multi-level pixel-aligned implicit function for high-resolution 3d human digitization. In *CVPR*, 2020.
- [10] Hugues Thomas, Charles R. Qi, Jean-Emmanuel Deschaud, Beatriz Marcotegui, François Goulette, and Leonidas J. Guibas. Kpconv: Flexible and deformable convolution for point clouds. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2019.
- [11] S. Ullman. The Interpretation of Structure from Motion. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 203(1153):405–426, January 1979.
- [12] Zhi Zheng, Yimin Luo, Zhang Yanfeng, Jun Wu, and Zhiyong Peng. A cnn-based subpixel level dsm generation approach via single image super-resolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 85:765–775, 10 2019.