

Reconstruction d'un modèle numérique de bâtiment à partir d'un nuage de points

Judith Millet

Juin 2022

Résumé : Ce projet a permis de développer un outil visant à automatiser le processus de reconstruction de bâtiments à partir d'un nuage de points, en utilisant des méthodes et fonctionnalités de la bibliothèque CGAL. Il s'est déroulé dans le cadre du projet "IASBIM : l'Intelligence Artificielle au service du BIM", une collaboration entre le laboratoire LIRIS et deux entreprises.

Mots-clés : Reconstruction, automatisation, nuage de points, modélisation géométrique, BIM, CGAL

1 - Introduction

Dans le cadre de l'unité d'enseignement "Projet d'Orientations en Master", j'ai effectué un travail de six mois encadré par Monsieur Guillaume DAMIAND, chercheur du laboratoire LIRIS situé sur le campus. L'objectif de ce projet a été la réalisation d'une méthode automatique de reconstruction d'un bâtiment depuis un nuage de points, décrivant non seulement la surface externe, mais également les intérieurs (pièces, couloirs, portes, fenêtres...). Le principe est de permettre la transformation numérique d'un bâtiment en un modèle géométrique.

Ce projet a été réalisé à l'occasion du projet "booster" proposé par la région Auvergne-Rhône-Alpes, permettant de faire collaborer entreprises et laboratoires de recherche en leur mettant à disposition des financements. Ainsi, il s'inscrit dans le projet "IASBIM : l'Intelligence Artificielle au service du BIM", réalisé en collaboration entre le laboratoire LIRIS et les entreprises BIMDATA et OSLANDIA. Les équipes souhaitent, à la longue, contribuer à l'accélération et à l'automatisation du processus Scan-to-BIM. Ce processus consiste à capturer un bâtiment sous forme d'un nuage de point, et le transformer en un modèle BIM (Building Information Modeling) [W22].

2 - Outils

Nous avons utilisé la bibliothèque C++ CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) [CGAL], une importante bibliothèque de géométrie algorithmique. Elle est disponible en open source et a été développée par plusieurs structures de recherches et entreprises. Cette bibliothèque propose de nombreuses fonctionnalités, par exemple de la génération de maillage, des méthodes de détection de plans et de reconstruction géométrique. Différents outils de CGAL ont été employés durant ce projet.

Le premier est la méthode Efficient Ransac proposée par le package "Shape Detection" [OVJA22]. Il implémente l'algorithme de détection de plans Ransac depuis un nuage de points non structuré avec des normales non-orientées. Un plan est ici représenté par une normale et une distance depuis l'origine.

Le deuxième est le package "Linear Cell Complex", dite LCC [D22]. Une LCC permet de représenter un objet 3D subdivisé ayant une géométrie linéaire, tel que chaque sommet de la subdivision est associé à un point.

Enfin, nous avons utilisé le package "3D Fast Intersection and Distance Computation" [ATW22] en manipulant un arbre AABB (Aligned Axis Bounding Box Tree). Un arbre AABB offre une structure de données statique et des algorithmes pour effectuer des requêtes d'intersection et de distance efficaces sur des ensembles d'objets géométriques 3D finis. Il servira ici à améliorer la rapidité d'une requête de distance.

Concernant la visualisation des nuages de points dans un premier lieu, nous nous sommes servis du logiciel Meshlab [CCR8], logiciel libre de visualisation et de traitement de maillage 3D.

3 - Etat de l'art

Actuellement, la modélisation d'un bâtiment s'effectue majoritairement manuellement. Disposer de reconstruction 3D d'un bâtiment en réalisant des plans précis de son intérieur devient indispensable dans différents domaines tels que l'architecture ou le BTP. Ils peuvent être employés pour l'élaboration de projets de constructions ou de rénovations. Ces modèles peuvent aussi permettre une anticipation des éventuelles anomalies ou problèmes rencontrés avant des travaux et donc, améliorer et faciliter l'exécution de ceux-ci.

Lors d'une reconstruction, la scène est scannée grâce à des capteurs d'image tels que des radars, lasers, etc. Cependant, l'acquisition par scan 3D dresse de nombreux obstacles à la reconstruction automatique, comme du bruit ou des occultations de murs. Les méthodes actuelles manquent de précision et ne sont pas efficaces pour tous les cas de figure. Il y a donc une réelle nécessité de rendre ce procédé complètement automatique quelle que soit la scène sans perdre en performance et en précision.

Depuis quelques années, plusieurs études ont documenté différentes méthodes de reconstruction automatique de bâtiments. C'est un sujet de recherche qui intéresse les laboratoires de recherche universitaires ainsi que les industriels.

Les recherches déjà effectuées décrivent que, dans un premier temps, les conditions de l'acquisition par scan 3D vont fortement influencer la qualité du nuage de points résultant. Ainsi, le modèle final obtenu peut perdre en qualité également. En effet, le bruit est un élément important qui va perturber la reconstruction.

3.1 - Prétraitements

Dans l'article [BTSAG16], les auteurs répertorient les fondamentaux de la reconstruction de surface, tels que les pré-traitements du nuage de points et l'importance de choisir en amont ses priorités.

Ces hypothèses vont permettre de réduire les imperfections du nuage de points et éventuellement de se concentrer sur les informations importantes des plans qui seront reconstruits. Sans ces hypothèses au préalable, la reconstruction pourrait prendre plus de temps et être moins précise.

De ce fait, l'utilité de classer la reconstruction de plans en termes de priorités aide également à limiter les attentes et à hiérarchiser les éléments importants pour la reconstruction. Par exemple, dans le domaine du bâtiment, un nuage de points lisse et étanche serait adéquat. En effet, la reconstruction de détails fins comme la texture d'un mur peut être inutile et créer des plans dérangeants. Au vue de l'approche développée, plusieurs exigences sont à prendre en considération.

La première hypothèse fondamentale est basée sur les primitives géométriques. Elle suppose que la géométrie de la scène peut être expliquée par un ensemble de formes géométriques simples, tels que des plans. La priorité dans ce cas-là est de trouver des formes primitives qui correspondent partiellement au nuage de points. Dans ce cas, il faut une consolidation des plans. Le modèle peut ainsi se faire par la détection puis l'amélioration de la reconstruction en fusionnant les plans adjacents, par exemple.

Selon [BT15], une méthode à ajouter au processus est le raisonnement spatial. Il consiste à agrandir les murs qui ne vont pas du sol au plafond et encore une fois, à fusionner les plans proches avec des normales similaires. Les plans voisins ayant des normales parallèles peuvent être considérés comme un même plan.

De plus, la complexité des données dépend du nombre d'objets qui composent la scène. Dans le contexte actuel, la deuxième hypothèse est donc la régularité globale, c'est-à-dire permettre de compléter des parties manquantes comme par exemple, si un objet se trouve dans le nuage de points.

3.2 - Méthodes de reconstruction

D'après [BL20], une méthode de reconstruction pourrait être la méthode cinétique. L'objectif de cette méthode est d'assembler des formes planes détectées dans le nuage de points dans un maillage polygonal étanche. Cela consiste à en développer les formes jusqu'à les faire entrer en collision (cf. figure 1). Elle s'effectue en deux parties : la détection de plans, puis l'assemblage dans un maillage polygonal. C'est une

méthode rapide mais qui peut sortir un maillage incomplet : il faudra compléter les parties manquantes soit de manière interactive avec des opérations de maillage guidées par l'utilisateur (solution non pertinente pour traiter de gros volumes de données) ou automatiquement avec des maillages triangulaires denses, qui peuvent ne pas produire de maillages polygonaux concis.

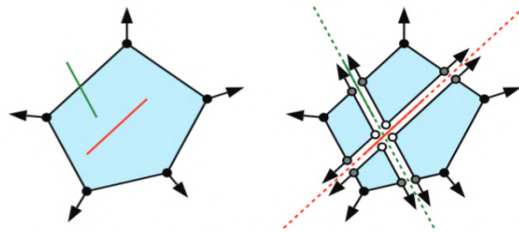


Figure 1 : Méthode cinétique appliquée au plan bleu créant des collisions avec les plans représentés par les lignes vertes et rouges.

4 - Méthode retenue

L'approche développée va s'inspirer de la méthode [BT15] en détectant d'abord les plans, puis, toutes les surfaces détectées seront interprétées comme des plans infinis et intersectées les unes avec les autres, ce qui se traduit par une segmentation de l'espace 3D en une LCC.

En effet, les nuages de points peuvent être très incomplets en raison d'occlusions et ainsi, placer les plans bruts dans la reconstruction peut permettre d'avoir une étanchéité perdue lors du scan.

Afin de disposer d'une vue d'ensemble de l'approche et de pouvoir mieux l'appréhender, un résumé de celle-ci est proposé dans la figure 2, sous forme d'organigramme.

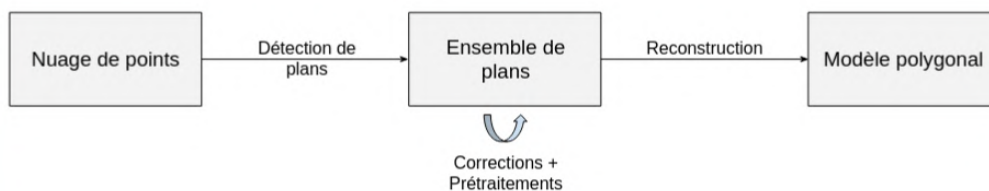


Figure 2 : Organigramme de l'approche de la reconstruction.

4.1 - Détermination des plans

La première étape de la reconstruction sera la détection de plans via des algorithmes tels que la croissance de régions ou Ransac. Le modèle reconstruit définit la scène par un ensemble de plans qui vont représenter les surfaces extraites du nuage de points. Ce type de méthodes est généralement utilisé dans la reconstruction de géométrie simple comme dans des milieux industriels et des bâtiments.

Selon l'article [PDVS18], l'utilisation de l'algorithme Ransac semble la meilleure manière de déterminer les plans car cet algorithme a prouvé sa robustesse et sa performance concernant le temps de traitement et la gestion du bruit. Il va construire une liste d'hypothèses de modèle à partir du nuage de points. En effet, lorsqu'on applique cet algorithme, on cherche à déterminer le meilleur résultat pour lequel le nombre de points pertinents, c'est-à-dire les points appartenant au modèle recherché, est maximal. De plus, Ransac possède des paramètres pouvant donner un résultat plus satisfaisant tels qu'un seuil définissant la distance maximale entre les points et le modèle, ou encore, un seuil donnant le nombre de points minimal devant être associé au résultat.

On calcule ensuite, à partir des bornes du nuage de points, la taille optimale d'une boîte englobante dans laquelle se trouvera la reconstruction. Sur le schéma de la figure 3 ci-dessous, cette boîte est représentée par le rectangle en pointillé. Chaque plan détecté est inséré dans celle-ci et ainsi, nous

obtenons une certaine quantité de faces résultantes de l'intersection de plans, correspondant ici aux quatre polygones rouge, bleu, jaune et vert.

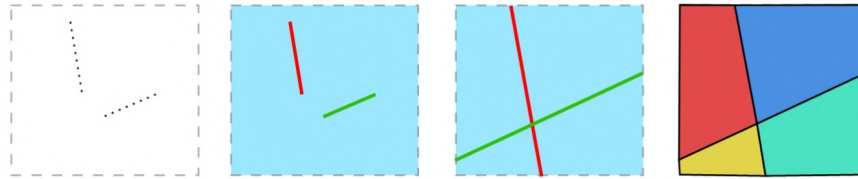


Figure 3 : Schéma de la détection de plans en 2D et de l'insertion dans une boîte englobante.

On tente, dans un premier temps, d'insérer les plans petit à petit dans une LCC, et d'appliquer le traitement après chaque insertion. Nous pourrions ensuite essayer de placer tous les plans, puis seulement appliquer le traitement afin de comparer les performances.

4.2 - Sélection des faces

La prochaine étape est la sélection des faces à supprimer. On souhaite construire un modèle géométrique (polygonal) pour décrire correctement la ou les pièces du bâtiment. La méthode proposée consiste à compter le nombre de points proches pour chaque face et ensuite de supprimer celles ayant un nombre de points inférieur à un seuil. On utilisera par ailleurs une map qui nous servira à répertorier le nombre de points pour chaque face.

Afin d'effectuer ce comptage, nous aurons besoin d'un arbre AABB car il contient la fonction `closest_point_and_primitive()` [ATW22], prenant un point en paramètre et renvoyant le point et la primitive les plus proches. Un arbre AABB est créé depuis un modèle triangulé, on rendra donc la LCC triangulaire avant d'initialiser l'arbre AABB. Ainsi, pour chaque point du nuage, on applique la fonction expliquée plus haut. La primitive résultante correspond à la surface la plus proche de ce point. On peut donc, à partir de celle-ci, incrémenter le nombre de points pour la surface en question.

Le choix du seuil à comparer avec le nombre de points est traité de plusieurs manières. La première approche admet un seuil à définir manuellement et donc paramétrable. Ainsi, les faces seront supprimées si leur nombre de points associés est inférieur à ce seuil. Sur le schéma ci-dessous, chaque nombre correspond à la quantité de points associés aux faces. Dans cet exemple, on souhaite que les faces jaune, rouge et bleu soient supprimées. Le seuil choisi doit donc être supérieur à 3.

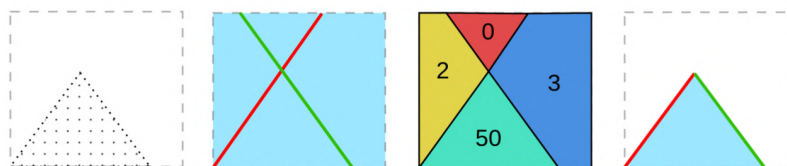


Figure 4 : Schéma de l'application de la méthode.

La deuxième approche consiste à prendre en compte l'aire du plan dans le calcul du seuil en déterminant sa densité surfacique. Ce seuil est dans ce cas-là un nombre de points minimum par unité de surface.

4.3 - Prétraitements

Les erreurs présentes lors de la détection de plans et le nombre de plans détectés peuvent entraîner un impact important sur les temps de calcul de la sélection. Dans le but de minimiser cela, il est intéressant d'appliquer un pré-traitement afin de viser un résultat plus optimisé.

En supposant que les plans à traiter en priorité soient des fondations de bâtiments, on peut régulariser les plans quasiment horizontaux, pouvant être des sols ou plafonds, et les plans quasiment verticaux, des murs dans ce cas-là, en corrigeant leur normale.

De plus, nous appliquons un filtrage sur les plans afin de ne prendre en compte qu'un plan lorsque plusieurs plans sont adjacents, comme vu précédemment. Ce filtrage sera basé sur la normale et la distance de ces plans. Il faudra pour cela les organiser en fonction de leur distance à partir de l'origine. Cela permettra de visiter le voisinage d'un plan et de comparer sa normale avec celles de ses voisins en fonction d'un seuil. On notera que ce seuil devra être défini manuellement et donc être choisi par l'utilisateur.

5 - Travail réalisé

Dans un premier temps, il a fallu récupérer des nuages de points exploitables en vue de tester la méthode sur des exemples simples, puis plus lourds et complexes.

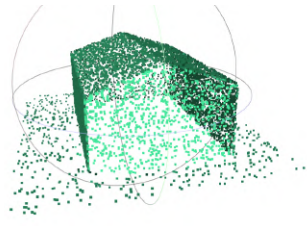
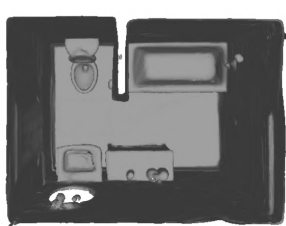
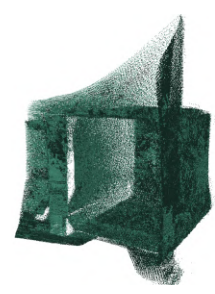
	<i>Dataset 1</i>	<i>Dataset 2</i>	<i>Dataset 3</i>
<i>Taille du fichier</i> <i>Nombre de points</i>	844 KB 8 075 points	37.1 MB 681 270 points	55.8 MB 1 004 825 points
<i>Visualisation</i>			

Figure 5 : Différents nuages de points comme une maison (gauche), une salle de bain (centre), une pièce vide (droite), et leurs caractéristiques.

La première approche de reconstruction repose sur le fait d'insérer les plans petit à petit dans la LCC et d'appliquer la méthode à chaque fois. Nous avons constaté que cette méthode ne fonctionnait pas en raison d'un problème externe concerné par la bibliothèque CGAL.

Pour y remédier, la solution a été la deuxième approche, c'est-à-dire, placer tous les plans puis reconstruire par la suite. C'est une méthode plus complexe pour des nuages de points plus conséquents. De ce fait, l'optimisation du prétraitement est essentielle.

5.1 - Choix du seuil

La méthode est basée sur le choix d'un seuil ϵ afin de sélectionner les faces à garder ou non. Dans un premier temps, le seuil choisi est fixe et paramétrable. Ainsi, en le modifiant, on obtient des résultats complètement différents. Choisir un seuil trop petit ou trop grand peut occasionner une reconstruction avec trop de faces ou une reconstruction incomplète (cf. figure 6). On constate que pour ce nuage de points, un seuil à 150 permet d'obtenir un résultat satisfaisant.

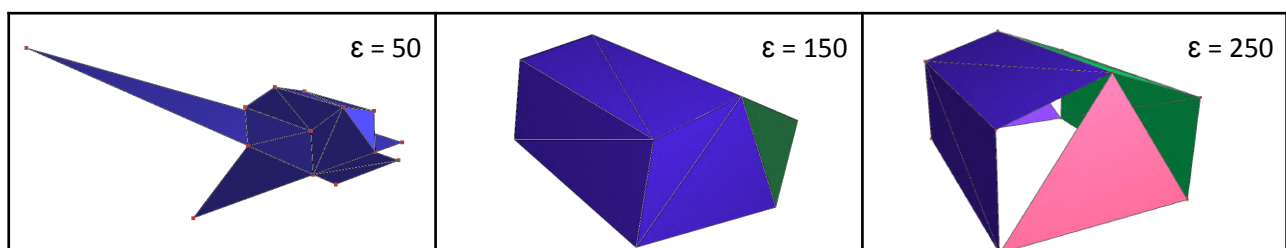


Figure 6 : Comparaison d'une reconstruction avec 3 seuils ϵ différents.

Cependant, prendre en considération le nombre de points par face seulement peut donner des résultats insatisfaisants dans le cas où le nuage de points se trouve avec des faces de tailles assez différentes. En effet, une face d'une certaine aire pourrait être conservée avec une face deux fois plus petite ayant le même nombre de points.

En testant cette méthode, on constate que le résultat obtenu avec un nuage de points léger est moins convenable que la première approche consistant à choisir un seuil fixe.

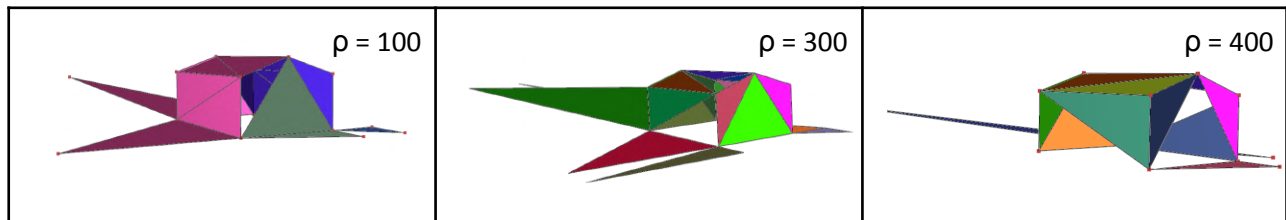


Figure 7 : Comparaison d'une reconstruction avec 3 seuils ρ différents (prise en compte de l'aire des faces).

5.2 - Prétraitements

Nous avons vu précédemment que les prétraitements sur le nuage de points peuvent permettre d'obtenir un résultat plus correct et plus performant.

Cela vient tout d'abord de la façon dont les plans sont déterminés.

5.2.1 - Détermination des plans

L'utilisation de l'algorithme RANSAC va permettre de définir la scène par un ensemble de plans. Cet algorithme peut être utilisé avec certains paramètres. Les paramètres appliqués sont :

- un seuil à 0.05 indiquant la probabilité de manquer une quantité de primitive à chaque itération,
- un seuil à 400 donnant le nombre de points minimal devant être associé à une surface,
- un seuil à 0.007 définissant la distance maximale entre les points et le modèle,
- un seuil à 0.001 définissant la distance maximale entre les points d'une même surface,
- un seuil à 0.9 fixant une déviation maximale des normales entre celle du point et celle de la surface.

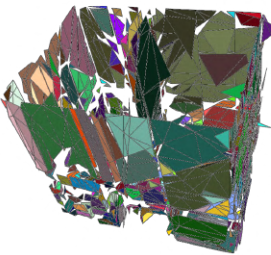
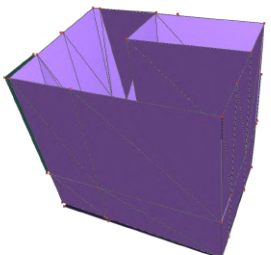
	Détection de plans avec paramètres	Détection de plans sans paramètre
Nombre de points initialement Paramètres utilisés	681 270 points $\epsilon = 80$, paramètres Ransac	681 270 points $\epsilon = 150$
Plans détectés Nombre de points non assignés Temps d'exécution de Ransac Temps total de la reconstruction	94 plans 56 425 points 19.51 secondes 381.69 secondes	11 plans 123 525 points 16.39 secondes 154.21 secondes
Reconstruction		

Figure 8 : Reconstruction avec et sans paramètres appliqués à la détection de plans.

On constate de par les résultats obtenus qu'en appliquant ces paramètres, on détecte plus de plans, les points sont assignés à 91,7% et la reconstruction obtenue est plus précise. Cependant, l'exécution de la méthode est au moins deux fois plus longue. Sans l'application des paramètres, le résultat manque de détails et les points ne sont assignés qu'à 81%, mais l'exécution est plus performante. Ainsi, on observe que l'utilisation des paramètres de Ransac permet d'obtenir un résultat plus correct, néanmoins, le nombre de plans détectés altère le temps d'exécution.

5.2.2 - Réorganisation des plans

Comme vu précédemment, les nuages de points peuvent contenir des murs texturés. De ce fait, filtrer les plans afin de n'en sélectionner qu'un lorsque plusieurs sont presque similaires va permettre de diminuer le nombre de plans à traiter de manière considérable.

Afin de diminuer la complexité et de satisfaire les conditions d'application locale de la transformation, le processus entier (traitement de toutes les orientations de normales) est seulement appliqué à son voisinage pour chaque plan.

De plus, comme expliqué au préalable, nous sommes dans un contexte où les plans qui nous intéressent sont principalement des murs, sols et plafonds. Ainsi, régulariser les murs va donner lieu à un rapprochement de certains plans adjacents et donc diminuer davantage le nombre de plans à traiter.

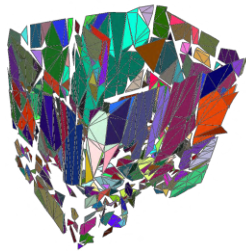
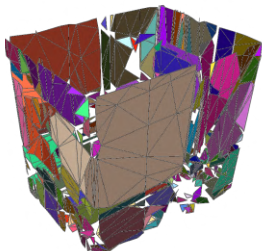
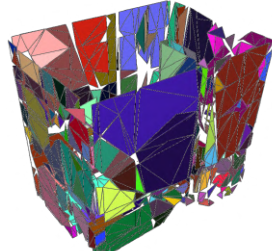
	<i>Sans prétraitement</i>	<i>Avec fusion des plans</i>	<i>Avec fusion et régularisation</i>
<i>Plans détectés</i>	91 plans	95 plans	89 plans
<i>Plans après fusion</i>	-	74 plans	73 plans
<i>Plans régularisés</i>	-	-	48 plans
<i>Temps total</i>	199.5 secondes	163.9 secondes	140.5 secondes
<i>Résultats</i>			

Figure 9 : Reconstruction sans prétraitement (à gauche), avec un filtrage des plans adjacents (au centre), puis avec une régularisation combinée à un filtrage des plans (à droite), pour un epsilon $\epsilon=80$.

On constate que les résultats obtenus sont meilleurs dans le cas où un prétraitement est appliqué. En effet, le nombre de plans et le temps d'exécution sont diminués. Ce prétraitement optimise la reconstruction. Tout ceci est paramétrable car en effet, des nuages de points simples n'ont pas besoin de celui-ci et peuvent même le fausser, comme le montre la figure 10 avec un nuage de points léger et propre.

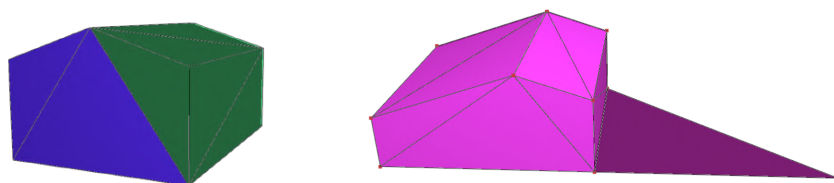


Figure 10 : Reconstruction sur un nuage de points simple sans prétraitement (à gauche) et avec prétraitements (à droite) pour un même epsilon $\epsilon=150$.

5.3 - Optimisation

On peut comparer cette méthode entre plusieurs cas de figure en précisant les paramètres adaptés afin d'obtenir le résultat le plus convenable.

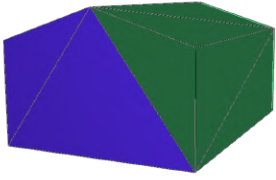
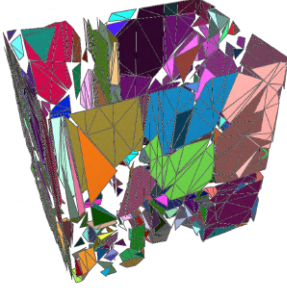
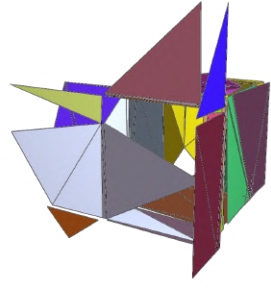
	<i>Dataset 1</i>	<i>Dataset 2</i>	<i>Dataset 3</i>
<i>Paramètres</i>	epsilon $\epsilon=150$, paramètres Ransac	epsilon $\epsilon=120$, paramètres Ransac, prétraitements	epsilon $\epsilon=2300$, paramètres Ransac, prétraitements
<i>Nombre de points moyen par face</i>	252	37	1 200
<i>Nombre de plans détectés</i>	7	90	23
<i>Nombre de plans après prétraitement</i>	(pas de traitement)	80	16
<i>Temps (en seconde) :</i>			
<i>Détection de plans</i>	0.16 s.	19.3 s.	20.3 s.
<i>Prétraitement</i>	(pas de prétraitement)	0.003 s.	0.0004 s.
<i>Insertion plans dans LCC</i>	0.006 s.	15.94 s.	0.049 s.
<i>Triangulation</i>	0.03 s.	9.79 s.	0.12 s.
<i>Sélection et suppression</i>	3.94 s.	304.97 s.	264.07 s.
<i>- Comptage des points</i>	3.76 s.	280.6 s.	268.8 s.
<i>- Suppression faces</i>	0.03 s.	23.45 s.	0.24 s.
<i>Total</i>	4.01 s.	350.17 s.	284.79 s.
<i>Résultats</i>			

Figure 11 : Comparaison de l'application de la méthode sur trois nuages de points.

La première reconstruction obtenue à partir d'un nuage de point simple produit un résultat qui peut confirmer l'utilité de la méthode. En effet, on obtient une reconstruction du nuage de points représentant les fondations voulues de la maison. Les deux autres résultats ne sont pas encore complets. On constate que la méthode détecte des plans non requis qui ne sont pas retirés lors du filtrage.

De plus, le comptage de points par face est l'exécution la plus longue du processus. En effet, plus le nuage de points est grand, plus ce temps d'exécution est allongé.

Afin d'améliorer ceci, l'application d'un paramètre permettant de prendre un point sur 3 va permettre de diminuer le temps de plus d'un tiers en donnant un résultat convenable. Il faut évidemment modifier le seuil ϵ choisi afin qu'il concorde avec la diminution de points traités.

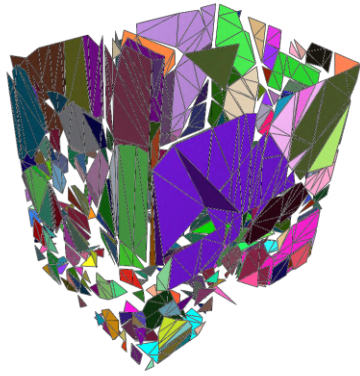
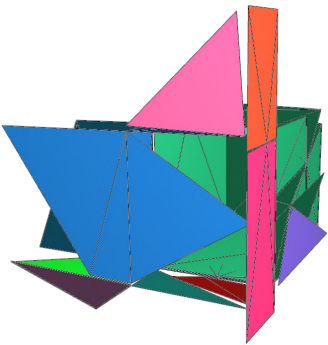
	<i>Dataset 2</i>	<i>Dataset 3</i>
<i>Paramètres</i>	epsilon $\epsilon=50$, paramètres Ransac, prétraitements, moins de points	epsilon $\epsilon=1000$, paramètres Ransac, prétraitements, moins de points
<i>Moyenne de points par face</i>	15	467
<i>Temps de comptage</i> <i>Temps total</i>	98.99 s. 167.33 s.	82.47 s. 99.69 s.
<i>Résultat</i>		

Figure 12 : Comparaison de l'application du paramètre d'optimisation du nombre de points sur deux nuages de points.

Les résultats confirment que ce paramètre permet une optimisation d'exécution sans perdre de détails sur la reconstruction.

6 - Conclusion

Ce projet a présenté une nouvelle approche pour aborder la reconstruction de bâtiment depuis un nuage de point. Cette méthode prend en considération les priorités et les fondamentaux vus dans l'état de l'art et a prouvé son utilité sur des données concrètes de différentes amplitudes.

Ainsi, pour modéliser la géométrie des éléments d'un bâtiment, une décomposition en plans est très souvent considérée. Nous avons choisi d'adopter cette décomposition dans la méthode en utilisant l'algorithme Ransac. Cet algorithme s'est avéré efficace avec l'application de paramètres pour les nuages de points complexes.

La deuxième étape consiste à insérer les plans détectés dans une LCC en les interprétant comme des plans infinis. Cette segmentation de l'espace 3D permet d'obtenir des faces qui seront traitées par la suite. Ainsi, ces faces sont considérées comme inutiles selon plusieurs critères, tels que le nombre de points associés à la face ou l'aire de celles-ci. Cette approche permet de produire une reconstruction complète dans certains cas de figure, mais reste à améliorer. En effet, l'amélioration du seuil de sélection de faces pourrait corriger d'une manière plus adéquate les modèles résultants, par exemple, en fractionnant les surfaces d'une certaine taille.

Les hypothèses proposées durant le travail de recherche ont été confirmées lors de la phase de réalisation. Ainsi, le nombre de plans détectés en amont fait dépendre la complexité et le temps d'exécution du remplissage de la LCC et donc, de la reconstruction.

La méthode réalisée a permis de mettre en évidence les difficultés rencontrées dans le processus de reconstruction d'un bâtiment. Les prochains travaux incluent une meilleure optimisation des prétraitements

qui semblent indispensables. Le filtrage des plans détectés et la régularisation des plans a permis de faire diminuer le nombre de plans à traiter et ainsi, faire baisser le temps d'exécution. Cependant, ce prétraitement peut être amélioré. En effet, nous sommes dans un contexte où les plans souhaités sont des fondations de bâtiment. Il peut donc être intéressant de prendre en considération seulement des surfaces d'une certaine taille. Cela permettrait d'éviter que des objets se retrouvent dans la reconstruction. Ainsi, les hypothèses proposées ouvrent la voie à de nombreux futurs travaux sur le sujet.

Références

- [ATW22] Pierre Alliez, Stéphane Tayeb, Camille Wormser. 3D Fast Intersection and Distance Computation. In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 5.4.1 edition, 2022. https://doc.cgal.org/latest/AABB_tree/index.html
- [BL20] Jean-Philippe Bauchet, Florent Lafarge, « Kinetic Shape Reconstruction. ACM Transactions on Graphics », Association for Computing Machinery, 2020, 10.1145/3376918. hal-02924409
- [BT15] J. Boehm, C. Thomson, « Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM », Remote Sens. 2015, 7, 11753-11775. <https://doi.org/10.3390/rs70911753>
- [BTSAG16] Matthew Berger, Andrea Tagliasacchi, Lee Seversky, Pierre Alliez, Gael Guennebaud, et al.. « A Survey of Surface Reconstruction from Point Clouds », Computer Graphics Forum, Wiley, 2016, pp.27. 10.1111/cgf.12802. hal-01348404v2
- [CCR8] P. Cignoni, M. Corsini, G. Ranzuglia. MeshLab: an Open-Source 3D Mesh Processing System. ERCIM News, 2008. <https://www.meshlab.net/>
- [CGAL] CGAL, Computational Geometry Algorithms Library, <https://www.cgal.org>
- [D22] Guillaume Damiand. Linear Cell Complex. In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 5.4.1 edition, 2022. https://doc.cgal.org/latest/Linear_cell_complex/index.html
- [OVJA22] S. Oesau, Y. Verdie, C. Jamin, P. Alliez, et al.. Shape Detection. In CGAL User and Reference Manual. CGAL Editorial Board, 5.4.1 edition, 2022. https://doc.cgal.org/latest/Shape_detection/index.html#Shape_detection_RANSAC
- [OVK19] Sebastian Ochmann, Richard Vock, Reinhard Klein, « Automatic reconstruction of fully volumetric 3D building models from oriented point clouds », ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 151, 2019, Pages 251-262, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.017>
- [PDVS18] M. Previtali, L. Díaz-Vilariño, M. Scaioni, « Indoor Building Reconstruction from Occluded Point Clouds Using Graph-Cut and Ray-Tracing », Appl. Sci. 2018, 8, 1529. <https://doi.org/10.3390/app8091529>
- [W22] Contributeurs de wikipédia, « Building information modeling », Wikipédia, l'encyclopédie libre. 2022. http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Building_information_modeling&oldid=190714863