



Du réel au virtuel



Numérisation 3D du patrimoine

Détermination des paramètres optimaux d'une prise
de vue en photogrammétrie

Charlotte Faugère



Charlotte Faugère

ENSA Paris la Villette, 2025

Mémoire de Master
en architecture

SAPI Savoirs des Activités de Projet Instrumentées

Encadré par Anne Tüscher Dokic, Joaquim Silvestre et, François Guéna

Pour accéder à mon mémoire en version numérique, scanner ce QR code



Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenue et accompagnée tout au long de la réalisation de ce mémoire de master.

En premier lieu, je remercie chaleureusement mes professeurs encadrants, Anne Tüscher Dokic, Joaquim Silvestre et ,François Guéna pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur accompagnement constant durant ma recherche et la rédaction de ce mémoire. Leur expertise et leur bienveillance ont été des atouts précieux pour mener à bien ce projet.

Je souhaite également remercier mes camarades, Thibault Decaluwe, Etienne Laget, Emilie Landais-Fedirici, Mamoun Lahlou et Olivia Hacquet, dont les relectures attentives et les retours constructifs ont grandement contribué à améliorer la qualité de ce travail.

Enfin, je tiens à adresser un remerciement tout particulier à mon frère, Anatole Faugère, dont les compétences en programmation et en langage Python ont été essentielles pour mener à bien certaines étapes techniques de ce mémoire. Son aide précieuse et son dévouement m'ont beaucoup aidée été essentiels dans la réussite de cette démarche.

.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif de déterminer les **paramètres d'acquisition optimaux** pour la prise de vue en **photogrammétrie**. C'est-à-dire le **nombre de photos** nécessaires et la **résolution** idéale de l'appareil photo pour garantir une **modélisation 3D de qualité**. Pour répondre à cette question, je réalise plusieurs essais en modifiant à chaque fois un de ces paramètres. Afin de comparer les différents modèles obtenus, je développe mes propres **outils d'évaluation**. Ces outils se veulent objectifs et **généralisables à d'autres modèles 3D** dans un cadre plus large que celui de la photogrammétrie. A partir de ces comparaisons je détermine le nombre de photos et la résolution à atteindre pour obtenir une qualité de modélisation optimale.

Abstract

This thesis aims to determine the **optimal acquisition parameters** for **photogrammetry imaging**, namely the **number of photos** required and the ideal **resolution** of the camera to ensure **high-quality 3D modeling**. To address this question, I conducted several tests, modifying one of these parameters each time. To compare the different models obtained, I developed my own **evaluation tools**. These tools are designed to be objective and **applicable to other 3D models** in a broader context beyond photogrammetry. Based on these comparisons, I determined the number of photos and the resolution needed to achieve optimal modeling quality.

Table des matières

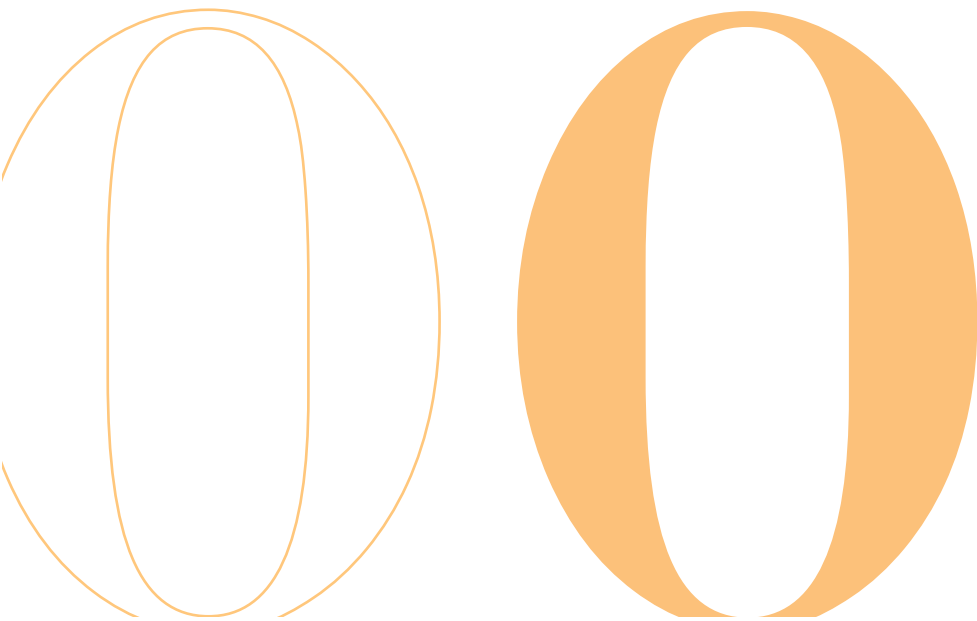
INTRODUCTION.....	14
PARTIE 1 : ETAT DE L'ART	18
I. LES OUTILS DE NUMÉRISATION 3D	19
a) La lasergrammétrie.....	19
b) La photogrammétrie.....	22
c) Avantages et inconvénients.....	23
II. LA PHOTOGRAMMÉTRIE.....	24
a) Origine de la photogrammétrie.....	24
b) Le fonctionnement étape par étape de la photogrammétrie	26
c) Les domaines d'application de la photogrammétrie	31
III. ETAT DE LA RECHERCHE ET PERSPECTIVES	33
a) Limites de la photogrammétrie	33
b) Ce qui a déjà été fait et perspectives	34
PARTIE 2 : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	38
I. EXPLICATION DE L'EXPÉRIENCE	38
II. RÉCOLTE DES DONNÉES.....	40
a) Réglages de l'appareil photo	41
b) Taux de recouvrement des photos.....	44
c) Prise de vue linéaire	45
III. MODÉLISATION 3D DANS METASHAPE	46
a) Alignement des caméras	46
b) Création des nuages de points dense.....	47
IV. OUTILS DE COMPARAISON DES DIFFÉRENTS MODÈLES 3D OBTENUS	49
a) Critères de qualité des photos.....	49
i. Réglage de l'appareil photo et résolution	49
ii. Indice de qualité d'Image Metashape	50
iii. Taux de recouvrement des photos.....	50
b) Critères de qualité d'un modèle 3D :.....	51
i. Evaluation par comparaison avec un modèle de référence	51
ii. Estimation visuelle de la densité du nuage de points	51
iii. Planéité des éléments plats	52
i. Dénombrement des clusters	58
iv. Qualité métrique	62

PARTIE 3 : ANALYSE DES RÉSULTATS	66
I. CRITÈRES DE QUALITÉ DES PHOTOS	67
a) Réglage de l'appareil photo et résolution	67
b) Indice de qualité d'image Metashape	67
c) Taux de recouvrement des photos.....	69
II. CRITÈRE DE QUALITÉ D'UN MODÈLE 3D :	70
a) Estimation visuelle de densité du nuage de points	70
b) Planéité des éléments plats.....	74
c) Dénombrement des clusters	77
d) Qualité métrique	83
PARTIE 4 : SYNTHÈSE	88
I. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS OBTENUS SUR MON OBJET D'ÉTUDE ET GÉNÉRALISATION.....	88
II. ÉTABLISSEMENT D'UN RATIO N QANTITÉ PHOTO/MÈTRE LINÉAIRE.....	92
III. EXEMPLE D'APPLICATION DU RATIO N.....	93
CONCLUSION	98
GLOSSAIRE DES TERMES TECHNIQUES.....	102
BIBLIOGRAPHIE.....	106
ANNEXE	112

Mode d'emploi

Lorsqu'un terme technique apparaît pour la première fois dans le mémoire, il est indiqué en **gras** afin de le distinguer clairement. Sa définition sera systématiquement référencée dans le glossaire situé à la fin du document. Les notions importantes, quant à elles, seront soulignées dans le texte afin d'attirer l'attention sur leur importance.

Introduction



Introduction

Dans le cadre d'un échange au Canada, je me suis demandé comment faire découvrir l'architecture typique de ce pays à quelqu'un qui ne pouvait s'y rendre. L'idée de proposer rapidement une représentation 3D précise d'un bâtiment m'a toujours fascinée.

C'est dans ce contexte que je me suis intéressée aux outils de relevés et de représentation architecturaux. Plus précisément, sur comment numériser en 3D facilement et avec du matériel accessible un édifice pour pouvoir le partager à quelqu'un à l'autre bout du monde. Par exemple, dans le cas d'un étudiant en échange souhaitant montrer à un de ses camarades l'architecture du pays où il se trouve.

L'évolution et le perfectionnement des outils de relevés architecturaux permet aujourd'hui des relevés 3D précis, fiables et rapides à exécuter¹. C'est le cas, par exemple, de la photogrammétrie et de la numérisation laser. Ce sont deux techniques de relevé numérique permettant de modéliser en 3D des objets ou des sites avec précision, l'une à partir de photographies, l'autre grâce à des scans laser. Ces technologies nous permettent de créer des reproductions numériques fidèles des édifices, restituant non seulement leur apparence, mais aussi leurs systèmes constructifs. Ces modèles 3D offrent également une nouvelle manière immersive de découvrir le patrimoine construit.

La photogrammétrie est une technique qui reproduit la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues photographiques de cet objet. Elle représente une technique particulièrement avantageuse pour sa facilité d'utilisation et son faible coût. Avec un iPhone et une dizaine de photos, il est possible de réaliser une esquisse 3D d'un objet. Dans le cadre d'une utilisation étudiante, c'est l'outil que je retiendrai pour ma reconstitution 3D d'un édifice bâti.

La qualité et l'exactitude des modèles obtenus en photogrammétrie peuvent varier en fonction de plusieurs paramètres d'acquisition. Ces paramètres sont nombreux, mais je vais retenir les principaux : la quantité de photos prises et la **résolution**² de ces photos. Ces variables influencent directement la précision de la modélisation des détails du modèle 3D final.

¹ Alain Fuchs. *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique. Modélisation et simulation. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2006.*

² **Résolution** = Nombre de pixels par photo.

Je m'interroge sur le degré d'influence de ces deux paramètres lors d'une reconstitution d'un édifice. Quelle est la valeur optimale de ces deux paramètres (le nombre de photos et la résolution) que je dois choisir pour obtenir un résultat satisfaisant ? Existe-t-il des limites inférieures à ces paramètres en dessous desquelles un modèle deviendrait trop dégradé ? Et en existe-t-il des supérieures au-delà desquelles le modèle ne gagnerait plus en précision ?

Pour répondre à ces questions, je souhaite mener une expérience en faisant varier ces deux facteurs, puis mesurer leur impact sur la qualité du modèle. Cette notion de qualité du modèle est importante; je vais déterminer une liste de critères à vérifier pour considérer qu'un modèle est « bon ». Je développerai également mes propres outils pour évaluer ces critères sur un modèle 3D. La conception de ces outils constitue une part importante de mon mémoire, et leur application me permettra de comparer les modèles obtenus. Ces outils se veulent objectifs et généralisables à d'autres modèles 3D.

Mon étude se déroulera en plusieurs étapes. Je commencerai par un état de l'art pour situer ma recherche dans le contexte des études existantes sur la photogrammétrie appliquée à l'architecture. Ensuite, je décrirai ma méthodologie expérimentale, détaillant les protocoles de prise de vue, les paramètres étudiés et les critères d'évaluation des modèles obtenus. Je détaillerai également les outils développés pour évaluer ces critères. Puis, je présenterai et analyserai les résultats de mes essais, ce qui me permettra de tirer des conclusions sur les paramètres optimaux de prise de vue. Enfin, j'aborderai la portée de mes résultats et des perspectives offertes par ma recherche dans le cadre d'une utilisation étudiante des résultats obtenus.

Cette recherche vise à fournir des recommandations aux étudiants souhaitant se lancer en photogrammétrie. Ces conseils, simples et pratiques, aideront les débutants à déterminer le nombre de photos à prendre et le type d'appareil photo à utiliser.

Les outils d'évaluation des modèles photogrammétriques développés dans ce mémoire peuvent être généralisés à l'évaluation de tout modèle 3D.

Etat de l'art

01

I. Les outils de numérisation 3D

II. La photogrammétrie

III. Etat de la recherche et perspectives

Partie 1 : Etat de l'art

Dans un premier temps je me suis intéressée aux outils de représentation 3D d'un bâtiment. L'objectif étant de pouvoir montrer une reproduction 3D fidèle à quelqu'un ne pouvant se rendre sur place.

Ce processus de reproduction 3D d'un objet s'appelle numérisation 3D³. La numérisation 3D se déroule en trois étapes. La première étape consiste à récolter les données nécessaires à la modélisation à l'aide d'un outil de relevé 3D. Cet outil, grâce à un calcul des distances que j'expliquerai plus loin, restitue les informations géométriques de l'objet à modéliser. Les informations géométriques sont transmises sous forme de coordonnées 3D de points définissant l'objet à un logiciel spécialisé.

Dans la deuxième étape, le logiciel lit ces coordonnées spatiales et génère un nuage de points correspondant aux coordonnées qu'il a reçues. C'est la troisième étape : le nuage de points obtenu correspond à l'objet initial. La figure ci-dessous récapitule les étapes de numérisation 3D.

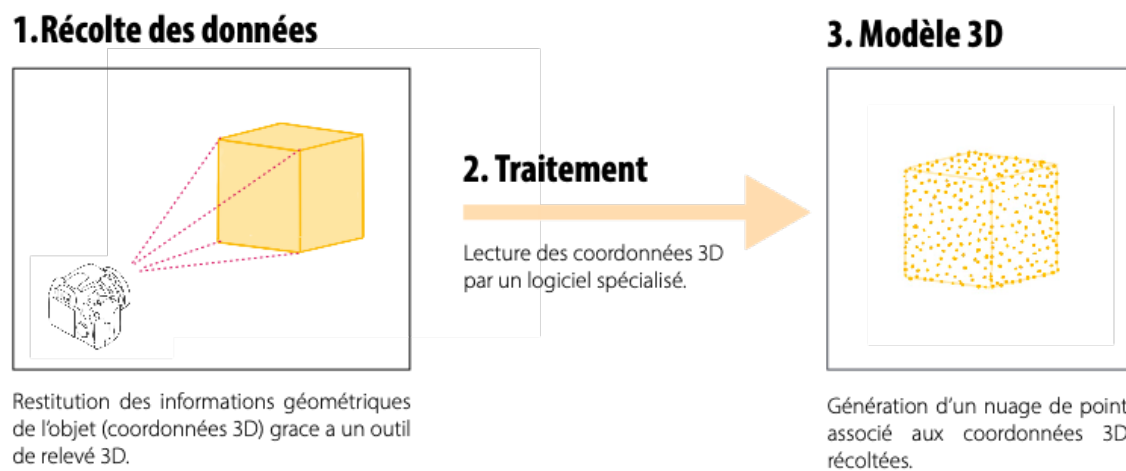


FIGURE 1.1 : EXPLICATION DE LA NUMÉRISATION 3D D'UN OBJET
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Dans le texte suivant, j'aborderai les différents outils de numérisation 3D qui existe. Je présenterai leur fonctionnement ainsi que leur origine. Je m'attarderai sur le processus de photogrammétrie. Puis je terminerai par ce qui existe déjà concernant notre étude et les perspectives de ma recherche.

³ Alain Fuchs. *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique. Modélisation et simulation. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2006.*

I. Les outils de numérisation 3D

Il existe deux technologies de numérisation 3D permettant de modéliser un bâtiment : la lasergrammétrie et la photogrammétrie. Ces techniques permettent de reproduire fidèlement les échelles, les mesures et les textures de l'objet initial.⁴

a) La lasergrammétrie

La lasergrammétrie est une technique de relevé 3D qui utilise des scanners laser pour obtenir des mesures précises de la surface d'objets, de bâtiments ou de sites entiers. Le scanner émet un faisceau laser qui rebondit sur la surface cible, et en mesurant le temps de retour du faisceau, il est possible de calculer les distances, permettant ainsi de reconstruire des modèles 3D détaillés.

Dans le domaine des scanners laser 3D, il existe deux techniques d'acquisition reposant sur des principes différents : le laser à triangulation et la télémétrie laser (aussi appelée LIDAR).

⁴ Maumont, Michel. « L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie ». In *Situ. Revue des patrimoines*, no 13 (3 août 2010)

Le laser à triangulation fonctionne de la manière suivante : l'émetteur projette un faisceau laser sur l'objet à mesurer, la surface de l'objet dévie la trajectoire de ce faisceau et cette déviation est enregistrée par le capteur. La figure 1.2 illustre ce procédé.

C'est donc le capteur/appareil photo qui permet de situer le point laser.⁵

Triangulation laser

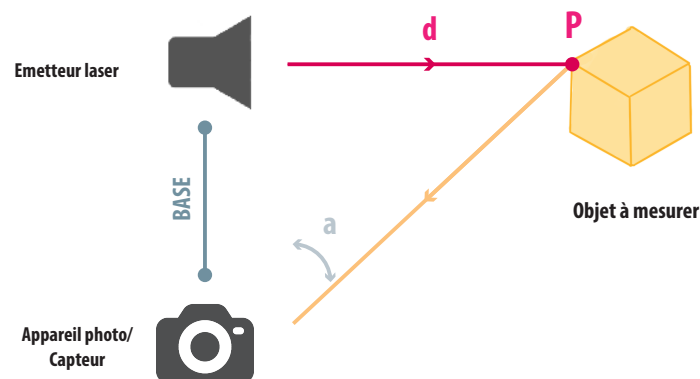


FIGURE 1.2 : PRINCIPE DE TRIANGULATION LASER (SOURCE : AUTEUR)

On parle de **triangulation** car, comme on peut le voir sur le schéma ci-dessus, un triangle est formé entre l'émetteur laser, le point laser et l'appareil photo. L'appareil va calculer la distance émetteur-objet (distance d) grâce à des calculs trigonométrique :

- la distance entre l'appareil photo/capteur et le laser est connue ("base" sur le schéma)
- l'angle retour du faisceau lumineux est également connu (angle a)
- la distance d est donc obtenue par la formule trigonométrique : $d = \text{base} \times \tan(a)$

Les lasers à triangulation sont généralement très précis pour de courtes distances (souvent moins de 1 mètre) et conviennent aux mesures de haute précision. En effet, plus la distance augmente, et plus les variations angulaires deviennent subtiles et difficiles à détecter.

⁵ « Les scanners 3D | Trousses à outils ». Consulté le 27 octobre 2024.

La deuxième technique, la télémétrie laser, utilise la mesure du temps de parcours d'un rayon lumineux jusqu'à l'objet mesuré. En connaissant la vitesse du faisceau lumineux (vitesse de la lumière dans le vide) et le temps écoulé pour l'aller-retour du faisceau, on peut ainsi déterminer la distance parcourue.

Télémétrie laser

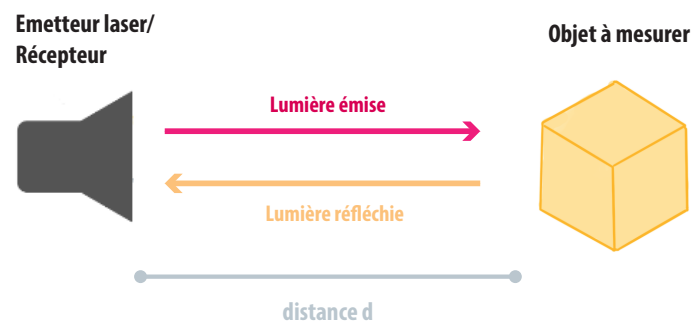
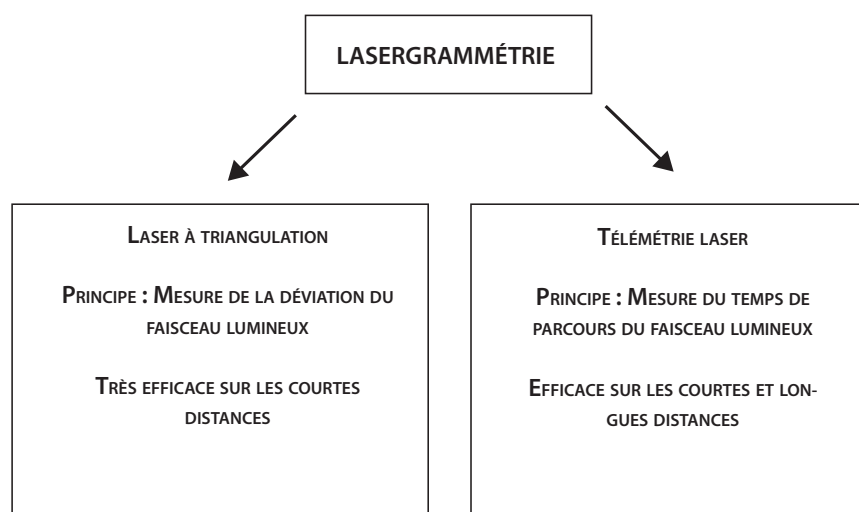


FIGURE 1.3 : PRINCIPE DE TELEMETRIE LASER (SOURCE : AUTEUR)

Cette technique présente l'avantage d'être tout aussi efficace sur de courtes distances que sur de longues, couvrant une plage allant de quelques mètres à plusieurs kilomètres.

En résumé voici en quoi se résument les deux techniques de lasergrammétrie :



b) La photogrammetrie

La seconde méthode d'acquisition est la photogrammétrie. Il s'agit d'une technique de mesure qui détermine la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vue photographiques de cet objet⁶. Son principe repose sur la perspective et son interprétation. La photogrammétrie inverse le processus photographique. Alors que la photographie prend un objet ou une scène et l'aplatit pour créer une image 2D, la photogrammétrie fait le chemin en sens inverse. Elle examine cette représentation 2D et construit un modèle 3D à partir d'indices contenus dans les images⁷.

La photogrammétrie utilise le principe de reproduction du relief à partir de deux images planes, ce concept se nomme stéréoscopie. Avec seulement une photo, on ne peut prédire la géométrie de l'objet ; c'est la superposition des deux qui nous renseigne sur le relief. (voir figure ci-dessous).

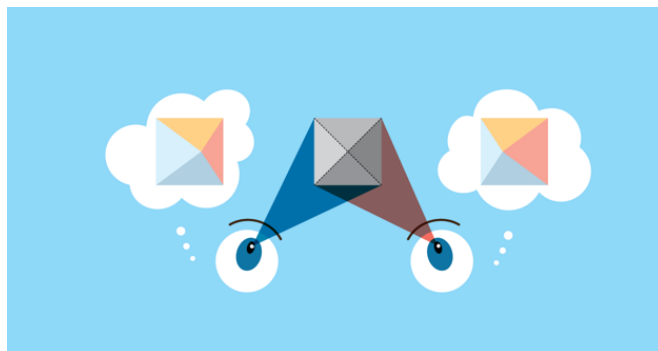


FIGURE 1.4 : PRINCIPE DE STEREOSCOPIE
SOURCE : LA PHOTOGRAMMÉTRIE - INSTITUT - IGN

La photogrammétrie s'appuie sur ce principe pour déduire les dimensions et les propriétés physiques d'objets. Avec suffisamment d'images superposables fournissant les informations spatiales nécessaires, il est possible de reconstruire un modèle 3D d'un objet ou d'une scène entière.

⁶ « La photogrammétrie - Institut - IGN », 10 février 2021.

⁷ « Qu'est-ce que la photogrammétrie ? | Solutions de scan professionnelles | Artec3D ».

c) Avantages et inconvénients

Chaque technique mentionnée précédemment a ses avantages et ses inconvénients. La lasergrammétrie est la plus précise des deux méthodes pour reproduire la géométrie d'un objet de manière fidèle. La photogrammétrie, quant à elle, est moins précise pour la géométrie, mais elle permet de reproduire l'aspect visuel de l'objet (ses textures et ses couleurs), ce que la lasergrammétrie ne peut pas faire.

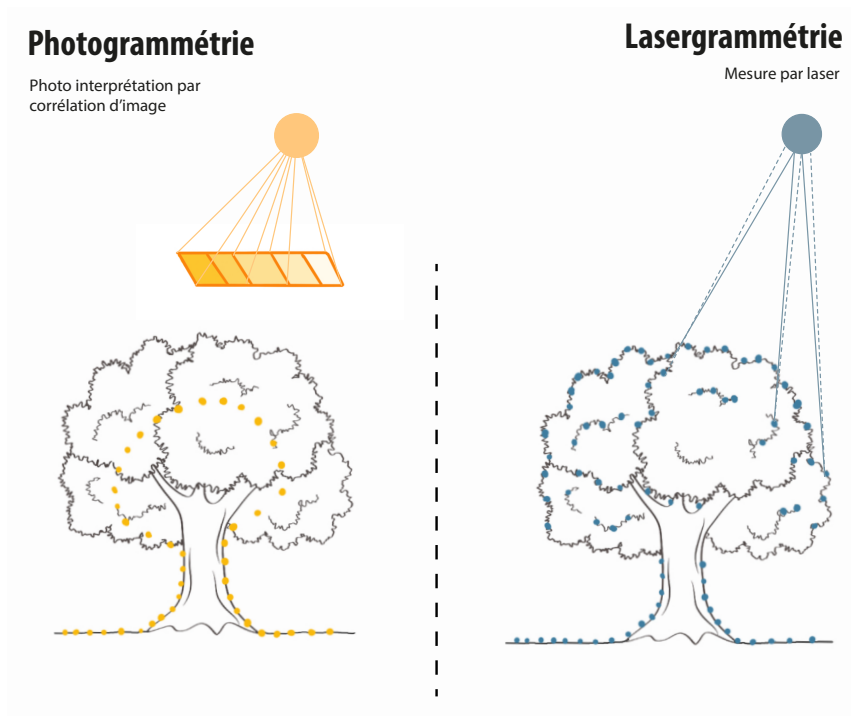


FIGURE 1.5 : COMPARAISON PHOTOGRAMMETRIE – LASERGRAMMETRIE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Le schéma ci-dessus montre comment la lasergrammétrie, par sa lecture des points dans l'espace, est plus apte à représenter fidèlement la géométrie de l'objet étudié. Une solution pour obtenir à la fois une précision géométrique et un rendu des textures consiste à combiner la photogrammétrie et le scanner 3D.

Dans mon cas, la lasergrammétrie est difficile à mettre en œuvre car elle nécessite un équipement spécifique (un laser) que je n'ai pas à ma disposition. C'est pourquoi je me suis orientée vers la photogrammétrie. Bien que sa précision géométrique soit inférieure à celle de la lasergrammétrie, elle demeure amplement suffisante pour les besoins de mon étude.

II. La photogrammétrie

Dans cette section, je vais présenter en détail l'ensemble des éléments essentiels à connaître sur la photogrammétrie. J'aborderai brièvement l'origine de la photogrammétrie, son processus détaillé, puis je terminerai par les domaines d'application de ce procédé de numérisation 3D.

a) Origine de la photogrammétrie

Le développement de la photogrammétrie telle que nous la connaissons actuellement est étroitement lié aux débuts de la photographie. Dans la seconde moitié du XIXe siècle, le colonel Aimé Laussedat, pionnier de cette discipline, a commencé à élaborer de nouvelles techniques d'acquisition de données en exploitant les images des premiers appareils photographiques.⁸

Il a notamment mis au point une méthode appelée métrophotographie, qui repose sur l'utilisation de photographies pour effectuer des relevés topographiques en appliquant des principes de perspective géométrique. Initialement testée avec des dessins en perspective, cette technique permettait de déterminer des coordonnées précises pour cartographier des zones difficiles d'accès. Bien que limitée par l'absence de stéréoscopie et de calculs d'erreurs avancés, la métrophotographie a ouvert la voie à la photogrammétrie moderne, en montrant que la photographie pouvait être un outil puissant pour la cartographie. La figure ci-contre illustre un exemple d'application de cette technique : en haut, une photographie montrant la topographie du terrain, en bas, sa restitution en plan par métrophotographie.

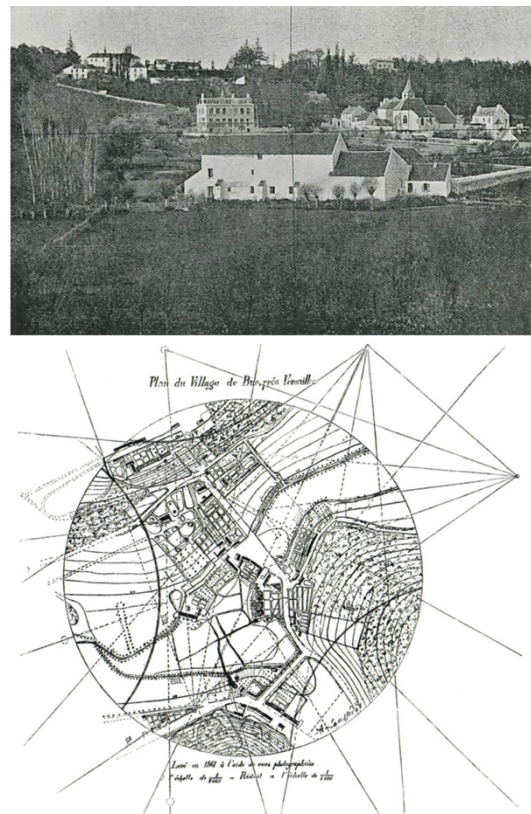


FIGURE 1.6 : PRINCIPE DE METROPHOTOGRAPHIE

SOURCE : POLIDORI, L. « ON LAUSSE DAT'S CONTRIBUTION TO THE EMERGENCE OF PHOTOGRAMMETRY »

⁸ Polidori, L. « ON LAUSSE DAT'S CONTRIBUTION TO THE EMERGENCE OF PHOTOGRAMMETRY ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020* (12 août 2020)-

Avec l'arrivée de l'aviation, au XXème, l'utilisation de prises de vue aériennes révolutionne le domaine. Pendant la Première Guerre mondiale, la photogrammétrie aérienne devint un outil essentiel, notamment pour la cartographie des terrains difficilement accessibles. Les premières entreprises de photogrammétrie aérienne apparaissent, et la technique est adoptée pour des usages civils, comme la cartographie urbaine et l'étude des ressources naturelles.

Après la Seconde Guerre mondiale, la photogrammétrie connaît un nouvel essor grâce aux progrès de l'électronique et des ordinateurs. Elle est largement utilisée pour obtenir des relevés de terrain avec une précision accrue. L'Institut Géographique National (IGN) en France joue un rôle important dans cette avancée en adoptant son utilisation à grande échelle pour la cartographie nationale

Photogrammétrie aérienne

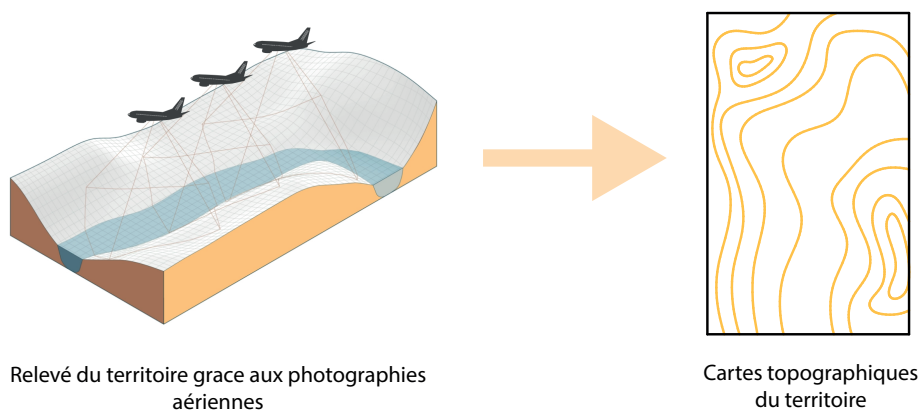


FIGURE 1.7 : LA CARTOGRAPHIE DU TERRITOIRE FRANÇAIS PAR PHOTOGRAMMETRIE

SOURCE : « QU'EST-CE QUE LA PHOTOGRAMMETRIE ? | SOLUTIONS DE SCAN PROFESSIONNELLES | ARTEC3D ».

À la fin du XXe siècle, l'arrivée de l'imagerie satellitaire haute résolution et des systèmes de positionnement global (GPS) transforme à nouveau la photogrammétrie. Cette période marque le début de la photogrammétrie numérique, grâce à des logiciels capables de convertir des séries d'images en modèles 3D avec une précision remarquable. La photogrammétrie s'étend alors à des domaines comme l'architecture, l'archéologie et l'ingénierie, permettant de modéliser des bâtiments, des sites archéologiques et des paysages très précisément. Aujourd'hui, la photogrammétrie continue de se développer, notamment avec l'utilisation des drones et de la réalité augmentée, la rendant de plus en plus accessible et polyvalente.

b) Le fonctionnement étape par étape de la photogrammétrie

Le procédé de photogrammétrie, qui consiste à reproduire la forme d'un objet dans l'espace à partir de photographies de cet objet, s'effectue en plusieurs étapes que je vais expliquer une par une.

1. Acquisition des données

Dans un premier temps il est nécessaire de récolter les données nécessaires à la modélisation de l'objet. On appelle acquisition cette étape, qui consiste à photographier l'objet. Cette étape est très importante car les résultats/ les modèles obtenus dépendent entièrement des images utilisées. Il est donc essentiel d'avoir des images nettes et détaillées.

La façon dont les photos sont prises est tout aussi importante : l'objet doit être capturé dans son intégralité et chaque zone de l'objet doit apparaître sur plusieurs images distinctes. La figure 1.8 ci-dessous illustre un exemple d'acquisition d'un objet avec des photographies prises de tous les angles. Chaque zone de l'objet apparaît à minima sur deux prises de vues différentes.

Prises de vues de l'objet à modéliser

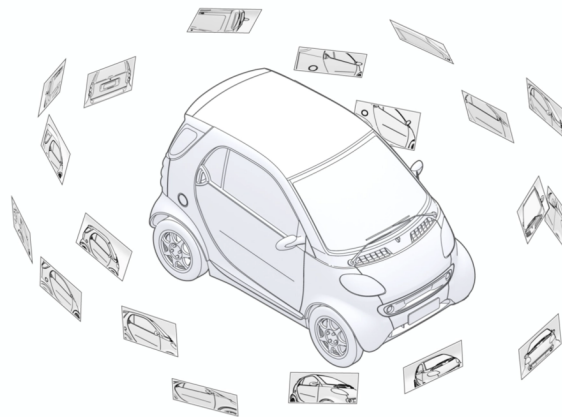


FIGURE 1.8 : ACQUISITION DES DONNEES : PRISES DE VUE DE L'OBJET

SOURCE : « QU'EST-CE QUE LA PHOTOGRAMMETRIE ? | SOLUTIONS DE SCAN PROFESSIONNELLES | ARTEC3D ».

2. Traitement des données

La deuxième étape, réalisée par un logiciel spécialisé en photogrammétrie, consiste à traiter les données collectées pour reconstituer un modèle 3D en repositionnant les points dans l'espace.

Le logiciel commence par déterminer quelles photos sont utiles au processus et repère les zones de chevauchement sur plusieurs images. C'est-à-dire les zones de l'objet qui apparaissent sur plusieurs photos prises sous des angles ou positions différentes. Grâce au repérage de ces zones de chevauchement, le logiciel détermine la position et l'orientation de l'appareil photo pour chaque image. Ce processus se nomme **alignement des photos**⁹. Sur la figure 1.9 ci-dessous, les photographies sont repositionnées autour de l'objet d'après les estimations du logiciel.

Alignement des photos :

Le logiciel reconstitue la scène des prises de vue

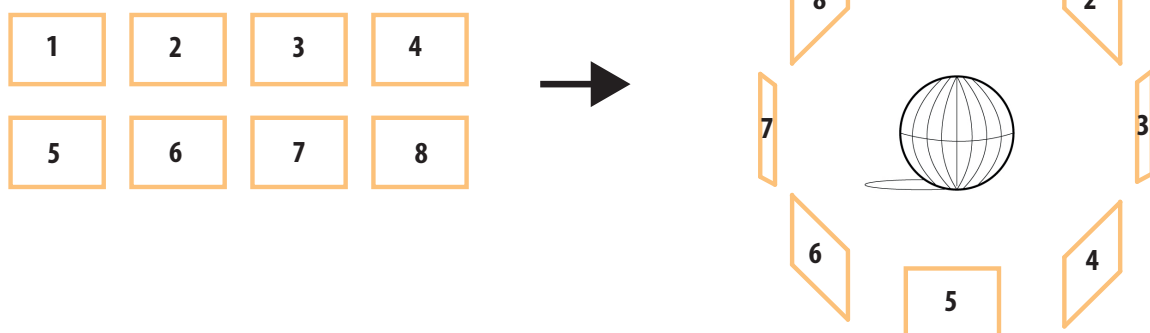


FIGURE 1.9 : ALIGNEMENT DES PHOTOS (SOURCE : AUTEUR)

Le logiciel vérifie en interne la cohérence des informations et indique les potentielles erreurs¹⁰. Une double vérification peut être effectuée avec le visuel de l'alignement des photos, fourni par le logiciel, ce qui permet d'écarter les photographies portant de mauvaises informations (par exemple: une photographie qui ne contient pas ou presque pas l'objet).

⁹ Alignement des photos : la position et l'orientation de l'appareil photo est déterminé pour chaque image. On peut ainsi reconstituer la scène des prises de vue.

¹⁰ Formlabs. « Photogrammetry: Step-by-Step Tutorial and Software Comparison ».

Par la suite, le logiciel utilise une technique appelée *Structure from Motion* (SfM)¹¹, qui repère les **points caractéristiques**¹², comme les arêtes, les coins, les lignes, ou les textures sur les images. Puis, le logiciel associe les points caractéristiques communs entre les photos, appelés **points homologues**¹³. Sur le schéma explicatif, figure 1.10, sont représentés en noir les points caractéristiques et en rose les points homologues. Pour effectuer cette correspondance entre les images, le logiciel utilise des algorithmes complexes basés sur la géométrie projective¹⁴.

Structure From Motion

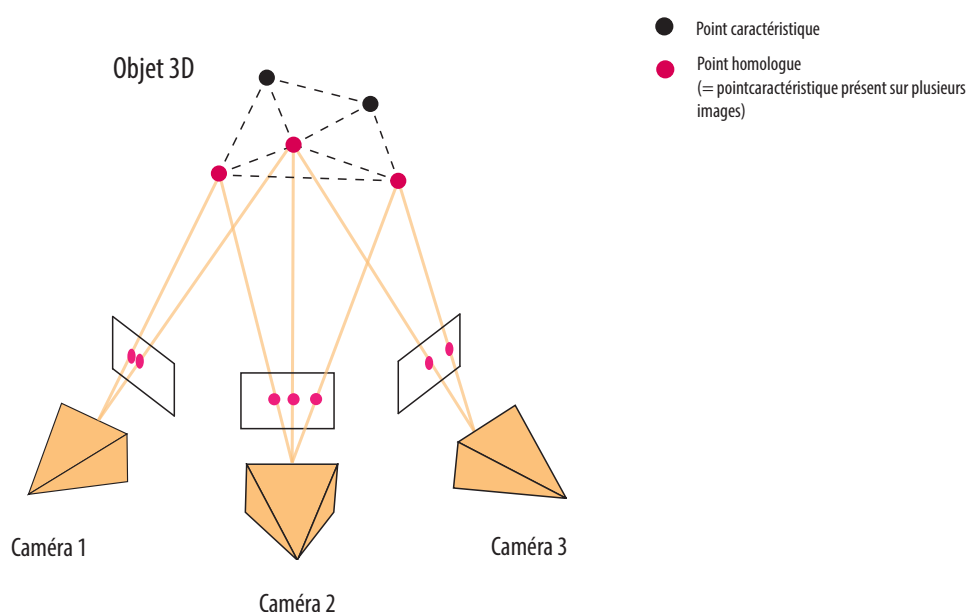


FIGURE 1.10 : SCHEMA SIMPLIFIE DU PROCEDE STRUCTURE FROM MOTION (SOURCE : AUTEUR)

A partir de ces associations et du principe de triangulation¹⁵ le logiciel détermine la position exacte de chaque points homologues. On obtient alors un **nuage de points clairsemé** constitués de tous ces points homologues.

¹¹ « Structure from motion ». In Wikipédia, 22 février 2023.

¹² **Points caractéristiques** : points qui permettent de caractériser visuellement l'objet

¹³ **Points homologues** : points caractéristiques communs à plusieurs photos, c'est-à-dire présents sur différentes photographies.

¹⁴ **Géométrie projective** : branche des mathématiques qui traite des relations entre les figures géométriques et les images, ou applications, qui résultent de leur projection sur une autre surface. (source : « Géométrie projective | Points, lignes et plans | Britannica ».)

¹⁵ **Triangulation** : technique permettant de déterminer la position d'un point en mesurant les angles entre ce point et d'autres points de référence dont la position est connue. (source : wikipedia)

Une fois que la géométrie globale a été établie au moyen d'un nuage de points clairsemés, le logiciel calcule le **nuage de points dense**¹⁶. Il s'agit d'un nuage de points représentant les emplacements 3D de chaque pixel de chaque image. Il est composé de milliers de points et son calcul peut prendre un certain temps. La figure 1.11 ci-dessous résume la différence les différents nuage de points obtenus.

Nuage de points clairsemé



Nuage de points constitué des points homologues, c'est-à-dire les point caractéristiques présents sur plusieurs images en même temps

Nuage de points dense



Nuage de points représentant tous les points de chaque pixel présent sur chaque photo

FIGURE 1.11 : LES DIFFERENTS NUAGES DE POINTS (SOURCE : AUTEUR)

Pour cette étape j'ai utilisée le logiciel de traitement de données photogrammétriques Metashape. Il s'agit du logiciel utilisé dans mon séminaire de recherche et une licence m'a été fournie, j'ai également été formée à l'utiliser. Ce logiciel Metashape, anciennement appelé Photoscan est un logiciel de photogrammétrie développé par Agisoft. C'est un logiciel très performant, qui permet de générer rapidement des nuages de points denses et des modèles détaillés avec des textures ; il est donc idéal pour représenter un bâtiment. Son traitement est rapide, surtout avec des ordinateurs puissants, et il est facile à utiliser grâce à ses options automatiques et ses réglages avancés.

¹⁶ Nuage de points denses : nuage de points représentant les emplacements 3D de chaque pixel de chaque image

3. Post traitement

L'étape précédente de traitement des données, bien que techniquement complexe, est en réalité assez facile pour l'utilisateur, car le logiciel prend en charge la majeure partie du traitement de manière autonome. En revanche, une étape de post-traitement du nuage de points peut être nécessaire selon l'usage envisagé. Dans mon cas, les nuages de points obtenus servent principalement à des fins de comparaison des modèles entre eux, je n'ai donc pas appliquée de traitement particulier à cette étape car je souhaite les comparer à l'état brut.

La seule opération post-traitement que j'ai réalisée consiste à mettre les modèles 3D obtenus à l'échelle. En effet, les modèles photogrammétriques respectent les proportions mais ne possèdent pas d'échelle. Pour remédier à cela, il faut connaître une distance de référence et l'entrer dans le logiciel ¹⁷. Celui-ci ajuste alors automatiquement le modèle par **homothétie**¹⁸ pour le mettre à l'échelle. Voir la figure ci-contre pour l'explication du principe d'homothétie.

Homothétie

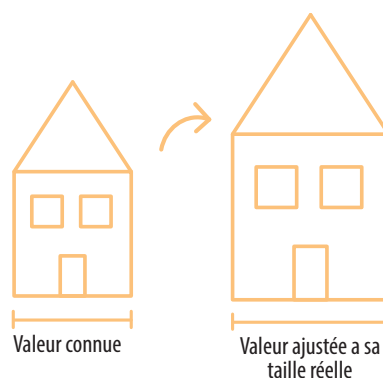


FIGURE 1.11 : PRINCIPE D'HOMOTHETIE POUR REMISE A L'ECHELLE D'UNE FAÇADE A PARTIR D'UNE DISTANCE CONNUE (SOURCE : AUTEUR)

Ainsi, les 3 étapes : 1. Acquisition des données, 2. Traitement des données, 3. Post-Traitement constituent les étapes de fonctionnement de la photogrammétrie. Je vais maintenant présenter ses différents domaines d'application.

¹⁷ « Qu'est-ce que la photogrammétrie ? | Solutions de scan professionnelles | Artec3D ».

¹⁸ Homothétie : transformation géométrique par agrandissement ou réduction selon un facteur d'échelle (source : wikipedia)

c) Les domaines d'application de la photogrammétrie

L'utilisation de la photogrammétrie s'est largement démocratisée, en grande partie grâce à sa polyvalence, son faible coût et son efficacité même sur de longues distances. Je vais passer en revue certaines de ses principales applications.¹⁹

Cartographie

Un des plus grands domaines d'application de la photogrammétrie est la cartographie, elle sert de base à la quasi-totalité des cartes topographiques du monde²⁰. En utilisant des photos prises par des drones, des avions ou des satellites, la photogrammétrie est capable de cartographier des terrains en 3D. Elle utilise les images en haute résolution pour créer des modèles de zones difficiles d'accès – y compris sous l'eau –, et ce très rapidement. La photogrammétrie est préférée à la lasergrammétrie pour la réalisation des cartes en raison de son coût nettement inférieur et de sa rapidité d'exécution. Contrairement au laser, qui nécessiterait l'installation de dispositifs au sol, la photogrammétrie s'appuie uniquement sur des prises de vue aériennes, ce qui simplifie considérablement le processus.

Google Earth est à ce jour le projet le plus ambitieux qui recourt à la photogrammétrie pour créer des images précises du relief terrestre. Google utilise des milliards d'images provenant d'une multitude de sources – Street View, imagerie aérienne et satellite – et les assemble pour montrer les détails d'une zone, y compris les distances précises entre des objets comme des routes, des marquages au sol, des bâtiments et des cours d'eau.

Préservation du patrimoine

Un autre domaine où la photogrammétrie joue un rôle essentiel est celui de la préservation du patrimoine, notamment en capturant des modèles 3D précis des sites et monuments historiques. Il est possible de documenter l'état actuel de structures fragiles, souvent menacées par le temps, les conditions environnementales ou l'activité humaine.

Ces modèles 3D servent de référence pour d'éventuels travaux de restauration, et leur précision permet de reproduire fidèlement des éléments qui pourraient se dégrader ou disparaître. à distance, tout en conservant une trace numérique durable du patrimoine culturel mondial.

¹⁹ « Qu'est-ce que la photogrammétrie ? | Solutions de scan professionnelles | Artec3D ».

²⁰ XpertSource.com. « XpertSource.com ». Détail d'article | Xpert Source. Consulté le 29 mars 2024.

Archéologie

Dans le même esprit la photogrammétrie est également utilisée en archéologie, sa capacité à cartographier une zone et à comprendre la disposition et la structure d'un site est très utile. La photogrammétrie métrique offre aux archéologues la possibilité de cartographier une zone et d'enregistrer les artefacts intéressants rapidement et précisément, ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre de l'archéologie préventive où le temps sur site est limité²¹. La capacité à partager les rendus 3D facilite aussi la coopération avec d'autres archéologues qui ne sont parfois pas sur le terrain.

Les grands projets d'ingénierie

Compte tenu de sa précision lors de l'acquisition sur de longues distances, la photogrammétrie est utilisée par les ingénieurs qui ont recours à des drones ou à des avions pour planifier et évaluer de gros projets de construction. Par exemple, l'emplacement et le design d'autoroutes. Les données issues de la photogrammétrie peuvent servir à calculer les activités de terrassement nécessaires et à fournir des informations essentielles aux ingénieurs civils sur le terrain. Elle est également importante pour évaluer l'avancée de projets grâce aux rendus 3D qu'elle fournit à chaque étape.

La photogrammétrie dans l'immobilier

La photogrammétrie sert aussi à créer des modèles virtuels de maisons pouvant être visualisés par des propriétaires potentiels. Beaucoup d'acheteurs se fient déjà aux annonces en ligne pour prendre leur décision. Depuis le Covid-19, cette tendance à la visualisation en ligne s'est encore accélérée. À moindre coût, la photogrammétrie moderne permet aux agences immobilières de créer une expérience virtuelle des maisons dont elles font la promotion.

²¹ LA PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE APPLIQUEE A L'ARCHEOLOGIE ET AU PATRIMOINE CULTURE, SIHAM YOUNSI

III. Etat de la recherche et perspectives

a) Limites de la photogrammétrie

La photogrammétrie, bien qu'efficace et accessible, présente plusieurs limites liées à sa sensibilité aux conditions externes et techniques. Tout d'abord, cette méthode exige des conditions spécifiques pour garantir de bons résultats : un éclairage uniforme et diffus, une texture suffisante sur l'objet pour permettre la détection des points homologues, et un environnement dépourvu d'éléments parasites. Les objets brillants, transparents ou trop uniformes sont souvent problématiques, car ils compliquent la reconnaissance des points d'intérêt.

Ensuite, la photogrammétrie est une technique chronophage. La planification des prises de vue, le respect du **recouvrement**²² minimum entre les images et le traitement des données nécessitent du temps et une rigueur importante. Le nombre de photos à prendre et leur qualité doivent être adaptés au cas par cas, en fonction de la complexité, de l'échelle et des détails de l'objet à modéliser. Les projets de grande ampleur, comme les bâtiments ou les environnements étendus, peuvent exiger des centaines de photos, ce qui alourdit considérablement le traitement et augmente les risques d'erreurs.

Enfin, cette technique demande une certaine expertise, notamment pour paramétrer correctement l'appareil photo (ISO, ouverture, vitesse, balance des blancs) et maîtriser les outils logiciels utilisés pour la reconstruction 3D. Les étapes de post-traitement, comme le nettoyage des nuages de points peuvent être longues et complexes. Malgré sa flexibilité et son accessibilité relative, la photogrammétrie reste donc une méthode exigeante qui nécessite un apprentissage approfondi et une préparation soignée pour exploiter pleinement son potentiel.

²² Recouvrement = pourcentage de chevauchement des photos

b) Ce qui a déjà été fait et perspectives

Lors de mes recherches, je me suis fortement appuyée sur un ouvrage intitulé *Culture 3D Cloud User's Guideline*. Ce guide détaille avec précision les règles de prise de vue à respecter pour garantir le bon déroulement du traitement des photographies dans le cadre de la photogrammétrie.

Il propose divers protocoles adaptés à différentes tailles et morphologies d'objets. L'accent est mis sur les aspects essentiels de la prise de vue : l'environnement (fond, lumière), la texture de l'objet, et les conditions d'éclairage. Le guide fournit également des instructions détaillées sur le matériel photographique nécessaire (appareils, objectifs, trépieds) et sur les réglages techniques à effectuer (ISO, ouverture, vitesse). Ces ajustements requièrent une certaine maîtrise de la photographie. En tant que novice dans ce domaine au début de ma recherche, j'ai dû effectuer des recherches complémentaires pour apprendre à configurer mon appareil photo et me concentrer sur les réglages les plus simples.

Deux méthodes de prise de vue sont expliquées en détail : une méthode linéaire, adaptée aux grandes surfaces, et une méthode spécifique aux petits objets. Le guide offre des conseils pratiques pour optimiser les prises de vue, notamment sur le recouvrement des images et l'éclairage. Une synthèse des principes fondamentaux ainsi qu'un glossaire facilitent la compréhension des termes techniques. Ce guide est destiné aussi bien aux débutants qu'aux initiés et constitue une base solide pour s'initier à la photogrammétrie.

Cependant, bien que très utile, il présente certaines limites. Par exemple, il aborde peu les problématiques liées au post-traitement des modèles 3D, comme la correction des défauts ou le nettoyage des nuages de points. Il ne propose pas non plus de méthodes pour évaluer la qualité finale d'un modèle ou pour effectuer des ajustements après traitement. De plus, bien que le guide fournisse des instructions générales, il ne quantifie pas précisément le nombre de photos nécessaires ni la résolution optimale à adopter selon les cas.

Dans le cadre de mon mémoire, je ne cherche pas à remplacer ce guide mais à le compléter. En prenant comme acquis ses conseils sur la prise de vue, je vais explorer un aspect peu abordé dans ce document : l'évaluation de la qualité des modèles 3D obtenus, un point essentiel pour optimiser les résultats en photogrammétrie.

Méthodologie de recherche



- I. Explication de l'expérience
- II. Récolte des données
- III. Modélisation 3D dans Metashape
- IV. Outils de comparaison des différents modèles 3D

Partie 2 : Méthodologie de recherche

I. Explication de l'expérience

Dans la partie précédente, j'ai expliqué le principe de la photogrammétrie et ses différentes utilisations. Je vais maintenant aborder son utilisation pour modéliser une maison à deux étages, et notamment sa façade. Celle-ci se situe à Montréal et présente une architecture typique du Plateau, un quartier de Montréal, avec de nombreux détails architecturaux et ornementaux en façade. La façade en question est présentée ci-dessous :



FIGURE 2.1 : PHOTOGRAPHIES DE LA FAÇADE UTILISÉE DANS NOTRE ÉTUDE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Je mène plusieurs essais en photogrammétrie pour réaliser une modélisation. Ne connaissant pas le nombre de photos à prendre ni le type d'appareil à utiliser, je teste différentes configurations, en variant le nombre de clichés et leur résolution. Je remarque rapidement que la qualité visuelle et métrique du modèle photogrammétrique obtenu dépend fortement de la quantité et de la qualité des prises de vue.

Je me propose dans cette partie d'élaborer un protocole pour estimer les paramètres d'acquisition optimaux permettant d'obtenir un modèle de qualité satisfaisante. C'est-à-dire le nombre de photos idéal et la résolution appropriée. Ce protocole est conçu pour une utilisation étudiante, avec le matériel dont je dispose.

Je vais réaliser plusieurs essais de modélisation d'une façade de maison en faisant varier un paramètre à la fois. Le principe de cette approche sera détaillé ci-après.

Dans un premier temps, avec un appareil photo A, je vais réaliser plusieurs essais successifs dans les mêmes conditions mais en augmentant le nombre de photos à chaque essai. Puis je vais réaliser une deuxième série d'essais selon le même principe, mais avec un appareil photo B, ayant une résolution inférieure à celle de l'appareil photo A.

Pour comparer les photos de la série A (18 Mpx) à celles de la série B (12 Mpx), il faut prendre 1,5 fois plus de photos dans la série B, pour obtenir théoriquement la même résolution. Ainsi on obtient deux séries, A et B, composées de plusieurs essais avec un nombre de photos augmentant progressivement. La figure ci-dessous récapitule les informations importantes à retenir pour la suite.

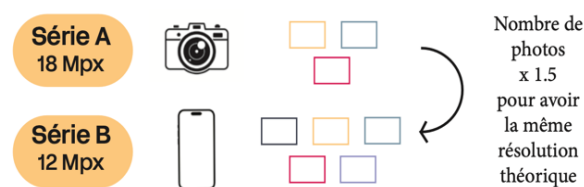


FIGURE 2.2 : SCHÉMA EXPLICATIF DU PROCÉDÉ
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Avec ces données et l'utilisation du logiciel Metashape, j'obtiens différents modèles 3D correspondant aux essais des séries A et B. Ces modèles 3D se présentent sous forme de nuages de points.

Je souhaite comparer tous ces nuages de points obtenus afin d'en déduire lequel est meilleur avec tels paramètres. Je m'interroge donc sur comment évaluer la qualité de chacun des modèles.

Pour cela je vais définir une liste de critères à vérifier pour considérer qu'un modèle est bon. Par exemple, la qualité visuelle du modèle, avec la densité du nombre de points à certains endroits, ou encore la planéité du modèle, sachant qu'il s'agit d'une façade. Pour appliquer ces critères je vais développer mes propres outils, me permettant par exemple de mesurer la planéité d'un nuage de points.

La comparaison de tous ces modèles et l'analyse des résultats me permettront de conclure sur les paramètres optimaux à retenir (le nombre de photos et la résolution). Je souhaite également savoir s'il existe des limites inférieures à ces paramètres, en dessous desquelles un modèle deviendrait trop dégradé, ainsi que des limites supérieures au-delà desquelles le modèle ne gagnerait plus en précision.

Le schéma ci-dessous récapitule les étapes de ma recherche.

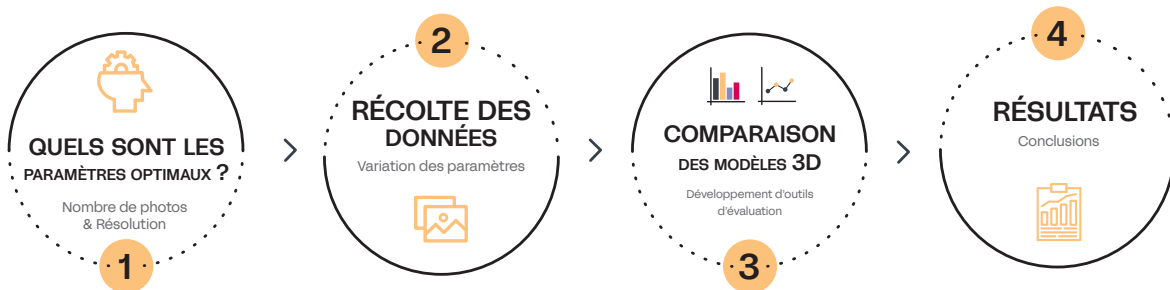


FIGURE 2.3 : EXPLICATION DU PROCESSUS DE RECHERCHE

SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Dans la section suivante, j'expliquerai l'étape de récolte des données, en détaillant le protocole de prises de vue utilisé. Puis j'aborderai la modélisation 3D de ces données à l'aide du logiciel spécialisé Metashape. Je terminerai par la comparaison des modèles 3D obtenus et la présentation des outils développés pour évaluer leur qualité.

II. Récolte des données

La première étape consiste à récolter les données nécessaires à la modélisation de ma façade, à savoir les photos de la façade. Mon appareil photo A sera un Canon Rebel I5 de résolution à 18 Mpx et mon appareil photo B sera un iPhone XR avec une caméra de résolution 12 Mpx.

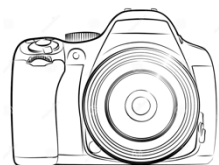


FIGURE 2.4.1 : APPAREIL PHOTO A
CANON REBEL I5



FIGURE 2.4.2 : APPAREIL PHOTO B
IPHONE XR

Je cherche à mesurer l'influence de deux paramètres, le nombre de photo et la résolution, il convient donc de fixer toutes les autres variables. Et notamment les réglages de l'appareil photo.

a) Réglages de l'appareil photo

Sur les appareils photo il est possible d'ajuster les 5 paramètres²³ suivants :

La résolution qui désigne le nombre de pixels capturés par l'appareil à chaque fois qu'une photo est prise. Dans notre cas elle est fixe pour chaque appareil photo.

La focale ou distance focale est la distance du centre optique de l'objectif au point de convergence F appelé foyer principal de l'image. Voir sur la figure 2.5 pour plus de clarté. Cette distance s'exprime en millimètres. La focale détermine l'angle de champ et le grossissement. Plus la distance focale est petite et plus le champ de vision est large. En photogrammétrie, la focale est fixe.²⁴ Je la règle manuellement au début des essais.

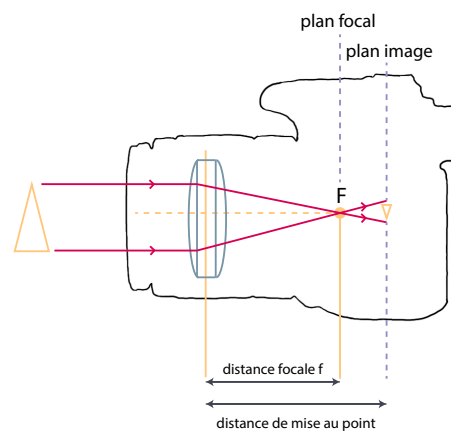


FIGURE 2.5 : DISTANCE FOCAL DANS L'APPAREIL PHOTO
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

L'ouverture de l'appareil photo est une valeur qui décrit à quel point le diaphragme de l'objectif s'ouvre pour laisser entrer la lumière dans l'appareil photo. Elle est caractérisée par N qui désigne le nombre d'ouverture. Ce nombre sans dimension est défini comme le rapport de la focale f sur le diamètre d de la pupille d'entrée, $N=f/d$.



FIGURE 2.6 : OUVERTURE DE L'APPAREIL PHOTO
SOURCE : ROUÉ, DAMIEN. « MP #169 : OUVERTURE ET F/STOP, EN FINIR AVEC LA CONFUSION ». PHOTOTREND, 16 MARS 2016

²³ Valente, Clément. « Photogrammétrie : Comment bien prendre les photos ? Numérisation 3D & Construction », 12 février 2019.

²⁴ « Qu'est-ce que la photogrammétrie ? | Solutions de scan professionnelles | Artec3D ».

L'ouverture détermine directement la profondeur de champ, c'est-à-dire à quel point la scène est nette. Une large ouverture gardera nette une fine couche de l'image et floutera le reste. La figure 2.7 ci-dessous montre l'influence de l'ouverture sur la profondeur de champ. L'ouverture est réglée automatiquement dans les deux appareils photos, je vérifie uniquement qu'elle est bloquée pour être constante lors des prises de vues.

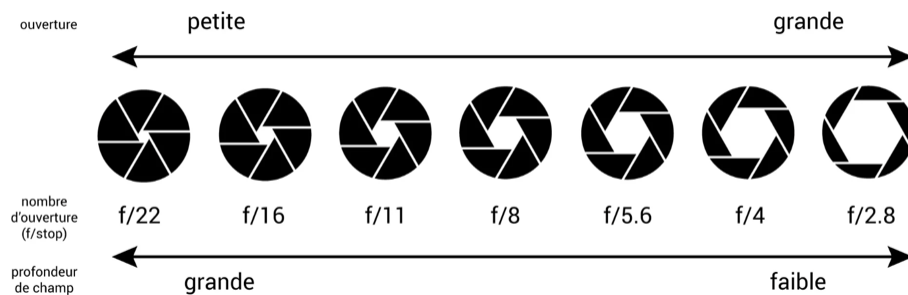


FIGURE 2.7 : INFLUENCE DE L'OUVERTURE DE L'APPAREIL PHOTO

SOURCE : « QU'EST-CE QUE LA PHOTOGRAMMÉTRIE ? | SOLUTIONS DE SCAN PROFESSIONNELLES | ARTEC3D ».

La vitesse d'obturation est la durée pendant laquelle l'obturateur de l'appareil photo reste ouvert et laisse la lumière se poser sur le capteur. L'obturateur est un rideau placé devant le capteur de l'appareil photo et qui reste fermé jusqu'à ce qu'on commence à photographier. La vitesse d'obturation est généralement exprimée en fractions de seconde.

En plus d'influer sur la quantité de lumière se posant sur le capteur, la vitesse d'obturation est également directement liée au flou cinétique (ou aussi flou de mouvement/action)²⁵. Si le sujet, ou l'appareil photo, bouge alors que l'obturateur est ouvert, la photo obtenue sera floue

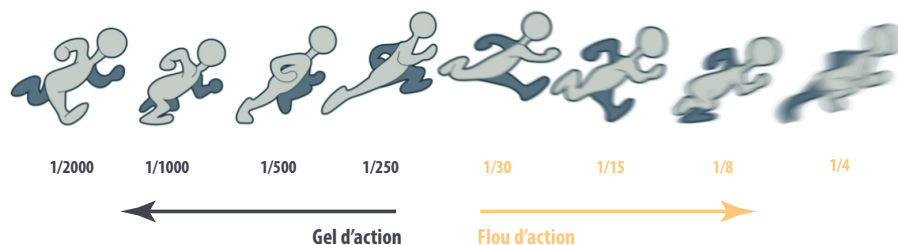


FIGURE 2.8 : VITESSE D'OBTURATION & FLOU CINÉTIQUE

SOURCE : « QU'EST-CE QUE LA PHOTOGRAMMÉTRIE ? | SOLUTIONS DE SCAN PROFESSIONNELLES | ARTEC3D ».

²⁵ « Qu'est-ce que la photogrammétrie ? | Solutions de scan professionnelles | Artec3D ».

De ce fait, puisque je tiens mon appareil photo pour prendre les photos, j'utilise une vitesse d'obturation suffisamment élevée, donc une durée d'acquisition courte, pour contrer les légers mouvements de mes mains.

La sensibilité ISO d'un capteur représente sa capacité à capter la lumière. Chaque appareil photo a une sensibilité de base, mais il est possible de l'augmenter en cas de faible lumière. Cependant, cette amplification électronique génère un effet indésirable appelé "bruit" ou "grain", qui peut altérer la qualité des images.²⁶

Pour minimiser ces problèmes, les conditions extérieures jouent un rôle clé. Une météo idéale pour la prise de vue photogrammétrique est sans pluie et sans ombre excessive. J'évite donc les journées très humides ou trop ensoleillées, car une forte lumière peut créer des contrastes marqués. Je privilégie les jours légèrement nuageux, où la luminosité reste constante et diffuse.

Une fois les réglages de l'appareil photo définis et les conditions extérieures stabilisées, je me concentre sur le protocole des prises de vue.

²⁶ Valente, Clément. « Photogrammétrique : Comment bien prendre les photos ? Numérisation 3D & Construction », 12 février 2019.

b) Taux de recouvrement des photos

Je vais maintenant me pencher sur la manière de prendre les photos. Une notion clé dans ce processus est le recouvrement entre les photos successives, c'est-à-dire le pourcentage de chevauchement de l'objet sur deux images consécutives. La figure 2.9 ci-dessous illustre cette notion. Un recouvrement élevé, avec de nombreux points communs entre les images, permet au logiciel de numérisation de reconstituer le modèle de manière plus précise et fidèle. C'est en tout cas l'hypothèse que je cherche à vérifier avec ce protocole. Je cherche à mesurer l'impact du nombre de photos sur la qualité de modélisation.

En faisant varier le nombre de photos, c'est sur le taux de recouvrement que je joue. En effet, si le nombre de photos est insuffisant, le taux de recouvrement sera faible et potentiellement la modélisation moins précise. En plus de vérifier cette hypothèse, je souhaite déterminer à partir de combien de photos j'atteins le recouvrement optimal. D'après le Guide pour la prise de vue photogrammétrique le taux de recouvrement optimal serait de 75 %. Je vais également vérifier si au delà de ces 75% de taux de recouvrement la qualité du modèle stagne ou non.



FIGURE 2.9 : TAUX RECOUVREMENT
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

c) Prise de vue linéaire

Après avoir défini les réglages de l'appareil photo et les conditions de recouvrement des photos il convient maintenant de préciser le protocole des prises de vue.

Les dimensions de mon objet d'étude sont explicitées sur la figure 2.10 ci-contre. La façade mesure 12 mètres de hauteur, ce qui signifie que, depuis le sol, il est impossible de photographier le toit du bâtiment. De plus, l'arrière de la maison étant inaccessible au public, mon objet d'étude se limitera aux deux façades principales (A et B) ainsi qu'à la portion de façade en biais.

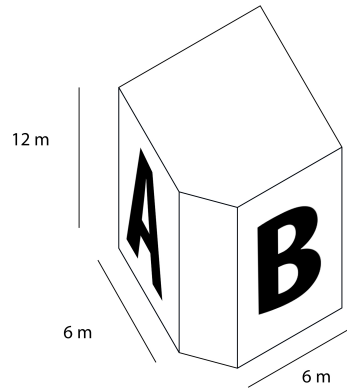


FIGURE 2.10 : GABARIT OBJET ETUDE (SOURCE : AUTEUR)

Concernant le parcours et l'ordre des photographies, je suis le protocole présenté par le *Guide pour la prise de vue photogrammétrique*²⁷ qui est adapté pour numériser un mur, un sol ou une surface. Il convient donc parfaitement à la numérisation de ma façade. L'acquisition se fait en déplaçant l'appareil photo parallèlement à la surface photographiée. Je fais attention à ce que les bords de la façade soient présents sur plusieurs images pour ne pas recouvrir seulement les éléments centraux. Pour cela, je prendrai des photographies au-delà de l'objet désiré. Il faut garder en mémoire qu'un même point de l'objet doit être visible au strict minimum sur 2 images afin de pouvoir être reconstitué.

Enfin, comme la façade à numériser présente un angle, il est nécessaire d'amorcer un mouvement autour de cet angle pour relier les deux surfaces. Ce mouvement doit respecter un recouvrement minimum de 75 % et compter en règle générale au minimum 6 photographies sur un angle.²⁸, comme illustré sur la figure 2.11 ci-contre.

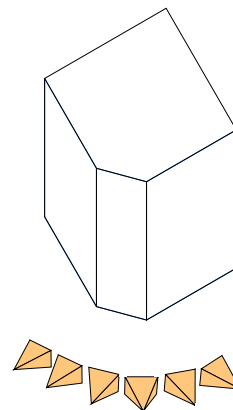


FIGURE 2.11 : PRISE DE VUE D'UN ANGLE (SOURCE : AUTEUR)

²⁷ Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

²⁸ Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

III. Modélisation 3D dans Metashape

a) Alignement des caméras

Une fois les photos effectuées pour les différents essais, j'importe les images dans Metashape²⁹, le logiciel utilisé pour traiter ces photos. La prochaine étape consiste à aligner les photos, c'est-à-dire que Metashape trouve la position et l'orientation de la caméra pour chaque image et construit un nuage de points clairsemé. Ci-dessous le nuage de points clairsemé de la façade modélisée.

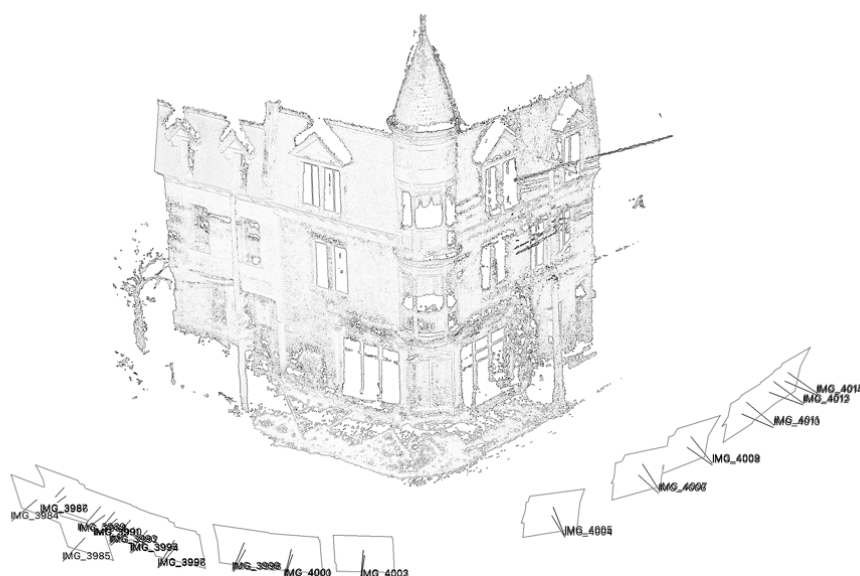


FIGURE 2.12 : ALIGNEMENT DES CAMÉRAS DANS METASHAPE ET CONSTRUCTION DU NUAGE DE POINTS CLAIRSEMÉS
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE - CAPTURE ÉCRAN METASHAPE – POSITION DES CAMÉRAS

Ce nuage de points clairsemé restitue uniquement les points communs reconnus et spatialisés, et permet par conséquent de vérifier si l'objet est suffisamment texturé, c'est-à-dire s'il y a assez de détails distinctifs (motifs, variations de couleur, arêtes, etc.). Il indique généralement s'il pourrait y avoir des lacunes dans la reconstruction finale : par manque de texture (global ou local), suite à un problème d'exposition des photographies (zones trop sombres ou trop claires), ou encore à cause de zones d'occlusion (les zones non modélisées). Ce nuage comporte aussi le positionnement des caméras et permet par conséquent de vérifier si l'entièreté de la scène (relations contexte/caméra/objet) a été correctement reconnue.³⁰ Sur la figure 2.12 on peut voir d'où est ce que les photographies ont été prises et avec quelle orientation.

²⁹ Manuel de l'utilisateur Agisoft Metashape, Edition 2019, Professional Edition, Version 1.5

³⁰ Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

b) Création des nuages de points dense

Une fois les photographies alignées, je demande à Metashape de calculer le nuage de points dense³¹ en fonction du paramètre de densité sélectionné. Il en existe trois.³² La figure 2.13 illustre chacune de ces densités.

Ce paramètre de densité modifie la taille de l'image sur laquelle sera calculée la **corrélation dense**³³. Cette étape de corrélation dense consiste à mettre en correspondance chaque pixel d'une photographie avec ceux des autres photographies choisies. Ce réglage de densité est basé est déterminé de la manière suivante :

- L'option High (haute résolution) diminue par 2 les dimensions de l'image, soit 4 fois moins de pixels que dans l'image initiale pour obtenir par conséquent 1 point pour 4 pixels.
- L'option Medium (moyenne résolution) diminue par 4 les dimensions de l'image, soit 16 fois moins de pixels que dans l'image initiale pour obtenir par conséquent 1 point pour 16 pixels.
- L'option Low (basse résolution) diminue par 8 les dimensions de l'image, soit 64 fois moins de pixels que dans l'image initiale pour obtenir par conséquent 1 point pour 64 pixels.

Corrélation dense

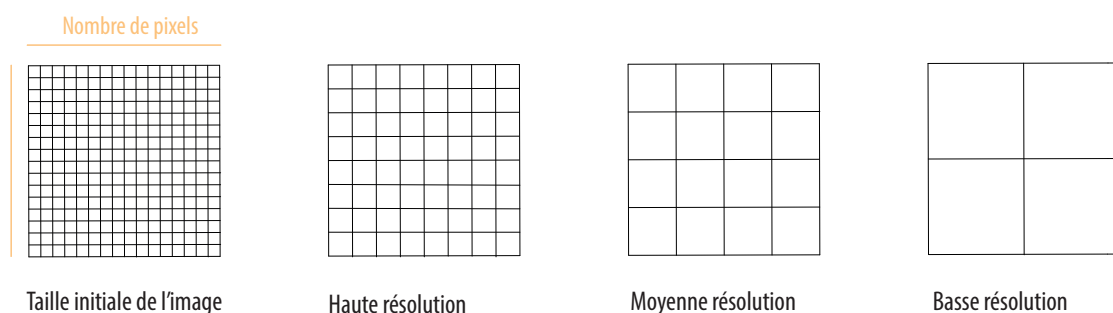


FIGURE 2.13 : TAILLE DE L'IMAGE SELON LA DENSITÉ CHOISIS
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

³¹ Nuage de points denses : nuage de points représentant les emplacements 3D de chaque pixel de chaque image

³² Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

³³ Corrélation dense : mise en correspondance de chaque pixel d'une photographie avec ceux des autres photographies choisies

Je constate donc l'importance de la résolution des photos de base, plus le nombre de pixels est élevé et plus il y aura de points dans le modèle 3D. Sur les images ci-dessous, la différence entre une résolution basse et une résolution haute est nettement visible : la façade est plus ou moins bien dessinée

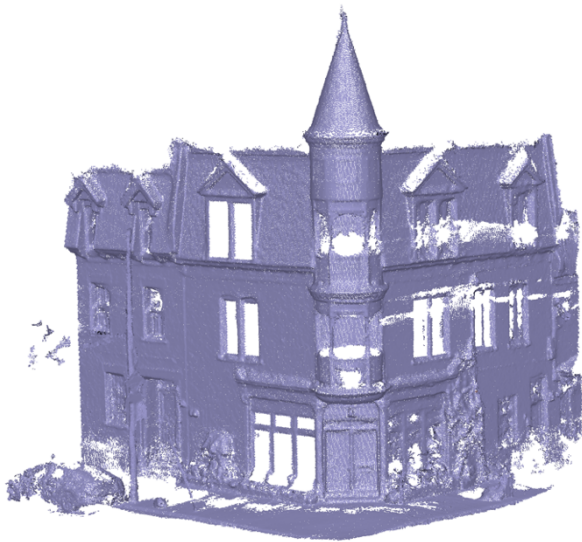


FIGURE 2.14 : NUAGE DE POINTS DENSE — RÉOLUTION BASSE

SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE - CAPTURE ÉCRAN METASHAPE
MODÉLISATION A 56 IMAGES AVEC APPAREIL PHOTO

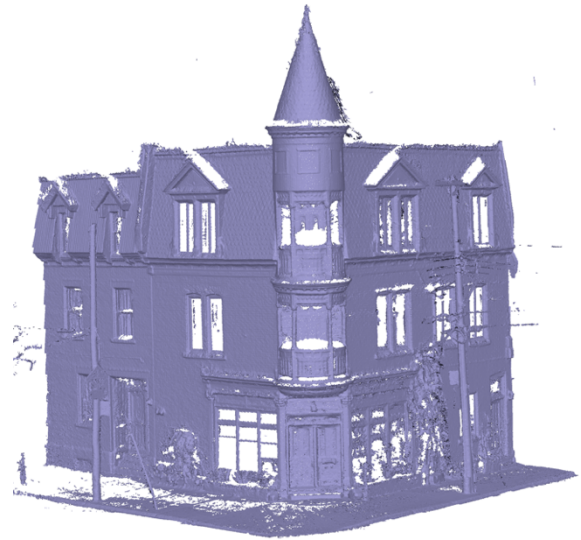


FIGURE 2.14 BIS : NUAGE DE POINTS DENSE — RÉOLUTION HAUTE

SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE - CAPTURE ÉCRAN METASHAPE
MODÉLISATION A 56 IMAGES AVEC APPAREIL PHOTO

Selon l'usage que je veux faire du nuage de points, j'utiliserai une densité différente. Dans le cas d'une estimation visuelle de la précision du modèle, j'utiliserai une haute résolution. Dans le cas où j'ai besoin de parcourir chaque point du nuage de points, pour un calcul de planéité (notion expliquée plus loin) par exemple, j'utiliserai une basse résolution pour limiter les temps de calcul. Et si j'ai besoin de faire les deux en même temps je trouverai un compromis en choisissant une résolution moyenne.

IV. Outils de comparaison des différents modèles 3D obtenus

Une fois les différents nuages de points obtenus, je me pose la question de l'estimation de la qualité de chacun de ces modèles. Comment les comparer et quand décider qu'un modèle est "bon" ?

Je vais donc établir une liste de critères à vérifier, me permettant de considérer qu'un modèle est de bonne qualité. Ces critères, ayant souvent une hiérarchie de réponse (mauvais, moyen, bon) ou encore une quantification, vont me permettre de comparer les nuages de points entre eux.

Ces critères et outils sont répertoriés en deux parties. La première partie correspond aux critères portant sur la qualité des images utilisées pour la modélisation. La deuxième partie correspond aux outils permettant d'évaluer la qualité des modèles 3D obtenus.

a) Critères de qualité des photos

Dans un premier temps je souhaite évaluer la qualité des images utilisées lors de chaque essai en photogrammétrie.

i. Réglage de l'appareil photo et résolution

Le premier critère porte sur les réglages de l'appareil photo et sa résolution. En photogrammétrie, la distance focale doit rester fixe tout au long de l'acquisition. Cette distance focale est ajustée manuellement par l'utilisateur et correspond à l'étape de mise au point de l'appareil photo sur l'objet à photographier. Une mauvaise mise au point influence directement la netteté des prises de vue. Cependant, il est difficile et arbitraire d'évaluer si une mise au point est réussie. Ainsi, ce n'est pas la distance focale que j'évaluerai, mais plutôt la résolution des photographies, qui dépend de l'appareil photo utilisé. La résolution de l'appareil photo sera donc notre premier critère.

Pour information, les photos sont prises au format **RAW**³⁴, correspondant au format conservant le plus de données possible.

³⁴ **Raw** est la désignation générique d'un type de fichier d'images numérique issues d'appareils photos numériques ou de scanners. Il contient les données brutes du capteur et les paramètres nécessaires à la transformation en fichier image visible sur écran.

ii. Indice de qualité d'Image Metashape

Le deuxième critère correspond à l'indice de qualité d'image fourni par Metashape³⁵, qui est une valeur comprise entre 0 et 1. Plus la valeur est proche de 1, et meilleure est la qualité selon Metashape. Les images dont la qualité est inférieure à 0.5 doivent préférablement être écartées du modèle.

Metashape calcule la qualité d'image sur les facteurs suivants : flou cinétique, mise au point, contraste et exposition des photos.³⁶

iii. Taux de recouvrement des photos

Le troisième critère est également calculé par Metashape. Il s'agit du taux de recouvrement des photos, une notion expliquée dans la partie 2.2.b. Cette valeur est accessible à partir des statistiques du levé³⁷ calculées par Metashape. Ces statistiques sont présentées sous forme de rapport qui inclut des informations sur le chevauchement des caméras, les positions, rotations des caméras et les points de contrôle au sol.

En récapitulatif les 3 critères portant sur la qualité d'image sont :

- la résolution de l'appareil photo
- l'indice de qualité d'image de Metashape
- le taux de recouvrement des photos

³⁵ Manuel de l'utilisateur Agisoft Metashape, Edition 2019, Professional Edition, Version 1.5

³⁶ Saczuk, Dr Eric. « Chapter 1.2 – Setting Up Images », 30 mars 2020.

³⁷ Outil de Metashape pour calculer certaines statistiques comme le chevauchement des caméras, les positions, rotations des caméras et les points de contrôle au sol.

b) Critères de qualité d'un modèle 3D :

Dans cette deuxième partie je vais présenter les 3 critères de qualité portant sur les modèles 3D. Leur application me servira également d'outils de comparaison de ces modélisations.

i. Evaluation par comparaison avec un modèle de référence

Une méthode d'évaluation de la qualité d'un modèle photogrammétrique existe déjà. Elle consiste à calculer l'écart entre un modèle de référence et le modèle réalisé, afin de mesurer le degré de superposition des deux modèles³⁸. Seulement, dans mon étude, cette méthode n'est pas applicable puisque je ne dispose pas de modèle de référence. Je vais donc développer mes propres critères.

ii. Estimation visuelle de la densité du nuage de points

Le premier critère consiste en une évaluation visuelle de la précision de modélisation de certains détails de façade. Plus le nuage de points est dense à ces endroits, plus le détail sera précis. Ci-dessous deux exemples de détails de façade à estimer sur chaque modèle.

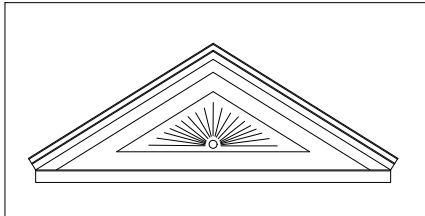


FIGURE 2.15 : LUCARNE ET DÉTAILS DÉCORATIFS
SOURCE : DESSIN AUTOCAD AUTEUR

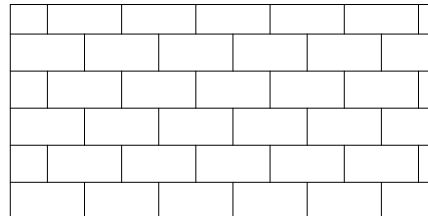


FIGURE 2.16 : DESSIN DES BRIQUES EN FAÇADE
SOURCE : DESSIN AUTOCAD AUTEUR

L'apparition du dessin des briques en façade est un très bon indicateur de qualité de modélisation puisqu'il nécessite une densité de points importante et homogène sur toute la surface.

³⁸ Thèse : *Evaluation de la qualité 3D des modèles de bâtiment en photogrammétrie numérique aérienne*. Mostafa Mohammed.

iii. Planéité des éléments plats

Le deuxième critère consiste en l'évaluation de la planéité des éléments plats, plus précisément la planéité de la façade.

Le premier outil utilisé pour mesurer ce critère est la fonction Champ scalaire disponible sur le logiciel CloudCompare³⁹. CloudCompare est un logiciel de traitement des nuages de points très utilisé en photogrammétrie. Cette fonction permet d'évaluer à quel point chaque point du plan est contenu dans le plan vertical de la façade. Dans l'illustration ci-dessous, si le point est vert, il est contenu dans le plan et plus la couleur s'en éloigne, rouge ou bleu, et plus le point est loin du plan vertical.

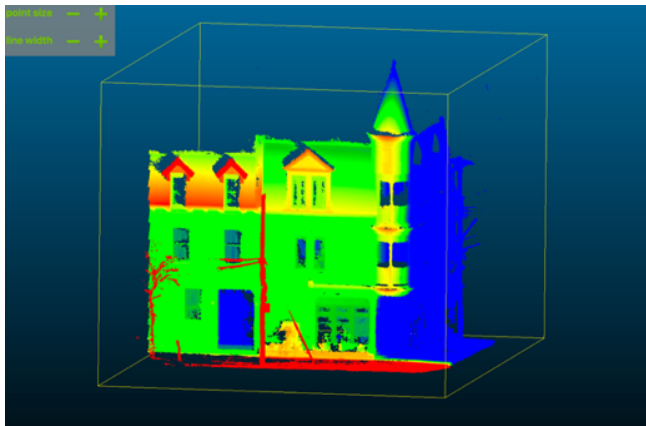


FIGURE 2.17 : CHAMPS SCALAIRE SUR L'AXE Y AVEC CLOUD COMPARE
SOURCE : CAPTURE D'ÉCRAN ISSU DU LOGICIEL CLOUD COMPARE, AUTEUR

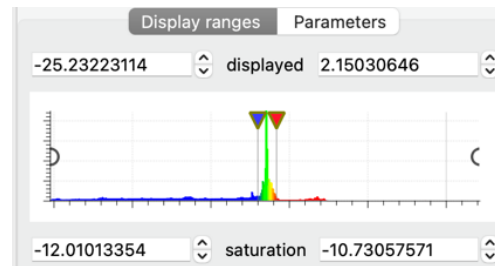


FIGURE 2.18 : RÉLAGE DES COULEURS EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
SOURCE : CAPTURE D'ÉCRAN ISSU DU LOGICIEL CLOUD COMPARE, AUTEUR

Cependant, cette estimation de la planéité dépend de l'orientation du modèle dans un repère tridimensionnel (x,y,z). C'est-à-dire la manière dont il est positionné et orienté par rapport aux axes du repère. Cependant j'ai réglé moi-même cette orientation avant d'exporter le modèle sur Cloud Compare. Finalement, ce qu'on estime avec le champ scalaire, c'est à quel point l'orientation est bien réglée par l'utilisateur et non pas si le modèle est vraiment plat. C'est pourquoi je vais utiliser une autre méthode.

³⁹ Logiciel de traitement des nuages de points

Je choisis d'utiliser un algorithme Python qui va mesurer la planéité de la façade. Le but est de fournir un nuage de points à l'algorithme et que celui-ci me renvoie le plan le plus fidèle, notion que je définirai plus loin.

Une fois le plan obtenu, je calcule le ratio du nombre de points appartenant au plan sur le nombre total de points, et j'obtiens le score de planéité. On considère qu'un point appartient au plan si sa distance au plan est inférieure à une certaine valeur nommée `distance_min_plan` dans l'algorithme.

$$\text{Score de planéité} = \frac{\text{Nombre de points appartenant au plan}}{\text{Nombre total de points}}$$

Le premier algorithme implémenté est celui dont le code est le plus intuitif et dont je suis l'auteur. Il renvoie le plan contenant le plus de points du modèle ainsi que le score de planéité associé. Il fonctionne de la manière suivante : il crée un plan avec toutes les combinaisons de 3 points non alignés possible, compte le nombre de points appartenant à ce plan, et stocke le score de planéité associé. Enfin, il renvoie le plan avec le score de planéité le plus élevé. Ci-dessous, le principe du code associé à l'algorithme, le code implémenté en langage Python se trouve en annexe A.0.

PRINCIPE DU CODE PYTHON MEILLEUR PLAN :

Définition de la fonction Meilleur Plan :

Pour toutes les combinaisons de 3 points issus du nuage de points :

Si les points ne sont ni alignés ni confondus :

Création de l'unique plan passant par ces 3 points

Calcul du score de planéité associé à ce plan

Stockage du score et du plan dans une liste L

Renvoie le score le plus haut contenu dans la liste et le plan associé

FIGURE 2.19 : PRINCIPE DU CODE PYTHON DU PLAN CONTENANT LE PLUS DE POINTS
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Je lance le script avec un échantillon de 5 points choisis au hasard pour tester l'algorithme. Sur la figure ci-contre apparaît le plan obtenu en lançant l'algorithme Python. Il s'agit d'un plan passant par les 5 points. Cet algorithme a l'avantage d'être extrêmement juste puisqu'il renvoie le plan (ou les plans s'il y a une égalité sur les scores de planéité) contenant le plus de points.

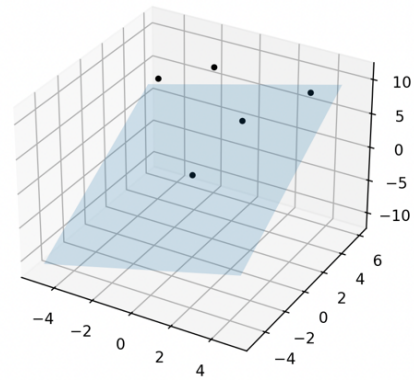


FIGURE 2.20 : PLAN CONTENANT LE PLUS DE POINTS
SOURCE : CAPTURE ECRAN PYTHON, CHARLOTTE FAUGÈRE

En revanche la **complexité du programme**⁴⁰ est de l'ordre de n^4 puisque j'ai 4 boucles imbriquées les unes dans les autres. Ce qui pose problème puisque l'algorithme ne tourne pas, le temps de calcul est trop long pour parcourir mes nuages de points de 500 000 points. Je me suis donc tournée vers une autre solution.

⁴⁰ La complexité d'un algorithme est une prédiction ou une garantie que l'algorithme ne prendra jamais plus qu'un certain nombre d'étapes ou opérations, qui dépend souvent de la taille des données qu'il manipule. Une complexité de l'ordre n^4 signifie que les opérations sont de l'ordre n^4 ce qui représente beaucoup de calcul, par exemple pour un nuage de points de $n=10$ points l'algorithme va faire 10^4 opérations, soit 10 000 opérations. Pour un nuage de points de 500 000 points cela représente une complexité beaucoup trop élevée.

Je vais utiliser un algorithme qui existe déjà et dont la complexité est moindre. Il s'agit de l'algorithme RANSAC⁴¹ (RANdom SAmple Consensus) qui est très efficace puisque sa complexité est d'ordre n . Il est utilisé pour estimer les paramètres de certains modèles mathématiques, ici un plan.

Son fonctionnement est le suivant, chaque étape est illustré sur la figure 2.21 ci-contre:

En premier lieu, j'indique à l'algorithme que le modèle géométrique à retrouver est un plan.

L'algorithme va sélectionner un échantillon de données aléatoirement et parcourir ce jeu de données. C'est l'étape 1.

Si la distribution de ces valeurs peut être expliquée par le modèle géométrique recherché, dans mon cas un plan, alors il qualifiera ces valeurs de "pertinentes", aussi appelées **INLIERS**. En revanche, si les valeurs sont aberrantes et ne correspondent pas au modèle choisi, alors il les écarte. Ces valeurs sont nommées **OUTLIERS**. C'est l'étape 2.

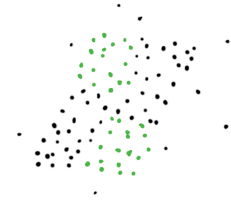
Dans la dernière étape, l'algorithme utilise les valeurs pertinentes, les INLIERS, pour trouver les paramètres du plan. C'est-à-dire l'équation du plan.

Fonctionnement Ransac



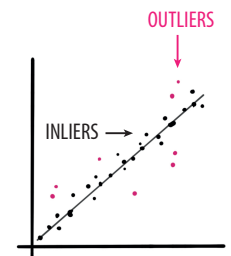
Objectif

Retrouver le plan le plus fidèle à ce nuage de points



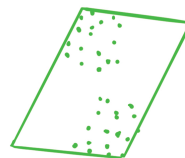
Etape 1

L'algorithme sélectionne un échantillon de points, les points verts sur la figure.



Etape 2

Sur l'échantillon sélectionné Ransac écarte les valeurs aberrantes, les **OUTLIERS** et garde seulement les valeurs cohérente, les **INLIERS**.



Etape 3

Ransac renvoie le plan le plus fidèle à l'échantillon.

FIGURE 2.21 : FONCTIONNEMENT RANSAC
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

⁴¹ « RANSAC ». In Wikipédia

La subtilité de cet algorithme, et aussi ce qui le rend si efficace, c'est qu'il ne va pas parcourir tout le nuage de points. Il va choisir un bon échantillon de points (c'est-à-dire sans **OUTLIERS**) et l'utiliser cet échantillon pour modéliser le modèle géométrique choisi.

La probabilité qu'il tire un bon échantillon est élevée à condition que les paramètres de départ soient soigneusement choisis. Ces paramètres sont :

- le nombre d'itérations (N) : c'est-à-dire combien de points il va tester pour les inclure ou non dans le modèle
- une valeur seuil (ε) pour déterminer si un point appartient au modèle géométrique, ici la distance au plan

Dans mon cas, les paramètres N et ε sont bien choisis puisque j'ai testé différentes valeurs avant de les déterminer ; un bon moyen de le vérifier est d'observer une certaine stabilité dans les résultats à chaque fois j'appelle l'algorithme RANSAC. En effet, à chaque appel de RANSAC, il va sélectionner un nouvel échantillon et j'obtiendrai un plan différent à chaque fois. Je pourrai ainsi comparer les scores de planéité à chaque fois.

Voir le script de RANSAC en annexe A.1 pour plus de détails sur le code.

RANSAC est particulièrement efficace pour identifier un modèle même lorsque les données contiennent beaucoup de valeurs aberrantes. En sélectionnant des échantillons aléatoirement, l'algorithme parvient souvent à ignorer les valeurs aberrantes, ce qui le rend robuste et fiable. Voir le graphique à droite pour comparer l'estimation du modèle par RANSAC avec celle obtenue par une **régression linéaire**⁴² classique .

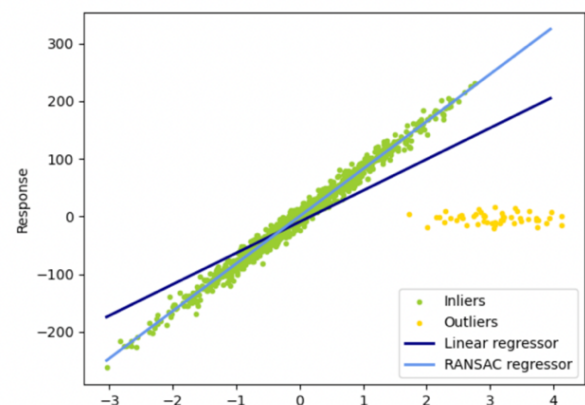


FIGURE 2.22 : COMPARAISON DE L'ESTIMATION DE RANSAC AVEC UNE ESTIMATION DE RÉGRESSION LINÉAIRE

SOURCE : SCIKIT-LEARN. « ROBUST LINEAR MODEL ESTIMATION USING RANSAC ».

⁴² La régression linéaire est une méthode statistique qui modélise la relation entre une variable dépendante et une ou

plusieurs variables indépendantes en ajustant une droite (ou un hyperplan) qui minimise l'erreur entre les prédictions et les données observées.

Ransac est un algorithme efficace mais non-déterministe⁴³ parce qu'il repose sur un processus de sélection aléatoire d'échantillons de données à chaque itération. Comme expliqué précédemment, à chaque fois que l'algorithme s'exécute, un nouvel échantillon est choisi, ce qui peut conduire à des résultats légèrement différents d'une exécution à l'autre.

Ci-dessous, un exemple d'utilisation de RANSAC avec mon modèle de façade: les points verts correspondent aux échantillons choisis par RANSAC pour modéliser le plan, les points rouges représentent les autres points, et le plan en gris correspond au meilleur plan trouvé par RANSAC.

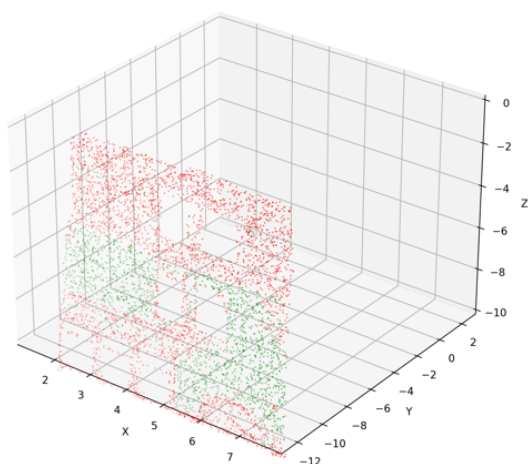


FIGURE 2.23 : EN VERT L'ÉCHANTILLON CHOISI PAR RANSAC
SOURCE : CAPTURE ÉCRAN PYTHON, CHARLOTTE FAUGÈRE

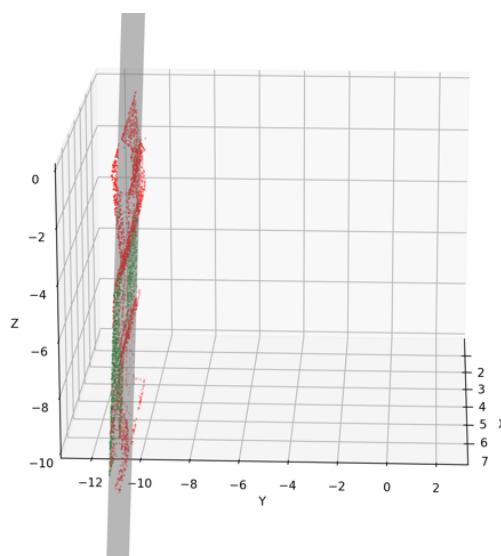


FIGURE 2.24 : MEILLEUR PLAN PAR RANSAC
SOURCE : CAPTURE ÉCRAN PYTHON, CHARLOTTE FAUGÈRE

Il est important de remarquer que le terme “meilleur plan” n’a pas la même définition pour le premier algorithme et pour RANSAC. Dans le premier cas, le meilleur plan était celui contenant le plus de points, tandis que pour l'algorithme RANSAC, il s’agit du plan le plus fidèle à l'échantillon choisi par RANSAC. Compte tenu du nombre de points présents dans mes modèles (au moins 500 000 points), c’est l'un des seuls algorithmes qui me permet d’obtenir un tel résultat.

⁴³ Algorithme non déterministe = Qui produit un résultat différent à chaque fois

i. Dénombrement des clusters

Un autre critère important est celui de la quantification des artefacts parasites. Le terme artefact parasite désigne tout point ou groupes de points accidentels présents sur le modèle 3D. Ils résultent d'imprécisions ou d'erreurs dans la capture des données ou leur traitement. Il est important de les quantifier pour savoir à quel point le modèle est parasité par de mauvaises informations.

Pour dénombrer ces artefacts parasites je vais utiliser la notion de **cluster**. J'appelle cluster un regroupement de points situés à une certaine proximité les uns des autres. A l'aide d'un algorithme de clustering⁴⁴ je cherche à reconnaître et dénombrer par taille tous les clusters présents sur les modèles 3D. Pour bien comprendre regardons la figure ci-dessous qui est un exemple de dénombrement de clusters sur mon objet d'étude. Chaque cluster de taille identique est indiqué par une couleur différente.

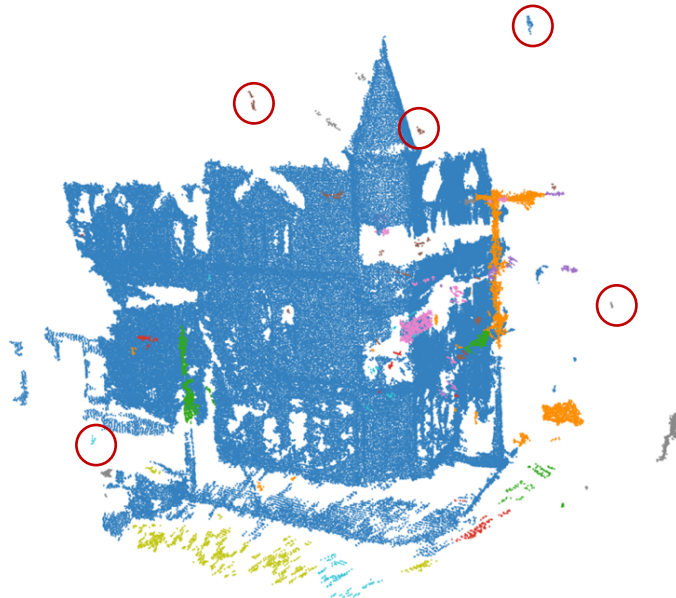


FIGURE 2.25 : AFFICHAGE DES DIFFÉRENTS CLUSTERS (SOURCE : AUTEUR)

Le cluster principal, représenté en bleu, correspond au plus grand regroupement de points. Il contient une grande partie des points de la façade. Une première hypothèse serait d'assimiler les petits clusters (de taille inférieure à 50 points) et les points isolés, aux artefacts parasites. Il s'agit des cercles rouges sur la figure ci-dessus. Les clusters moyens, comme par exemple le groupe de points du lampadaire, ne peuvent pas être considérés comme des artefacts parasites car bien qu'ils ne soient pas l'objet d'étude, ils apportent des informations pertinentes.

⁴⁴ Algorithme qui compte les clusters

Ce dénombrement joue plusieurs rôles, car il me fournit plusieurs indicateurs de qualité de modélisation :

- Le dénombrement des petits clusters (moins de 50 points)

Ces petits clusters sont associés aux artefacts parasites. Une augmentation du nombre de ces petits clusters est donc un signe de dégradation de la qualité globale du modèle.

- Évaluation du bruit (points isolés ou parasites) :

Le bruit représente des points aberrants qui ne peuvent être comptés dans les clusters, par exemple lorsqu'ils sont trop éloignés. Un modèle contenant beaucoup de bruit traduit une mauvaise qualité des données.

- Nombre total de clusters (toutes tailles confondues) :

Un modèle 3D de qualité tend à se structurer autour d'un unique cluster principal, représentant l'objet modélisé de manière précise et homogène. Par conséquent, un grand nombre de clusters montre une fragmentation excessive, ce qui compromet la précision de la modélisation.

Ainsi, en appliquant ce dénombrement à chaque modèle 3D et en examinant ces trois indicateurs, je pourrai évaluer précisément la qualité de chaque modélisation.

Pour réaliser cette opération de dénombrement j'ai choisi d'utiliser l'algorithme DBSCAN (*Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise* ⁴⁵), réputé pour sa capacité à identifier correctement des clusters même dans des formes complexes. Cet algorithme de clusterisation basé sur la densité fonctionne en tenant compte de deux paramètres principaux : le nombre de points N considérés dans une zone et la distance ε entre ces points. L'algorithme fonctionne de la manière suivante, il parcourt le nuage de points et classeifie les points en 3 catégories :

- **Core points:** les points qui vérifient les conditions de densité définies préalablement (Le nombre de points et la distance entre ces points). Ces points correspondent aux points roses sur la figure 2.26 ci-dessous.
- **Border points:** les points qui ne remplissent pas les conditions de densité mais sont proches des core points. Ce sont les points noirs sur la figure.
- **Noise ou Bruit :** points qui ne remplissent pas les conditions de densité et qui ne sont proche d'aucun autre point. Ainsi l'algorithme est robuste aux valeurs aberrantes, puisqu'il éliminera les points perdus loin du modèle. ⁴⁶ Ce sont les points blancs sur le schéma 2.26.

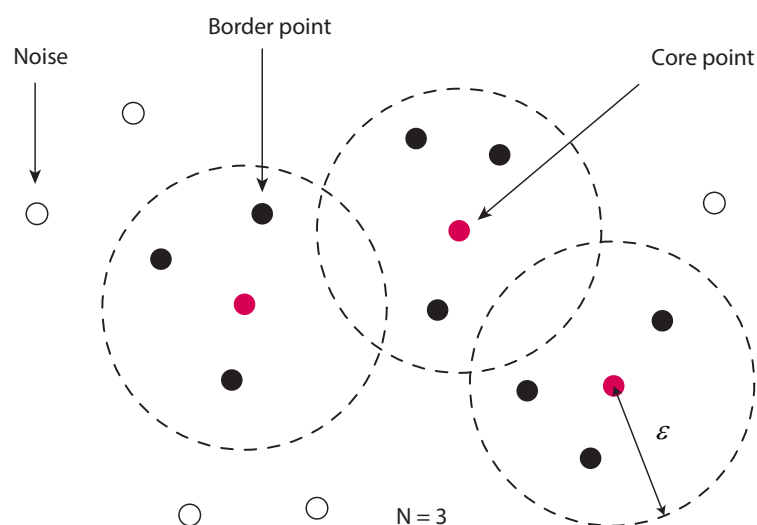


Figure 2.26 : Principe de classification de DBSCAN
Source : KDnuggets. « DBSCAN Clustering Algorithm in Machine Learning ».

⁴⁵ Jauregui, Ander Fernández. « DBSCAN in Python: Learn How It Works ». Ander Fernández

⁴⁶ Poux, Prof Florent. « 3D Shape Detection for Indoor Modelling ». 3D Geodata Academy

L'algorithme réalise ensuite les étapes suivantes :

- Il calcule les distances entre les différents points en les organisant dans une matrice. La distance euclidienne⁴⁷ est généralement utilisée.
- Prenant en compte les paramètres de densité, il classifie chaque point selon les catégories énoncées plus haut.
- Il assigne chaque core point à un cluster.

Le pire cas de complexité de l'algorithme DBSCAN est de l'ordre de n^2 ce qui se produit lorsque les paramètres de distance entre chaque point sont trop grands et que le nombre de points contenus dans un cluster est trop petit.⁴⁸ La complexité en n^2 de l'algorithme m'oblige à réduire la taille des nuages de points.

Pour cela je choisis la plus basse des densités lors de la création du nuage de points dense. Comme cela n'est pas suffisant, j'utilise aussi un outil de **décimation**⁴⁹ disponible dans le logiciel, CloudCompare⁵⁰. Cet outil réduit le nombre de points de façon à ce que la distance minimale entre chaque point soit de 0.04 mètres. Ainsi, le nuage de points est réduit à un quart de sa taille initiale. Voir Figure 2.27 .

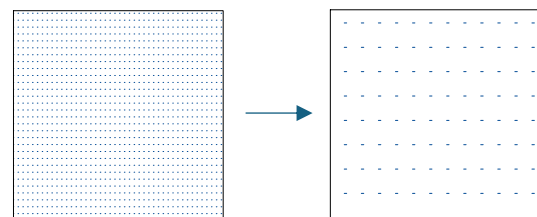


FIGURE 2.27 : UTILISATION DE L'OUTIL DECIMATION = REDUCTION DE LA DENSITE DE POINTS

SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

J'applique donc cet algorithme à mes différents modèles. Voir Annexe A.2 pour le script détaillé du programme DBSCAN.

⁴⁷ En mathématiques, la distance euclidienne entre deux points de l'espace euclidien est la longueur du segment qui sépare ces points. Elle est parfois appelée la distance de Pythagore car elle peut être calculée par le théorème de Pythagore à partir des coordonnées cartésiennes de ces points.

⁴⁸ Poux, Prof Florent. « 3D Shape Detection for Indoor Modelling ». 3D Geodata Academy

⁴⁹ **Décimation** = réduction de la taille du nuage de points, on perd de l'information par suppression des points très rapprochés. Par exemple une décimation de 50 mm supprimera toutes les points proches les uns des autres à plus de 50mm.

⁵⁰ Outil subsample de CloudCompare : réalise cette opération de manière intelligente en se basant sur la courbure. Cela signifie que dans une zone très courbée et géométriquement complexe, il y aura plus de points conservés comparé à une zone géométriquement plus simple. (source : « Subsampling the dense pointcloud ». Consulté le 7 mai 2024. <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=7699.0>)

iv. Qualité métrique

Le dernier critère d'évaluation des modèles 3D porte sur la qualité métrique des représentations. J'ai abordé le fait que la photogrammétrie conservait les proportions mais pas les échelles dans la partie sur l'état de l'art. Je mets donc à l'échelle chaque modèle : je rentre une valeur connue (D1), et le logiciel procède à une homothétie⁵¹ du nuage de points pour l'ajuster à cette valeur connue.

En utilisant une deuxième distance connue sur le modèle (D2), je mesure l'écart entre la valeur théorique connue et la valeur mesurée sur chaque modèle. C'est cet écart qui me sert à évaluer la qualité métrique de chaque modèle.

⁵¹ Homothétie : transformation géométrique par agrandissement ou réduction.

J'ai donc établi une liste de tous les critères utilisés pour évaluer la qualité des photographies ainsi que des modèles 3D. En voici le récapitulatif:

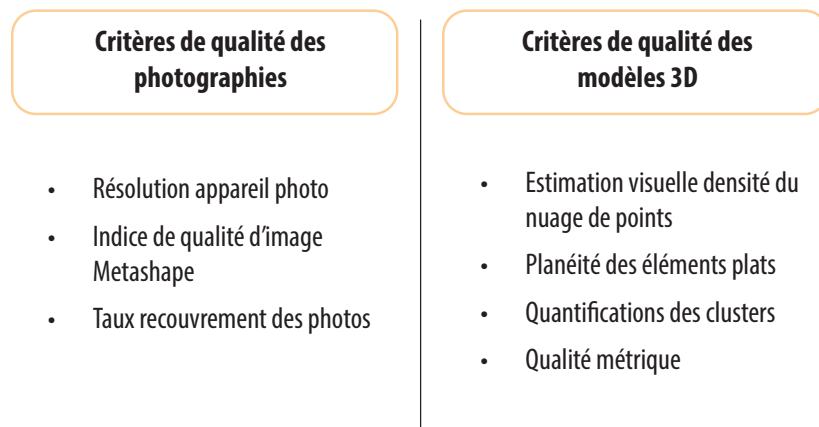


FIGURE 2.28 : LISTE RECAPITULATIVE DES CRITERES (SOURCE : AUTEUR)

Le but dans la suite est de pouvoir comparer la série A à la série B et chaque essai entre eux . Ce qui me conduis à la partie suivante à l'exploitation de ces outils et à l'analyse des résultats.

Analyse des résultats

03

I. Critères de qualité photos

II. Critères de qualité d'un modèle 3D

Partie 3 : Analyse des résultats

Dans cette 3^{ème} partie je vais appliquer le protocole expliqué à la partie 2.

Les prises de vue ont été effectuées, j'ai deux séries A et B d'essais photogrammétriques, la série A avec un appareil photo à **18 MPx** et la série B avec un iPhone XR à **12 MPx**. Les caractéristiques sont rappelées dans les tableaux ci-dessous:

ESSAI	A.1	A.2	A.3	A.4
Nombre de photos	16	32	56	79

FIGURE 3.1 : RÉSUMÉ DES ESSAIS DE LA SÉRIE A (18MPx)

ESSAI	B.1	B.2	B.3
Nombre de photos	26	56	75

FIGURE 3.2 : RÉSUMÉ DES ESSAIS DE LA SÉRIE B (12 MPx)

Je me suis arrêtée à 79 photos, car il n'était pas possible d'en prendre davantage. Pour atteindre un tel nombre, il aurait fallu se décaler de 10 cm à chaque prise, ce qui représente une distance trop petite pour être réalisable. La série B contient un nombre de photos égal à 1,5 fois celui de la série A. Ainsi, chaque essai de la série A est comparé avec l'essai correspondante de la série B : A.1 avec B.1, A.2 avec B.2, et ainsi de suite. L'essai A.4 n'a pas de comparatif dans la série B puisqu'il n'était plus possible d'augmenter le nombre de photos.

Pour chaque essai de la série A et B, je passe en revue les critères de qualité photos et de qualité de modèles 3D obtenus cités précédemment.

I. Critères de qualité des photos

a) Réglage de l'appareil photo et résolution

Je commence avec le critère portant sur la résolution des images, liée intrinsèquement à l'appareil photo. Je rappelle ici les deux résolutions utilisées pour mon expérience.



Pour comparer la série B avec la série A, qui a une résolution de 18 MPx, j'ai du faire 1,5 fois plus de photos pour arriver à la même résolution théorique ($12 \times 1,5 = 18$).

b) Indice de qualité d'image Metashape

Le second critère à passer en revue sur la qualité des images est l'outil de Metashape : indice de qualité d'image. Pour rappel il s'agit d'une valeur comprise entre 0 et 1 fourni par le logiciel pour chaque photographie. Plus la valeur est proche de 1, et meilleure est la qualité selon Metashape. Les images dont la qualité est inférieure à 0.5 doivent préférablement être écartées du modèle. Ce calcul d'indice de qualité d'image réalisé par Metashape se base sur les facteurs suivants : flou cinétique, mise au point, contraste et exposition des photos.⁵² Je regarde donc quel indice est fourni pour chaque image de chaque série

⁵² Saczuk, Dr Eric. « Chapter 1.2 – Setting Up Images », 30 mars 2020.

Sur les figures ci-dessous on peut voir une comparaison du 3ème essai de la série A avec le 3ème essai de la série B, soit respectivement A.3 et B.3.

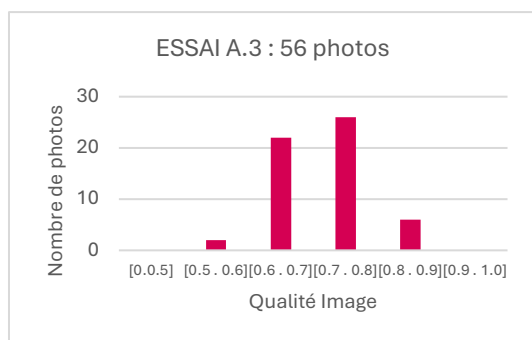


FIGURE 3.3 : HISTOGRAMME DES QUALITÉS D'IMAGE OBTENUS POUR LA SÉRIE A (AVEC APPAREIL PHOTO) (SOURCE : AUTEUR)

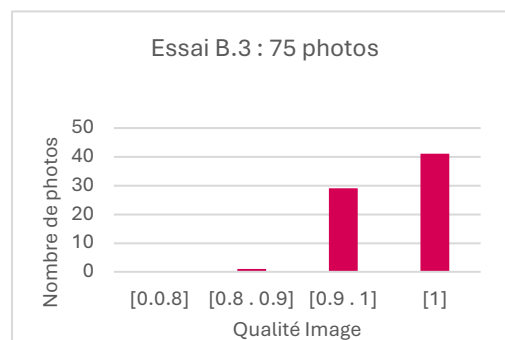


FIGURE 3.4 : HISTOGRAMME DES QUALITÉS D'IMAGE OBTENUS POUR LA SÉRIE B (AVEC IPHONE XR) (SOURCE : AUTEUR)

Voici une synthèse de la comparaison des indices de qualité d'image :

Dans chaque série individuellement : Dans chaque essai, plus le nombre de photos augmente et plus la qualité d'image augmente. Ce qui est normal : l'échantillon étant plus grand, on a davantage de meilleures photos.

Comparaison de la série A avec la série B : J'observe que la qualité d'image pour la série B (Iphone Xr) est nettement supérieure à celle de la série A (Appareil photo). Voir la figure 3.3 et 3.4 juste au dessus pour le voir sur les histogrammes. Cela s'explique par le fait que les critères servant à établir cette qualité d'image (flou cinétique, mise au point, contraste et exposition des photos⁵³) sont automatiquement réglés dans l'iPhone lors de la prise de vue, ce qui n'est pas le cas avec l'appareil photo en mode manuel où c'est l'utilisateur, donc moi-même, qui règle ces paramètres.

Étant moins douée que l'iPhone à ajuster ces paramètres, les photographies que j'ai prise avec l'appareil photo présentent un indice de qualité d'image plus faible que sur la série B. Cependant il pourrait en être autrement, en suivant des cours de photographie et en acquérant les compétences nécessaires, tout utilisateur pourrait rivaliser avec les réglages de l'iphone. Ici, je ne l'ai pas fait car nous verrons plus tard que ce critère d'indice qualité d'image n'est en réalité pas un bon critère. En effet, l'hypothèse à vérifier par la suite est de savoir si ce critère de qualité d'image, est représentatif de la qualité de modélisation du nuage de points. Se référer à l'annexe A.3 pour retrouver tous les histogrammes de qualité des images pour les différents essais.

⁵³ Saczuk, Dr Eric. « Chapter 1.2 – Setting Up Images », 30 mars 2020.

c) Taux de recouvrement des photos

Pour finir l'évaluation de la qualité des photos, j'analyse le taux de recouvrement fourni par Metashape. Pour rappel le taux de recouvrement des images correspond au pourcentage de superposition des images les unes par rapport aux autres. Je remarque que ce taux fourni par Metashape concerne uniquement le recouvrement horizontal. Il aurait fallu aussi regarder le recouvrement vertical car la façade étant haute j'ai dû prendre plusieurs photos pour couvrir toute la hauteur. Je vais considérer que le recouvrement horizontal est représentatif du recouvrement vertical et que par conséquent il est suffisant pour mon étude.

Voir sur les figures ci-contre les relevés du taux de recouvrement générés par Metashape. Plus le bleu est foncé et meilleur est le taux de recouvrement. En effet un bleu turquoise signifie un recouvrement de 7 (sur une échelle de 10) et le bleu foncé un taux de recouvrement supérieur à 9.

J'observe qu'à partir de l'essai A.2, Figure 3.6, le recouvrement de la façade est supérieur à 9 en tout point du modèle (ne pas regarder le trottoir, il ne fait pas parti de l'objet étudié). À partir de 30 photos, le critère de recouvrement est vérifié.

Pour ce qui est de la série B, le recouvrement est atteint dès le premier essai B.1. Cela s'explique par le fait que l'essai B.1 est composé de 26 photos, alors que l'essai A.1 était composé de 16 photos. Cela confirme l'hypothèse qu'une trentaine de photos est suffisante pour obtenir le recouvrement minimum.

Se référer à l'annexe A.4 pour les données de recouvrement de chaque essai.

FIGURE 3.5 :
TAUX
RECOUVREMENT
ESSAI A.1
(16 PHOTOS –
APPAREIL PHOTO)

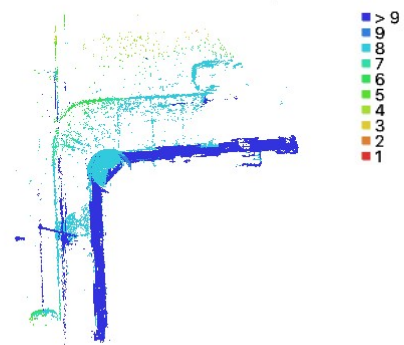


FIGURE 3.6 :
TAUX RECOUVREMENT
ESSAI A.2
(32 PHOTOS –
APPAREIL PHOTO)

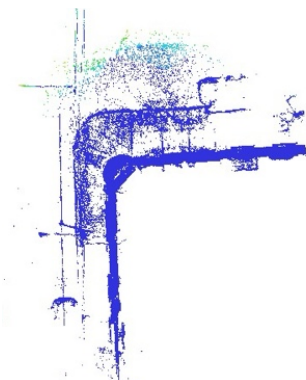
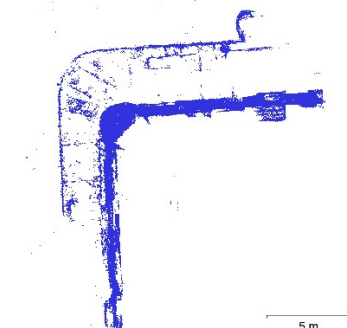


FIGURE 3.7 : TAUX
RECOUVREMENT ESSAI
A.2
(32 PHOTOS – APPAREIL
PHOTO)



SOURCE : METASHAPE
CHARLOTTE FAUGERE

II. Critère de qualité d'un modèle 3D :

Après avoir évalué la qualité des photographies je cherche à évaluer la qualité des différents modèles 3D . Pour cela, je me livre à une analyse rigoureuse des différents nuages de points selon les critères établis plus haut. Pour rappel voici les 4 critères que je vais passer en revue : L'estimation visuelle de la densité du nuage de points, la planéité des éléments plats, la quantification des artefacts parasites, et l'évaluation de la qualité métrique des modèles.

a) Estimation visuelle de densité du nuage de points

Pour commencer, j'estime visuellement la précision de la modélisation de certains détails de façade. Je vais regarder plusieurs détails de façades, qui seront énumérés dans le tableau plus bas et évaluer la qualité de la modélisation. L'exemple le plus marquant est le dessin des briques en façade. Sur les deux figures ci-dessous je peux nettement voir la différence entre l'essai A.1 et l'essai A.3.



FIGURE 3.8 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI A.1 (16 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE



FIGURE 3.9 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI A.3 (56 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE

Sur la figure 3.8 représentant le nuage de points de l'essai A.1, composé de 16 photos, j'observe clairement que les briques ne sont pas apparentes et qu'un aspect granuleux dû à l'imprécision de la modélisation apparaît. En revanche, sur l'essai A.3, composé de 56 photos, le dessin est de très bonne qualité. La qualité du modèle augmente donc avec le nombre de photos.

Pour information je ne prends pas en compte les vitres des fenêtres car Metashape ne sait pas gérer les reflets, donc elles contiennent forcément des erreurs.

Ci-dessous, deux tableaux résumant les observations effectuées sur la qualité de plusieurs détails de façade avec les deux séries A et B :

ESSAI A	Nb Photos	Balcon circulaire à l'avant de la façade	Porte d'entrée principale	Porte entrée sur la façade de droite	Ouvertures de fenetre	Dessin des briques en facade
A.1	16	Faible : forme globale mal modélisée	Faible : forme incomplète	Faible : dessin de l'ouverture seulement	Faible	NON, aspect granuleux seulement
A.2	32	Moyenne : Forme correcte mais trous dans les gardes corps	Moyenne : Encore quelques zone de trous	Moyenne : Quelques détails de la porte apparaissent	Moyenne : Cadre modélisé correctement	NON
A.3	56	Bonne :	Bonne : Boite aux lettres qui apparaît	Moyenne : Quelques détails de la porte apparaisse	Bonne	Bonne
A.4	79	Bonne	Bonne : Boite aux lettres qui apparait	Bonne	Bonne	Bonne

ESSAI B	Nb Photos	Balcon circulaire à l'avant de la façade	Porte d'entrée principale	Porte entrée sur la façade de droite	Ouvertures de fenetre	Dessin des briques en facade
B.1	26	Faible : forme globale mal modélisée	Faible : forme incomplète	Très Faible	Très Faible	NON
B.2	48	Faible : forme globale mal modélisée	Faible : forme incomplète	Faible	Faible	NON
B.3	75	Moyenne : Forme correcte mais trous dans les gardes corps	Moyenne : Encore quelques zone de trous	Moyenne : Quelques détails de la porte apparaissent	Moyenne : Cadre modélisé correctement	UN PEU

Les tableaux de comparaison montrent que la modélisation et la précision des détails augmentent lorsque le nombre de photos augmente. Je peux clairement le voir avec l'exemple du dessin des briques, qui commence à se dessiner à partir de l'essai A.3, donc à partir de 56 photos. Je peux donc fixer à 50 photos la limite inférieure du nombre de photos nécessaire pour obtenir une modélisation de bonne qualité.

Entre l'essai A.3 et l'essai A.4, l'amélioration n'est pas flagrante, que ce soit sur le dessin des briques ou les autres détails de façade. Voir Figure 3.10 et 3.11 pour comparaison. C'est pourquoi je conserve à 50 le nombre minimum de photos nécessaire pour obtenir une modélisation optimale.



FIGURE 3.10 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI A.3 (56 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE



FIGURE 3.11 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI A.4 (79 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE

Pour ce qui est de la série B, je remarque que même avec l'essai ayant le plus de photos (B.3 à 75 photos), la précision de la modélisation dans Metashape reste moyenne. Voir la figure 3.12 et 3.13 ci-dessous. Je constate assez rapidement qu'aucun dessin de brique n'apparaît dans l'essai B.3, ce qui confirme mon hypothèse selon laquelle l'iPhone avec sa résolution de 12 Mpx n'atteint pas la qualité de modélisation obtenue avec l'appareil photo reflex à 18 Mpx, malgré la multiplication du nombre de photographies avec l'iPhone.



FIGURE 3.12 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI A.3 (56 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE

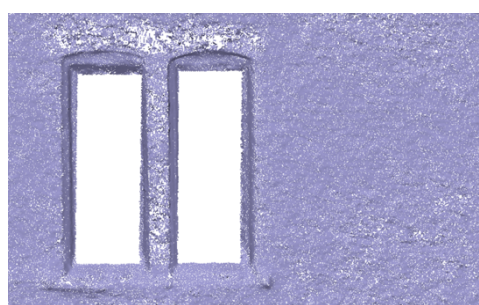


FIGURE 3.13 : DÉTAIL FAÇADE ESSAI B.3 (75 PHOTOS)
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE

Cela confirme également que l'indicateur de qualité d'image fourni par Metashape n'est pas un critère pertinent. Par la suite, je poursuis ma comparaison des modèles 3D avec d'autres outils afin d'obtenir la certitude que c'est bien l'appareil photo à 18 Mpx qui donne de meilleurs résultats.

b) Planéité des éléments plats

Je vais maintenant m'intéresser à l'évaluation de la planéité des nuages de points. Avec l'algorithme Ransac détaillé dans la partie 2- IV.b.iii. je détermine le plan le plus fidèle au nuage de points puis je calcule le score de planéité. Pour rappel, ce score correspond au ratio du nombre de points appartenant au plan sur le nombre total de points.

Voici les valeurs d'entrées à fournir à l'algorithme Ransac pour l'utiliser :

- Le nuage de points (calculé par Metashape précédemment) représentant la façade
- Les paramètres d'intervalle de confiance :
 - une valeur seuil (ε) permettant de déterminer si un point appartient au modèle géométrique, ici la distance au plan. On choisit un seuil de **0.001 m** car il s'agit de la précision donnée par Metashape lors de la mise à l'échelle. Pour rappel, l'unité du modèle est en mètres.
 - Le nombre d'itérations (N) : c'est-à-dire combien de points il va tester pour les inclure ou non dans le modèle . On choisit **5000 itérations** car on sait qu'avec 5 000 itérations Ransac arrive à trouver suffisamment de points pertinent pour modéliser le plan. En effet si on augmente l'algorithme à 10 000 voire 100 000 itérations, le résultat reste identique. A chaque itérations, on obtient un résultat différent mais on observe quand même un score de planéité identique sur les deux premières décimales.

Pour limiter le nombre de points présents dans le modèle, je reconstruis mes modèles en qualité Medium. Il s'agit du paramètre de densité expliqué à la partie 2- III – b) *création du nuage de points dense*. Je prends seulement une section du modèle correspondant à un morceau de la façade. Voir figure 3.14 ci contre. La section est conservée dans son intégralité, toit incliné et fenêtres incluses.

En effet, je sais que RANSAC écarte les valeurs aberrantes, ici les points loin du plan. Par exemple, le toit incliné et les menuiseries seront écarté, c'est pourquoi je les conserve.



FIGURE 3.14 : SECTION DU NUAGE DE POINTS
TRANSMISE A RANSAC
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE -METASHAPE

Je lance l'algorithme Ransac pour chacun des nuages de points et j'obtiens les scores de planéité suivants :

	A.1	A.2	A.3	A.4	B.1	B.2	B.3
SCORE	0.21	0.26	0.34	0.33	0.20	0.25	0.25
Nombre Points du nuage de points considéré	391 562	375 534	445 502	403 915	186 838	179 729	220 065

FIGURE 3.15 : RÉSULTATS DES SCORE DE PLANÉITÉ OBTENU AVEC RANSAC
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Pour la série A, je remarque que plus le nombre de photos augmente et meilleur est le score de planéité. Cependant, à partir de A.4, le score diminue légèrement, passant de 0,34 à 0,33. Je constate donc qu'il stagne (voir encadré jaune sur le tableau de la figure 3.15). Cette variation est trop faible pour conclure à une perte de qualité ; je parlerais plutôt d'un niveau de qualité constant. J'en déduis qu'il existe un seuil à 50 photos, au-delà duquel le modèle ne gagnerait plus en qualité.

Pour ce qui est de la série B, je remarque que, de manière similaire à la série A le score augmente avec le nombre de photos. A partir de l'essai 3 (B.3), le score stagne à 0.25, voir encadré orange foncé sur le tableau. De même, la limite supérieure permettant de gagner en qualité est atteinte.

En revanche, les scores de la série B, tous essais confondus, sont moins bons que ceux de la série A. Cela confirme une nouvelle fois mon hypothèse que la qualité des essais photogrammétriques est meilleure avec l'appareil photo qu'avec l'iphone.

Le graphique ci-dessous permet de résumer les résultats obtenus. En bleu sont représentés les résultats de la série A et en orange ceux de la série B. Chaque courbe indique le score de planéité en fonction du nombre de photos de chaque essai. Le graphique met en évidence que la courbe orange, de la série B, reste en dessous de la courbe bleue, de la série A. La série A, utilisant un appareil photo, obtient donc de meilleurs scores de planéité.

Une limite supérieure du nombre de photos existe, au-delà de laquelle le score de planéité stagne. Cette limite est entourée en noir sur le graphique. Elle est située à 48 photos pour la série B et à 56 photos pour la série A. Au-delà de cette limite, la qualité du modèle reste constante.

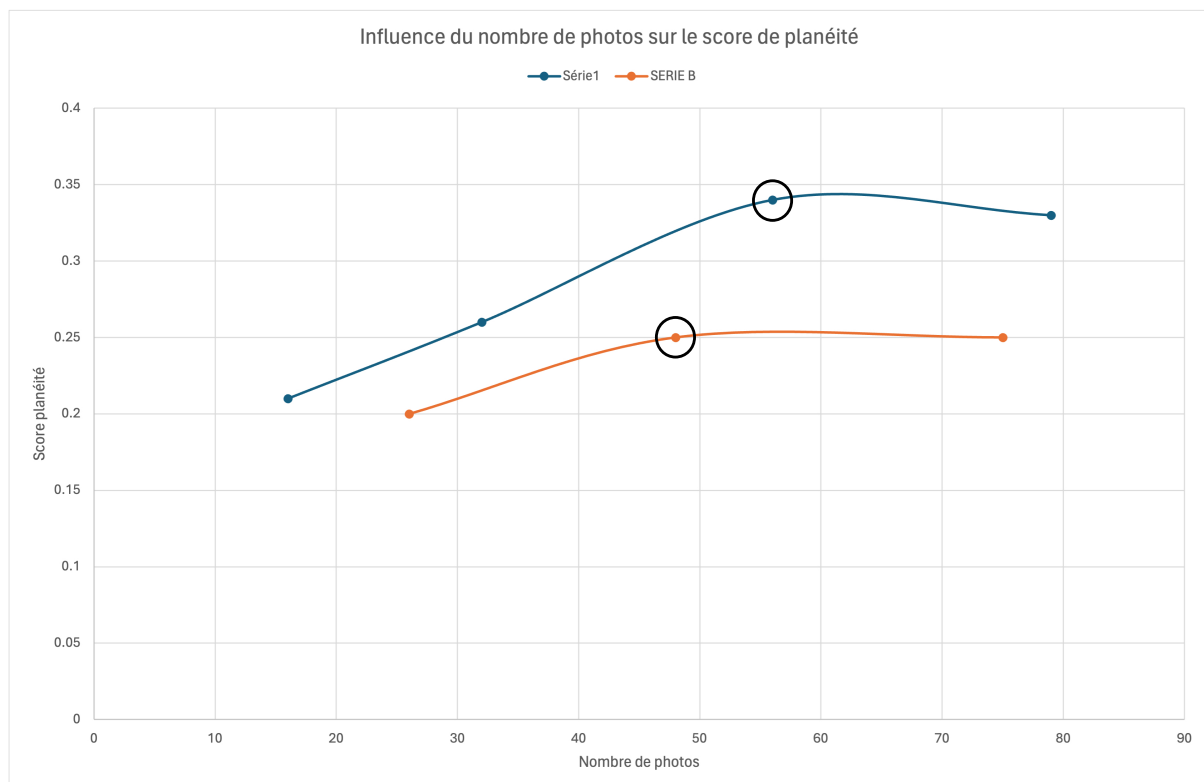


FIGURE 3.16 : COURBE EXCEL SUR L'ÉVOLUTION DU SCORE DE PLANÉITÉ EN FONCTION DU NOMBRE DE PHOTOS
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

c) Dénombrement des clusters

Je cherche maintenant à dénombrer les clusters présents sur les différents modèles 3D. Ce dénombrement des clusters me fournit les trois indicateurs de qualité suivants:

- Dénombrement des petits clusters (moins de 50 points)

Ces petits clusters sont associés aux artefacts parasites. Une augmentation du nombre de ces petits clusters est donc un signe de dégradation de la qualité globale du modèle.

- Évaluation du bruit (points isolés ou parasites) :

Le bruit représente des points aberrants qui ne peuvent être comptés dans les clusters, par exemple lorsqu'ils sont trop éloignés. Un modèle contenant beaucoup de bruit traduit une mauvaise qualité des données.

- Nombre total de clusters (toutes tailles confondues) :

Un modèle 3D de qualité tend à se structurer autour d'un unique cluster principal, représentant l'objet modélisé de manière précise et homogène. Par conséquent, un grand nombre de clusters montre une fragmentation excessive, ce qui indique une précision dégradée de la modélisation.

Pour réaliser ce dénombrement, j'utilise l'algorithme de clusterisation DBSCAN, qui est basé sur la densité. Pour choisir les paramètres de densité de DBSCAN (N , ε), il faut tester plusieurs valeurs jusqu'à ce que les clusters soient reconnus correctement. Les différentes figures ci-dessous illustrent le choix du paramètre ε , qui correspond à la distance entre les points. Bien que je ne sois pas l'auteur de ces figures et qu'elles ne correspondent pas à mon nuage de points, elles illustrent de manière claire la situation que j'ai rencontrée.

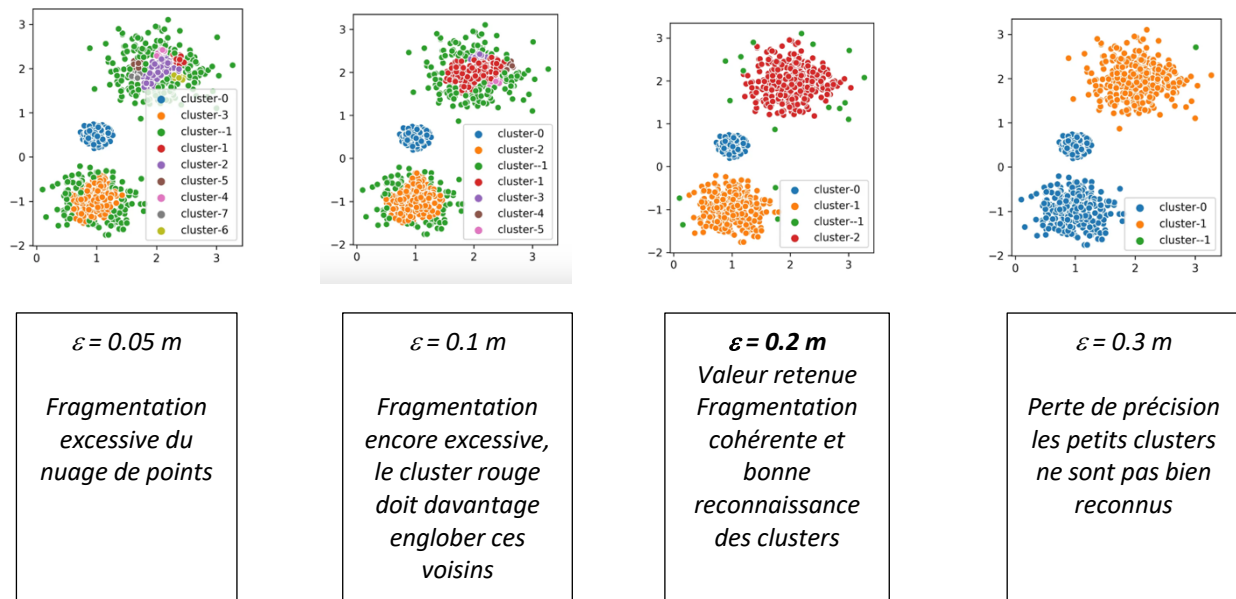


Figure 3.17 : Choix du paramètre ε

Source : « How to Use DBSCAN Effectively. A complete guide on using the most... / by Vijini Mallawaarachchi / Towards Data Science ».

$\varepsilon = 0.02 \text{ m}$ est la valeur retenue pour le premier paramètre. Le deuxième paramètre N , correspond au nombre de points dans les noyaux des clusters (le nombre de core points)⁵⁴. De même que pour le premier paramètre, il faut tester plusieurs configurations.

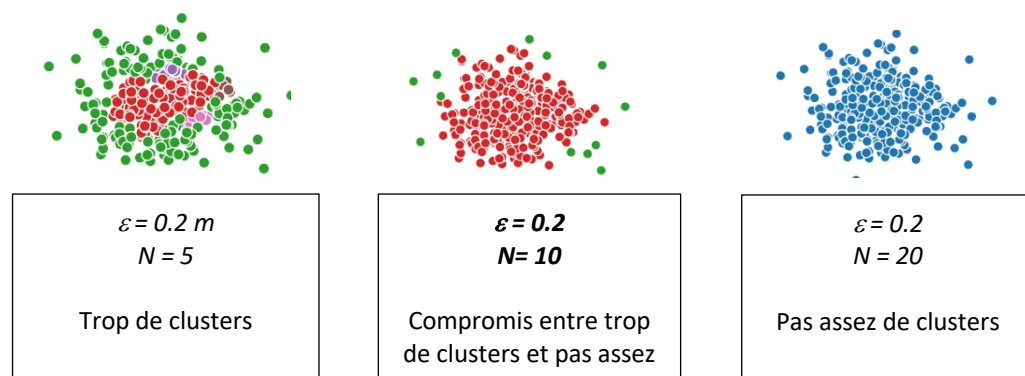


Figure 3.18 : Choix du paramètre N

Source : « How to Use DBSCAN Effectively. A complete guide on using the most... / by Vijini Mallawaarachchi / Towards Data Science ».

⁵⁴ Se référer la page 57 et à l'explication du fonctionnement de DBSCAN

Ainsi, les paramètres retenus pour l'algorithme sont $\varepsilon = 0.2$ et $N = 10$. J'exécute DBSCAN sur mes différents nuages de points correspondant à chacun des essais. Les deux figures ci-dessous, 3.17 et 3.18, montrent l'utilisation de DBSCAN et des clusters qu'il a reconnus. La figure 3.17 montre l'ensemble des clusters dont le cluster principal, en bleu. A droite, la figure 3.18, représente les clusters sans le cluster principal. Il est important de préciser qu'il existe plein de micro clusters difficiles à voir sur ces figures.

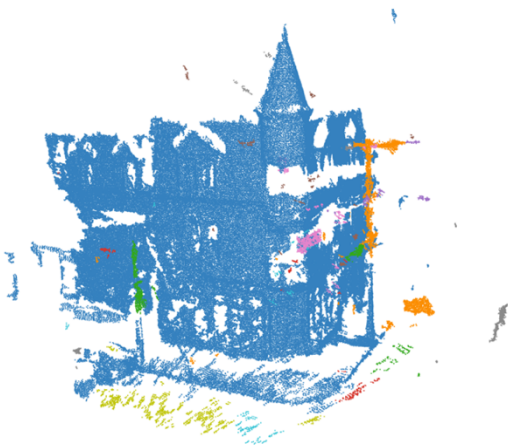


FIGURE 3.19 : NUAGE DE POINTS A.1 AVEC TOUT SES CLUSTERS
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

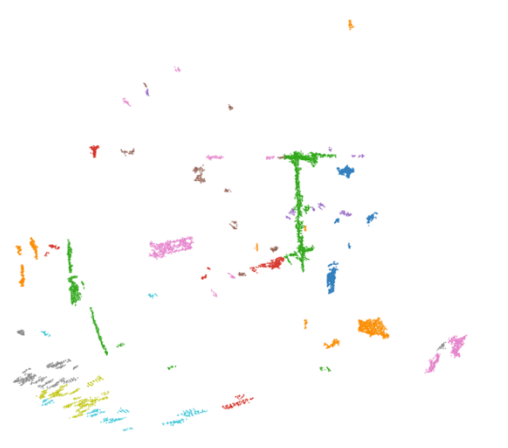


FIGURE 3.20 : NUAGE DE POINTS A.1 SANS LE CLUSTER PRINCIPAL
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour la série A :

	A.1	A.2	A.3	A.4
Taille nuage de points décimés	109 114	182 933	205 208	219 369
Petits Clusters (inférieurs à 50 points)	77 580	125 674	132 359	148 951
Bruit	1 316	1142	875	1914
Total Clusters	96	68	63	82

Je regarde les indicateurs de qualité listés précédemment :

- Dénombrement des petits clusters (moins de 50 points)

Le nombre de petits clusters augmente à mesure que le nombre de photos croît, ce qui signifie que l'on obtient de plus en plus d'artefacts parasites. Si on s'appuie sur l'hypothèse que les artefacts parasites dégrade la qualité du modèle cela pose une contradiction : les modèles perdraient en qualité à mesure que le nombre de photos augmente alors que les critères que l'on a vu jusqu'à présent montrent le contraire.

Je peux commencer par remettre en question le fait d'avoir assimilé tous les petits clusters de moins de 50 points à des artefacts parasites. Peut-être que la limite de 50 points était mal choisie.

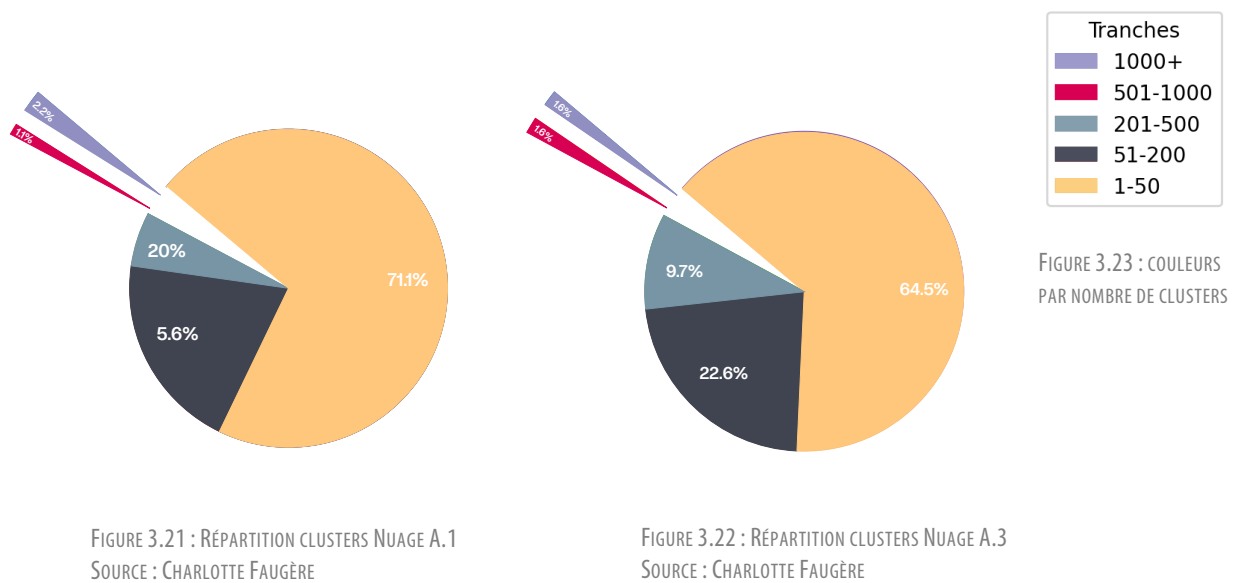
Une autre explication serait que le nombre d'artefacts parasites augmente plus rapidement que la qualité de la modélisation, à mesure que le nombre de photos augmente.

J'écarte donc cet indicateur car il est difficile à exploiter.

- Évaluation du bruit et nombre total de clusters :

Le bruit et le nombre total de clusters diminuent de l'essai A.1 à A.3. Voir les cases orange dans le tableau. Cela s'explique par le fait que plus le modèle a de photos et plus le nuage de points est dense, donc les points sont davantage absorbés par les clusters et les petits clusters s'accumulent pour former des gros clusters.

Ainsi la proportion de petits clusters diminue et la proportion de grands clusters augmente. C'est ce que je vais vérifier en regardant la répartition des clusters par taille.



Les figures 3.21 et 3.22 montrent la répartition des clusters par taille. Entre l'essai A.1 et A.3 la proportion de petits clusters (moins de 50 points) passe de 71,1 % à 64.5%. Alors que les proportions des clusters de taille intermédiaire (51-200 points et 200-500 points), de couleurs bleues, augmentent. (5.6% à 22.6 % pour la part bleu foncé). Ainsi la proportion de clusters intermédiaires augmente et la proportion de petits clusters diminue quand le nombre de photos augmente. Ce qui confirme mon hypothèse évoquée précédemment, les petits clusters fusionnent ou sont absorbés par les plus gros clusters pour former davantage de clusters de taille moyenne.

Ainsi les modèles gagnent en précision, car le nombre total de clusters diminue, quand le nombre de photos augmente. Ce résultat s'applique pour les essais A.1 à A.3.

Pour ce qui est de l'essai A.4, le tableau de la figure 3.19 montre que le nombre de clusters et le bruit augmentent à nouveau de manière conséquente. Voir les cases en jaune sur le tableau des résultats. Cela signifie que le maximum de photos est atteint et qu'au-delà le modèle se dégrade. Dans la série A, la valeur seuil est fixée à 56 photos, qui correspond au nombre de photos de l'essai A.3.

Je m'intéresse maintenant aux résultats de la série B qui sont compilés dans le tableau ci-dessous :

	B.1	B.2	B.3
Taille nuage de points décimés	101 840	165 071	186 609
Nombre Cluster	84	88	83
Bruit	1 110	1 731	1763

Je remarque que le nombre de clusters stagne, mais le bruit lui augmente avec le nombre de photographies. Ce qui n'était pas le cas dans la série A. Dans les essais (A.1,A.2,A.3), le bruit diminuait quand le nombre de photos augmentait. Une explication plausible est que la résolution des photos étant plus basse, plus le nombre de photos augmente et plus cela ajoute des informations erronées, ce qui amplifie le bruit lui aussi.

Je regarde la répartition des clusters selon leur taille pour la série B.

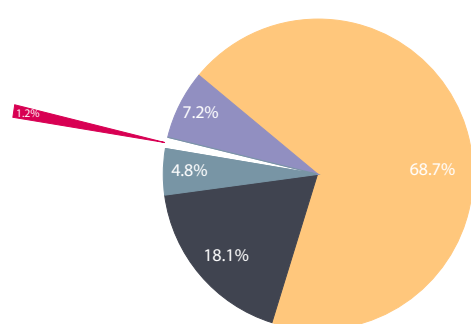


FIGURE 3.25 : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE B.1
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

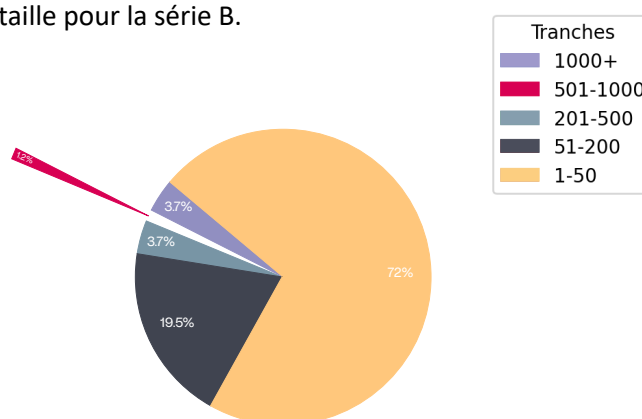


FIGURE 3.26 : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE B.3
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Sur la figure 3.26, j'observe que la proportion de très grand clusters est moins élevée que dans la série A par exemple. Ce phénomène et le fait que le nombre de clusters stagne (alors qu'il devrait diminué) peut expliquer les nombreuses erreurs de modélisation dues aux photos de basse qualité.

Pour conclure, les photos de l'appareil photo sont plus pertinentes et conduisent à un nuage de points plus dense, avec moins de clusters, ce qui est synonyme de meilleure qualité.

d) Qualité métrique

Le dernier critère à évaluer porte sur la qualité métrique des modèles 3D. Il vise à vérifier si les proportions sont bien respectées lors de la modélisation. Je met donc à l'échelle chaque modèle : je rentre une valeur connue (D1), et le logiciel procède à une homothétie du nuage de points pour l'ajuster à cette valeur connue. La valeur D1 choisie correspond à la largeur de la porte d'entrée, voir la figure 3.27 pour situer cette distance sur le modèle .

En utilisant une deuxième distance connue D2, je mesure l'écart entre la valeur théorique connue et la valeur mesurée sur chaque modèle. C'est cet écart qui me sert à évaluer la qualité métrique de chaque modèle. Voir la figure 3.28, pour situer la distance D2 qui correspond à la largeur d'une fenêtre.



FIGURE 3.27 : DISTANCE DE RÉFÉRENCE D1 POUR LA MISE À L'ÉCHELLE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE



FIGURE 3.28 : DISTANCE D2 POUR
VÉRIFIER LA MISE À L'ÉCHELLE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Voici les valeurs théorique, mesurées sur site :

$D1_{théorique} = 1m80$

$D2_{théorique} = 1m$

Ces valeurs théoriques ont été mesurées avec un mètre, on admet une incertitude de lecture et de mesure de l'ordre de 1 cm. De même pour mesurer $D2_{mesurée}$ sur le modèle 3D il y a une incertitude de placement des repères de l'ordre du cm.

Ainsi, toute valeur de $D2_{mesurée}$ comprise dans l'intervalle [99 cm - 101 cm] est considérée comme correcte. Le tableau de la figure 3.29 ci-dessous récapitule les valeurs de $D2_{mesurée}$ sur chaque modèle ainsi que l'écart à la valeur théorique. La qualité métrique d'un modèle est correcte si cet écart est inférieur à 1cm, elle est alors symbolisée en vert. Et si ce n'est pas le cas elle est symbolisée en rouge.

ESSAI	$D2_{mesurée}$	$D2_{théorique} - D2_{mesurée}$
A.1	98.1 cm	1.9 cm
A.2	99.7 cm	0.3 cm
A.3	1.04 m	0.4 cm
A.4	1.03 m	0.3 cm

ESSAI	$D2_{mesurée}$	$D2_{théorique} - D2_{mesurée}$
B.1	1.16 m	1.6 cm
B.2	1.1 m	1 cm
B.3	1.07 m	0.7 cm

FIGURE 3.29 : RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTES VALEURS DE $D2_{mesurée}$ SUR CHAQUE MODÈLE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Analyse des résultats Série A : À part l'essai A.1 qui présente un écart de plus de 1 cm, tous les autres essais sont corrects. Plus il y a de photos, plus la mesure est précise.

Analyse des résultats série B : De même, c'est uniquement l'essai B.1 qui présente une inexactitude.

Pour valider ce critère une trentaine de photos est nécessaire avec l'appareil photo de la série A, et une cinquantaine de photos pour l'iphone de la série B.

Ce critère conclut mon analyse des résultats. La prochaine partie présente une synthèse des résultats obtenus pour chaque critère, ainsi que les valeurs seuil du nombre de photographies pour chaque critère également.

Synthèse



I. Synthèse des résultats obtenus sur l'objet d'étude

II. Etablissement d'un ratio N quantité de photos par mètre linéaire de façade

III. Exemple d'application du ratio N

Partie 4 : Synthèse

Cette partie vise à synthétiser les résultats obtenus dans la partie 3 et à les généraliser à d'autres objets d'étude. L'objet d'étude sur lequel s'est portée ma recherche est une façade en angle d'une maison à deux étages. Ses dimensions sont les suivantes : longueur = largeur = 7m et hauteur = 14m.

I. Synthèse des résultats obtenus sur mon objet d'étude et généralisation

Le tableau ci-après, figure 4.2, résume les résultats obtenus dans la partie 3 sur mon objet d'étude.

Plusieurs types de réponses y apparaissent :

- Soit une mention OUI ou NON qui indique si le critère est vérifié, c'est le cas du critère taux de recouvrement qui nécessite de franchir la barre des 75% de recouvrement, et du critère qualité métrique qui nécessite un écart métrique aux dimensions réelles inférieur à 1cm.
- Soit une mention BON, MOYEN ou MAUVAIS qui quantifie le résultat, c'est le cas du critère Estimation de la qualité visuelle.
- Soit c'est une valeur numérique, dans ce cas le résultat me renseigne plutôt sur le nombre maximal de photos à ne pas dépasser car la fluctuation des valeurs m'indique que l'on a dépassé un seuil (c'est le cas de la planéité des éléments plats quand le score redescend)
- Soit il n'y a pas d'évaluation, c'est le cas de la résolution qui est fixée dès le départ par le choix de l'appareil photo
- Le critère indice de qualité Metashape n'est pas retenu car il n'évalue pas les bonnes choses

Le tableau se lit de la manière suivante : chaque essai de la série A est comparé à l'essai de la série B ayant la même teinte. On compare A.1 avec B.1, et ainsi de suite. A.4 n'a pas d'équivalent dans la série B, car il n'était pas possible de prendre davantage de photos.

		Critères de qualité des photos			Critères qualité modèle 3D				
		Nombre de photos	Résolution (Mpx)	Taux recouvrement photos Supérieur a 75%	Estimation visuelle (dessin des briques)	Planéité des éléments plats Score (entre 0 et 1)	Quantification des artefacts		Qualité métrique
							Nombre clusters	Bruit	
Série A	A.1	16	18	NON	MAUVAIS	0.21	96	1316	NON
	A.2	32	18	OUI	MOYEN	0.26	68	1142	OUI
	A.3	56	18	OUI	BON	0.34	63	875	OUI
	A.4	79	18	OUI	BON	0.33	82	1914	OUI
Série B	B.1	26	12	OUI	MAUVAIS	0.2	84	1110	NON
	B.2	56	12	OUI	MAUVAIS	0.25	88	1731	OUI
	B.3	75	12	OUI	MOYEN	0.25	83	1763	OUI

FIGURE 4.2 : RÉCAPITULATIF DES RESULTATS OBTENUS POUR CHAQUE CRITÈRE ET CHAQUE ESSAI
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Pour la série A, c'est l'essai A.3, avec 56 photos, qui présente les meilleurs résultats. A.1 et A.2 obtiennent des scores inférieurs sur les critères d'estimation visuelle, de planéité des éléments plats et de qualité métrique. L'essai A.4 est moins performant que A.3 en termes de planéité des éléments plats et de quantification des artefacts, car les clusters et le bruit augmentent.

Pour la série B, c'est l'essai B.3 qui présente les meilleurs résultats, notamment sur le critère d'estimation visuelle.

Les résultats me permettent de conclure que la qualité des modèles 3D obtenus augmente avec le nombre de photos, que ce soit avec l'appareil photo (série A) comme avec l'iPhone (série B). Les essais réalisés avec l'iPhone (série B) n'atteignent pas le niveau de qualité de la série A (appareil photo), directement dû à la différence de résolution des deux appareils photo.

Ces résultats sont assez largement généralisables à tous les essais en photogrammétrie portant sur un objet de même gabarit.

Le deuxième tableau ci-après (figure 4.3) s'applique toujours à mon objet d'étude et récapitule les seuils minimaux du nombre de photos nécessaires pour obtenir un résultat de qualité optimale.

Tous les critères ne permettent pas de déduire un seuil minimum de photos ; c'est notamment le cas des critères de planéité des éléments plats et de quantification des artefacts. En effet, ces critères fournissent des valeurs numériques qui permettent d'observer la fluctuation des résultats (c'est-à-dire si le score augmente ou diminue) mais je n'ai pas de valeur de référence m'indiquant qu'à partir d'un certain score, le modèle est de bonne qualité.

	Nombre de photo MINIMUM pour valider chaque critère	
	Série A - 12 Mpx	Série B - 18 Mpx
Taux recouvrement photos Supérieur a 75%	32 photos	32 photos
Estimation visuelle (dessin des briques)	56 photos	JAMAIS ATTEINT
Planéité des éléments plats Score (entre 0 et 1)		
Quantification des artefacts		
Qualité métrique	32 photos	32 photos

FIGURE 4.3 : RÉCAPITULATIF DES SEUILS MINIMAUX DU NOMBRE DE PHOTOS EN FONCTION DE CHAQUE CRITÈRE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Pour les critères taux de recouvrement et qualité métrique le seuil minimum de photo à atteindre est de 32 photos, alors que pour le critère estimation visuelle le seuil est de 56 photos. Je retiens donc le critère le plus restrictif, à savoir 56 photos, ce qui correspond à la meilleure qualité atteinte lors de mes différents essais. Ainsi pour avoir une qualité optimale il faut réaliser à minima 56 photos.

Le tableau, figure 4.4, indique les seuils maximaux à ne pas dépasser pour ne pas perdre en qualité. Cette fois-ci, ce sont les critères de planéité des éléments plats et de quantification des artefacts qui me permettent de conclure sur le seuil maximal de photos à respecter. En effet, c'est grâce à l'analyse des valeurs obtenues avec ces deux outils, et notamment à l'observation de la fluctuation des résultats, que je peux affirmer l'existence d'un seuil maximal. (Par exemple pour la planéité des éléments plats le score stagne à 56 photos).

	Nombre de photo MAXIMUM pour valider chaque critère	
	Série A - 12 Mpx	Série B - 18 Mpx
Taux recouvrement photos Supérieur a 75%	56 photos	56 photos
Estimation visuelle (dessin des briques)		
Planéité des éléments plats Score (entre 0 et 1)		
Quantification des artefacts		
Qualité métrique		

FIGURE 4.4 : RÉCAPITULATIF DES SEUILS MAXIMAUX DU NOMBRE DE PHOTOS EN FONCTION DE CHAQUE CRITÈRE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Au regard du tableau ci-dessus, dépasser 56 photos n'améliorerait pas la qualité du modèle ; au contraire, cela entraînerait une perte de qualité. C'est pourquoi je fixe le seuil maximal à ne pas dépasser à 56 photos. Ainsi, en tenant compte des seuils minimal et maximal, 56 photos semblent être le nombre idéal pour obtenir une qualité optimale tout en évitant de prendre des photos inutiles.

Cependant, mon étude n'est pas précise à la photo près, puisque j'ai réalisé mes séries de photos par paliers : un essai à 16 photos, un autre à 32, etc. J'admets que la valeur obtenue peut fluctuer de 10%. Ce qui me conduit à un intervalle de photos compris entre 51 et 61 photos pour obtenir une modélisation photogrammétrique de qualité optimale.

Ce résultat peut être généralisé à d'autres objets de gabarit équivalent, c'est-à-dire présentant des dimensions et des particularités similaires. Pour exploiter davantage ce résultat je vais établir un ratio entre le nombre de photos à prendre et le mètre linéaire de façade. Ainsi, les conclusions de ma recherche pourront être appliquées dans un cadre plus large.

II. Etablissement d'un ratio N quantité photo/mètre linéaire

Je cherche à établir un ratio du nombre de photos nécessaires pour chaque mètre linéaire de façade afin d'obtenir une modélisation de qualité optimale. Ce ratio sera applicable à toutes les façades, tant que leur hauteur ne dépasse pas 14 mètres. Au-delà de cette hauteur, il devient difficile de positionner la caméra de manière adéquate pour photographier le sommet du bâtiment.

Pour déterminer ce ratio, je m'appuie sur la quantité optimale de photos nécessaires obtenue dans la partie précédente, à savoir 56 photos, qui correspondent à la qualité maximale de mon objet d'étude. Mon objectif est maintenant de déterminer à combien de mètres linéaires de façade cette valeur s'applique. La figure 4.4 ci-dessous présente les dimensions de ma façade étudiée jusqu'à maintenant.

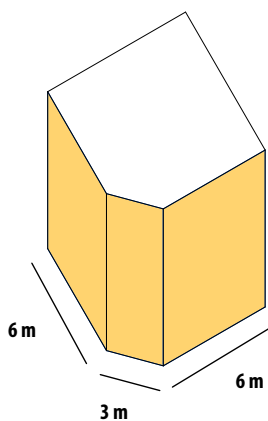


FIGURE 4.4 : GABARIT DE MON OBJET D'ÉTUDE (SOURCE : AUTEUR)

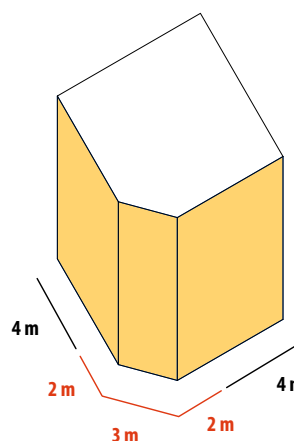


FIGURE 4.5 : AMORCE DE L'ANGLE (SOURCE : AUTEUR)

Une règle importante en photogrammétrie est que, pour modéliser correctement un angle, il est nécessaire de prendre deux fois plus de photos sur le tronçon amorçant l'angle du bâtiment⁵⁵. J'ai suivi cette règle lors de la modélisation de ma façade. J'ai considéré qu'il fallait amorcer l'angle 2m avant et 2m après celui-ci. Ainsi on commence à amorcer l'angle au bout de 4m de linéaire de façade, puis sur les 3m de biais et enfin encore 2m après l'angle. Cette amorce est représentée sur la figure 4.5.

J'appelle N le nombre de photos à réaliser sur 1m linéaire de façade pour obtenir une qualité optimale. Ainsi l'équation à résoudre est la suivante : $4N + 2 \times (2 + 3 + 2)N + 4N = \text{Nombre minimal de photos sur l'objet d'étude} = 56 \text{ photos}$. J'obtiens donc $22N = 56$ soit **N= 2.5 photos/mètre linéaire de façade**.

⁵⁵ Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

Pour la même raison que citée précédemment, ce résultat admet une marge de 10%. Le ratio N de 2.5 photos tous les 1m signifie qu'il faut prendre une photo tous les 40 cm. Cela correspond approximativement à la méthodologie adoptée lors de l'essai 3, comprenant 56 photos, réalisé au cours de mon expérience, le ratio me paraît donc cohérent.

III. Exemple d'application du ratio N

Je vais présenter plusieurs exemples d'application de ce ratio dans le cas où la surface à modéliser présente la géométrie de la figure 4.6. Pour rappel la hauteur de celle-ci doit être inférieure à 14m.

Pour commencer, considérons que la façade à modéliser est uniquement la façade A. Sa longueur est de $\ell = 10$ mètres. Ainsi le nombre de photos à faire est : $N \times \ell = 2.5 \times 10 = 25$ photos, avec N le ratio de 2.5 photos par mètre linéaire de façade, déterminé juste avant.

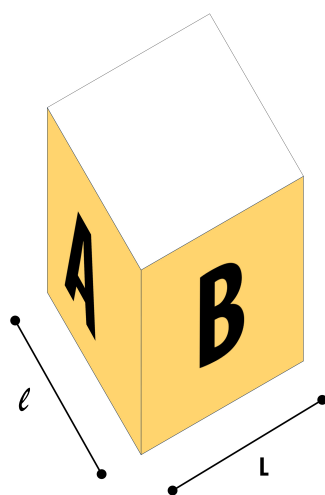


FIGURE 4.6 : GÉOMÉTRIE DE L'OBJET À MODÉLISER
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

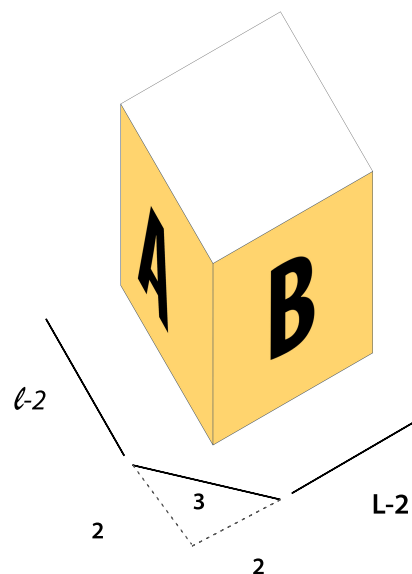


FIGURE 4.7 : EXPLICATION DU BIAIS FICTIF
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Plaçons-nous maintenant dans le cas où la façade à modéliser est constituée de A et B. Cette façade présente un angle, il faut donc prendre 2 fois plus de photos lorsqu'on commence à amorcer l'angle. Considérons que pour amorcer l'angle, on réalise le parcours présenté sur la figure 4.7. Il s'agit d'un biais réalisé 2m avant l'angle et qui se termine 2m après l'angle.

Ce biais correspond à la diagonale d'un carré de côté 2m, il mesure donc 2.8m, que l'on arrondit à 3m.

Ainsi pour modéliser cette façade en angle le mode opérationnel est le suivant :

- Sur la face A je dois prendre $l-2 \times N$ photos
- Sur le biais je dois prendre $3 \times 2N$ photos (le double de photos sur l'angle)
- Sur la face B je dois prendre $L-2 \times N$ photos

Le schéma ci-dessous récapitule le nombre de photos à prendre sur chaque face.

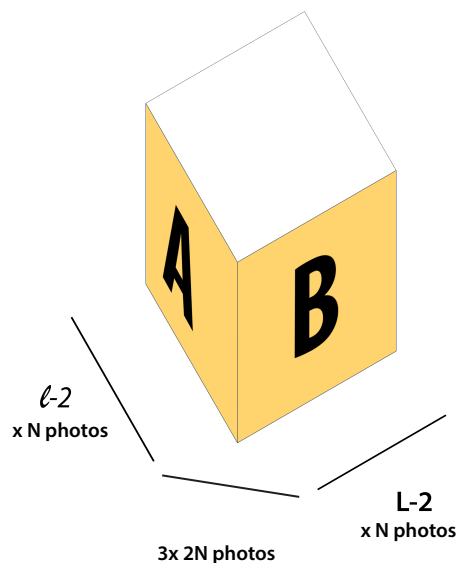


FIGURE 4.8 : RECAPITULATIF DU NOMBRE DE PHOTOS A PRENDRE PAR FACE
SOURCE : CHARLOTTE FAUGÈRE

Prenons un exemple où $l = 6$ m et $L = 6$ m, je dois alors prendre :

- Sur la face A : $4 \times 2.5 = 10$ photos
- Sur le biais : $3 \times 2 \times 2.5 = 15$ photos
- Sur la face B : $4 \times 2.5 = 20$ photos

Ainsi au total pour avoir une qualité optimale je dois prendre 45 photos. Cette situation n'est pas la même géométriquement que celle de mon objet d'étude mais elle y ressemble, ainsi le nombre de photos semble cohérent.

Je précise que le tracé pour amorcer l'angle est libre, il n'y a pas d'obligation à tracer un biais droit, c'est tout à fait possible de réaliser un arc de cercle. Dans ce cas il faut appliquer le ratio $2N$ sur le demi-périmètre de ce cercle.

Conclusion

05

Conclusion

Le but de ma recherche était de déterminer les paramètres optimaux pour la prise de vue en photogrammétrie, à savoir le nombre de photos nécessaires et la résolution idéale de l'appareil photo. Pour répondre à cette question, j'ai réalisé plusieurs essais en modifiant à chaque fois un paramètre. Afin de comparer les différents modèles obtenus et d'en tirer des conclusions, j'ai établi une liste de critères d'évaluation pour juger de la qualité des modèles en photogrammétrie.

Cette liste de critères, ainsi que les outils développés pour leur application, dépassent le cadre de mon étude. Ils peuvent être utiles à toute personne cherchant à évaluer la qualité d'un modèle 3D, que ce dernier soit issu de photogrammétrie ou de lasergrammétrie. Ces outils sont adaptables à tous les types de nuages de points. Les outils les plus significatifs sont l'évaluation de la planéité des éléments plats et la quantification des artefacts parasites.

Mes analyses m'ont permis de conclure que la qualité d'un modèle en photogrammétrie augmente avec le nombre de photos utilisées jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel la qualité commence à se dégrader. J'ai ainsi pu identifier un ordre de grandeur du nombre de photos nécessaires pour obtenir un modèle de bonne qualité. En appliquant ce résultat à la façade modélisée, j'ai défini un ratio minimal de 2.5 photos par mètre linéaire de façade, généralisable à toute façade de hauteur inférieure ou égale à 14 mètres et correspond à une qualité de modélisation optimale.

Une autre conclusion majeure est que la qualité des modèles 3D dépend également de la résolution de l'appareil photo. En comparant un iPhone XR de 12 Mpx à un appareil Canon Rebel T5 de 18 Mpx, j'ai observé que l'appareil photo produit des résultats nettement supérieurs. Cela s'explique notamment par la taille plus importante des capteurs dans l'appareil photo par rapport à l'iPhone. Des capteurs plus grands permettent de capturer davantage de lumière, de réduire le bruit numérique et d'améliorer la précision des détails, ce qui est non négligeable pour une modélisation 3D de haute qualité.

Enfin, sur la base de mes résultats, je recommande :

1. D'utiliser un appareil photo plutôt qu'un smartphone
2. De respecter un ratio d'environ 2,5 photos par mètre linéaire pour des façades inférieures à 14 mètres de hauteur.
3. D'adopter une approche méthodique dans la prise de vue pour garantir un recouvrement adéquat et des angles de vue adaptés.

Une extension naturelle de ce mémoire consisterait à valider le ratio établi sur des objets présentant des caractéristiques similaires. Une autre piste serait de développer des ratios spécifiques pour des objets aux dimensions ou aux configurations différentes de celles étudiées ici. L'évaluation de ces nouveaux modèles 3D pourrait s'appuyer sur la liste de critères élaborée dans le cadre de cette recherche, offrant ainsi une méthode robuste et adaptable.

Glossaire



Glossaire des termes techniques⁵⁶

Acquisition : Processus d'obtention des données de base, soit les prises de vue.

Alignement des photos : la position et l'orientation de l'appareil photo est déterminé pour chaque image. On peut ainsi reconstituer la scène des prises de vue.

Artefacts parasites⁵⁷ : Groupes de points accidentels présents sur le modèles 3D

Bruit : points qui ne remplissent pas les conditions de densité et qui ne sont proche d'aucun autre point

Corrélation dense: mise en correspondance de chaque pixel d'une photographie avec ceux des autres photographies choisies.

Cluster : Groupe d'un certains nombre de points, espacés d'une certaine distance/ groupe de points accidentels présents sur le modèle 3D

Complexité d'un algorithme⁵⁸: La complexité d'un algorithme est une prédiction ou une garantie que l'algorithme ne prendra jamais plus qu'un certain nombre d'étapes ou opérations, qui dépend souvent de la taille des données qu'il manipule.

Décimation⁵⁹ : réduction de la taille du nuage de points, on perd de l'information par suppression des points très rapprochés. Par exemple une décimation de 50 mm supprimera toutes les points proches les uns des autres à plus de 50mm.

Points caractéristiques : points qui permettent de caractériser visuellement l'objet

Points homologues⁶⁰ : points caractéristiques communs à plusieurs photos

Homothétie⁶¹ : transformation géométrique par agrandissement ou réduction selon un facteur d'échelle

Modèle 3D : représentation tridimensionnelle d'un objet sous forme informatique.

Nuage de points : ensemble de points images dont les coordonnées géométriques ont été calculées à partir d'un objet réel par une numérisation 3D. Il s'agit d'un fichier qui contient pour chaque point les coordonnées spatiales (X, Y, Z) et les composantes colorimétriques (Rouge, Vert, Bleu).

Nuage de points dense : nuage de points représentant les emplacements 3D de chaque pixel de chaque image

⁵⁶ Sauf indications contraires la source est : *Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique*

⁵⁷ Larousse pour artefact

⁵⁸ Tichadou, Florent Bouchez. « Complexité algorithmique »,

⁵⁹ Source : Auteur

⁶⁰ Formlabs. « *Photogrammetry: Step-by-Step Tutorial and Software Comparison* ».

⁶¹ Wikipedia

Nuage de points clairsemé⁶² : nuage de points des points composé uniquement points homologues

Orientation globale⁶³ : L'étape d'orientation détermine les paramètres extrinsèques tel que la position de l'appareil photo et la direction de la prise de vue.

RAW⁶⁴ : *est la désignation générique d'un type de fichier d'images numérique issues d'appareils photos numériques ou de scanners. Il contient les données brutes du capteur et les paramètres nécessaires à la transformation en fichier image visible sur écran.*

Recouvrement : pourcentage de superposition de deux photographies.

Régression linéaire⁶⁵ : modèle de régression qui cherche à établir une relation linéaire entre une variable, dite expliquée, et une ou plusieurs variables, dites explicatives.

Résolution⁶⁶ : Nombre de pixels par photo.

⁶² Formlabs. « Photogrammetry: Step-by-Step Tutorial and Software Comparison ».

⁶³ Culture 3D Cloud : Guide pour la prise de vue photogrammétrique

⁶⁴ Wikipedia

⁶⁵ Wikipedia

⁶⁶ Valente, Clément. « Photogrammétrique : Comment bien prendre les photos ? Numérisation 3D & Construction », 12 février 2019.

Bibliographie



BIBLIOGRAPHIE

Photogrammétrie

Pierre Grussenmeyer, *Photogrammétrie architecturale et modélisation 3D du patrimoine*, CIPA (Comité International de la Photogrammétrie Architecturale).

Culture 3D Cloud : *Guide pour la prise de vue photogrammétrique*.

Klaus HANKE & Pierre GRUSSENMEYER, *ARCHITECTURAL PHOTOGRAMMETRY: Basic theory, Procedures, Tools* - Corfu, September 2002.

Remondino Fabio, *FROM POINT CLOUD TO SURFACE: THE MODELING AND VISUALIZATION PROBLEM* - Institute of Geodesy and Photogrammetry - Swiss Federal Institute of Technology. ETH Zurich, Switzerland.

Livio de Luca, *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural*, Thèse, 2008.

Pierre Grussenmeyer, *Photogrammétrie, bilan et perspectives de 150 années d'histoires.* – INSA Strasbourg. Mars 2026.

El-Hakim, Sabry Beraldin, Jean-Angelo Picard, Michel Vettore, *Effective 3D Modeling of Heritage Sites*. A. Archives des publications du CNRC.

Delevoie, Caroline, Bruno Dutailly, Pascal Mora, et Robert Vergnieux. « Un point sur la photogrammétrie ». Archéopages. Archéologie et société, no 34 (1 février 2012): 86-89. <https://doi.org/10.4000/archeopages.410>.

Pierre d'Angle. « La photogrammétrie numérique », 6 avril 2021. <https://anabf.org/pierredangle/dossiers/la-representation-du-paysage-de-la-carte-aunumerique/la-photogrammetrie-numerique>.

Yves. Egels, « La photogrammétrie, principes généraux et terminologie ». Collection EDYTEM. Cahiers de géographie 12, no 1 (2011): 41-50. <https://doi.org/10.3406/edyte.2011.1176>.

Formlabs. « Photogrammetry: Step-by-Step Tutorial and Software Comparison ». <https://formlabs.com/blog/photogrammetry-guide-and-software-comparison/>.

Institut IGN, « La photogrammétrie - Institut - IGN », 10 février 2021. <https://www.ign.fr/institut/kiosque/la-photogrammetrie>.

EXID DIAGNOSTIC. « Les domaines d'application de la photogrammétrie », 30 mars 2021. <https://www.exid-diagnostic.fr/les-domaines-dapplication-de-la-photogrammetrie/>.

Polidori, L. « ON LAUSSE DAT'S CONTRIBUTION TO THE EMERGENCE OF PHOTOGRAMMETRY ». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020* (12 août 2020): 893-99. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-893-2020>.

SIHAM YOUNSI, LA PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE APPLIQUEE A L'ARCHEOLOGIE ET AU PATRIMOINE CULTUREL.

« *Qu'est-ce que la photogrammétrie ?* | Solutions de scan professionnelles | Artec3D »..
<https://www.artec3d.com/fr/learning-center/what-is-photogrammetry>.

XpertSource.com. « XpertSource.com ». Détail d'article | Xpert Source. Consulté le 29 mars 2024.
<https://xpertsources.com/fr/blogue/photogrammetrie>.

HALET, Philippe. « *ContextCapture : différence entre points de liaison et points de contrôle* ». beCAD (blog), 12 novembre 2018. <https://www.becad.net/index.php/contextcapture-difference-entre-points-de-liaison-et-points-de-contrôle/>.

Réglages appareil photo :

Valente, Clément. « Photogrammétrie : Comment bien prendre les photos ? Numérisation 3D & Construction », 12 février 2019.
<https://numerisation3d.construction/photogrammetrie-comment-prendre-photos/>.

Escoffier, Eric. « La focale et distance focale : définition et applications pratiques ». *declenchermailin* (blog), 5 mai 2018.

Roué, Damien. « MP #169 : ouverture et f/stop, en finir avec la confusion ». Phototrend, 16 mars 2016.

Saczuk, Dr Eric. « Chapter 1.2 – Setting Up Images », 30 mars 2020.
<https://pressbooks.bccampus.ca/ericsaczuk/chapter/chapter-1-2-setting-up-images/>.

Les outils de numérisation 3D

Fuchs, Alain. Thèse « Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique », 2007.

Jean-Paul Saint-Aubin Thèse : *Le relevé et la représentation de l'architecture*, 2020.

Maumont, Michel. « *L'espace 3D : de la photogrammétrie à la lasergrammétrie* ». In Situ. Revue des patrimoines, no 13 (3 août 2010). <https://doi.org/10.4000/insitu.6413>.

GOULETTE François, Modélisation 3D automatique, outils de géométrie différentielle, Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 1999

« Photogrammétrie ou lasergrammétrie, que choisir ? »
<https://www.abot.fr/blog/-photogrammetrie-ou-lasergrammetrie-que-choisir--n684>.

« Les scanners 3D | Trousses à outils ».
<https://toolbox.hub-charleroi.be/fiche/les-scanners-3d>.

Précision de la modélisation 3D en photogrammétrie :

Kratky, Vladimir. « Normes de Précision pour les Points de Contrôle Photogrammétriques au Sol Expérience simulée ». The Canadian Surveyor 25, no 5 (octobre 1971): 530-41.
<https://doi.org/10.1139/tcs-1971-0115>.

Panorama. « Caractéristiques et bonnes pratiques en photogrammétrie », 12 août 2018.
<https://panorama.ulb.ac.be/caracteristiques-bonnes-pratiques-photogrammetrie/>.

Mostafa Mohammed. Thèse : *Evaluation de la qualité 3D des modèle de bâtiment en photogrammétrie numérique aérienne.*

Maitrise des logiciels

Manuel de l'utilisateur Agisoft Metashape, Edition 2019, Professional Edition, Version 1.5

Playlist Initiation à la photogrammétrie (Metashape & Cloud Compare) : remeuze
<https://www.youtube.com/@Remeuze/playlists>

Merge chunks in Cloud Compare : <https://www.youtube.com/watch?v=0OcN-INChIA>

ORTHOPHOTO : <https://www.youtube.com/watch?v=z4a4lYeevSI>

Les algorithme python

Bibliothèque Scikit Spatial : « Introduction — scikit-spatial documentation ».. <https://scikit-spatial.readthedocs.io/en/stable/index.html>.

Tichadou, Florent Bouchez. « Complexité algorithmique »,

RANSAC

Wagh, Aditya. « adityamwagh/ransac-pcl ». Python, 30 avril 2024.
<https://github.com/adityamwagh/ransac-pcl>.

« Robust line model estimation using RANSAC — skimage 0.23.2 documentation ».
https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/transform/plot_ransac.html.

scikit-learn. « Robust Linear Model Estimation Using RANSAC ».
https://scikit-learn/stable/auto_examples/linear_model/plot_ransac.html.

« RANSAC ». In Wikipédia, 30 janvier 2023.
<https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=RANSAC&oldid=200927993>.

Marco Zuliani, RANSAC for Dummies, , November 19, 2011

DBSCAN

« Exploring Clustering and Visualization of 3D Point Cloud Datausing Python – AI Robotic », 1 septembre 2023.
<https://ai-robotic.de/exploring-clustering-and-visualization-of-3d-point-cloud-datausing-python/>.

scikit-learn. « Demo of DBSCAN Clustering Algorithm ».
https://scikit-learn/stable/auto_examples/cluster/plot_dbscan.html.

« How to Use DBSCAN Effectively. A complete guide on using the most... | by Vijini Mallawaarachchi | Towards Data Science ».
<https://towardsdatascience.com/how-to-use-dbscan-effectively-ed212c02e62>.

scikit-learn. « Sklearn.Cluster.DBSCAN ».
<https://scikit-learn/stable/modules/generated/sklearn.cluster.DBSCAN.html>.

Jauregui, Ander Fernández. « DBSCAN in Python: Learn How It Works ». Ander Fernández (blog), 2 mars 2022.
<https://anderfernandez.com/en/blog/dbscan-python-tutorial/>.

Poux, Prof Florent. « 3D Shape Detection for Indoor Modelling ». 3D Geodata Academy, 4 octobre 2023. <https://learngeodata.eu/3d-shape-detection-for-indoor-modelling/>.

Régression linéaire Hinge Sodevisk :

Some Notes on Least Squares, QR-factorization, SVD and Fitting, Department of Engineering Sciences and Mathematics. January 23, 2013 .Ove Edlund

Annexe



A.1 Script Algorithme MeilleurPlan

A.2 Algorithme Ransac

A.3 Script de l'agorithme DBSCAN

A.4 Histogramme Qualités des Images des séries A & B

A.5 Recouvrement des images

A.6 Diagrammes de répartition des clusters

Annexe

A.1 Script Algorithme MeilleurPlan (Source : Auteur)

```
from skspatial.objects import Plane, Point, Points, Vector, Points
from skspatial.plotting import plot_3d
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy as np

#les points
points = Points([[0, 0, 0], [1, 3, 5], [-5, 6, 3], [3, 6, 7], [-2, 6, 7]])

#Le Meilleur plan par calcul des distances
distance_min_plan = 0.05
liste = []

def MeilleurPlan():
    for pt1 in points:
        for pt2 in points:
            for pt3 in points:
                if not (Points([pt1, pt2]).are_concurrent() or Points([pt1, pt3]).are_concurrent() or Points([pt3, pt2]).are_concurrent()) :
                    #verifie que les points ne sont pas confondus
                    if not Points([pt1, pt2, pt3]).are_collinear() :#verifie que les 3 points ne sont pas alignés
                        plane = Plane.from_points(pt1, pt2, pt3) #on cree l'unique plan contenant ces 3 points
                        n = 0 #on initialise notre compteur

                        for pt4 in points:
                            if plane.distance_point_signed(pt4) <= distance_min_plan :
                                n += 1

                        liste.append((plane, n)) #on stocke tout les plans et toutes les quantités de points

    #on trie la liste des scores dans l'ordre decroissant
    liste_triee = sorted(liste, key=lambda x: x[1], reverse=True)

    #score = pourcentage de points contenu dans le plan
    N = len(points)
    n_max = liste_triee[0][1]
    score = n_max * 100 / N
    print("score =", score, "%")
    print("Le nombre de points contenu dans le plan est "+str(liste_triee[0][1]))

    #graphe
    plot_3d(points.plotter(c='k', s=10, depthshade=False), liste_triee[0][0].plotter(alpha=0.2, lims_x=(-5, 5), lims_y=(-5, 5)),)
    plt.title ("Plan contenant le plus de points")
    plt.show()

    a, b, c, d = liste_triee[0][0].cartesian()
    equation_plan = f"{a}x + {b}y + {c}z + {d} = 0"
    print("Équation du plan:", equation_plan)

MeilleurPlan()
```

A.2 Explication détaillée de l'algorithme Ransac (Source : « RANSAC ». In Wikipédia)

entrées :

data - un ensemble d'observations
modele - un modèle qui peut être ajusté à des données
n - le nombre minimum de données nécessaires pour ajuster le modèle
k - le nombre maximal d'itérations de l'algorithme
t - une valeur seuil pour déterminer si une donnée correspond à un modèle
d - le nombre de données proches des valeurs nécessaires pour faire valoir que le modèle correspond bien aux données

sorties :

meilleur_modèle - les paramètres du modèle qui correspondent le mieux aux données (ou zéro si aucun bon modèle n'a été trouvé)
meilleur_ensemble_points - données à partir desquelles ce modèle a été estimé
meilleure_erreur - l'erreur de ce modèle par rapport aux données

itérateur := 0

meilleur_modèle := aucun

meilleur_ensemble_points := aucun

meilleure_erreur := infini

tant que itérateur < k

 points_aléatoires := n valeurs choisies au hasard à partir des données

 modèle_possible := paramètres du modèle correspondant aux points_aléatoires

 ensemble_points := points_aléatoires

Pour chaque point des données **pas dans** points_aléatoires

si le point s'ajuste au modèle_possible avec une erreur inférieure à t

 Ajouter un point à ensemble_points

si le nombre d'éléments dans ensemble_points est > d

(ce qui implique que nous avons peut-être trouvé un bon modèle,

on teste maintenant dans quelle mesure il est correct)

 modèle_possible := paramètres du modèle réajusté à tous les points de ensemble_points

 erreur := une mesure de la manière dont ces points correspondent au modèle_possible

si erreur < meilleure_erreur

(nous avons trouvé un modèle qui est mieux que tous les précédents,

le garder jusqu'à ce qu'un meilleur soit trouvé)

 meilleur_modèle := modèle_possible

 meilleur_ensemble_points := ensemble_points

 meilleure_erreur := erreur

 incrémenter de 1 l'itérateur

retourne meilleur_modèle, meilleur_ensemble_points, meilleure_erreur

Intégralité script de l'algorithme Ransac implémenté dans python (Source : Auteur)

```
from skspatial.objects import Plane, Point, Points, Vector, Points
from skspatial.plotting import plot_3d
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy as np

#les points

def read_points_from_file(file_path):
    """
    Lit les coordonnées des points à partir d'un fichier texte où chaque ligne correspond à un point avec les coordonnées x, y et z
    :param file_path: chemin du fichier texte
    :return: tableau numpy de forme (num_points, 3) contenant les coordonnées des points
    """
    points = []
    with open(file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            coordinates = line.strip().split()
            if len(coordinates) >= 3:
                points.append([float(coord) for coord in coordinates[:3]])

    return np.array(points)

points = read_points_from_file('A.4.txt')
print('nombre de points du modèle =', len(points))

#RANSAC

def ransac(data, sample_size=3, threshold=0.001, iterations=5000):
    """
    Algorithme RANSAC pour détecter les valeurs aberrantes et ajuster un plan en 3D
    :param data: tableau numpy de forme (N, 3)
    :param threshold: seuil pour les valeurs aberrantes
    :param iterations: nombre d'itérations
    :return: tableau numpy de forme (1, 4) contenant les paramètres du plan ajusté
            et le tableau (M, 3) des valeurs non aberrantes (inliers)
    """
    best_inliers = np.array([])
    best_plane_parameters = np.array([])

    for _ in range(iterations):
        i, j, k = np.random.randint(0, data.shape[0] - 1, sample_size)
        p1, p2, p3 = data[i], data[j], data[k]
        x1, y1, z1 = p1[0], p1[1], p1[2]
        x2, y2, z2 = p2[0], p2[1], p2[2]
        x3, y3, z3 = p3[0], p3[1], p3[2]

        a = (y2 - y1) * (z3 - z1) - (z2 - z1) * (y3 - y1)
        b = (z2 - z1) * (x3 - x1) - (x2 - x1) * (z3 - z1)
        c = (x2 - x1) * (y3 - y1) - (y2 - y1) * (x3 - x1)
        d = -(a * x1 + b * y1 + c * z1)
        current_plane_parameters = [a, b, c, d]

        norm_of_plane_normal = math.sqrt(a * a + b * b + c * c)
        distances = (
            np.abs(a * data[:, 0] + b * data[:, 1] + c * data[:, 2] + d)
            / norm_of_plane_normal
        )

        inlier_index = np.argwhere(distances <= threshold)
        current_inliers = data[inlier_index]
        if len(current_inliers) > len(best_inliers):
            best_inliers = current_inliers
            best_plane_parameters = current_plane_parameters

    return best_plane_parameters, best_inliers

data = points

# Ajustement d'un plan au jeu de données en utilisant RANSAC avec un seuil de 0.01 et 1000 itérations
params, inliers = ransac(data, threshold=0.01, iterations=1000)
print(f'Paramètres du plan : {repr(params)}')
print(f'Valeurs non aberrantes : {inliers, inliers.shape}')
print(f'Ratio de valeurs non aberrantes : {repr(inliers.shape[0] / data.shape[0])}')

# affichage du score
a,b,c,d= params [0],params [1],params [2],params [3]
equation_plan = f"{a}x + {b}y + {c}z + {d} = 0"
print("Equation du plan:", equation_plan)
print("nombre de points contenus dans le plan =", inliers.shape[0],)

distance_min_plan = 0.01
liste = []

plane = Plane(point=[0,0,-d/c], normal=[a,b,c])

good_points = []
bad_points = []

def score_ransac():
    n = 0 #notre compteur
    for pt in points:
        if abs(plane.distance_point_signed(pt)) <= distance_min_plan :
            n +=1
            good_points.append(pt)
        else:
            bad_points.append(pt)

    N = len(points)
    score = n * 100 / N
    print ("score = ", score,"%","nombre de points=", n)
    return score

score = score_ransac()
good_points_array = np.array(good_points)
bad_points_array = np.array(bad_points)
```

```

# Ajustement d'un plan au jeu de données en utilisant RANSAC avec un seuil de 0.01 et 1000 itérations
params, inliers = ransac(data, threshold=0.01, iterations=1000)
print(f"Paramètres du plan : {repr(params)}")
print(f"Valeurs non aberrantes : {inliers, inliers.shape}")
print(f"Ratio de valeurs non aberrantes : {repr(inliers.shape[0] / data.shape[0])}")

# affichage du score
a,b,c,d= params [0],params [1],params [2],params [3]
equation_plan = f"{a}x + {b}y + {c}z + {d} = 0"
print("Équation du plan:", equation_plan)
print(f"nombre de points contenus dans le plan =",inliers.shape[0],)

distance_min_plan = 0.01
liste =[]

plane = Plane(point=[0,0,-d/c], normal=[a,b,c])

good_points = []
bad_points = []

def score_ransac():
    n = 0 #notre compteur
    for pt in points:

        if abs(plane.distance_point_signed(pt)) <= distance_min_plan :
            n +=1
            good_points.append(pt)
        else:
            bad_points.append(pt)

    N = len(points)
    score = n * 100 / N
    print ("score = ", score,"%","nombre de points=", n)
    return score

score = score_ransac()
good_points_array = np.array(good_points)
bad_points_array = np.array(bad_points)

# Paramètres du plan pour visualiser le plan
X, Y = np.meshgrid(*np.array([data.min(axis=0), data.max(axis=0)])[:, :2].T)

```


A.3 Script de l'algorithme DBSCAN implémentés dans Python (source : Auteur)

Ce que fait l'algorithme : il trouve les clusters et leur taille avec DBSCAN. Le paragraphe *decompte* stocke le nombre d'occurrence de clusters par taille et la renvoie.

```
from collections import OrderedDict
from sklearn.cluster import DBSCAN
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from sklearn import metrics
import matplotlib.animation as animation; animation.writers.list()
import numpy as np
import open3d as o3d

def read_points_from_file(file_path):
    """
    Lit les coordonnées des points à partir d'un fichier texte où chaque ligne correspond à un point avec les coordonnées x, y et z
    :param file_path: chemin du fichier texte
    :return: tableau numpy de forme (num_points, 3) contenant les coordonnées des points
    """
    points = []
    with open(file_path, 'r') as file:
        for line in file:
            coordinates = line.strip().split()
            if len(coordinates) >= 3:
                points.append([float(coord) for coord in coordinates[:3]])
    return np.array(points)

points = read_points_from_file('A.1.Sub.txt')
print('nombre de points du modèle =', len(points))

point_cloud = o3d.geometry.PointCloud()
point_cloud.points = o3d.utility.Vector3dVector(points)

# cluster

# DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) algorithm

eps = 0.2 # Distance threshold for points in a cluster
min_points = 10 # Minimum number of points per cluster
labels = np.array(point_cloud.cluster_dbscan(eps=eps, min_points=min_points))

max_label = labels.max()
print(f"Il y a {max_label + 1} clusters")

colors = plt.get_cmap("tab10")(labels / (max_label if max_label > 0 else 1))
colors[labels < 0] = 0
point_cloud.colors = o3d.utility.Vector3dVector(colors[:, :3])

# o3d.visualization.draw_geometries([point_cloud])

# Fonction pour isoler un cluster
def get_cluster_point_cloud(original_pcd, labels, cluster_index):
    cluster_indices = np.where(labels == cluster_index)[0]
    cluster_points = np.asarray(original_pcd.points)[cluster_indices]
    cluster_colors = np.asarray(original_pcd.colors)[cluster_indices]

    cluster_pcd = o3d.geometry.PointCloud()
    cluster_pcd.points = o3d.utility.Vector3dVector(cluster_points)
    cluster_pcd.colors = o3d.utility.Vector3dVector(cluster_colors)
    return cluster_pcd

# Display clusters (label i)
clusters = []
for index in range(max_label):
    cluster = get_cluster_point_cloud(point_cloud, labels, index)
    clusters.append((cluster, len(cluster.points)))

#decompte
compteur = {}
for cluster, nombre in clusters:
    if nombre in compteur:
        compteur[nombre] = compteur[nombre] + 1
    else:
        compteur[nombre] = 1

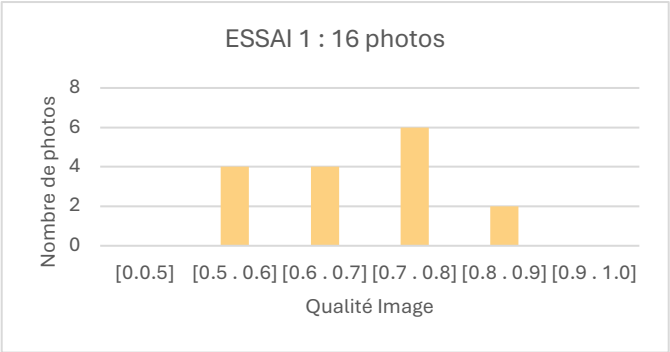
# Trier le dictionnaire par clé en ordre décroissant et créer un OrderedDict
compteur_ordonnee = OrderedDict(sorted(compteur.items(), key=lambda item: item[0], reverse=True))

# Afficher le résultat
print(compteur_ordonnee)

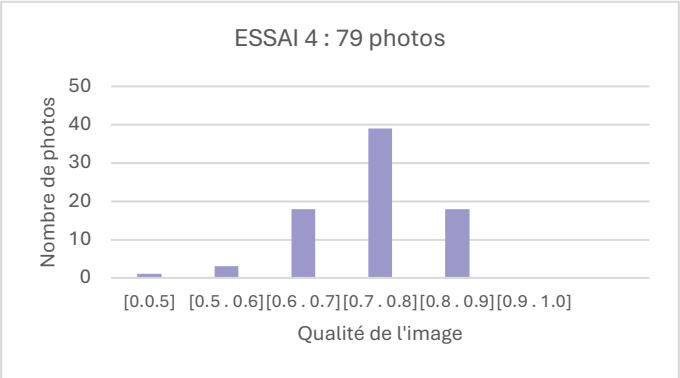
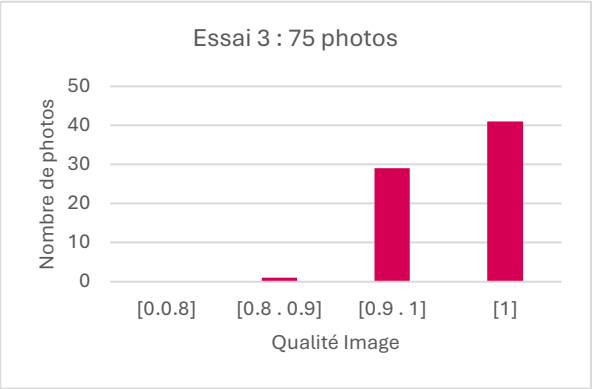
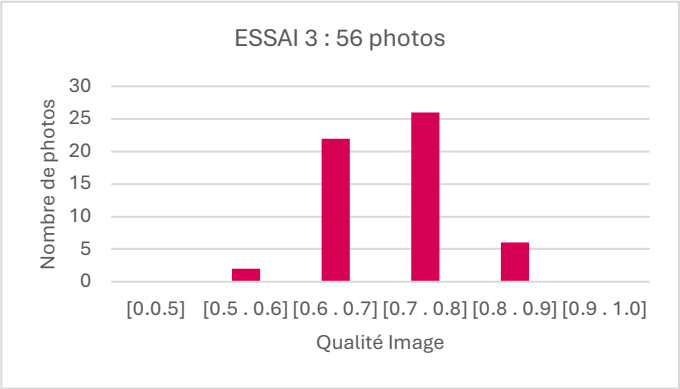
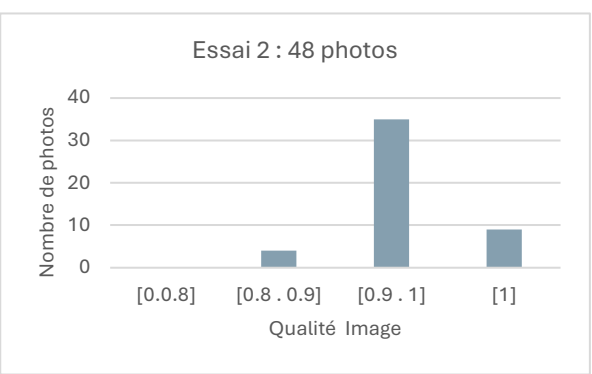
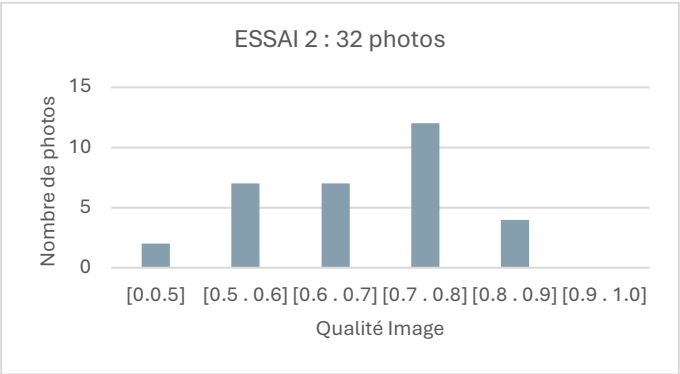
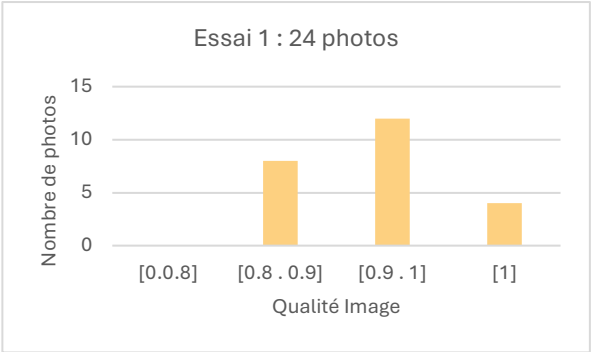
o3d.visualization.draw_geometries([cluster[0] for cluster in clusters])
```


A.4 – Histogramme Qualités des Images des séries A & B (Source : Auteur)

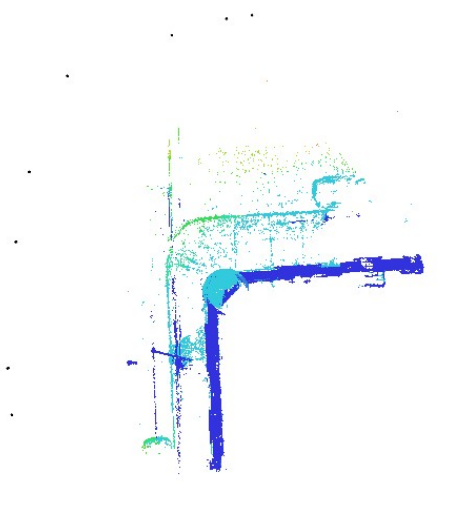
HISTOGRAMME DES QUALITÉS D'IMAGE OBTENUS POUR LA SÉRIE A (AVEC APPAREIL PHOTO)



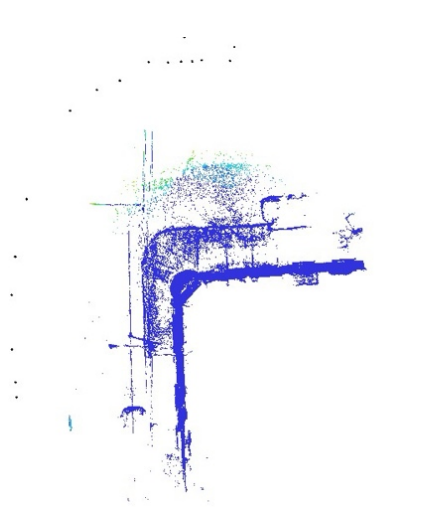
HISTOGRAMME DES QUALITÉS D'IMAGE OBTENUS POUR LA SÉRIE B (AVEC IPHONE XR)



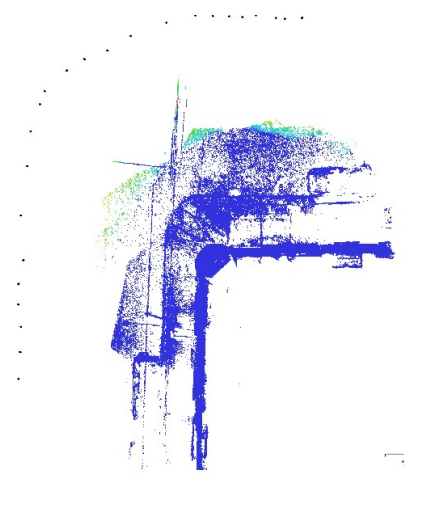
A.5 – Recouvrement des images – statistique issues de Metashape (Source : Auteur)



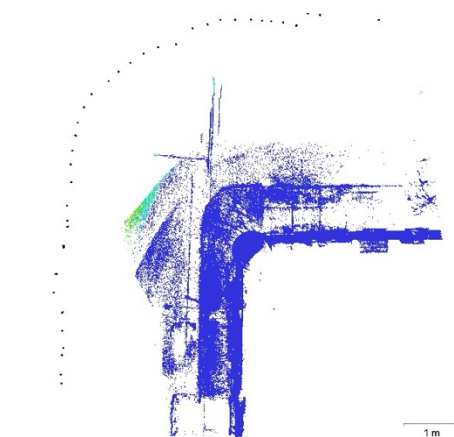
ESSAI A.1 : RECOUVREMENT DES 16 PHOTOS



ESSAI A.2 : RECOUVREMENT DES 32 PHOTOS



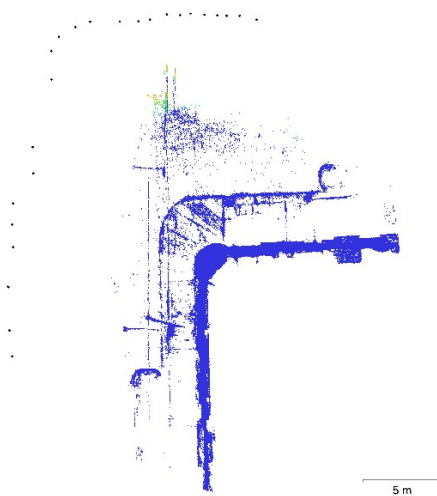
ESSAI A.3 : RECOUVREMENT DES 56 PHOTOS



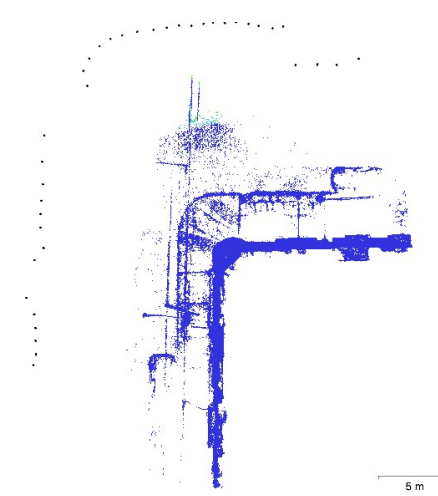
ESSAI A.4 : RECOUVREMENT DES 79 PHOTOS



ESSAI B.1: RECOUVREMENT DES 26 PHOTOS



ESSAI B.2: RECOUVREMENT DES 48 PHOTOS



ESSAI B.3: RECOUVREMENT DES 75 PHOTOS

A.6 – Diagrammes de répartition des clusters (Source : Auteur)

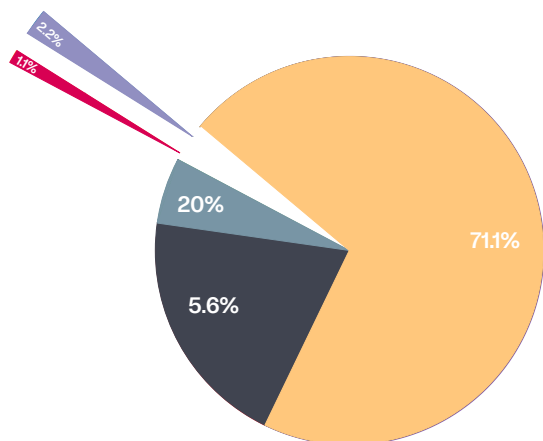


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE A.1

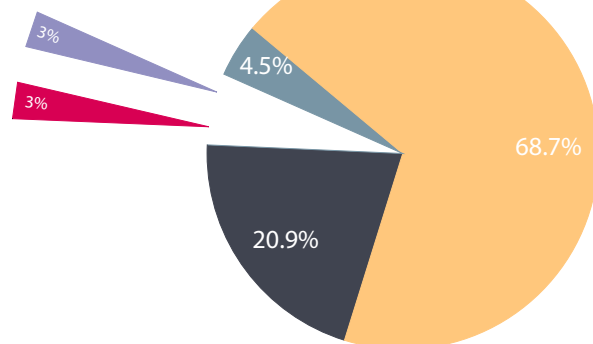


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE A.2

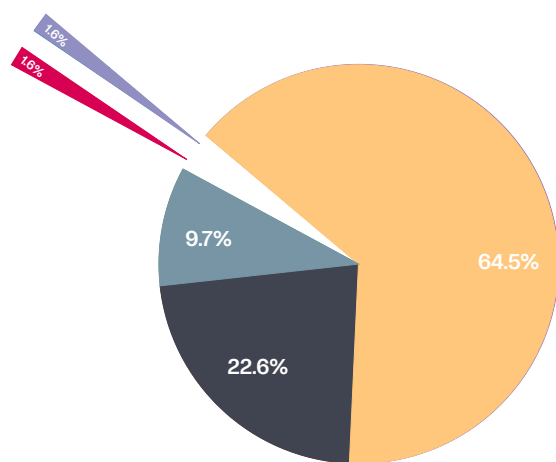


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE A.3

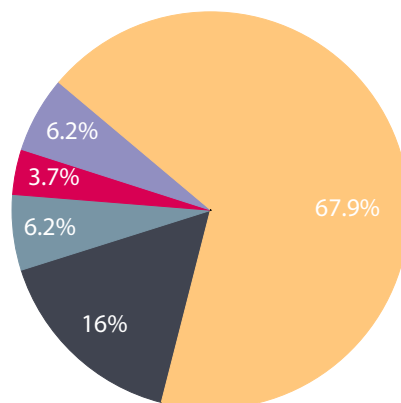


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE A.4

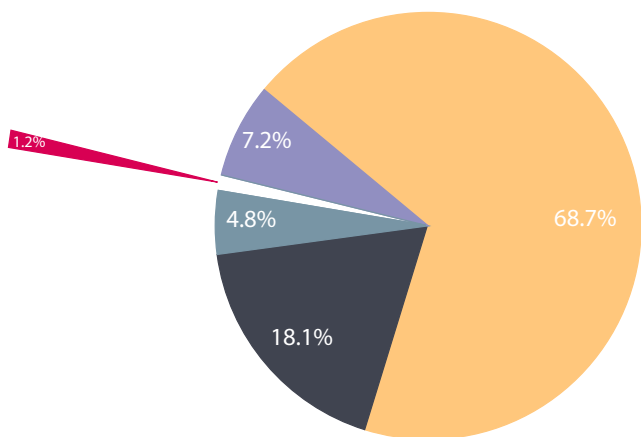


FIGURE: RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE B.1

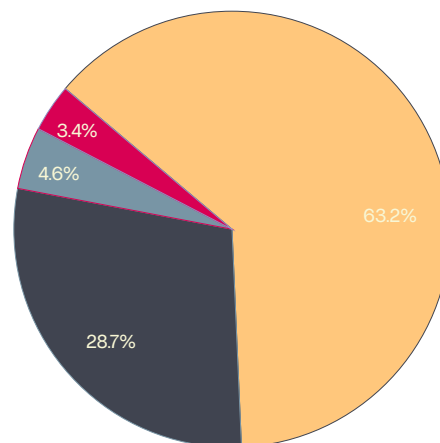


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE B.2

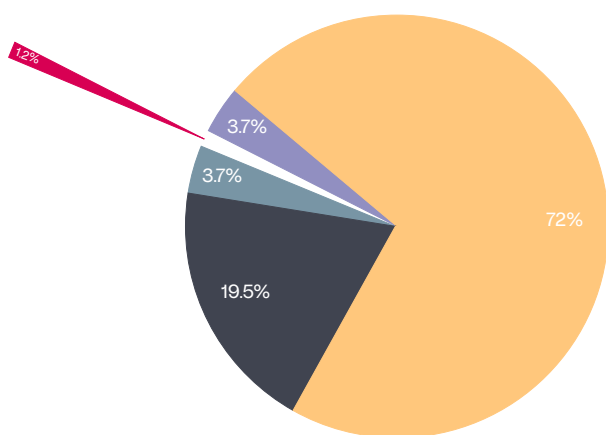


FIGURE : RÉPARTITION CLUSTERS NUAGE B.3

