

---

## Étude automatisée de la qualité d'une reconstruction photogrammétrique selon les prises d'image

**Auteur :** de Lame, Thomas

**Promoteur(s) :** Lebeau, Frédéric; Hallot, Pierre

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2021-2022

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/15812>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---



**ÉTUDE AUTOMATISÉE DE LA QUALITÉ D'UNE  
RECONSTRUCTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE SELON  
LES PRISES D'IMAGES**

**THOMAS DE LAME**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022**

**CO-PROMOTEURS : SAMUEL DUBOIS, FRÉDÉRIC LEBEAU ET PIERRE HALLOT**





© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique <sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority <sup>2</sup> of Gembloux Agro-Bio Tech.

This document is the sole responsibility of its author

---

1. L'autorité académique est représentée par le promoteur, membre du personnel enseignant de GxABT (Frédéric Lebeau)

2. The academic authority is represented by the thesis supervisor, a member of the GxABT teaching staff (Frédéric Lebeau)



**ÉTUDE AUTOMATISÉE DE LA QUALITÉ D'UNE  
RECONSTRUCTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE SELON  
LES PRISES D'IMAGES**

**THOMAS DE LAME**

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
L'ENVIRONNEMENT**

**ANNÉE ACADEMIQUE 2021 - 2022**

**CO-PROMOTEURS : SAMUEL DUBOIS, FRÉDÉRIC LEBEAU et PIERRE HALLOT**



# Remerciements

Ce Travail de Fin d'Études n'aurait jamais pu aboutir sans l'aide indéfectible de plusieurs personnes à qui je souhaite témoigner toute ma gratitude :

Tout d'abord, Samuel Dubois, pour ton enseignement et ton encadrement. Tes conseils avisés ont grandement contribué à guider mon travail et à alimenter mes réflexions. Ton accueil au sein du Centre Scientifique et Techniques de la Construction (CSTC) m'a fourni un cadre de travail adapté et professionnel.

Alexey Pasumansky, pour le support qu'il fournit au logiciel Agisoft Metashape. Sans vous, ce travail n'aurait jamais pu voir le jour.

Mes promoteurs, Frédéric Lebeau, du département Biosystems Dynamics and Exchanges (BIODYNE) et Pierre Hallot, de la Faculté d'Architecture de Liège, département Art, Archéologie et Patrimoine (AAP).

Hugo de Lame : un immense merci pour le temps accordé à la relecture de mon document et la correction de ses imperfections.

Gaspard Estenne, Baptiste de Martear, Sam Ligot, Thibaut de Clerck, Clara Lhoest, mes compagnons de travail : votre entourage m'a motivé à donner le meilleur de moi-même.

Emma de Smet, Anaïs Buret, Martin Jacob, Anne-Catherine Renard, Zoé Rousseau ; amis et camarades : votre soutien moral et intellectuel m'a beaucoup aidé lors de la finalisation de ce travail.

Mes parents, mon frère et ma sœur : merci d'être là pour moi, votre présence constitue une de mes plus grandes forces.





## Résumé

Dans le domaine de la construction, il est important de pouvoir capturer la réalité de manière complète et précise. Avec le scanning laser, la photogrammétrie est la technologie la plus employée à cet effet. Elle vise à recréer un objet sous forme de nuage de point depuis des images prise autour de celui-ci. Cependant, les meilleures pratiques pour effectuer un relevé photogrammétrique sont parfois floues ; et évaluer leurs impacts peut s'avérer laborieux.

En effet, un nombre importants de facteurs viennent influencer la qualité finale d'une reconstruction, autant en termes de paramètres inhérents à l'appareil photo qu'en termes de positionnement et orientation des photos. L'utilisation de drones décuple encore ce phénomène en augmentant le nombre de positions et d'orientations de la caméra possibles. La campagne de relevé devient un processus long et la bonne qualité de la reconstruction finale n'est jamais assurée.

Dans ce contexte, ce travail propose une méthode complètement virtuelle et automatisée permettant la comparaison de la qualité de reconstructions photogrammétriques en créant une campagne de relevé directement dans le logiciel de photogrammétrie Metashape. La qualité s'entend en termes de fidélité géométrique, confiance et exhaustivité de la reconstruction. Elle permet de traiter chaque paramètre individuellement et évalue son impact de manière automatique et rapide. Le processus est ici illustré pour les conséquences de la prise d'image sur la qualité finale du relevé.

Elle permet par exemple de mettre en évidence qu'une prise d'image circulaire est suffisante pour les relevés basse résolution d'objets relativement simples. Si une plus haute résolution est requise ou que l'objet à capturer est plus élaboré, il est alors préférable d'utiliser un planificateur de vol tridimensionnel. Les relevés nadir ne sont jamais à même de retranscrire correctement la géométrie de l'objet.

Le processus, ici appliqué à la position et l'orientation des images, s'inscrit dans un contexte plus grand en fournissant une méthode innovante pour tester l'influence des paramètres utilisés sur un processus de reconstruction photogrammétrique.

## Abstract

In the field of construction, it is important to be able to capture reality completely and accurately. Along with laser scanning, photogrammetry is the most used technology for this purpose. It aims to recreate an object as a point cloud from images taken around it. However, the best practises in photogrammetry are sometimes blurred, and evaluating their impact can be laborious.

Indeed, a lot of important factors influence the final quality of a reconstruction, as much in terms of parameters inherent to the camera as in terms of positioning and orientation of the pictures. The use of drones increases this phenomenon by increasing the number of possible positions and orientations. The survey campaign becomes a long process and the good quality of the final reconstruction is never assured.

Facing this issue, this work proposes a completely virtual and automated method of comparison of photogrammetric reconstruction by recreating a survey campaign directly in the photogrammetry software Metashape. It allows to treat each parameter individually and to evaluate its impact in an automatic and fast way. The process is illustrated here on the consequences of the image capture scenario on the final quality of the survey.

It shows that a circular image capture is sufficient for low resolution surveys of relatively simple objects. If a higher resolution is required or if the object to be captured is more elaborate, it is then preferable to use a three-dimensional flight planner. Nadir surveys are never able to correctly capture the geometry of the object.

The process, applied here to the position and orientation of images, is part of a larger context by providing a new method to test the influence of the parameters of a photogrammetric reconstruction process.

# Table des matières

	Page
Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Table des figures	vii
Liste des tableaux	ix
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 La capture de la réalité dans le domaine de la construction . . . . .	1
1.2 La photogrammétrie comme outil de numérisation . . . . .	3
1.3 La planification de trajectoire drone pour la capture d'objet 3D . . . . .	5
1.4 Les paramètres influençant la reconstruction photogrammétrique . . . . .	8
1.4.1 Les erreurs systématiques intrinsèques . . . . .	8
1.4.2 Les erreurs systématiques extrinsèques . . . . .	11
1.5 Problématique, question de recherche . . . . .	13
<b>2 Matériel et méthodes</b>	<b>15</b>
2.1 Modèle de référence . . . . .	16
2.2 Générations des différents plan de vol virtuel . . . . .	19
2.3 Prise d'image virtuelle . . . . .	26
2.4 Reconstruction 3D issue de la prise d'image virtuelle . . . . .	26
2.5 Comparaison de la reconstruction avec le modèle de référence . . . . .	28
<b>3 Résultats et discussion</b>	<b>31</b>
3.1 Modèle Simple . . . . .	31

3.2	Modèle intermédiaire . . . . .	42
3.3	Modèle élaboré . . . . .	52
3.4	Effets de la complexité des modèles . . . . .	62
3.4.1	Similitudes . . . . .	62
3.4.2	Différences . . . . .	63
3.5	Perspectives . . . . .	64
3.5.1	Amélioration de la méthode . . . . .	64
3.5.2	Utilisation de la méthode . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Annexes</b>	<b>73</b>
6.1	Les quaternions comme rotations dans l'espace 3D . . . . .	74
6.2	Statistique descriptive des distances à la référence pour les différents modèles	74
6.3	Histogramme des distances au modèle de référence . . . . .	76

# Table des figures

1.1	Fig. 1. Logigramme du processus de reconstruction 3D en génie civil (MA et al., 2018).	4
1.2	Orientation d'image nadir et oblique	6
1.3	Trajectoires automatiques disponibles (Pix4D, 2022)	7
1.4	Paramètre d'orientation interne (DAI, FENG et al., 2014)	10
1.5	Capture d'image	10
1.6	Erreur de position des points. Avec a) une bonne b) une mauvaise position de l'appareil photo (DAI, FENG et al., 2014)	12
2.1	Logigramme simplifié de l'algorithme	15
2.2	Logigramme de l'algorithme - model* correspond au modèle de référence appliqué	16
2.3	Modèles de référence proposés	17
2.4	Modèles de références proposés avec la texture synthétique	18
2.5	Zoom de la texture synthétique	18
2.6	Planificateur de vol <i>Mission Plan</i>	19
2.7	Vol nadir : <i>pitch</i> de 0 degrés	21
2.8	Vol oblique : <i>pitch</i> de -22.5 degrés	22
2.9	Vol circulaire	22
2.10	Vol sphérique	24
2.11	Matrice de transformation : Composantes	27
3.1	Boxplot pour le modèle simple	33
3.2	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle simple	34
3.3	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle simple - suite	35
3.4	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle simple	36
3.5	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle simple - suite	37
3.6	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle simple	38
3.7	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle simple - suite	39
3.8	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence simple	40

3.9	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence simple - suite . . . . .	41
3.10	Boxplot pour le modèle intermédiaire . . . . .	43
3.11	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle intermédiaire 44	
3.12	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle intermédiaire - suite . . . . .	45
3.13	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle intermédiaire 46	
3.14	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle intermédiaire - suite . . . . .	47
3.15	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle intermédiaire 48	
3.16	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle intermédiaire - suite . . . . .	49
3.17	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence intermédiaire . . . . .	50
3.18	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence intermédiaire - suite . . . . .	51
3.19	Boxplot pour le modèle élaboré . . . . .	53
3.20	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle élaboré . .	54
3.21	Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle élaboré - suite . . . . .	55
3.22	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle élaboré . .	56
3.23	Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle élaboré - suite . . . . .	57
3.24	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle élaboré . .	58
3.25	Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle élaboré - suite 59	
3.26	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence élaboré . . . . .	60
3.27	Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence élaboré - suite . . . . .	61
6.1	Rotation du vecteur $\vec{p}$ autour de l'axe $\vec{r}$ d'un angle $\theta$ . . . . .	74
6.2	Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle simple . . .	77
6.3	Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle intermédiaire 78	
6.4	Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle élaboré . .	79

# Liste des tableaux

1.1	Comportements de la modélisation photogrammétrique (DAI, FENG et al., 2014) . . . . .	9
2.1	Complexité et dimension des modèles de références selon les axes X, Y et Z . . . . .	19
2.2	Distance entre le coin et le centre de la <i>bounding box</i> . . . . .	23
2.3	Altitude des différents cercles générés autour du modèle de référence . . . . .	24
3.1	Table des résultats pour le modèle simple . . . . .	31
3.2	Table des résultats pour le modèle intermédiaire . . . . .	42
3.3	Table des résultats pour le modèle élaboré . . . . .	52
6.1	Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle simple . . . . .	75
6.2	Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle intermédiaire . . . . .	75
6.3	Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle élaboré . . . . .	75





# 1 | Introduction

## 1.1 La capture de la réalité dans le domaine de la construction

Dans le domaine de la construction, le ‘relevé’ désigne l’action d’effectuer une série de mesures sur un bâtiment ou un terrain afin de le caractériser géométriquement, généralement sous forme de plans. Ceux-ci sont historiquement basés sur l’évaluation de la position de points discrets à la surface de l’objet grâce à la mesure de distances ainsi que d’angles verticaux et horizontaux. Aujourd’hui, les stations totales permettent d’automatiser ces prises de données et de fournir des coordonnées de l’objet scanné de manière très précises; mais la qualité finale de l’objet reste dépendante des actions de l’opérateur, qui doit viser des points d’intérêt sélectionnés sur la façade et les référencer correctement (DUBOIS et al., 2018; ALMUKHTAR et al., 2021).

De nos jours, le relevé géométrique du bâtiment ne se limite plus uniquement à prendre des mesures ponctuelles, mais vise à retranscrire la réalité de manière beaucoup plus complète. Il est possible de mesurer très précisément la position dans l’espace de millions de points sur l’objet d’intérêt grâce aux nouvelles techniques (DUBOIS et al., 2018), permettant de créer des relevés à haute définition ou scan 3D<sup>1</sup>. Le grand avantage face au relevé traditionnel est le niveau de détail qu’ils permettent d’atteindre : ils retranscrivent en effet la microgéométrie et la couleur des surfaces scannées.

Les utilisations d’un relevé géométrique HD<sup>2</sup> sont nombreuses. Ils servent à (DUBOIS et al., 2018; BAYRAK et al., 2005) :

- **Placer un bâtiment dans le temps et l’espace**

Le scan 3D permet de placer un objet dans le temps et l’espace, pour par exemple garder une trace tridimensionnelle d’un site archéologique ou comparer un bâtiment existant avec des plans d’archives (PIROTTI et al., 2013).

---

1. Tridimensionnelle

2. Haute définition

— **Comprendre un bâtiment ou une partie de celui-ci**

Le scan 3D contient énormément d'informations sur l'objet capturé sous forme facilement consultable. La possibilité de coupler des scans intérieurs et extérieurs permet de mieux comprendre l'agencement des structures ou des volumes d'un édifice.

— **Mesurer, diagnostiquer et évaluer**

Le scan 3D permet d'effectuer un grand nombre de mesures sans nécessiter d'aller-retour sur le site. Il permet également de mettre en évidence les défauts et déformations de l'édifice d'intérêt. C'est l'utilisation la plus fréquente .

— **Communiquer**

Le scan 3D permet de percevoir les informations 3D sous différents angles de vues ou de créer des orthophotos de différentes façades des bâtiments. On peut également s'en servir pour créer une maquette photoréaliste de l'élément architectural étudié ou des transcriptions en modèle BIM.

— **Concevoir et fabriquer**

Dans le domaine de la rénovation, un scan 3D permet une préfabrication (remplacement d'un élément architectural endommagé, électricité ou plomberie) sans erreur grâce à une appréhension des espaces existants.

Ils peuvent également servir de base dans un processus de fabrication, en vue par exemple, d'ajouter une annexe à un bâtiment existant.

— **Administrer**

Un scan 3D permet de prendre les décisions en se basant sur une représentation complète des zones d'intérêts, et d'éventuellement mettre en évidence certains aspects non-visibles sur des représentations bidimensionnelles ou lors de simples visites sur site. Les scans transformés en modèles BIM permettent de visualiser des décisions stratégiques quant à des transformations ou des réaménagements de bâtis existant (CRAGGS et al., 2016).

— **Contrôler**

Obtenir une représentation précise de l'existant permet également de contrôler certains aspects géométriques (contrôle sur chantier lors de rénovations). On peut ainsi facilement identifier d'éventuels défauts d'exécution et anticiper leurs conséquences. Pour des projets importants, où de telles requêtes seront répétées, on peut prévoir un processus de contrôle systématique et régulier (via une maquette BIM servant de référence par exemple) (CRAGGS et al., 2016).

Ainsi, les utilisations d'une reconstruction 3D sont multiples et la manière de numériser un bâtiment est différentes d'un cas à l'autre. La résolution et la précision de la mesure requise dépendent directement du besoin final de l'utilisateur. En conséquence, la méthode la plus adaptée sera différente pour chaque besoin.

Pour numériser un bâtiment en entier en haute définition, deux techniques sont aujourd'hui utilisées : le scanning laser, qui se base sur l'analyse de la lumière réfléchie d'un rayon laser sur la surface d'un objet, et la reconstruction photogrammétrique, créée à partir d'images prises autour de l'objet d'intérêt. D'autres techniques existent mais sont minoritaires (LAMAILLE et al., 2016). Elles ne seront pas abordées dans le cadre de ce travail.

### 1.2 La photogrammétrie comme outil de numérisation

La technique la plus fiable pour obtenir des relevés à haute définition est actuellement le scanning laser. Il se base sur l'analyse de la lumière réfléchie d'un rayon laser sur la surface d'un objet. Ce sont des instruments de mesure active dits de "ligne de vue" (ou *line of sight* (LOS)) : Les éléments solides en premier plan créent des "zones d'ombre" en arrière-plan et les objets s'y trouvant ne peuvent être transcrits géométriquement. En conséquence, un objet doit être relevé à partir de plusieurs positions, afin de limiter au maximum ce type de zones invisibles.

La photogrammétrie est une autre technique de relevé haute définition. Elle découle du principe de la stéréoscopie, qui reproduit une perception du relief à partir d'images planes. Elle permet donc de reconstruire un objet 3D à partir d'images prises sous différents angles de vues, qui sont des projections en 2D de cet objet.

Un logiciel de reconstruction photogrammétrique par corrélation d'images commence par détecter des points homologues, qui sont des points distinctifs de l'objet vus sur différentes images. Il produit ainsi un premier nuage de point de faible densité (MA et al., 2018).

À partir de ces points homologues, il détermine les paramètres de position et de calibration de chaque images via des algorithmes itératifs. Ce premier processus d'optimisation est appelé SFM (*structure from motion*).

Une fois les photos calibrées et positionnées dans l'espace, le logiciel recalcule les positions dans l'espace tridimensionnel de tous les pixels de l'image (et non seulement les points homologues) et produit des cartes de profondeur, qui sont par la suite utilisées pour produire un nuage de point beaucoup plus dense que le premier. Ce processus est illustré par la Figure 1.1.

Les logiciels modernes fournissent un degré élevé d'automatisation et l'opérateur ne doit pas disposer de connaissances poussées en photogrammétrie. Cependant, certains facteurs, comme les surfaces réfléchissantes ou unies, les mouvements des ombres ou les flous sur les photos peuvent nuire à la qualité du nuage de points et la qualité finale de la reconstruction 3D de l'objet n'est jamais prévisible. Un autre inconvénient de la méthode réside dans la puissance de calcul élevée requise pour calculer un nuage de points à partir d'un

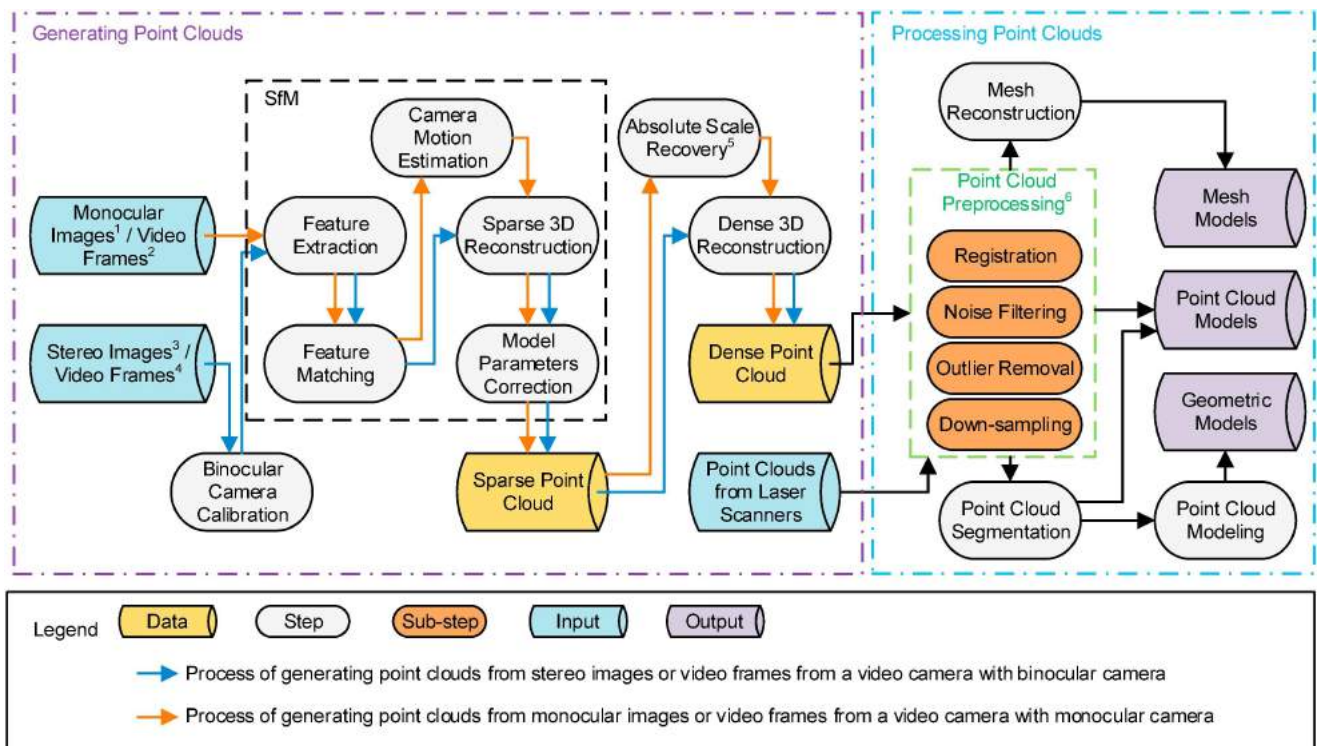


FIGURE 1.1 – Fig. 1. Logigramme du processus de reconstruction 3D en génie civil (MA et al., 2018).

grand nombre de photos. C'est pourquoi le scanning laser est actuellement préféré face à la photogrammétrie (DAI, FENG et al., 2014).

Elle présente néanmoins quelques avantages face au scan laser :

- Elle nécessite un investissement bien moindre face à un scan laser (coûtant plusieurs dizaines de milliers d'euros) étant donné qu'elles sont reconstruites uniquement à partir d'image : un simple appareil photo permet de réaliser un relevé haute définition.
- Le relevé sur le terrain est plus rapide qu'avec un scan laser, qui a besoin de plusieurs prises de données nécessitant une installation fastidieuse sur un trépied.
- Elle permet d'atteindre des zones difficiles d'accès si l'appareil photo est monté sur un drone (toitures par exemple). Une prise d'image par drone permet donc de décupler les possibilités de prise de vues, en termes de position comme d'orientation, face à une prise d'image au sol.

## 1.3 La planification de trajectoire drone pour la capture d'objet 3D

Le vol drone visant la capture de l'objet d'intérêt, la "mission", est généralement planifié au préalable en laboratoire et en tenant compte de la taille de l'objet, des paramètres de la caméra utilisée et de la distance d'échantillonnage au sol (GSD - *Ground Sample Distance*), déterminant la résolution finale et à fortiori sa précision (NEX et al., 2014). Celle-ci se calcule comme suit :

$$GSD = \text{Distance à l'objet} * \frac{\text{Taille des pixels}}{\text{Distance focale}}$$

La taille des pixels et la distance focale sont généralement fixes, conditionnant la distance à l'objet (FEDERMAN et al., 2017).

La photogrammétrie fonctionnant en trouvant des points de similitudes entre les images, elle exige un certain recouvrement entre celles-ci qui conditionne la distances les séparant :

$$\text{Distance entre deux images} = \left(1 - \frac{\% \text{ de recouvrement}}{100}\right) * W$$

avec  $W = \left(\frac{\text{Distance l'objet}}{\text{Distance focale}} * \text{Largeur de l'image}\right)$  ( formule de (FEDERMAN et al., 2017)).

Les valeurs communément utilisée sont un recouvrement longitudinal de 80 % et de recouvrement transversal de 60 %.

La réalisation du vol peut se faire de plusieurs manières :

Manuellement, où c'est à l'opérateur de s'assurer qu'il conserve la bonne valeur de distance et de recouvrement pour la prise d'image. Ces paramètres sont généralement irréguliers (FEDERMAN et al., 2017).

De manière autonome, à l'aide de planificateurs de vols, comme Pix4D (PIX4D, 2022), PrecisionHawk (PRECISIONHAWK, 2022), DJI Flight Planner (DJI : FLIGHT PLANNER, 2022) ou le logiciel libre ArduPilot Mission Planner (PLANNER, 2022). Différentes options sont alors possibles :

- Une trajectoire "tondeuse" (*lawnmower grid*), où la zone d'intérêt est capturée de manière systématique à l'aide de ligne, couvrant ainsi toute la zone d'intérêt. Cette trajectoire peut être soit simple (Figure 1.3a), soit double (Figure 1.3b) : Une deuxième trajectoire, perpendiculaire à la première, est alors réalisée. Cette deuxième grille vise à améliorer la qualité de la reconstruction en augmentant le nombre d'images disponible (EISENBEISS, 2009).

Le choix de l'orientation de la caméra est alors à réaliser (Figure 1.2) :

- Une image nadir<sup>3</sup>, d’angle d’incidence nul (perpendiculaire au sol), convient pour les surfaces planes et pour la génération de sorties 2D comme les orthoimages ou les modèles numériques de surface (DSM - *digital surface model*). Ce type de prise d’image est peu adapté pour la capture d’objet 3D car sur-échantillonne certaines régions (par exemple, les toits), tout en sous-échantillonnant d’autres régions (par exemple, les façades, les surplombs et les détails fins) (LINGUA et al., 2017).
- Une image oblique, d’angle d’incidence non nul (qui n’est pas perpendiculaire au sol) permet d’observer les surfaces verticales, normalement invisibles pour une image nadir. Cette prise d’image permet d’obtenir une reconstruction 3D bien plus fidèle de la réalité (CHIABRANDO et al., 2017). Elle introduit cependant de nouvelles réflexions, comme par exemple l’occlusion liée aux bâtiments, l’inclinaison idoine de la caméra ou les différentes distances au sol (GSD) dans une même image (LINGUA et al., 2017).
- Une trajectoire circulaire : la zone d’intérêt est définie comme le centre du cercle et les images sont prises sous différents angles autour de l’objet (EISENBEISS, 2009). L’orientation des images est telle qu’elle regarde toujours le centre du cercle (Figure 1.3c). Ce type de prise d’image convient aux modèles 3D.

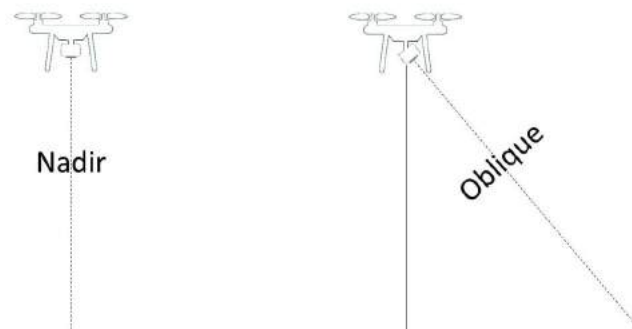


FIGURE 1.2 – Orientation d’image nadir et oblique

Malheureusement, ces vols autonomes sont rarement applicables dans le domaine de la construction et doivent encore souvent être réalisés manuellement. D’un point de vue pratique ou législatif, il peut être nécessaire d’adapter le plan de vol de manière à prendre en compte les zones interdites d’accès au drone ou qui doivent être évitées en cas de dysfonctionnement inattendu de l’appareil. Ces zones peuvent inclure des obstacles, lignes à haute tension, plans d’eau ou autoroutes. Un vol manuel apparaît alors comme plus simple à mettre en oeuvre.

De plus, si la reconstruction 3D exige certains paramètres photogrammétriques, comme une

3. Point situé sous l’observateur en suivant la verticale tirée du point où il se tient et passant par le centre de la Terre, ou dirigée dans le sens de la gravitation. Point opposé du zénith.



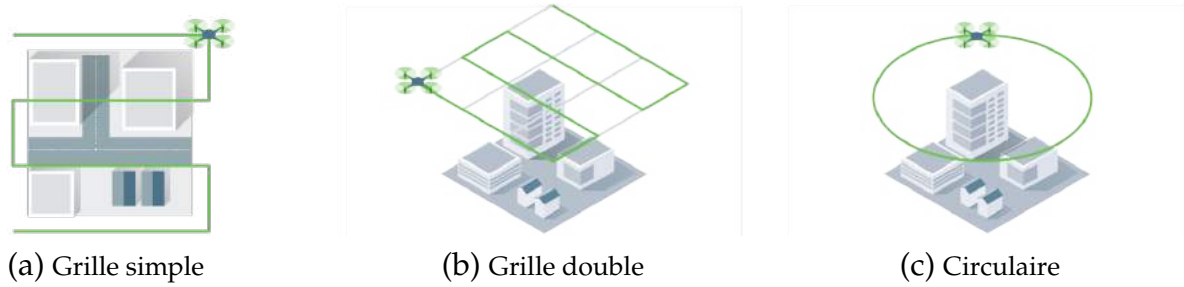


FIGURE 1.3 – Trajectoires automatiques disponibles (PIX4D, 2022)

grande résolution (GSD) ou un grand recouvrement d'image, les techniques de vol autonomes ne sont pas adaptées (KOCH et al., 2019).

En connaissance des limitations liées au manque de flexibilité des vols autonomes classique, la planification automatisée de vols drone tridimensionnels complexes, destinés à la capture d'objet 3D, apparaît comme une solution pertinente pour la capture de structures élaborées.

La recherche générale sur la planification de trajectoire 3D pour le vol de drone (*path planning*) se divise principalement en deux catégories : la capture sans connaissance préalable de l'objet et avec connaissance préalable de l'objet, c'est-à-dire une représentation 3D grossière de celui-ci (ZHANG et al., 2020).

Les méthodes sans modèle visent à explorer des environnements inconnus tout en mettant à jour le modèle reconstruit de manière itérative en fonction du gain d'information et des cartes d'occupation volumétrique (PALAZZOLO et al., 2018; BIRCHER et al., 2018). Cependant, l'objectif de ces méthodes est de créer un plan de vol pour le pilotage automatique de drones et ne se concentre pas sur la complétude ou la précision de la reconstruction 3D. L'autre catégorie, les méthodes basées sur le modèle à basse résolution, prennent un modèle 3D initial comme entrée et y ajoute des points de vue supplémentaires pour affiner le modèle.

Les méthodes basées sur le modèle ne nécessitent pas de calcul en ligne ou de détermination de la meilleure vue suivante; elles visent à atteindre un optimum global de complétude (ROBERTS et al., 2017; HEPP et al., 2019). Le modèle initial peut être acquis et reconstruit à partir d'images d'un vol régulier ou extrait d'une carte altimétrique (SMITH et al., 2018). Un sous-ensemble optimal de points de vue est par la suite sélectionné parmi des points candidats selon des critères différents (par exemple, l'angle d'incidence, l'angle entre la direction du point de vue et la normale de la surface (HOPPE et al., 2012), la parallaxe et la distance (SMITH et al., 2018; HEPP et al., 2019)). Les points de vue sélectionnés sont finalement connectés pour construire des trajectoires de vol réelles.

La précision du modèle acquis est assurée par des indices de qualité photogrammétriques, introduits pour guider la planification, comme la " propagation limitée des erreurs ", qui



approxime la covariance de l'image (OLAGUE et al., 2007).

La conception du plan de vol se base sur le fait que l'information obtenue par l'ajout d'une image ne diminue jamais et que la fonction objectif liée à l'information peut être traitée en différentes fonctions élémentaires (KRAUSE et al., 2014).

Cela permet d'ajouter des points de vue de manière itérative tout en considérant l'optimisation globale, réduisant considérablement la quantité de calcul à réaliser. Le problème peut être formulé comme un problème d'orientation ou être résolu à l'aide de *mixed-integer programming, downhill simplex, or genetic algorithm* (SMITH et al., 2018; MARTIN et al., 2016).

Récemment, Agisoft a annoncé la fonctionnalité de planification de vol drone tridimensionnel dans son logiciel Metashape, qui vise à obtenir des ensembles optimaux de positions de caméra basés sur un modèle grossier. Il crée ainsi un plan de vol en utilisant ces ensembles optimaux (AGISOFT LLC, 2021). Le logiciel étant *closed source*, il est impossible d'obtenir les algorithmes exacts de cette option.

## 1.4 Les paramètres influençant la reconstruction photogrammétrique

La table 1.1 résume le comportement général de la photogrammétrie en ce qui concerne les facteurs influençant ses performances.

L'angle d'intersection correspond à l'angle formé entre les rayons lumineux de 2 photos (voir Figure 1.6).

L'angle d'incidence est l'angle formé entre la normale de la surface de l'objet et le rayon lumineux.

À partir de la table 1.1, les erreurs systématiques rencontrées en photogrammétrie sont regroupées en deux grandes catégories : Les erreurs intrinsèques, dues à l'appareil photo et les erreurs extrinsèques, dues à la position des photos.

### 1.4.1 Les erreurs systématiques intrinsèques

Les erreurs dues à l'appareil photo peuvent être subdivisées en trois catégories : i) distorsions d'images ii) distance à l'image approximative et iii) résolution.

**Distorsion des images** La distorsion des images est illustrée dans la Figure 1.4. Dans l'appareil photo, la distorsion de l'objectif décale un point de l'objet à capturer de sa position réelle  $p(x_p, y_p)$  à sa position sur l'image  $p'(x'_p, y'_p)$ . Un décalage de  $dx, dy$  apparaît alors entre la position géométrique de l'objet et son image.

## CHAPITRE 1. INTRODUCTION

TABLE 1.1 – Comportements de la modélisation photogrammétrique (DAI, FENG et al., 2014)

Facteur	Comportement
Distance à l'objet	Plus grande est la distance → moindre précision (40 m : 6 ~10 cm)
Nombre de photos se recouvrant	Plus le nombre de photos qui se recouvrent est important → meilleure est la précision
Angle d'intersection	Plus on est proche de 90° → meilleure est la précision
Angle d'incidence	Plus on se rapproche de 0°, meilleure est la qualité des images → donc meilleure est la précision
Résolution	Forte corrélation avec la précision (augmentation de 1,6 % par augmentation de 1 Mo )
Texture de l'objet d'intérêt	Plus il y a de caractéristiques → plus de précision ; plus de précision par une texture colorée que par une texture grise/unie
Distance focale	Une distance focale plus longue → une plus grande précision ; à régler pour obtenir une couverture optimale (pour un distance égale à l'objet)
Objectif de l'appareil photo	Moins de distorsion → plus de précision

La correction à apporter pour capturer la position réelle se formule alors comme :

$$x_p = x'_p + dx$$

$$y_p = y'_p + dy$$

Les caméras numériques actuelles calculent la distorsion de l'objectif de l'appareil  $dx$  et  $dy$  comme la somme de la distorsion radiale et de la distorsion de décalage (BEYER et al., 1995; FRASER, 1996).

La distorsion radiale de la lentille est amplifiée dans la direction radiale : plus un point est éloigné du centre de la lentille, plus grande est le décalage entre la position réelle du point et sa position capturée sur l'image.

Comme l'objectif d'un appareil photo est en fait composé d'une combinaison de lentilles, les centres de ces lentilles ne sont pas strictement alignés, ce qui donne lieu à une distorsion de décalage. Les valeur  $dx$  et  $dy$  deviennent :

$$dx = dx_{radiale} + dx_{dcalage}$$

$$dy = dy_{radiale} + dy_{dcalage}$$

Les formules pour modéliser ces distorsions ont été formulées par (BROWN, 1971). Elles ne sont pas détaillées dans le cadre de ce travail. Lors du processus de reconstruction, il est indispensable de modéliser ces facteurs de distorsion  $dx$  et  $dy$ .

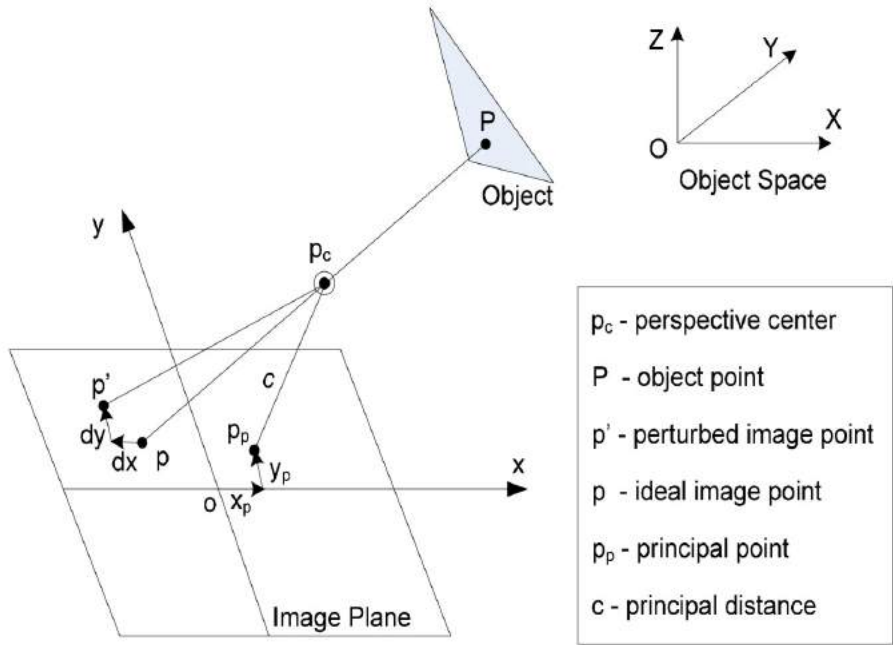


FIGURE 1.4 – Paramètre d’orientation interne (DAI, FENG et al., 2014)

**Distance principale approximative** La distance principale ( $v$ ) dans la modélisation photogrammétrique se définit comme la distance de la ligne perpendiculaire allant du centre optique au plan de l’image de l’appareil photo (Figure 1.5a). Cette distance est couramment approximée par la distance focale  $f$ , facilement retrouvable dans les métadonnées de l’image.

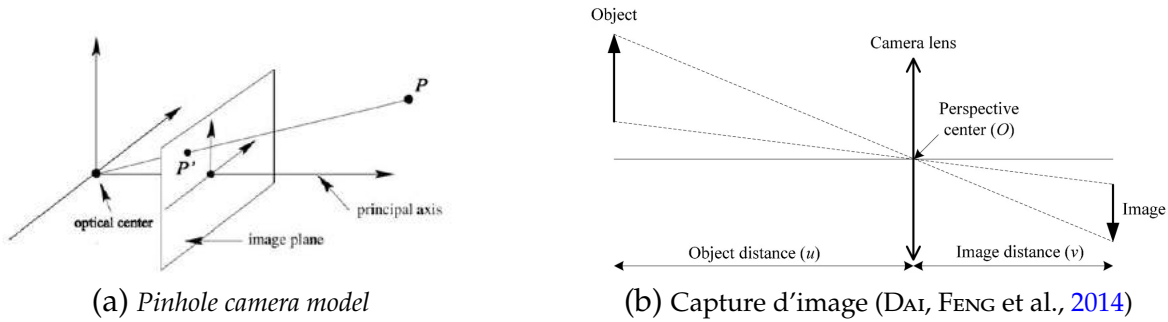


FIGURE 1.5 – Capture d’image

Dans les faits, la distance focale  $f$  est égale à la distance principale  $v$  uniquement si le plan de l’image est parfaitement parallèle au plan contenant la lentille et que l’objet est parfaitement mis au point. La distance de l’objet à la lentille est  $u$  (Figure 1.5b). Le lien entre ces trois paramètres a été formulé par (RAY, 1984) :

$$v = \frac{uf}{u - f} \leftrightarrow v \approx f$$

vu que la distance à un objet  $u$  est généralement beaucoup plus grande que la distance à l'image  $v$ , le dénominateur est approximé, permettant la simplification :  $(u - f) \approx u$ . Une telle approximation introduit des erreurs de mesures lors de l'évaluation de la distance des points au moment du processus de reconstruction (DAI, FENG et al., 2014).

Le logiciel de photogrammétrie utilisé, Agisoft Metashape, minimise ces erreurs lors de la phase de calibration de l'étape *Structure From Motion* de la reconstruction (AGISOFT LLC, 2022).

**Résolution** À une distance focale et à une distance à l'objet donnée, la résolution des images conditionne la limite de détection des détails (voir 1.3 : GSD). Un objet de la taille inférieure à un pixel ne pourra pas être détecté. Ce paramètre explique pourquoi l'utilisation d'une caméra haute résolution est conseillée pour les relevés photogramétriques (DAI, FENG et al., 2014).

### 1.4.2 Les erreurs systématiques extrinsèques

Les erreurs des mesures photogramétriques issues d'imagerie résultent aussi de mauvaises récoltes de données. La distance à l'objet, le recouvrement des photos, les angles d'intersection des images ou les angles d'incidence sont des paramètres qui peuvent conduire à des erreurs de reconstruction. Plusieurs études expérimentales en photogrammétrie ont révélé que la précision d'un réseau augmente avec le recouvrement entre les images (REMONDINO et al., 2006). En termes de positionnement des caméras, les travaux de modélisation de (DAI et LU, 2008) ont révélé que plus l'angle entre les rayons lumineux est proche d'un angle droit (90 degrés), plus l'erreur est faible (Figure 1.6).

Les erreurs humaines liées au positionnement des point de contrôle terrestre (*Ground Control Points* - GCPs) ne sont pas détaillées car non retrouvées dans le présent travail. Un détail de ces erreurs est disponible dans (DAI et LU, 2010).

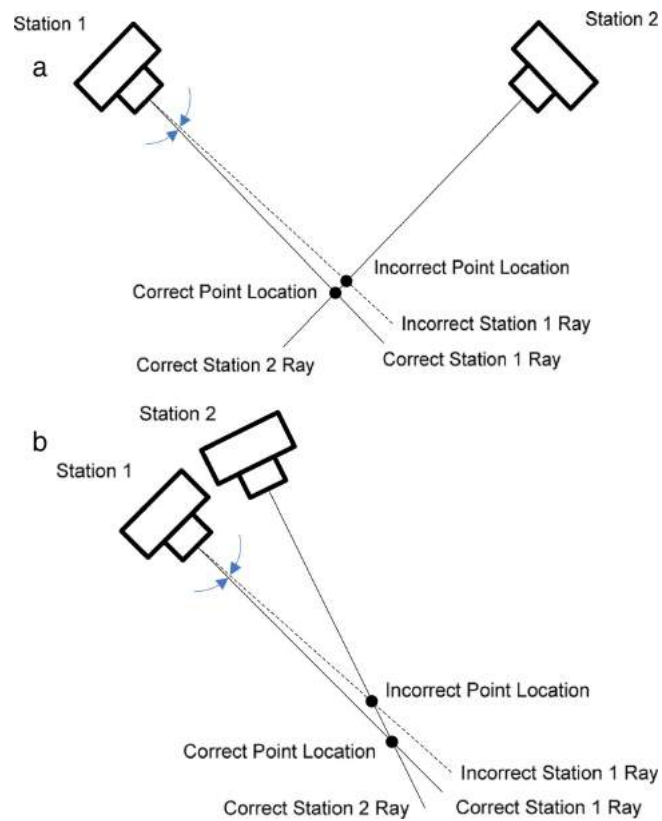


FIGURE 1.6 – Erreur de position des points. Avec a) une bonne b) une mauvaise position de l'appareil photo (DAI, FENG et al., 2014)

## 1.5 Problématique, question de recherche

Face au scan laser, la photogrammétrie laisse tellement de libertés (paramètres de calibration, position et orientation des images, nombre d'images, résolution, chevauchement entre les photos, angles entre différentes photos, ...) que les meilleures pratiques pour l'acquisition de données sont beaucoup moins évidentes qu'avec les autres techniques de relevés HD.

L'utilisation d'un drone pour la prise d'image renforce encore ce phénomène : les possibilités d'orientation et positionnement sont décuplées face à une acquisition d'image au sol et les combinaisons d'orientation et de position dans l'espace sont presque infinies. Seulement, le niveau de détail de la reconstruction 3D (*limit of detection*, LOD) dépendra directement de ces paramètres de relevé et varie selon le besoin final de l'utilisateur (voir 1.1). Les recommandations sont empiriques et il n'existe aujourd'hui aucune manière rapide et simple de comparer l'influence d'un paramètre sur la qualité finale de la reconstruction photogrammétrique.

À chaque acteur correspond donc un besoin, et à chaque besoin correspond un jeu de paramètres pour la prise d'image en vue d'effectuer une reconstruction par photogrammétrie. Par exemple, le niveau de détail géométrique d'un relevé HD ne sera pas le même pour présenter les transformations d'un édifice à des clients que pour remplacer un élément architectural d'un bâtiment historique.

**L'enjeu du travail ici présenté est d'améliorer la correspondance entre le besoin de l'utilisateur et le jeu de paramètres utilisés pour produire un relevé HD de l'objet d'intérêt.**

Afin d'améliorer cette concordance, il est proposé au travers de ce travail une méthodologie de comparaison automatisée de différentes reconstructions photogrammétrique réalisée depuis divers scénarios de capture d'image. La méthode permet de critiquer une reconstruction photogrammétrique et facilite donc la prise de décisions de l'opérateur avant d'effectuer une récolte de données.

Elle évalue la qualité des reconstructions 3D en termes d'exhaustivité, de confiance dans la reconstruction et de fidélité géométrique, quantifiée par la distance par rapport au modèle de référence. Elle utilise divers outils de gestion de nuages de point comme Metashape (logiciel de photogrammétrie (AGISOFT LLC, 2022)) ou CloudCompare (Logiciel de traitement de nuages de points et de maillages 3D (CLOUDCOMPARE, 2022)). Le tout est entièrement virtuel et automatisé afin de pouvoir comparer l'impact d'un paramètre de manière rapide et sans nécessiter d'intervention de l'opérateur ni de récolte de données physiques.



## 2 | Matériel et méthodes

La présente section a pour but de présenter la méthode nouvellement proposée pour comparer différentes reconstructions 3D créée par photogrammétrie. Celle-ci se divise en différentes étapes :

1. Importation de modèles 3D dans un projet géoréférencé (2.1)
2. Génération des plans de vol (2.2)
3. Prise d'image virtuelle (2.3)
4. Reconstruction à partir des images virtuelles (2.4)
5. Comparaison de la reconstruction avec le modèle de référence (2.5)

L'ensemble de ces étapes est répété pour différents modèles, de complexité croissante. Les Figures 2.1 et 2.2 propose un logigramme simplifié et détaillé de l'algorithme.

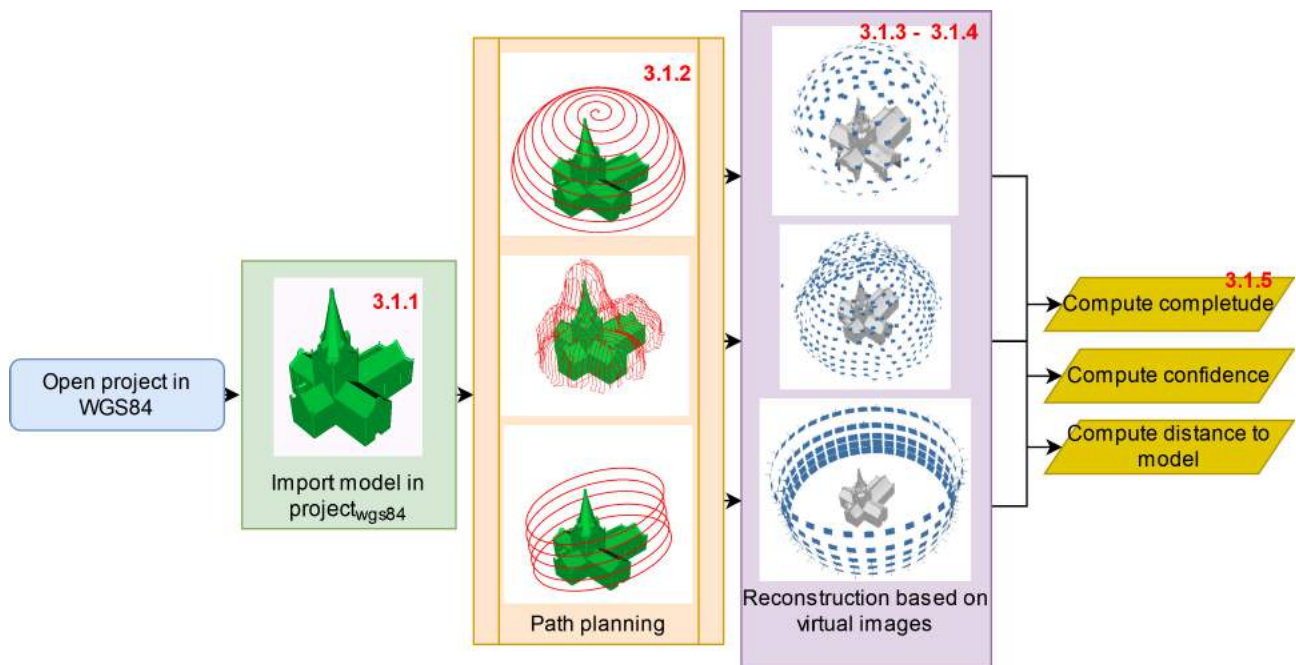


FIGURE 2.1 – Logigramme simplifié de l'algorithme



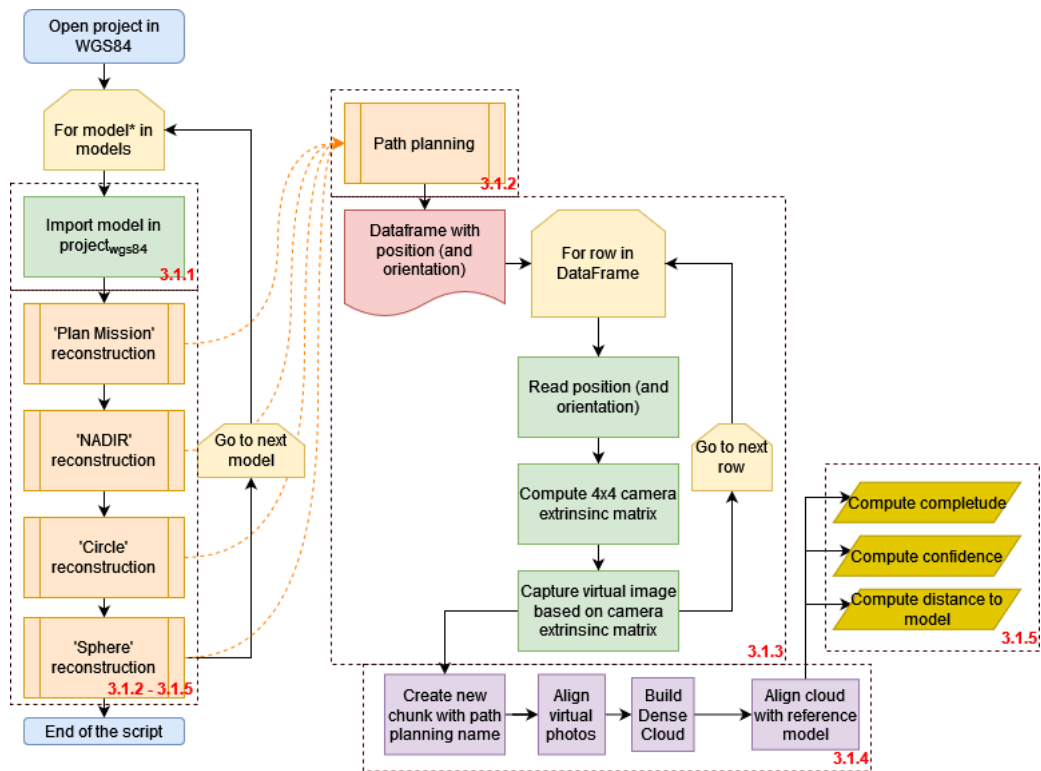


FIGURE 2.2 – Logigramme de l’algorithme - model\* correspond au modèle de référence appliqué

## 2.1 Modèle de référence

Différents modèles 3D de référence de complexité croissante, représentant des églises, ont été choisis depuis le site d’hébergement de fichiers 3D en ligne (SKETCHFAB, 2022) afin de tester les limites de l’algorithme proposé (Figure 2.3).

Il a été choisi de travailler avec des églises étant donné de leur grande disponibilité en ligne. Le premier modèle est relativement simple, avec de larges surfaces planes et peu de détail. Le deuxième augmente progressivement la complexité, avec divers détails tels que des balcons, des surfaces incurvées et des tours, terminées par des dômes et surmontées par des piques. Le troisième modèle vient tester les limites de la méthode : il constitue en une église gothique avec de nombreux arc-boutants, clochers et tours. Les surfaces sont irrégulières et les toits sont surmontés de piques.

Ces modèles sont importés dans Blender (BLENDER, 2022) afin d’en corriger l’orientation avant de les ajouter à un projet géoréférencé (WGS84<sup>1</sup>) précédemment créé dans Agisoft Metashape (AGISOFT LLC, 2022) à l’aide d’image issue d’un drone DJI mavic PRO 2 (DJI Mavic Pro 2022) contenant un GPS. Un projet est dit "géoréférencé" lorsque les nuages de

1. World Geodetic System 1984

## CHAPITRE 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

points sont donnés par rapport à un référentiel terrestre. Chaque point est alors décrit par une longitude, une latitude et une altitude.

Une texture synthétique artificielle a été appliquée à ces différents modèles afin de les rendre "capturable" par le processus photogrammétrique, tout en offrant une base texturale commune. Celle-ci est une image de 8K en noir et blanc, créée via Affinity Photo. Elle a été randomisée via un filtre de texture procédurale ("Urban Camouflage") de manière à ce que le logiciel de photogrammétrie trouve un maximum de points homologues (voir Figure 2.4 et 2.5).

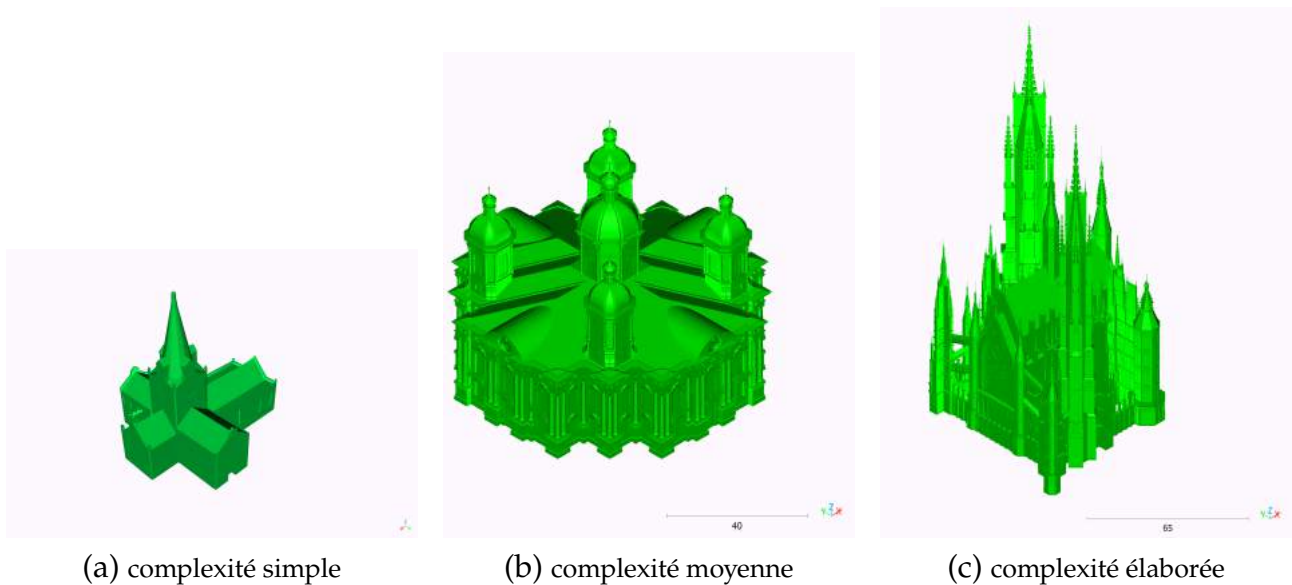


FIGURE 2.3 – Modèles de référence proposés

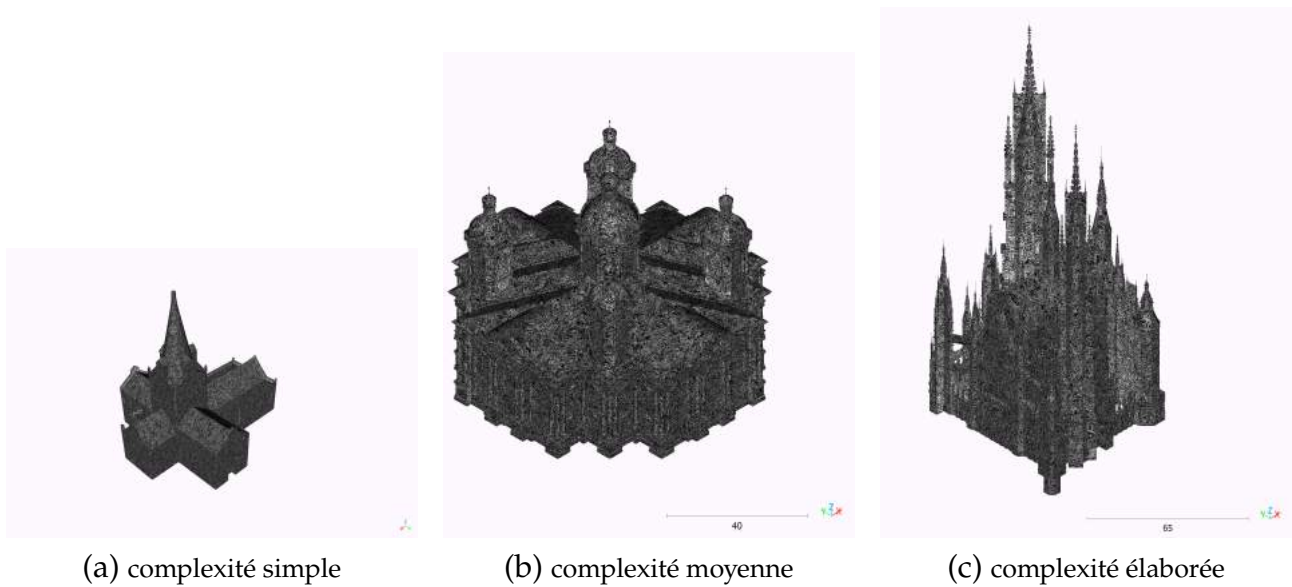


FIGURE 2.4 – Modèles de références proposés avec la texture synthétique



FIGURE 2.5 – Zoom de la texture synthétique

Les dimensions de ces modèles sont disponibles dans la table 2.1.

TABLE 2.1 – Complexité et dimension des modèles de références selon les axes X, Y et Z

	Modèle Simple	Modèle intermédiaire	Modèle élaboré
X [m]	46,7	64,1	55,8
Y [m]	39,8	64,1	69,8
Z [m]	49,1	61,3	150,1
Nombre de faces	4796	347 570	2 441 492

## 2.2 Générations des différents plan de vol virtuel

Différents plans de vols virtuels sont proposés dans le cadre de ce travail :

1. Un plan de vol 3D complexe issu de l'option "*plan mission*" de Agisoft Metashape
2. Un plan de vol en grille avec une orientation des photos nadir et oblique
3. Un plan de vol circulaire autour du centre de l'objet
4. Un plan de vol sphérique autour du centre de l'objet

Lors de cette étape, un tableau contenant la position des photos, parfois leurs orientations est généré pour chaque plan de vol. Celui-ci sera d'abord utilisé pour capturer une image à ladite position et orientation (section 2.3). Il est ensuite réutilisé afin d'aligner grossièrement les nuages de points avec leur référence (section 2.4).

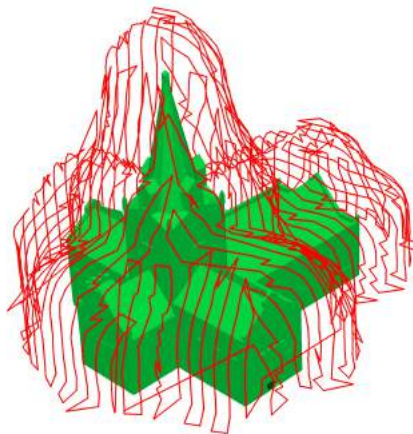


FIGURE 2.6 – Planificateur de vol *Mission Plan*

**Vol 3D complexe issu de l'option "*Plan Mission*" de Agisoft Metashape** Depuis la version 1.7.0, Agisoft propose un planificateur de vol intégré à son logiciel de photogrammétrie Metashape. Celui-ci se base sur une reconstruction 3D grossière de l'objet d'intérêt et va affiner

la qualité de celle-ci en y ajoutant des points de vues supplémentaires. Les emplacements de ces points de vue sont ensuite envoyés au drone sous forme de fichier .kml ou .csv en fonction du logiciel de pilotage de drone utilisé, qui est alors en mesure de réaliser une récolte de données de manière automatique.

Il est également possible d'exporter ces emplacements sous forme de fichier .path, fichier utilisé par metashape dans l'onglet "animation" pour observer le modèle sous différents angles et emplacements. Il contient les colonnes de positions du drone, dans le CRS du chunk<sup>2</sup> où le modèle de référence a été importé (WGS84, vu que le modèle de base est créé à partir de photos géoréférencées) et ses orientations, sous forme de quaternions vectoriels. Ceux-ci sont une extension des nombres complexes et contiennent l'information d'orientation de l'image sous forme de vecteur. Ils sont couramment utilisés en infographie et en robotique car plus stables sur le plan informatique que les matrices de rotation ou vecteurs (HART et al., 1994).

Un quaternion vectoriel est défini comme

$$q = q_w + iq_x + jq_y + kq_z$$

avec :

- $i, j, k$  des nombres complexes tels que  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$
- $q_w$  la partie réelle
- $q_x, q_y, q_z$  sont les parties vectorielles.

Une explication plus détaillée de comment un quaternion permet d'effectuer une rotation autour d'un vecteur est disponible en annexe 6.1.

À partir de ces quaternions, il est possible de transformer les orientations des quaternions sous forme d'angle *yaw*, *pitch*, *roll* par la relation :

$$Yaw = -(2 * (q_w q_z + q_x q_y), 1 - 2 * (q_y^2 + q_z^2)) * (180/\pi)$$

$$Pitch = -\arcsin(\pm 2 * (q_w q_y - q_z q_x)) * (180/\pi)$$

$$Roll = (2 * (q_w q_x + q_y q_z), 1 - 2 * (q_x^2 + q_y^2)) * (180/\pi)$$

avec :

- $pitch = \arcsin(+2 * (q_w q_y - q_z q_x))$  si  $2 * (q_w q_y - q_z q_x) > 1$
- $pitch = \arcsin(-2 * (q_w q_y - q_z q_x))$  si  $2 * (q_w q_y - q_z q_x) < -1$

Les angles sont donnés en degré.

Yaw, pitch, et roll sont les angles communément utilisés par les drones pour retenir les données d'orientation. Ils sont nécessaires à la prise d'image virtuelle, où ils seront transformés en matrice extrinsèque pour chaque image. *Yaw* correspond aux mouvement

2. Un chunk est un sous ensemble d'un projet dans le logiciel Metashape. Il contient une reconstruction photogrammétrique.



## CHAPITRE 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

autour de l'axe Z; *Pitch* aux mouvements autour de l'axe Y et *Roll* au mouvements autour de l'axe X.

Il est ainsi possible de créer un tableau contenant les données de positions géoreférencées et les orientations sous forme de yaw, pitch, roll qui seront par la suite utilisée pour capturer les images virtuelles.

Pratiquement, 3 vols planifiés sont générés à l'aide de l'option *Mission Plan* en faisant varier uniquement le chevauchement des images : un vol avec un chevauchement des images de 30%, un vol avec un chevauchement des images de 50% et un vol avec un chevauchement des images de 80%. La distance de capture à l'objet est de 30 m et l'altitude minimale est de 5 m. Une illustration est disponible à la Figure 2.6.

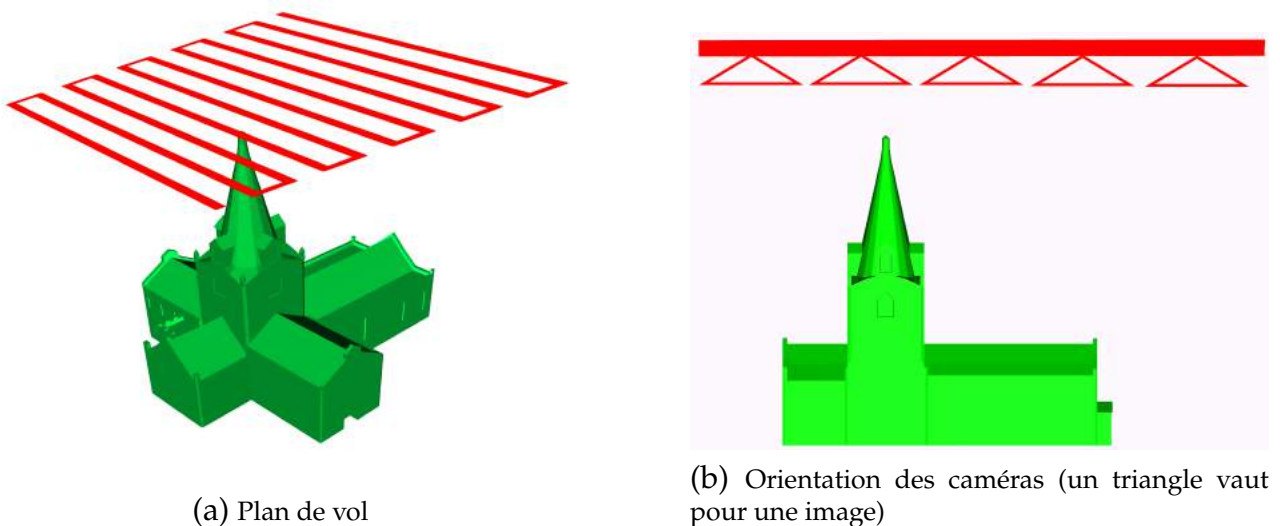


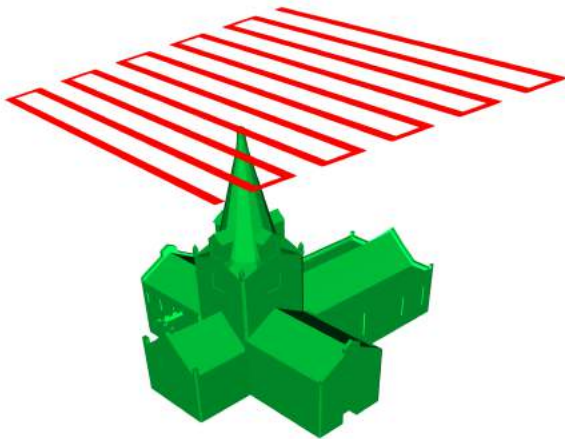
FIGURE 2.7 – Vol nadir : *pitch* de 0 degrés

**Grille, avec orientation nadir et oblique** Le Nadir, en astrologie, est la direction opposée au zénith : elle caractérise la direction verticale descendante d'un objet. En imagerie drone, une image nadir est une image prise perpendiculairement à la surface de l'objet d'intérêt. Cette technique est communément utilisée lors de la reconstruction de plan en 2D (EISENBEISS, 2009).

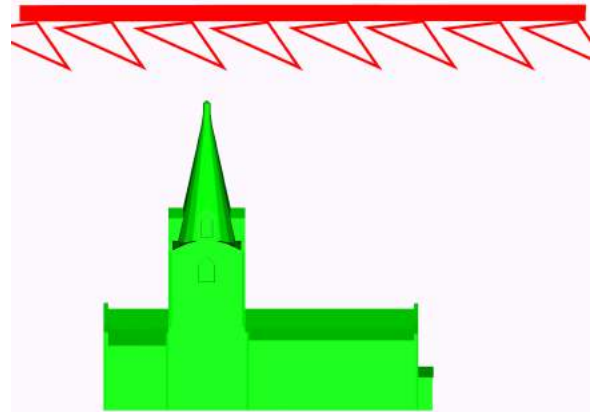
Ainsi, une prise d'image nadir a été proposée. Celle-ci se base sur les limites de l'objet dans le logiciel, sa "*Bounding Box*", et en utilise les coins pour planifier le vol. 10 lignes de photos sont proposées. Les valeurs des angles *yaw*, *pitch* et *roll* sont donc de 0 degré.

De plus, une prise d'image oblique a été générée sur base des positions des images nadir avec un angle "*pitch*" de -22.5 degrés pour correspondre au mieux aux techniques appliquées

sur le terrain (ROSSI et al., 2017) (Figure 2.8). La caméra possède alors deux orientations, en s'inversant à chaque nouvelle ligne de la grille.



(a) Plan de vol



(b) Orientation des caméras (un triangle vaut pour une image)

FIGURE 2.8 – Vol oblique : *pitch* de -22.5 degrés

Tout comme pour le vol 3D complexe (*plan Mission*), il est ainsi possible de créer un tableau contenant les données de positions géoreférencées et les orientations sous forme de yaw, pitch, roll qui seront par la suite utilisées pour capturer les images virtuelle. Une illustration est disponible à la Figure 2.7.

### Vol circulaire autour de l'objet (Figure 2.9)

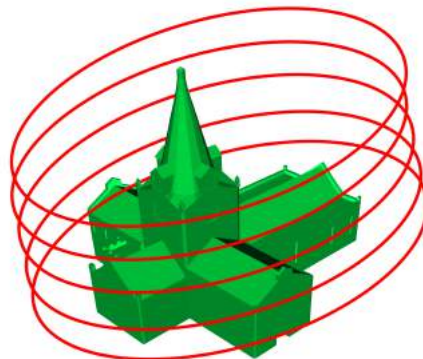


FIGURE 2.9 – Vol circulaire

TABLE 2.2 – Distance entre le coin et le centre de la *bounding box*

Modèle de référence	Distance coin/centre [m]
Modèle simple	70,94
Modèle intermédiaire	102,71
Modèle élaboré	223,28

Un autre placement de caméras couramment utilisé dans les campagnes de relevé d’image drone est le vol circulaire autour de l’objet d’intérêt (SALERI et al., 2019); permettant ainsi d’observer l’objet d’étude sous différents angles de vue. Afin de simuler celui-ci dans Meta-shape, un script a été créé générant des points en cercle autour du centre de la *bounding box*.

Afin de réaliser celui ci, la formule paramétrique d’un cercle dans l’espace a été utilisée :

$$\begin{aligned}
 x &= c_x + a_x * r * \cos(\theta) + b_x * radius * \sin(\theta) + altitude_x \\
 y &= c_y + a_y * r * \cos(\theta) + b_y * radius * \sin(\theta) + altitude_y \\
 z &= c_z + a_z * r * \cos(\theta) + b_z * radius * \sin(\theta) + altitude_z
 \end{aligned}$$

avec :  $(x, y, z)$ , les positions de l’image dans l’espace.

Le cercle dépend de différents paramètres :

- $c = (c_x, c_y, c_z)$ , le centre du cercle.
- $\theta$ , l’angle créé entre le point d’intérêt et le premier point capturé. La première image a donc un angle de 0 degré.
- $r$ , le rayon du cercle. Il est défini comme la distance entre le centre de la *bounding box* et les coins de celle-ci. Le tableau 2.2 contient ces distances.
- $a = (a_x, a_y, a_z)$  et  $b = (b_x, b_y, b_z)$ , deux vecteurs unitaires perpendiculaires à la direction du vecteur unitaire de l’axe de rotation du cercle et entre eux.

Pour tourner autour de l’axe  $z$ , contenant les altitudes, il est nécessaire d’utiliser  $a = (1, 0, 0)_{wgs84}$  et  $b = (0, 1, 0)_{wgs84}$ .

Afin d’obtenir les résultats attendus, il a été nécessaire de faire des changements de repères dans chunk contenant le modèle de référence : les points nouvellement ajoutés sont dans le repère local "*local coordinates system*" et doivent être transformé dans le système de coordonnées WGS84. Le changement inverse a aussi été effectué pour ajouter les vecteurs unitaires  $a$  et  $b$  au projet en "*local coordinates system*".

On obtient ainsi les positions dans le système géoréférencé WGS84 d’un cercle de 36 photos autour du centre de la *bounding box*. La campagne de capture circulaire est répétée à différentes altitudes pour simuler une prise d’image à différentes hauteurs autour du modèle de référence. Les altitudes sont :



TABLE 2.3 – Altitude des différents cercles générés autour du modèle de référence

Modèle de référence	Alt min [m]	Alt 25% [m]	Alt 50% [m]	Alt 75% [m]	Alt 100% [m]
Modèle simple	5	14,00	23,00	35,36	52,71
Modèle intermédiaire	5	15,71	26,43	40,87	63,31
Modèle élaboré	5	37,37	69,75	112,28	159,82

- 5 m, l'altitude minimale, définie au préalable.
- 25 % de la hauteur de la bounding box.
- 50 % de la hauteur de la bounding box.
- 75 % de la hauteur de la bounding box.
- 100 % de la hauteur de la bounding box.

L'ensemble de ces altitudes est présenté en table 2.3.

Il est ainsi possible de créer un tableau contenant les données de positions géoreférencées qui seront par la suite utilisées pour capturer les images virtuelles. Leur orientation est telle que chaque photo regarde le centre de la *bounding box*. Cette partie sera détaillée dans la section 2.3.

### Vol sphérique autour de l'objet (Figure 2.10)

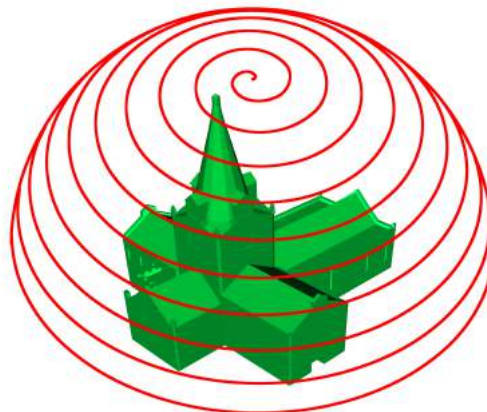


FIGURE 2.10 – Vol sphérique

Enfin, une campagne de relevé sphérique a été incluse car celle-ci maximise la couverture de l'objet par les images et permet d'observer l'objet sous un maximum de points de vue différents.

Afin de réaliser celle-ci, la modélisation du phénomène de phyllotaxie spiralée étendue à une sphère a été utilisée. Il est en effet possible de créer un polyèdre régulier où chaque

## CHAPITRE 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

sommet du polyèdre est un point de la grille à partir d'une série de valeurs données (HARDIN et al., 2016).

Soit une série de nombres uniformément espacés d'une unité et de longueur égale au nombre d'arêtes du polyèdre régulier :

$$I = \{0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, \dots\}$$

Cette série de nombres peut être transformée à la sphère unitaire  $[0, 1]^3$  par la projection cylindrique d'aire égale :

$$(i) \rightarrow (\theta, \phi) : \left( \arccos\left(1 - \frac{2 * i}{n}\right), 2\pi \frac{i}{\varphi} \right)$$
$$(\theta, \phi) \rightarrow (x, y, z) : (\cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, \sin \phi)$$

avec :

- $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1,6180339887$ , le nombre d'or
- $i$ , un élément de la suite de nombre  $I$
- $n$ , la longueur de la suite  $I$ . Il définit également le nombre de sommets du polyèdre régulier.

et

Cette sphère unitaire est finalement centrée autour de l'objet et mise à l'échelle via :

$$x = c_x + r * \cos(\theta) * \cos(\phi)$$
$$y = c_y + r * \cos(\theta) * \sin(\phi)$$
$$z = c_z + r * \sin(\theta)$$

avec :

- $c = (c_x, c_y, c_z)$ , le centre de la sphère. Il correspond au centre de la *bounding box* du modèle étudié.
- $r$ , le rayon du cercle. Il est défini comme la distance entre le centre de la *bounding box* et les coins de celle-ci. La valeur est la même que celle utilisée pour la génération de cercles et est présentée dans la table 2.2.

Ainsi, une sphère de 200 photos est produite autour du centre de la *bounding box* avec comme rayon la distance entre le centre et un coin de la *bounding box*.

Seuls les points situés au-dessus de l'altitude minimale de 5 m ont été retenus, réduisant le nombre total de photos utilisé pour reconstruire le modèle de référence.

Un tableau contenant les données de positions géoreférencées est finalement généré. Il sera utilisé par la suite pour capturer les images virtuelles. Tout comme le vol sphérique, Leur orientation est telle que chaque photo regarde le centre de la *bounding box*. Cette partie sera détaillée dans la section 2.3.

## 2.3 Prise d'image virtuelle

La prise d'image virtuelle s'effectue dans Agisoft Metashape. Elle capture une image de l'objet aux positions et orientations spécifiées, contenue dans les tableaux générés dans la section 2.2. Les images virtuelles héritent de paramètres de la caméra ayant servi à créer le modèle géoréencé (Ici, un DJI mavic PRO avec une résolution de 5472 x 3648 pixels; une distance focale  $f$  de 10.26 mm et une taille de pixel de  $2.41 \times 2.41 \mu m$ ).

Les autres paramètres intrinsèques sont par la suite recalculés lors de l'alignement des photos ( $c_x, c_y$  : Coordonnées du point principal;  $b_1, b_2$  : Coefficients de transformation *Affinity* et *Skew* (non-orthogonalité);  $k_1, k_2, k_3, k_4$  : Coefficients de distorsion radiale;  $p_1, p_2$  : Coefficients de distorsion de décalage).

L'orientation et la position des images est par la suite transformée dans le système de coordonnées ECEF<sup>3</sup>, système de coordonnées de base de Metashape.

De là, le logiciel crée la matrice extrinsèque de la caméra 4x4 correspondante (voir Figure 2.11), contenant les données de rotation et de translation et la transforme dans le "*local coordinates system*" du projet. La dernière ligne comprend uniquement  $[0,0,0,1]$ , rendant la matrice carrée. Elle permet de décomposer cette matrice en une rotation suivie d'une translation.

Le logiciel capture ensuite l'image à la position et orientation donnée à l'aide de cette matrice.

Pour les vols circulaires et sphériques autour de l'objet, une adaptation est faite de telle sorte que l'orientation soit toujours en direction du centre de la *bounding box*. Pour chaque position de photo autour de l'objet, un vecteur en direction du centre de la *bounding box* est créé et la matrice de rotation correspondante est calculée. Celle-ci est incluse à la matrice extrinsèque de la caméra nécessaire pour capturer l'image.

Il est important de souligner que les photos émises par Metashape sont parfaites : les positions et orientation sont exactement celles définies dans le logiciel. Dans le cas d'une prise d'image réelle, une certaine erreur de positionnement et d'orientation serait retrouvée. Cette partie sera détaillée dans la section 3.5

## 2.4 Reconstruction 3D issue de la prise d'image virtuelle

La reconstruction 3D à partir des images virtuelles est effectuée par la méthode classique préconisée par Agisoft Metashape :

1. Création d'un nouveau chunk.

---

3. Earth-centered, Earth-fixed coordinate system. Système de coordonnée non-projeté, par opposition au WGS84 par exemple.

$$transform = \begin{bmatrix} r11 & r12 & r13 & t14 \\ r21 & r22 & r23 & t44 \\ r31 & r32 & r33 & t34 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R = matrice de rotation  
 T = matrice de translation  
 0,0,0,1 = Ligne permettant de rendre la matrice carrée

Matrice de transformation *CameraT*

Composants de la matrice *CameraT*

FIGURE 2.11 – Matrice de transformation : Composantes

2. Chargement des photos virtuelles dans le nouveau chunk.
3. Correspondance des photos avec une limite de points caractéristiques de 80 000 points et de points de correspondance de 30 000.

Les points caractéristiques sont des points observés sur une image et les points de correspondances sont des points où la même caractéristique a été reconnue sur plusieurs autres images.

4. Alignement des caméras.
5. Création des cartes de profondeur avec la qualité sélectionnée à "moyenne" et le filtrage de la profondeur léger.

La qualité moyenne correspond à des images de 1/4 de leur résolution d'origine, résultant en un nuage de point contenant 1/4 de la quantité de points par rapport au traitement du projet en haute résolution. Il a été choisi de travailler avec cette option pour limiter la puissance de calcul nécessaire à la génération des cartes de profondeur. Le filtrage de la profondeur léger permet de conserver les détails importants dans la scène à reconstruire.

6. Génération du nuage de point dense en calculant la confiance dans le modèle, où metashape comptera combien de carte de profondeur ont été utilisées pour générer chaque point du nuage de point dense.

Par la suite, les positions des photos dans le système de coordonnées WGS84 sont ajoutées dans le logiciel sur base du tableau généré lors de la section 2.3. Le but est que la reconstruction 3D soit plus ou moins alignée et à l'échelle avec le modèle de référence.

L'alignement grossier des modèles permet d'assurer le succès de l'algorithme d'ICP <sup>4</sup> responsable de l'alignement fin des nuages de points.

---

4. Iterative closest point. Algorithme employé pour minimiser la différence entre deux nuages de points.

## 2.5 Comparaison de la reconstruction avec le modèle de référence

Enfin, les nuages de points créés par reconstruction 3D sont comparés avec le modèle de référence d'origine. La comparaison porte sur l'exhaustivité des reconstructions, sur la confiance dans les reconstructions et sur la fidélité géométrique, inhérente à la distance au modèle de référence. D'autres indicateurs de qualité sont possibles mais non abordés dans ce travail.

**Exhaustivité** Afin d'en évaluer la complétude, le nuage de points créé est aligné finement avec le modèle de référence à l'aide de l'algorithme d'ICP disponible dans CloudCompare (CLOUDCOMPARE, 2022).

Le modèle de référence est ensuite échantillonné en un nuage de 1 million de points. La distance entre le nuage de points issu de la reconstruction et le nuage de points issu du modèle de référence est calculée, et les points du nuage de points issu de la reconstruction situé à plus de 40 cm du modèle de référence sont considérés comme non reconstruits. À partir du nombre de points reconstruit, un pourcentage est calculé :

$$\% \text{ de complétude} = \frac{\text{points reconstruits situés à moins de 40 cm du modèle de référence}}{\text{points échantillonnés sur le modèle de référence}} * 100$$

Le résultat est néanmoins critiquable : lors de l'échantillonnage du modèle de référence, les points situés à l'intérieur du modèle, et donc impossible à reconstruire, sont tout de même échantillonné : une complétude de 100 % n'est donc pas atteignable (voir Figure 3.17 et 3.26). Une amélioration à apporter serait de sélectionner des modèles parfaitement creux.

**Confiance** Afin d'évaluer la confiance dans la reconstruction, les cartes de profondeur créées dans le nuage de points dense sont réutilisées (voir 2.4). À partir de celle-ci, le logiciel calcule une "confiance en la reconstruction" sur base du nombre de cartes de profondeur utilisées pour situer le point. Plus un point est vu sur beaucoup de cartes de profondeur, plus la confiance dans l'emplacement du point augmente.

Similairement à ce qui a été fait pour la complétude des reconstructions, les points vus par moins de 3 cartes de profondeur sont supprimés et un pourcentage en est calculé :

$$\% \text{ de confiance} = \frac{\text{points vus par au moins de 3 cartes de profondeur}}{\text{l'ensemble des points de la reconstruction}} * 100$$

Le résultat est néanmoins critiquable : si la génération du nuage de points dense reconstruit des "taches", celles-ci seront comptées dans le pourcentage et diminueront celui-ci en augmentant le dénominateur. Les "taches" sont des points homologues aberrants situés loin

du modèle de référence que le logiciel retrouve dans la première étape du processus de reconstruction (Figure 3.2b ou 3.20c par exemple).

**Fidélité géométrique** Enfin, la fidélité géométrique de la reconstruction par rapport au modèle de référence est calculée et analysée. Tout comme pour la complétude des modèles, le nuage de points créé est aligné finement avec le modèle de référence à l'aide de l'algorithme d'ICP disponible dans CloudCompare (CLOUDCOMPARE, 2022). La distance entre la reconstruction et le modèle de référence est calculée et analysée.

Des paramètres statistiques et tests classiques sont calculés :

- Une adaptation du RMSE (*Root Mean Square Error*) appliquée aux reconstructions, par la formule (SUN et al., 2018) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{distance à la référence})^2}{n}}$$

où  $n$  correspond au nombre de points reconstruits et la distance à la référence correspond à  $X_{prediction,i} - X_{observation,i}$  de la formule classique.

- Moyenne, écart-type, minimum, maximum et quartiles
- La quantité de valeurs aberrantes (*outliers*) est calculée par la formule :

$$\text{lower limit} = Q1 - 1.5 * IQR \text{ et } \text{upper limit} = Q3 + 1.5 * IQR$$

Avec  $Q1$ , le premier quartile,  $Q3$ , le troisième quartile et  $IQR = Q3 - Q1$ , l'écart interquartile. Seules les valeurs comprises entre ces limites sont conservées.

La distance considérée ici est celle entre la reconstruction et l'ensemble du modèle : les surfaces planes comprenant beaucoup de points gommant les déformations observables au niveau des arêtes : afin de pousser plus loin l'analyse, il aurait été intéressant d'effectuer cette analyse sur uniquement les arêtes des modèles de référence.



## 3 | Résultats et discussion

La présente section a pour but de présenter et interpréter les résultats. Elle présentera ceux-ci par modèle de référence, à l'aide d'un tableau synthétique ainsi que différentes vues isométriques illustrant celui-ci. Elle exposera ensuite l'effet de la complexité des modèles et terminera sur les perspectives d'amélioration et d'utilisation du travail. Dans un souci de clarté et pour ne pas alourdir le texte, on référera "une reconstruction effectuée à partir d'image ..." comme simplement "une reconstruction ...".

### 3.1 Modèle Simple

TABLE 3.1 – Table des résultats pour le modèle simple

	Chev. 30%	Chev. 50%	Chev. 80%	Nadir	Oblique	Cercle	Sphere
Nombre d'images	113	115	451	209	209	180	144
RMSE	0,19	0,11	0,06	/	0,047	0,11	0,20
% Complétude	93,03	92,26	94,68	2,04	67,45	93,83	71,23
% Confiance	90,09	94,59	96,60	90,56	91,10	97,65	86,22
GSD [mm/pixel]	9,22	9,25	9,19	25,8	26,6	14,2	9

L'analyse du tableau 3.1 démontre une bonne qualité générale de la reconstruction : le RMSE, quantifiant la distance moyenne par rapport à la référence, est situé entre 0,047 et 0,23. Les pourcentages de complétude et de confiance sont presque tous supérieurs à 90 % ; à l'exception de la reconstruction sphérique. La résolution des images, mesurées à l'aide du *Ground Sample Distance* (GSD) est de l'ordre de 9 mm par pixel, à l'exception de la sphère où elle vaut 14,2 mm/pixel.

La reconstruction à l'aide d'image nadir n'a cependant pas obtenu un résultat satisfaisant : la prise d'image est faite avec un seul et unique angle de vue et le logiciel de reconstruction photogrammétrique n'est pas capable d'évaluer correctement la géométrie du modèle de référence (voir Figure 3.2d). Elle ne permet pas à l'algorithme d'ICP l'alignement avec le modèle de référence. Ainsi, le RMSE correspondant n'a pas été calculé et le pourcentage de complétude est très faible (Figure 3.6d).



La reconstruction oblique, quant à elle, est bien plus à même de reconstruire la géométrie du modèle (voir Figure 3.3a). Bien que plus fidèle, elle crée ici tout de même une erreur de géométrie en surestimant la hauteur du clocher (Figure 3.9a).

Les reconstructions du planificateur de vols avec chevauchement d'image de 30 % et 50 % sont créées à partir d'à peu près le même nombre d'images (113 et 115). Il est supposé que cette option du logiciel Metashape n'est pas optimisée pour un chevauchement d'image si faible : l'algorithme de génération des plans de vol est en dessous d'une valeur seuil et sélectionne le même nombre de points de vue pour les deux valeurs de chevauchement d'images. Malheureusement, il est impossible de vérifier cette information car le logiciel est un logiciel propriétaire : le code source de l'algorithme n'est pas consultable.

La reconstruction circulaire semble prometteuse : à l'aide de seulement 180 images, elle est capable d'obtenir une reconstruction presque équivalente à celle effectuée via le planificateur de vol avec recouvrement d'image de 80 %, qui nécessite 451 images. La reconstruction circulaire possède des pourcentage de complétude et de confiance équivalente avec celle issue du planificateur de vol, et obtient un RMSE et un GSD un peu moins performant (0,11 contre 0,06 pour le RMSE et 9,22 contre 14,2 pour le GSD).

De plus, la reconstruction circulaire ne nécessite pas de connaissance préalable de l'objet d'intérêt alors que la reconstruction via le planificateur de vol oui : dans des conditions réelles, utiliser le planificateur de vol nécessite une première prise d'image pour obtenir une reconstruction grossière qui va être affinée à l'aide de nouveaux points de vue (voir 1).

Les surfaces perpendiculaires à l'axes Z (toit et autres) semblent moins certaines (voir Figure 3.5b). Une combinaison avec une prise d'image nadir permettrait d'améliorer cette confiance.

La reconstruction à partir de prise d'image sphérique ne reconstruit que 71 % du modèle de référence et la partie basse du modèle de référence n'est pas reconstruite. En effet, la prise d'image est faite de telle sorte que chaque image soit dirigée vers le centre de la *bounding box*, et le bas du modèle de référence n'apparaît que peu sur les photos. De plus, la confiance dans le modèle est également moindre que dans les autres reconstructions avec 86 % .

Il est intéressant d'observer que la majorité des erreurs de reconstruction se trouvent sur la pointe du clocher (Figure 3.3, 3.5, 3.7 et 3.8) du modèle simple. Les reconstructions à partir du planificateur de vol semblent malgré tout plus à même de reconstruire celui-ci que les autres reconstructions (Figure 3.7).

Les boxplots sont réalisées sur un échantillon de 150 000 points sélectionnés aléatoirement parmi tous les points de la reconstruction donnée. Elles sont présentées avec et sans outliers pour plus de clarté (Figure 3.1). Les outliers situés loin de la médiane résultent des "taches", consistant en des points homologues aberrants trouvés par le logiciel de photogrammétrie situés loin du modèle de référence (Figure 3.2a et 3.2b). Leur distance au modèle de référence est plus élevée et augmente la valeur du RMSE. Le détail des valeurs permettant la construction des boxplots est disponible en annexe 6.1.

### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Leur analyse permet de mettre en évidence que l'ensemble des reconstructions sont plus ou moins équivalentes en termes de distances à la référence : leurs médianes sont toutes très proches de 0 et leur plage de valeur se situe entre -0,04 et 0,04.

La reconstruction nadir n'est pas satisfaisante (Figure 3.2d) et ne permet pas à l'algorithme d'ICP l'alignement avec le modèle de référence. Ainsi, la boxplot et les statistiques descriptives correspondantes n'ont pas été calculés.

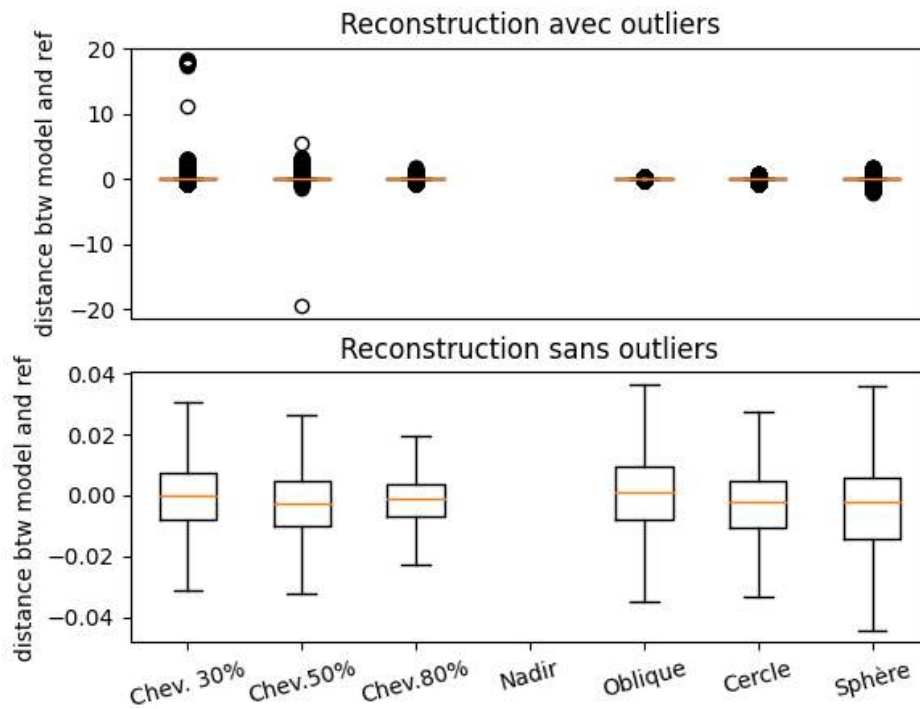


FIGURE 3.1 – Boxplot pour le modèle simple

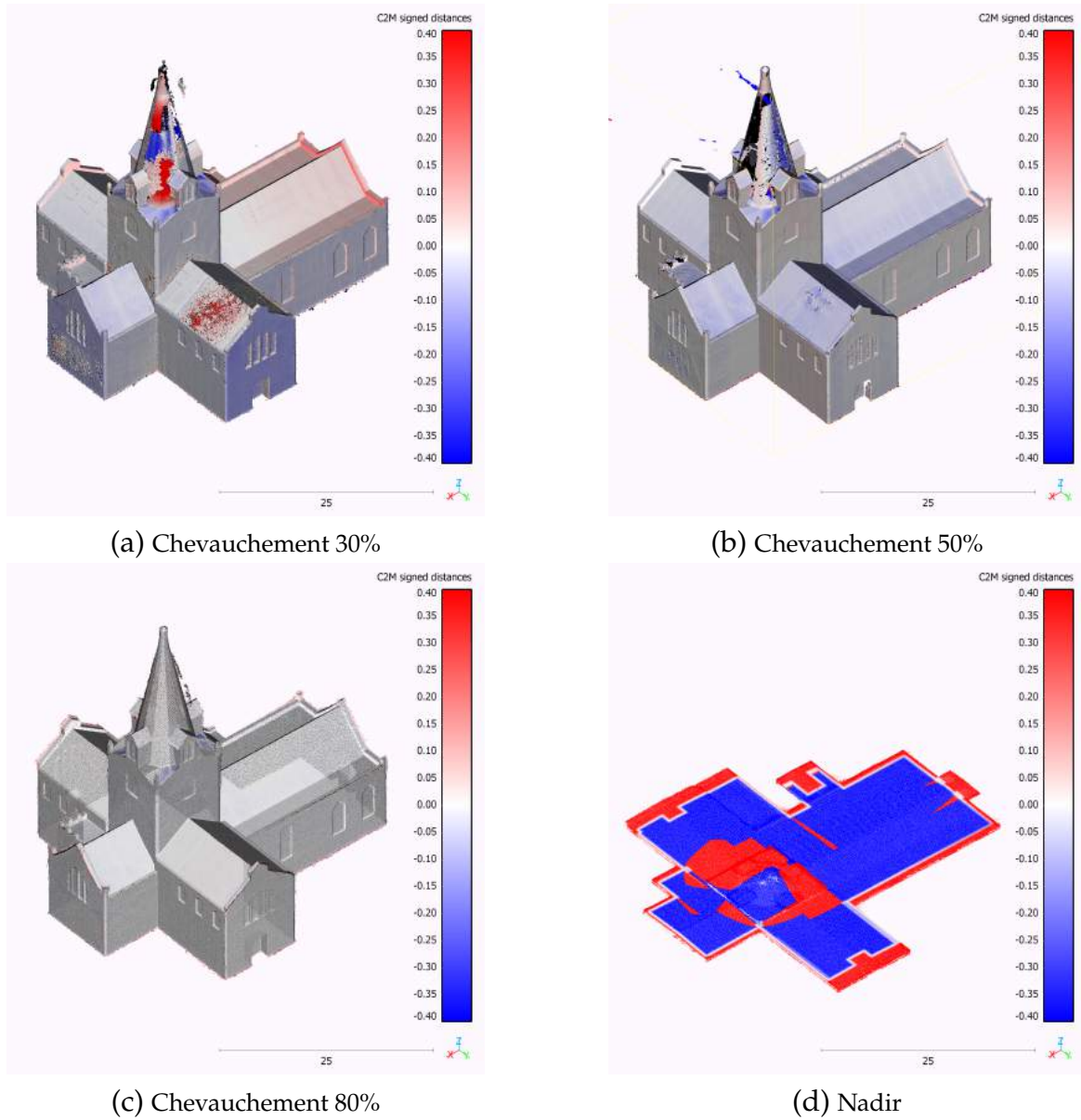


FIGURE 3.2 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle simple

### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

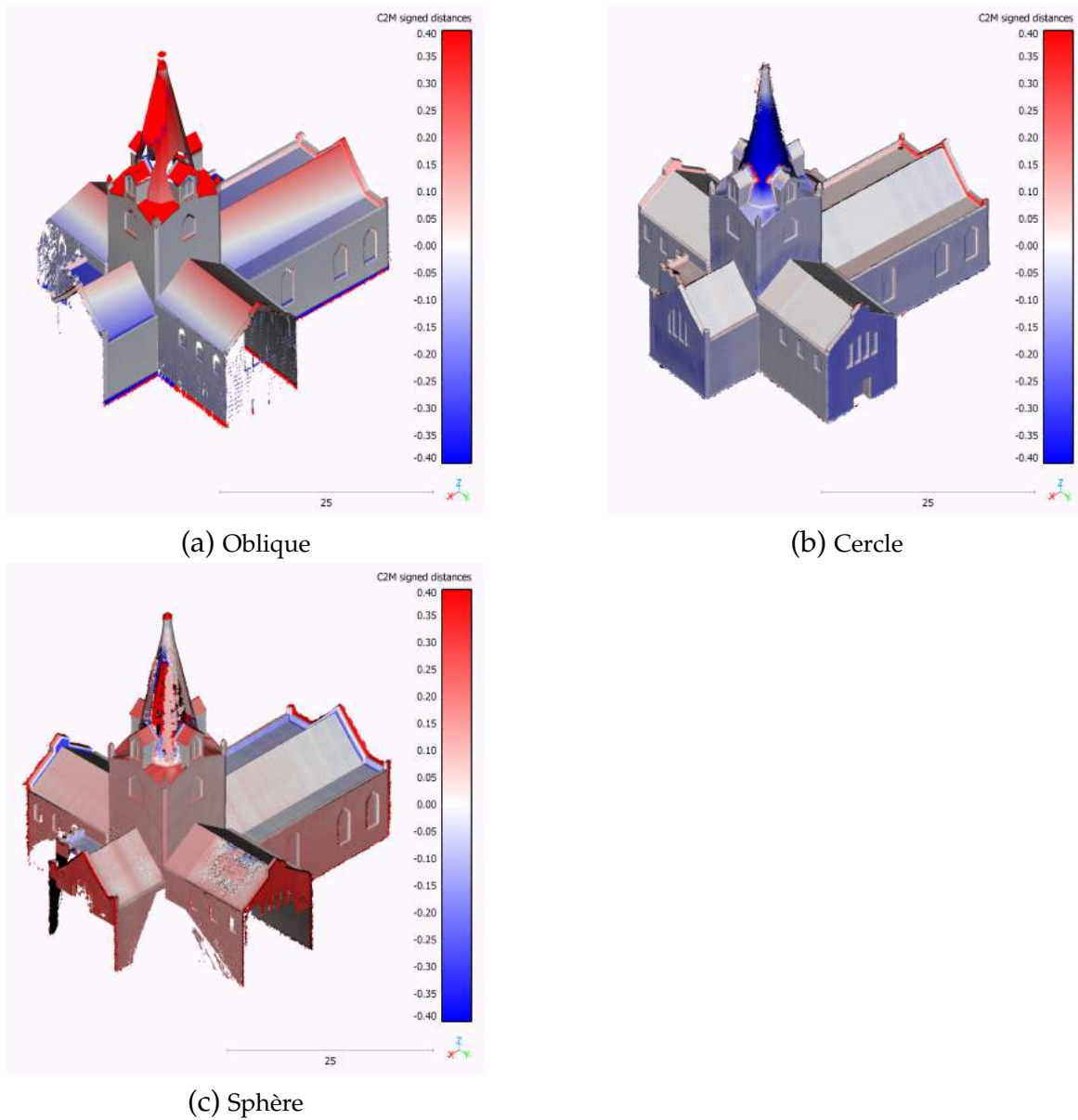


FIGURE 3.3 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle simple - suite

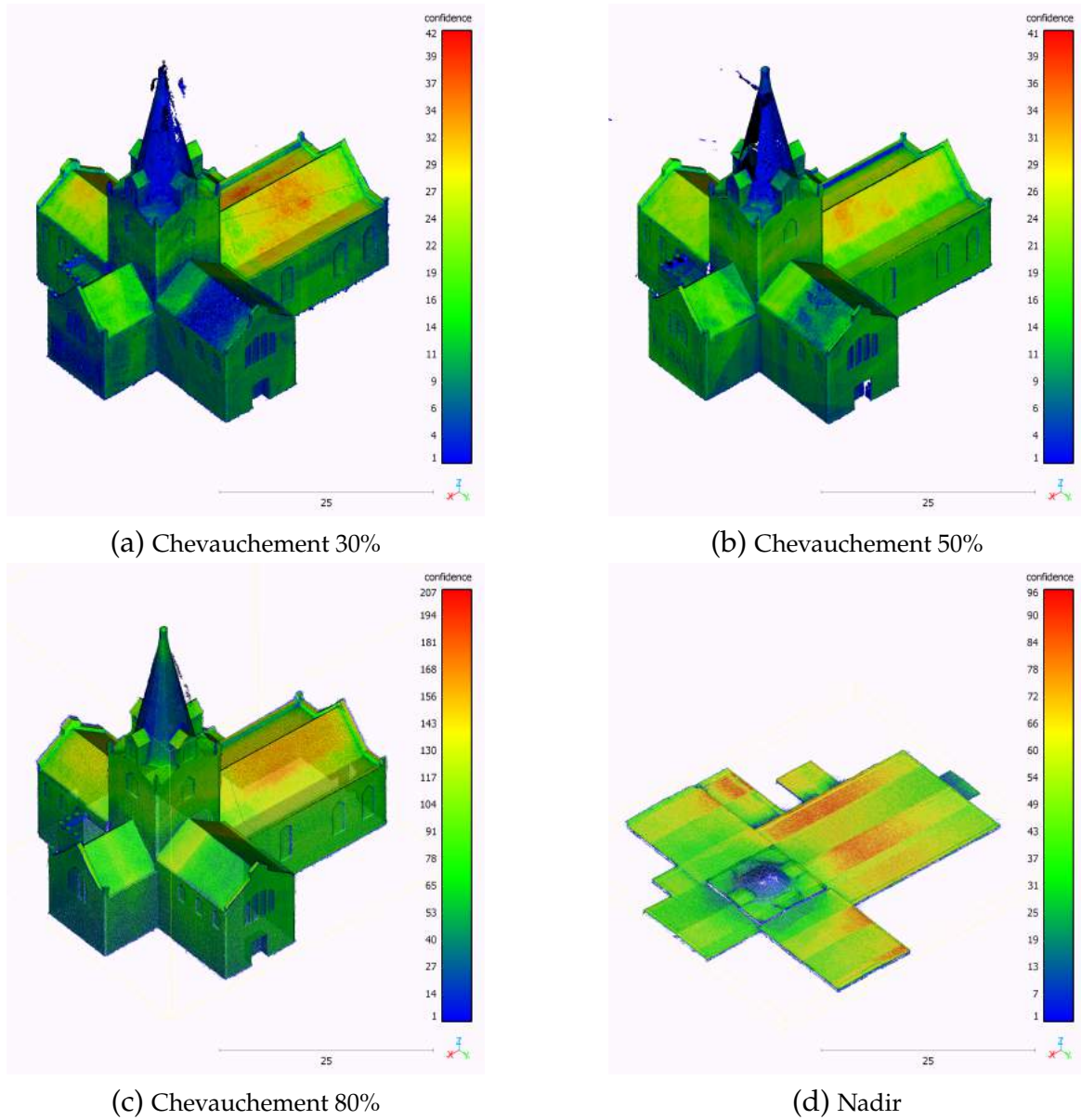
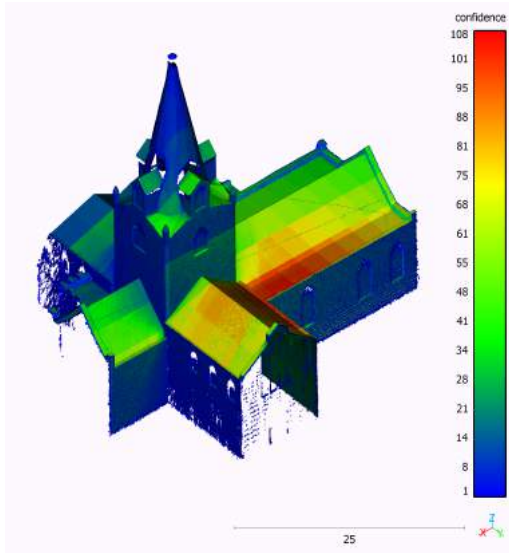
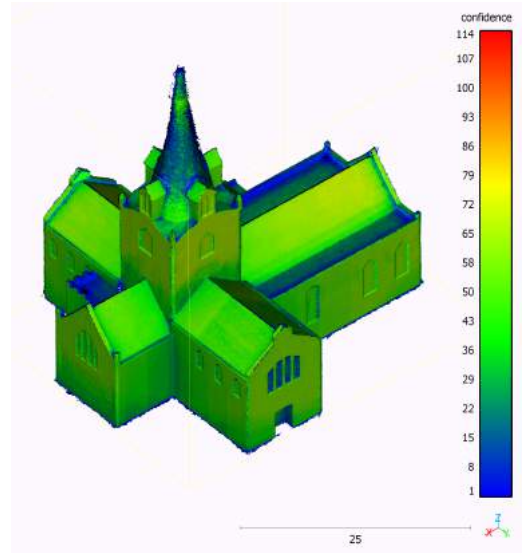


FIGURE 3.4 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle simple

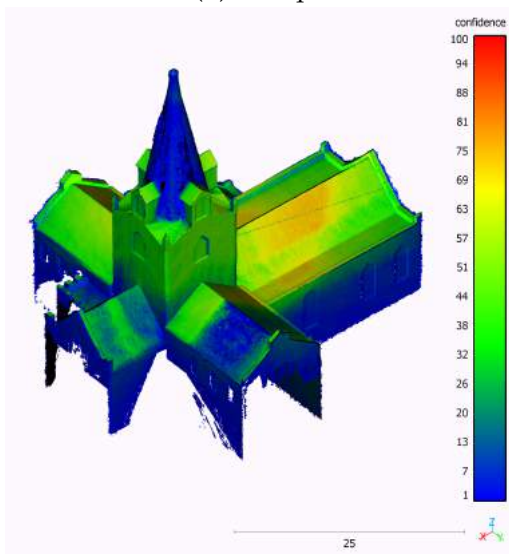
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



(a) Oblique



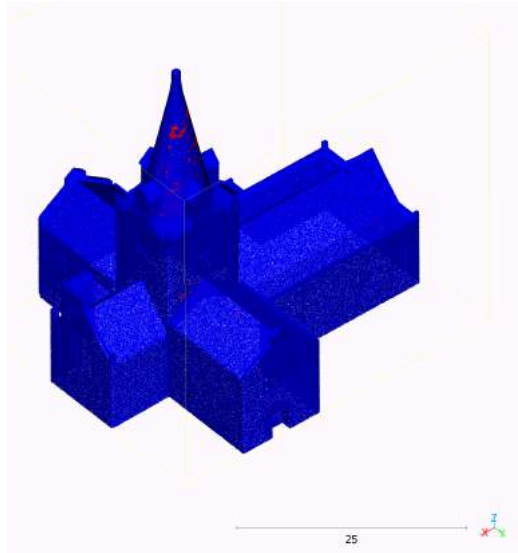
(b) Cercle



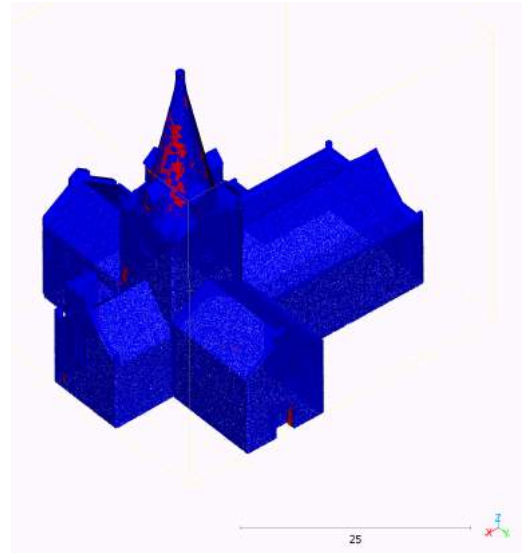
(c) Sphère

FIGURE 3.5 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle simple - suite

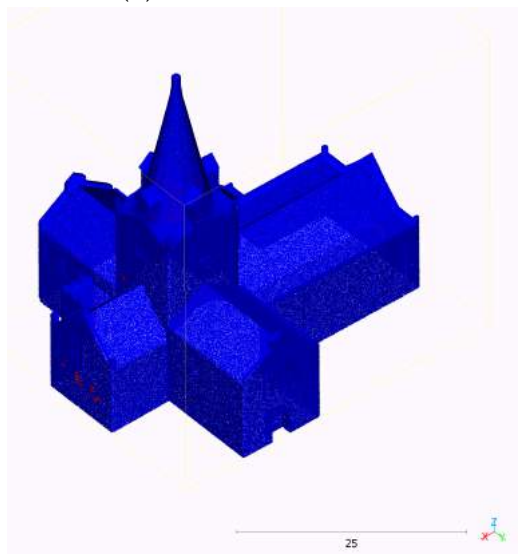




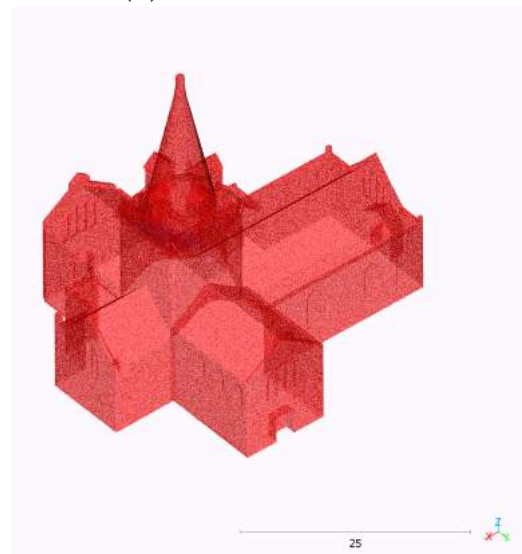
(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



(c) Chevauchement 80%



(d) Nadir

FIGURE 3.6 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle simple

CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

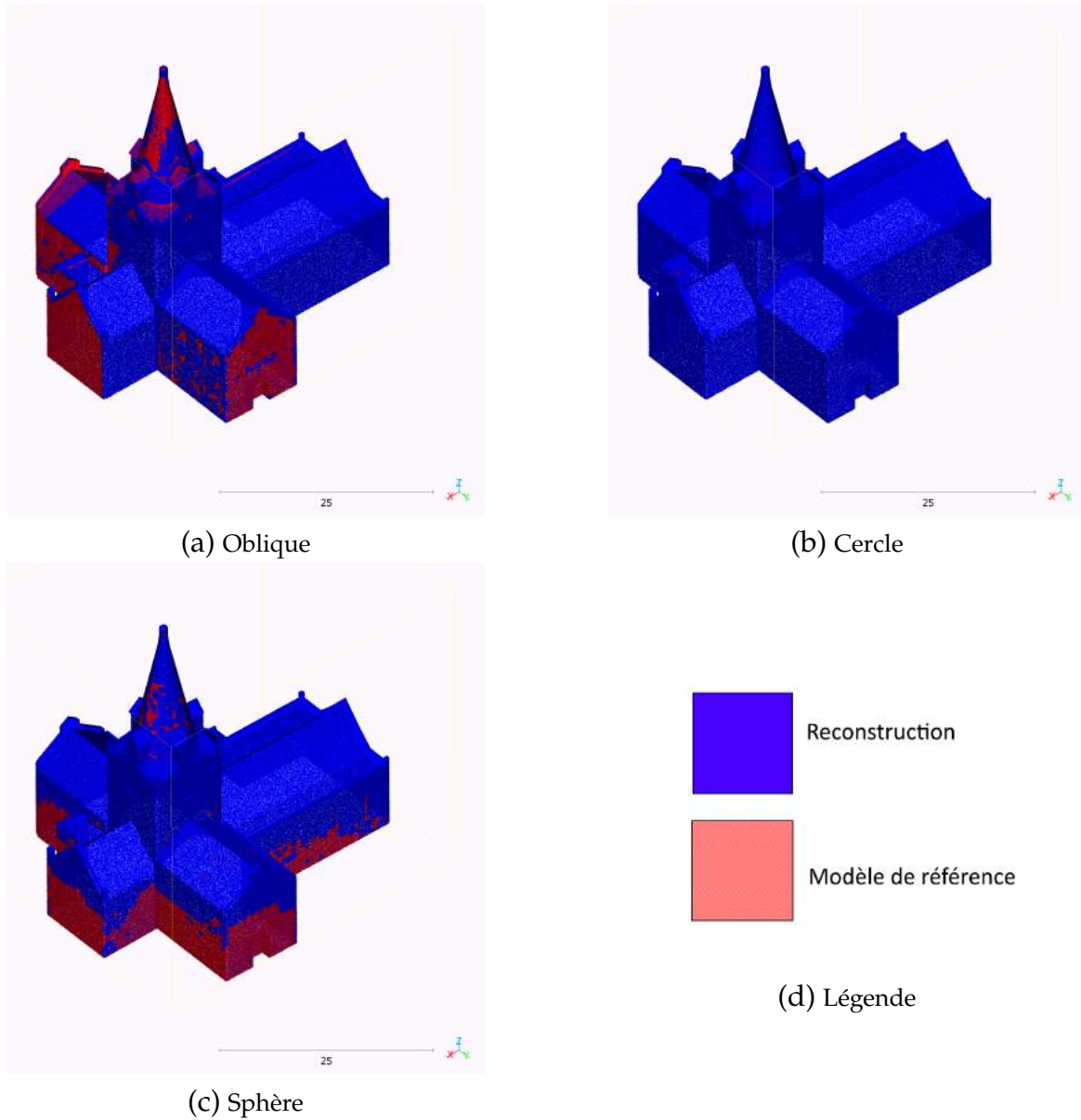


FIGURE 3.7 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle simple - suite



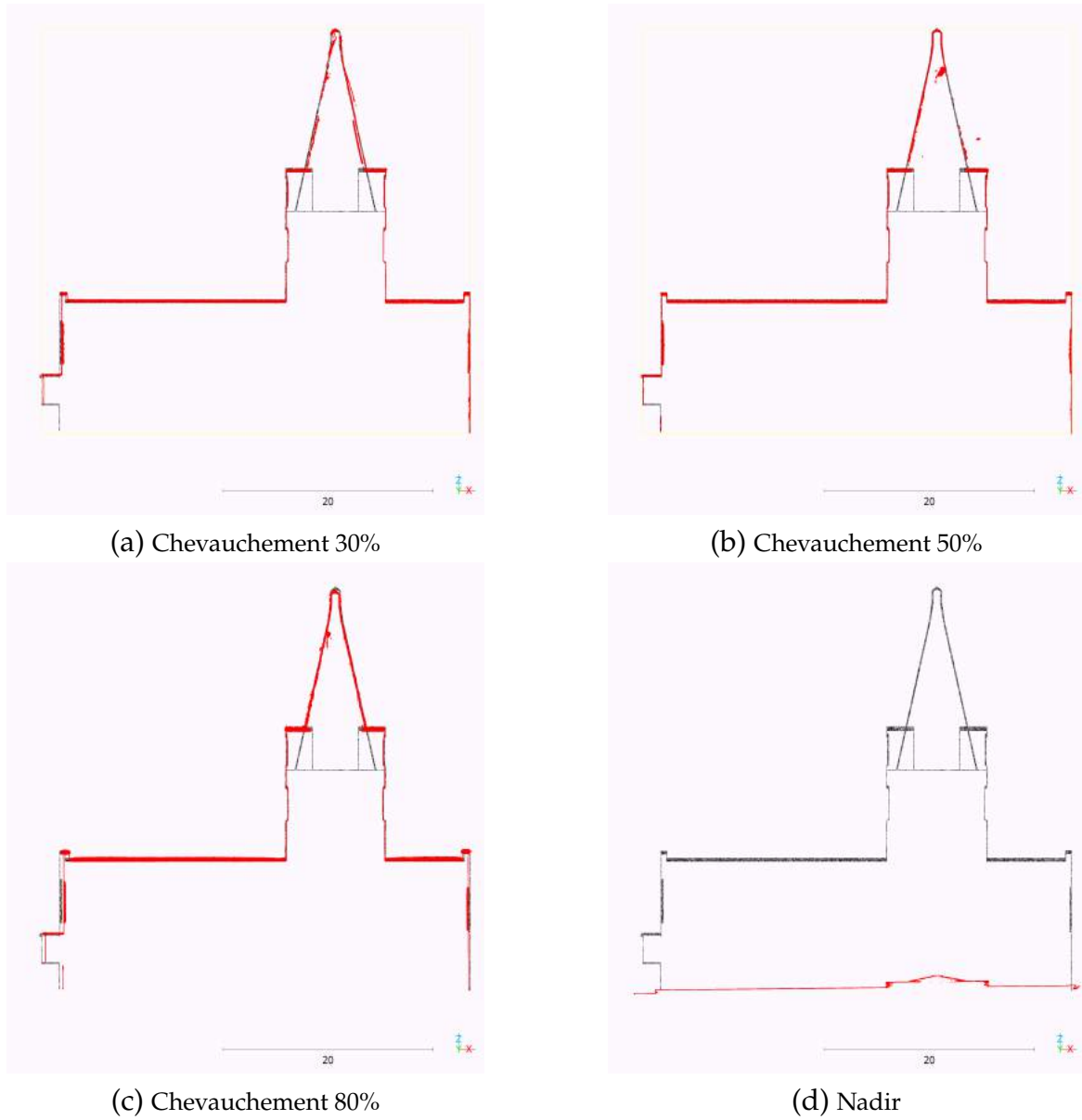
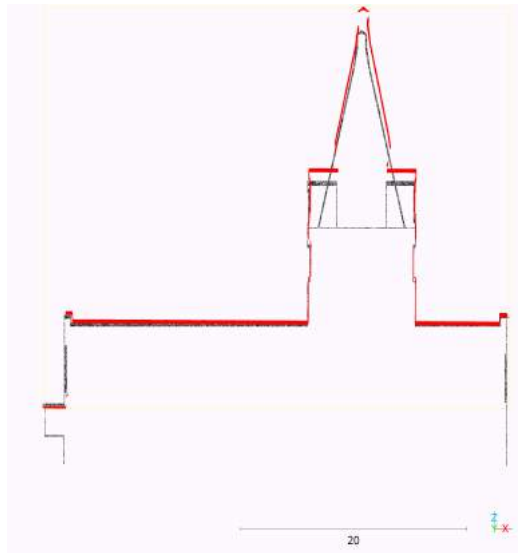


FIGURE 3.8 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence simple

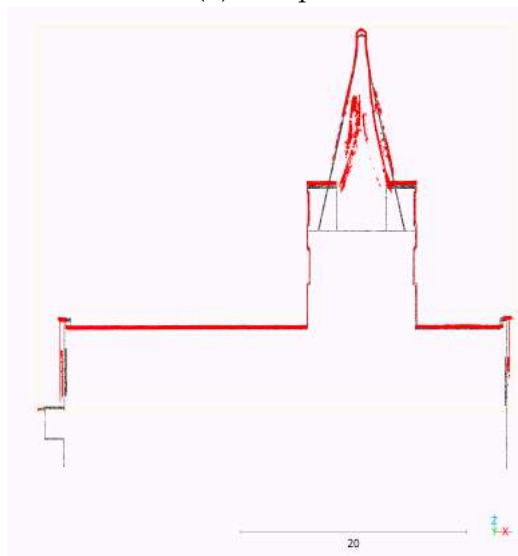
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



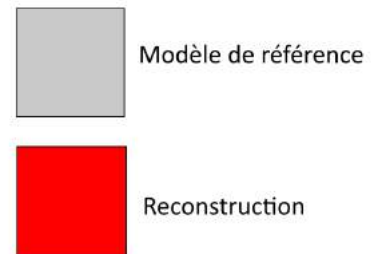
(a) Oblique



(b) Cercle



(c) Sphère



(d) Légende

FIGURE 3.9 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence simple - suite

## 3.2 Modèle intermédiaire

TABLE 3.2 – Table des résultats pour le modèle intermédiaire

	Chev. 30%	Chev. 50%	Chev. 80%	Nadir	Oblique	Cercle	Sphere
Nombre d'images	313	251	718	160	160	180	133
RMSE	0,18	0,39	0,045	/	/	0,06	0,07
% Complétude	87,37	87,87	83,43	/	/	89,00	60,02
% Confiance	88,21	86,23	95,91	64,42	58,33	98,44	87,72
GSD [mm/pixel]	8,22	9,78	9,77	8,06	5,35	19,1	10,2

L'analyse de la table 3.2 révèle différentes observations :

Le nombre d'images utilisées pour les reconstructions issues du planificateur de vol pour un chevauchement de 30 % et 50 % valide l'hypothèse que le planificateur de vol utilisé n'est pas adapté à des chevauchements d'images si faibles : le nombre d'images pour un chevauchement de 50% est inférieur à celui avec un chevauchement de 30 %. Les résultats restent néanmoins acceptables et relativement constants. Les valeurs de RMSE pour ces deux scénarios sont plus élevées que pour les autres reconstructions : le logiciel de photogrammétrie reconstruit des "taches", basées sur des points homologues aberrants situés loin du modèle de référence (Figure 3.11a et 3.11b). Le RMSE étant basé sur la distance au modèle de référence, ces points augmentent la valeur de celui-ci. Ces "taches" sont également mises en évidence via les outliers des boxplots correspondantes (Figure 3.10).

A contrario, le chevauchement de 80 % sélectionne beaucoup plus de points de vue (751), Plus de carte de profondeur sont utilisée pour créer le nuage de point dense. Ce scénario de reconstruction diminue aussi le RMSE car les points homologues sont correctement placés. La résolution, fortement corrélée à la distance de capture, est constante pour les trois reconstructions, qui sont effectuées à partir d'images situées à 30 m du modèle de référence.

Il est intéressant de souligner que les résultats obtenus pour la reconstruction "Chevauchement d'image 80 %" est similaire à la reconstruction circulaire. Elles possèdent des caractéristiques équivalentes, à l'exception de la résolution, moindre pour le modèle circulaire (19,1 face à 9,77 mm/pixel). La reconstruction circulaire nécessite aussi bien moins de photos (180 face à 751) et peut être réalisée sans connaissance préalable de l'objet à capturer. Néanmoins, la reconstruction circulaire n'est pas aussi efficace pour reconstruire les détails de l'objet à capturer (voir Figure 3.17c et 3.18b : la pointe est moins nette pour la reconstruction circulaire).

Le logiciel de photogrammétrie ne permet pas de retranscrire la géométrie de l'objet pour la reconstruction nadir et oblique (3.11d et 3.12a). Les reconstructions ne permettent donc pas l'alignement avec le modèle de référence, et les mesures liés à la distance à celui-ci n'ont pas pu être calculées (RMSE, statistiques descriptives et boxplot). Étant donné qu'elles

### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

sont reconstruite avec peu de photos, elles possèdent peu de cartes de profondeur (valeur maximale des légendes des figures 3.13d et 3.14a). Le pourcentage lié à cette confiance, calculé comme le nombre de points vus par au moins 3 cartes de profondeurs, reste similaire à celui des autres reconstructions.

La raison de l'absence de points dans le bas de la reconstruction sphérique est la même que pour le modèle simple : la prise d'image regarde toujours le centre de la *bounding box* contenant le modèle de référence et très peu d'images capturent le bas de celui-ci, rendant sa reconstruction impossible.

Le pourcentage de 100 % de complétude n'est pas atteignable : l'analyse des coupes révèle des géométries internes impossible à reconstruire (Figure 3.17). Elle permet également de mettre en évidence la difficulté pour le logiciel de reconstruire les balcons : aucune des reconstructions n'a pu les retranscrire complètement.

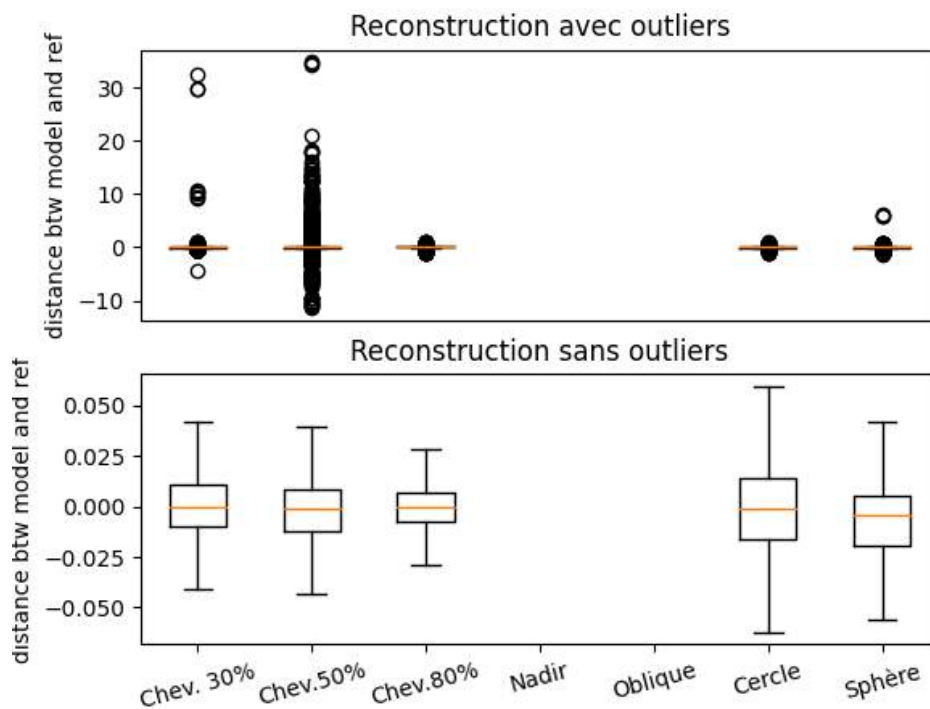


FIGURE 3.10 – Boxplot pour le modèle intermédiaire

Les boxplots du modèle intermédiaire révèlent une distance médiane à la référence toujours avoisinant 0, sur une plage de données située entre -0,05 et 0,05. Le détail des valeurs est disponible dans le tableau 6.2 disponible en annexe. Tout comme pour le modèle simple, celles-ci sont réalisées sur un échantillon de 150 000 points pris aléatoirement dans l'ensemble

des points. La plage de donnée plus large est liée à une plus grande dispersion des points autour de la médiane, observable dans les histogrammes disponibles en annexe (Figure 6.3).

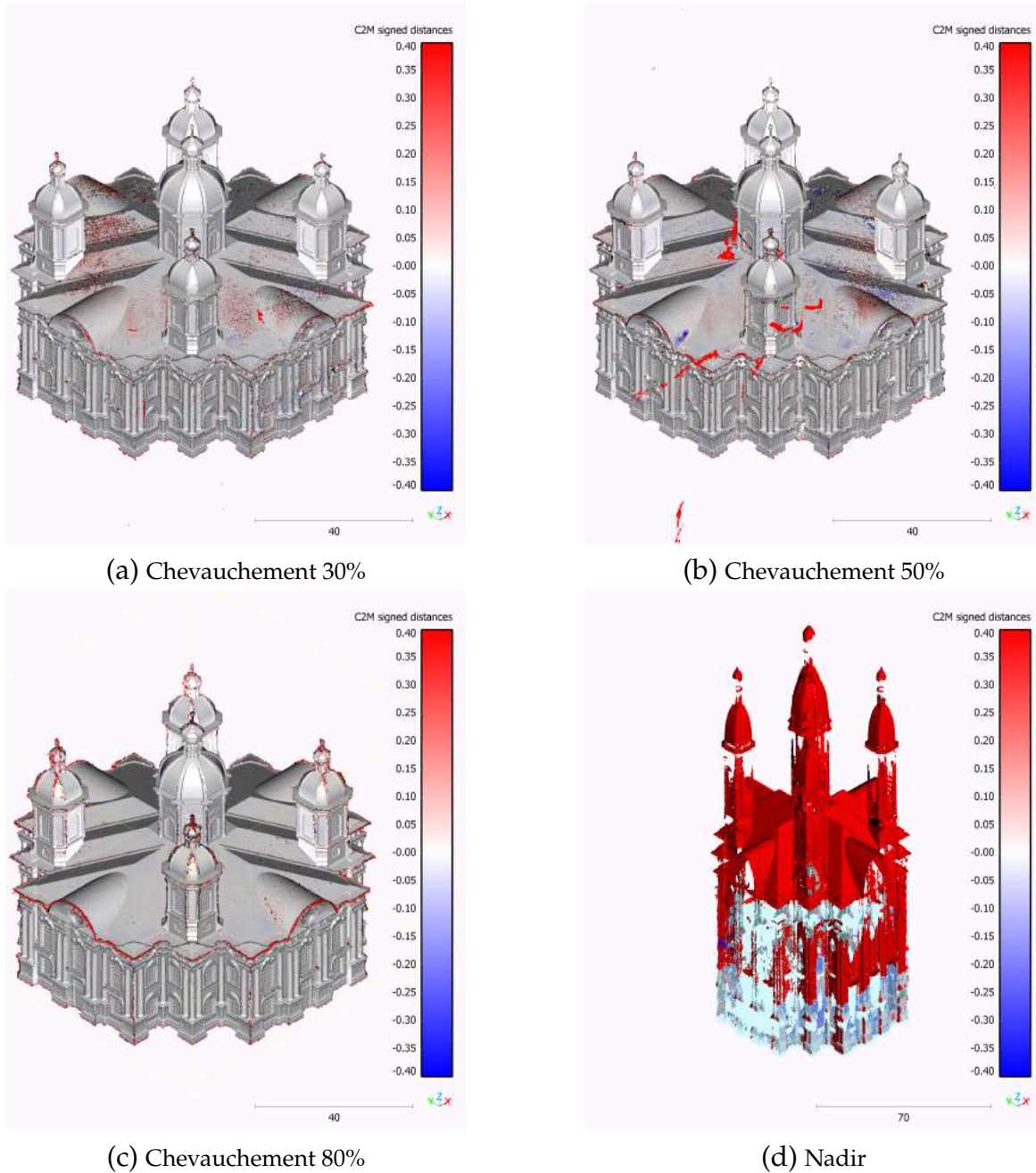
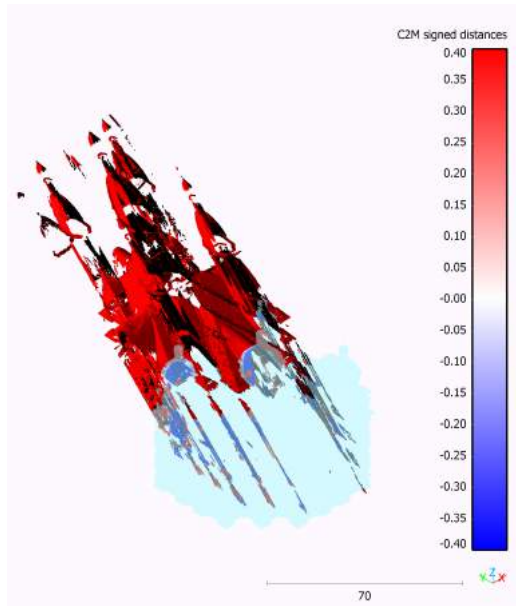
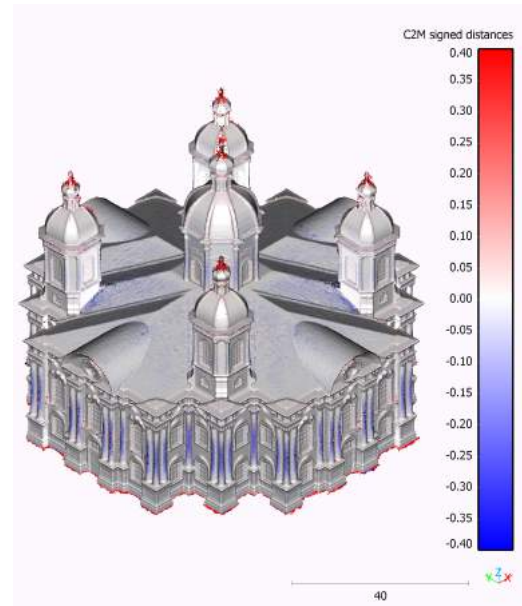


FIGURE 3.11 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle intermédiaire

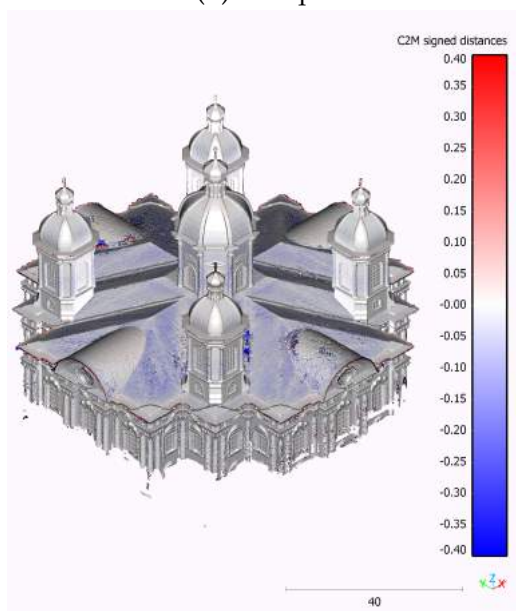
### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



(a) Oblique



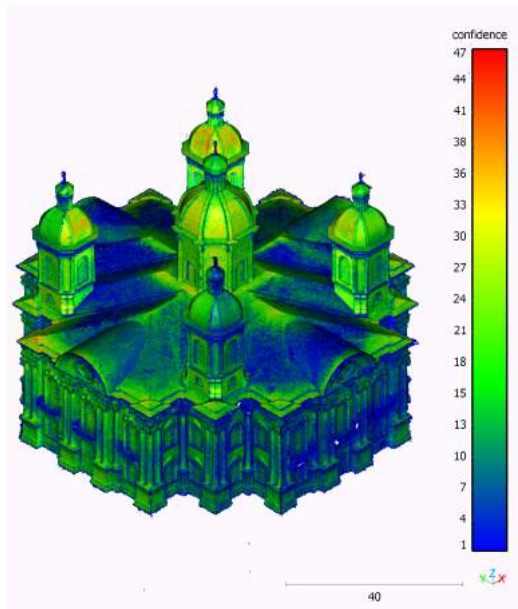
(b) Cercle



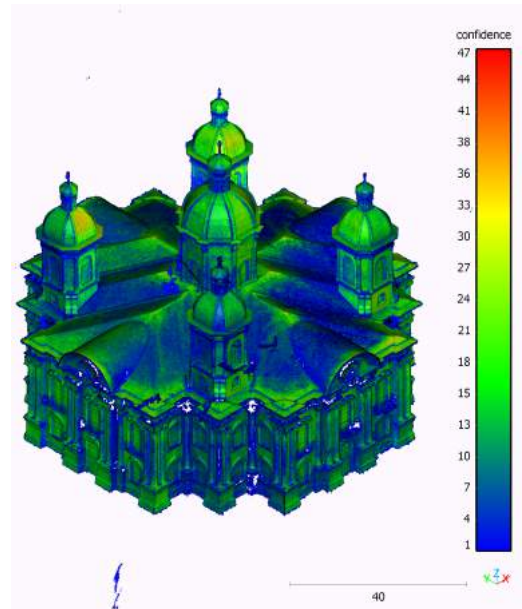
(c) Sphère

FIGURE 3.12 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle intermédiaire - suite

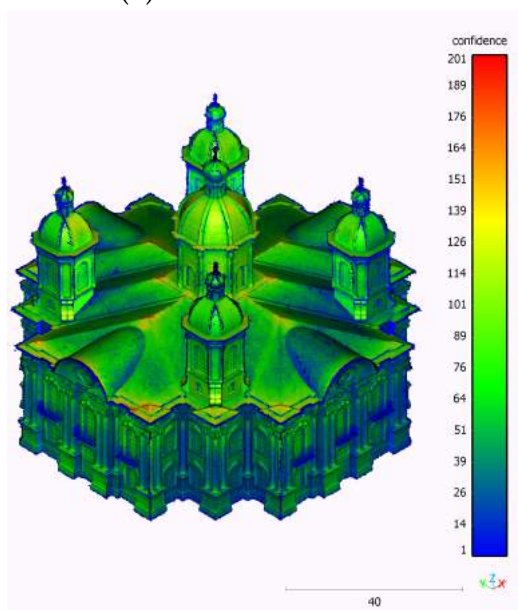




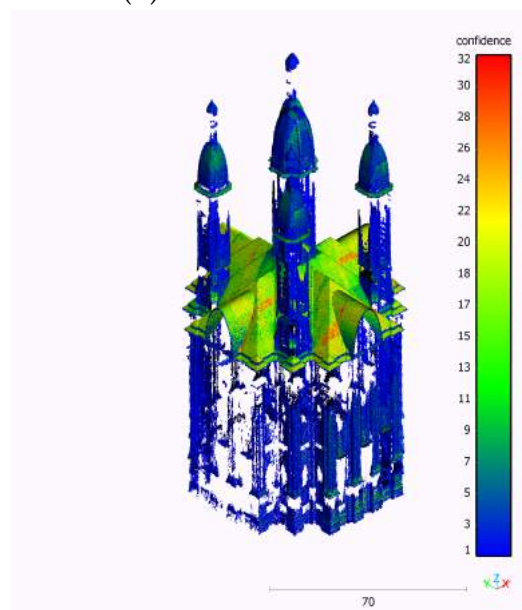
(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



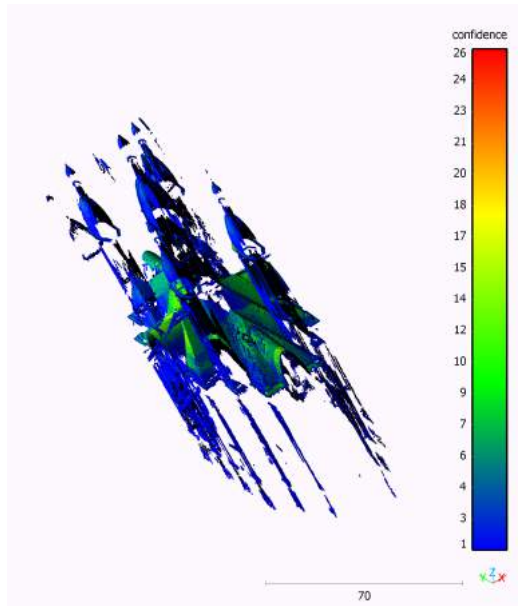
(c) Chevauchement 80%



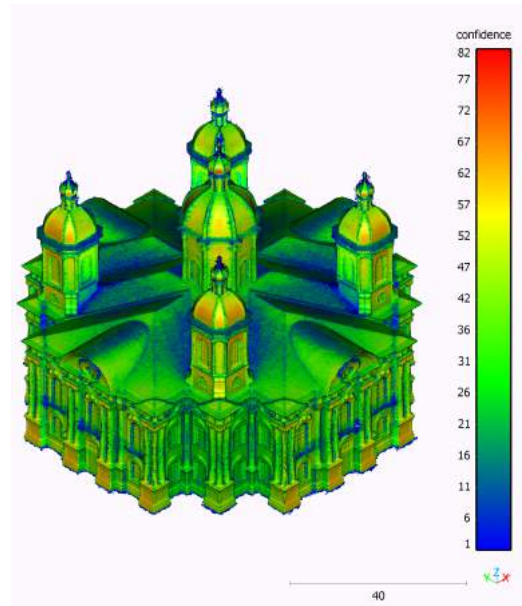
(d) Nadir

FIGURE 3.13 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle intermédiaire

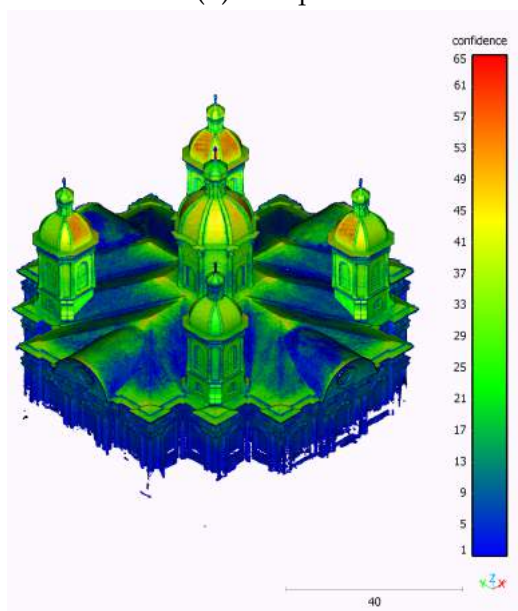
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



(a) Oblique



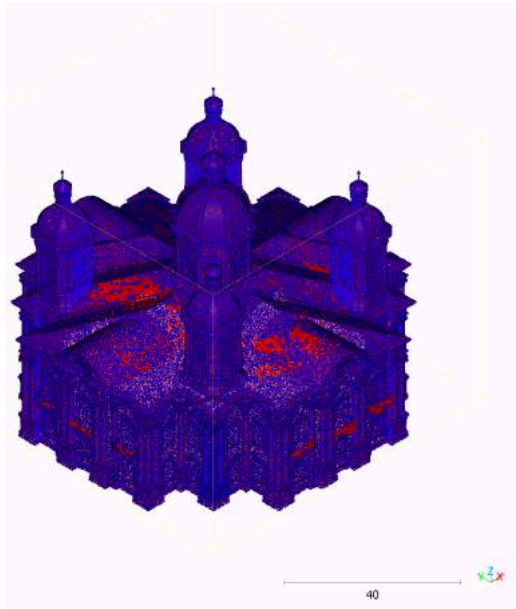
(b) Cercle



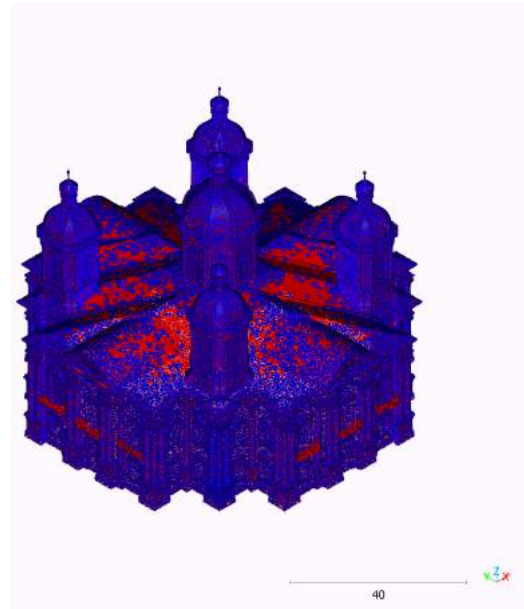
(c) Sphère

FIGURE 3.14 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle intermédiaire - suite

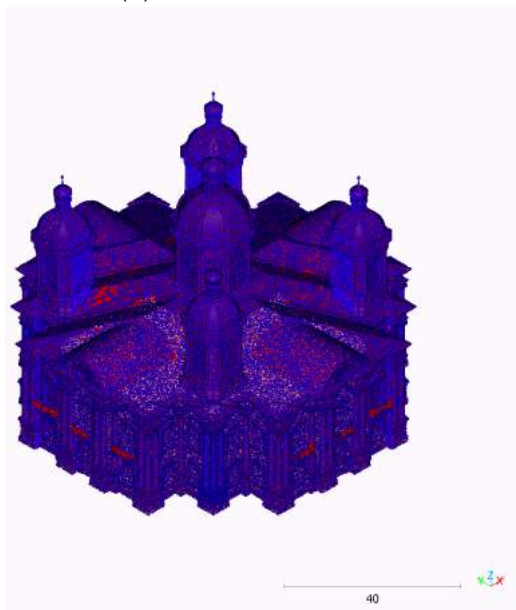




(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



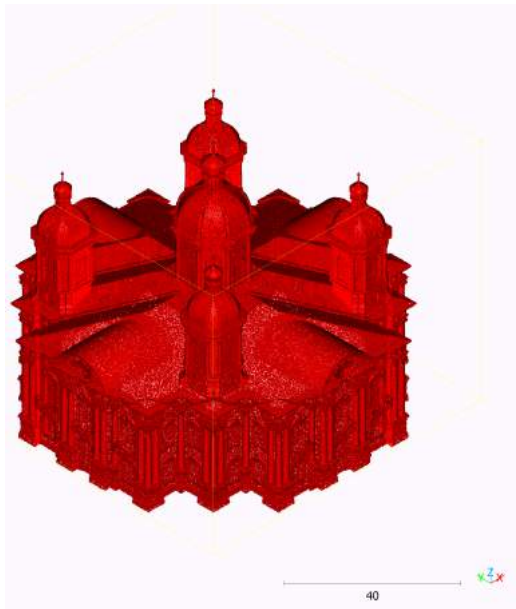
(c) Chevauchement 80%



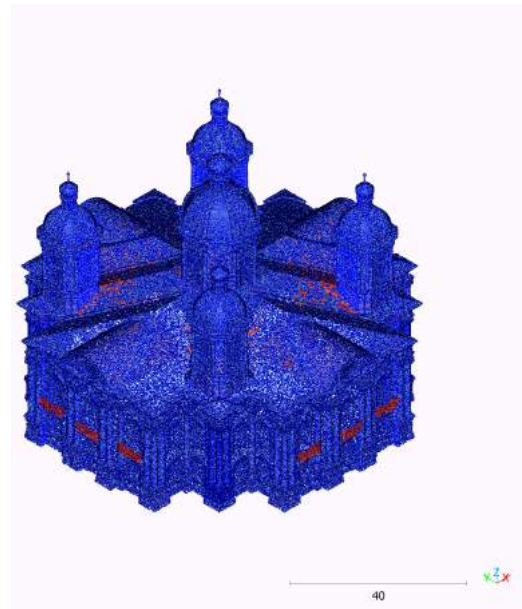
(d) Nadir

FIGURE 3.15 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle intermédiaire

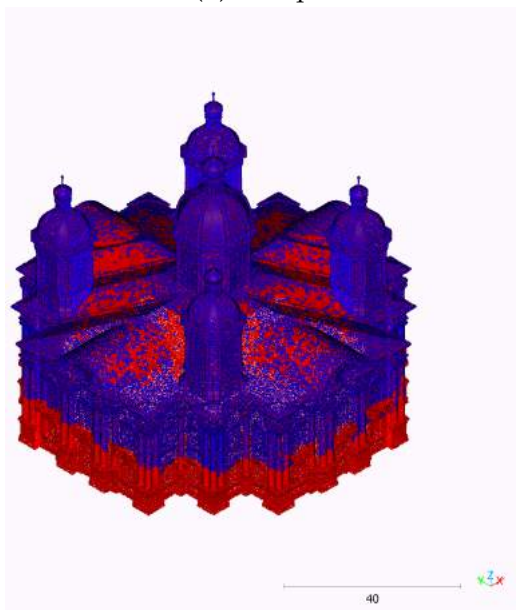
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



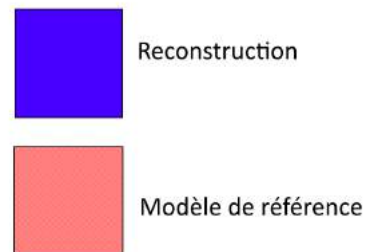
(a) Oblique



(b) Cercle



(c) Sphère



(d) Légende

FIGURE 3.16 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle intermédiaire - suite

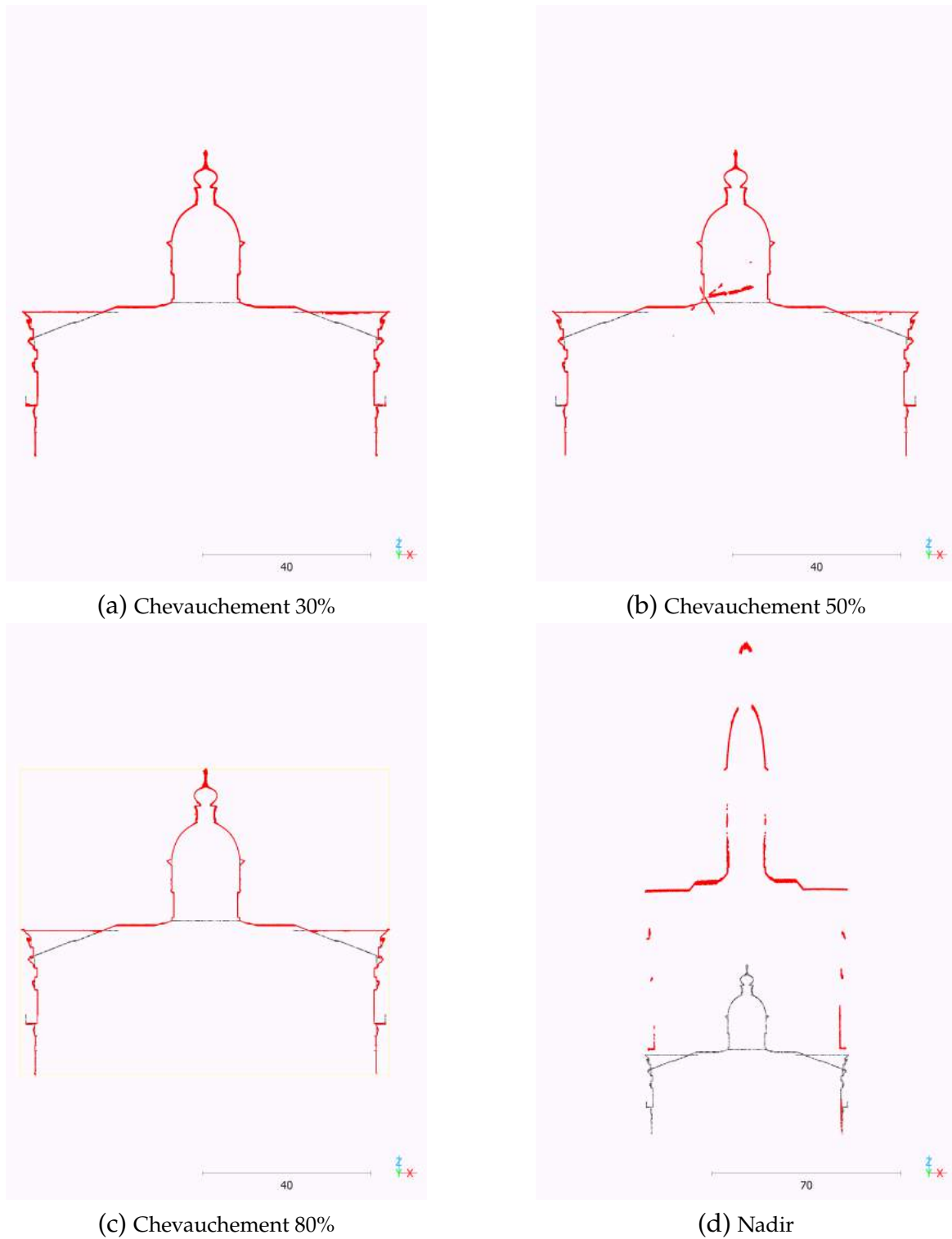
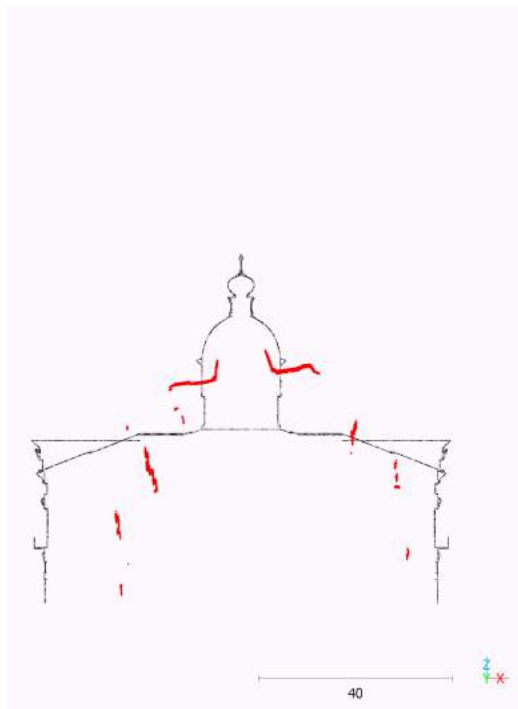
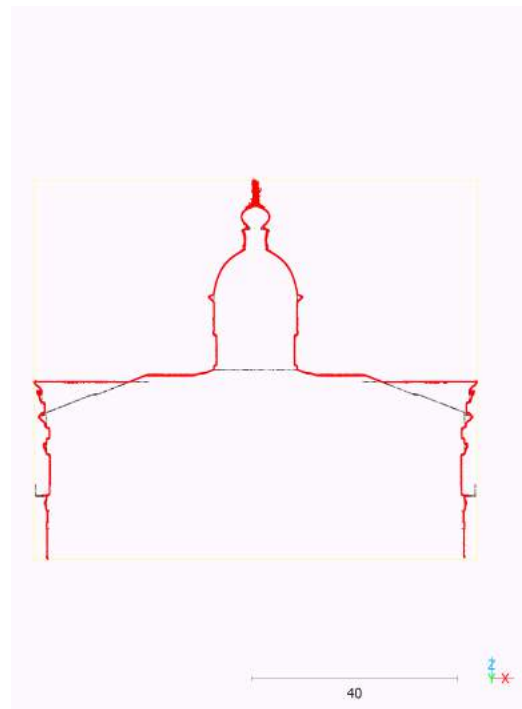


FIGURE 3.17 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence intermédiaire

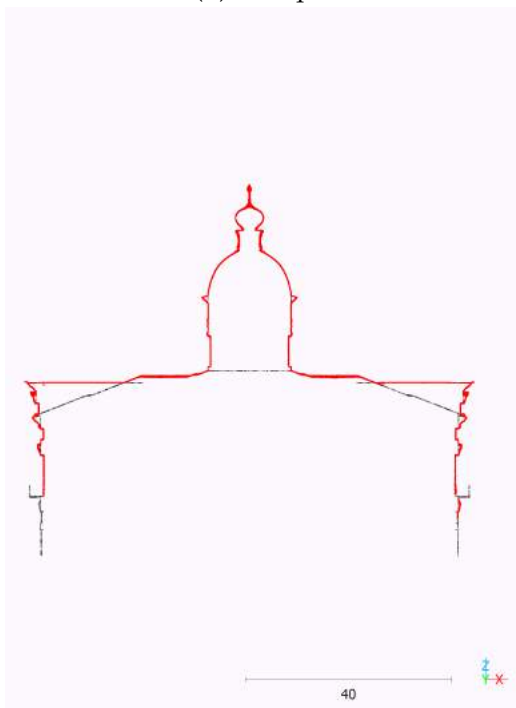
### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



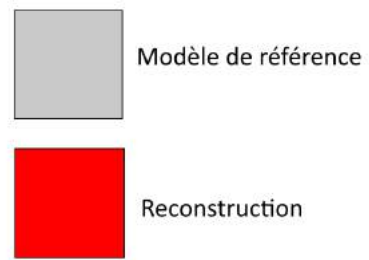
(a) Oblique



(b) Cercle



(c) Sphère



(d) Légende

FIGURE 3.18 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence intermédiaire - suite

### 3.3 Modèle élaboré

TABLE 3.3 – Table des résultats pour le modèle élaboré

	<b>Chev. 30%</b>	<b>Chev. 50%</b>	<b>Chev. 80%</b>	<b>Nadir</b>	<b>Oblique</b>	<b>Cercle</b>	<b>Sphere</b>
Nombre d'images	908	789	1922	187	187	180	148
RMSE	1,92	0,48	2,19	/	0,25	0,20	0,14
% Complétude	55,77	53,81	58,82	0,42	39,58	36,61	33,78
% Confiance	72,82	75,01	79,91	77,79	84,40	91,29	86,32
GSD [mm/pixel]	10,7	11,2	10,2	26,6	25,8	47,9	26,8

Le modèle élaboré a été choisi en vue de tester les limites de la méthode et du logiciel de photogrammétrie. Le tableau 3.3 en donne les principaux résultats. La majorité des valeurs retrouvées dans le tableau peuvent être expliquée de la même manière que pour les modèles simple et intermédiaire :

Tout comme le modèle intermédiaire, le RMSE pour les reconstructions "Chevauchement 30 %" et "Chevauchement 80 %" est plus élevé que pour les autres reconstructions à cause des "taches", points homologues mal placés (figures 3.20a et 3.20c). Ces points sont visibles comme outliers sur les boxplots relatives au modèle élaboré (Figure 3.19).

Le nombre de photos pour les reconstructions "Chevauchement 50 %" est inférieur au nombre de photos pour la reconstruction "Chevauchement 30 %", tout comme le modèle intermédiaire. Cela conforte l'hypothèse du manque d'optimisation du planificateur de vol de Metashape pour des valeurs de recouvrement d'images trop faible.

Le pourcentage de complétude de 100 % n'est pas atteignable étant donné des géométries internes impossibles à reconstruire (Figure 3.26).

La reconstruction nadir n'est pas à même de retranscrire la géométrie du modèle de référence (Figure 3.20d), rendant impossible l'alignement fin via l'algorithme d'ICP. Le RMSE, les statistiques descriptives et la boxplot correspondante n'ont pu être calculés.

Cependant, on constate que la résolution, mesurée par le GSD, est bien meilleure pour les reconstructions issues du planificateur de vol que pour les autres reconstructions. La reconstruction circulaire reste la reconstruction possédant la plus mauvaise résolution.

Les reconstructions issues du planificateur de vol ont également un pourcentage de complétude plus élevé que pour les autres scénarios.

Le pourcentage de confiances, par contre, est plus élevé pour la reconstruction circulaire que pour les autres reconstructions (Figure 3.25b). Le nombre de cartes de profondeur utilisé pour sa génération est également le deuxième le plus élevé après la reconstruction "Chevauchement 80 %", bien que celle-ci nécessite 10 fois plus d'images (pour rappel, chaque

### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

image produit une carte de profondeur ; et la valeur de confiance d'un point correspond au nombre de carte de profondeur où ce point apparaît).

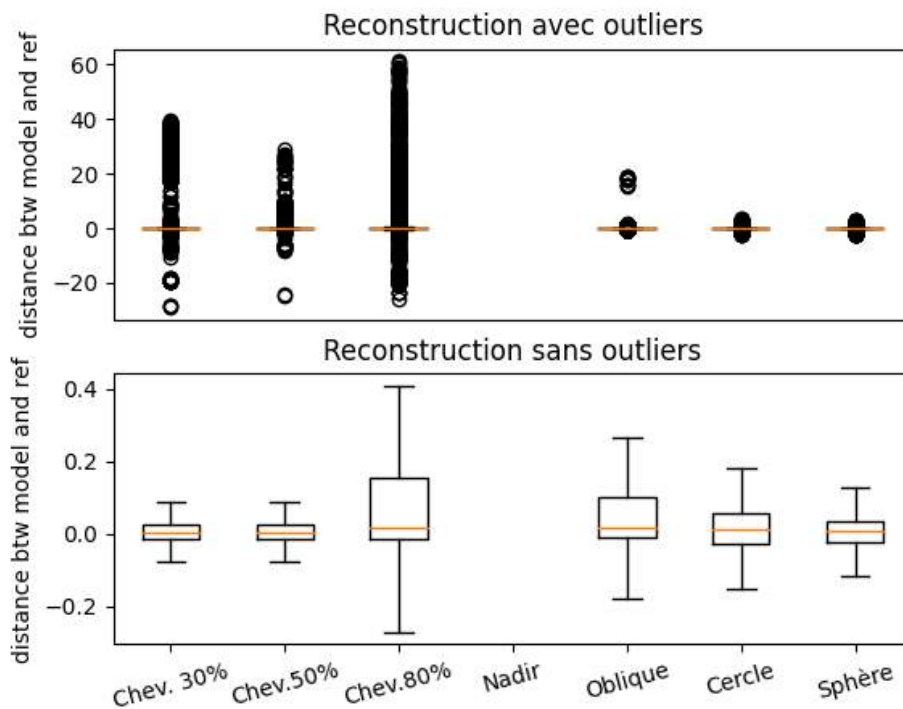
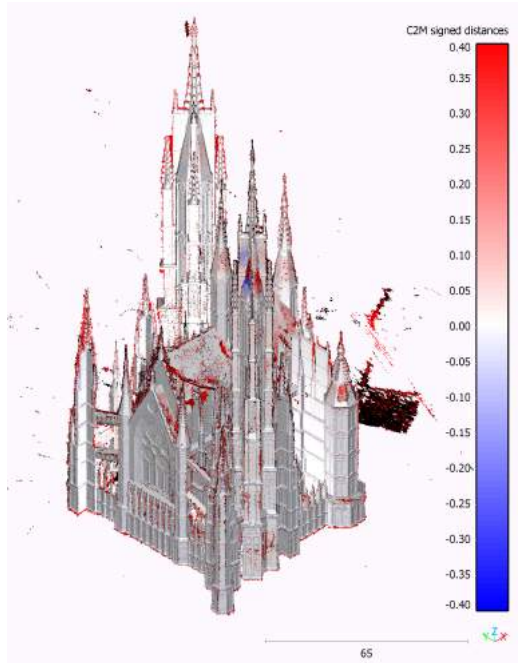


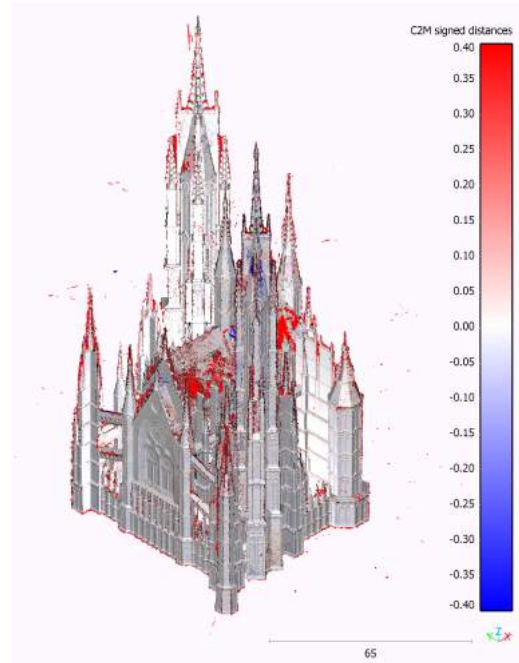
FIGURE 3.19 – Boxplot pour le modèle élaboré

Les boxplots sont toujours réalisées sur un échantillon de 150 000 points. La médiane des reconstructions est toujours proche de 0. La plus grande plage de valeur observée par la reconstruction "Chevauchement 80 %" s'observe également sur les histogrammes disponibles en annexe (Figure 6.4). Les statistiques permettant la construction de ces boxplots sont disponible dans la table 6.3.

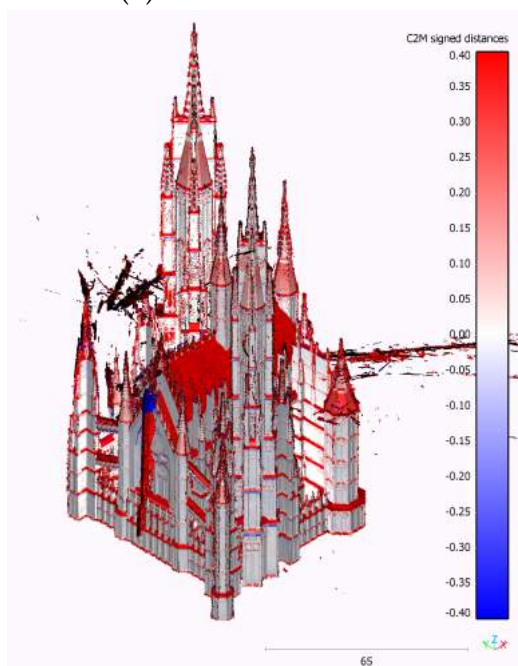




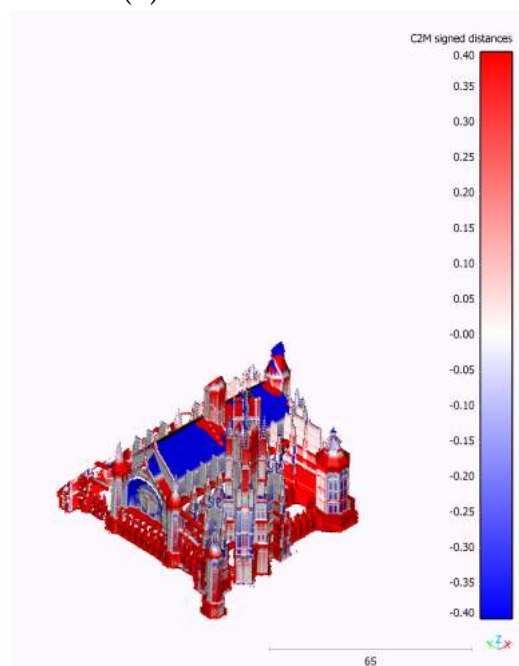
(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



(c) Chevauchement 80%



(d) Nadir

FIGURE 3.20 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle élaboré

CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

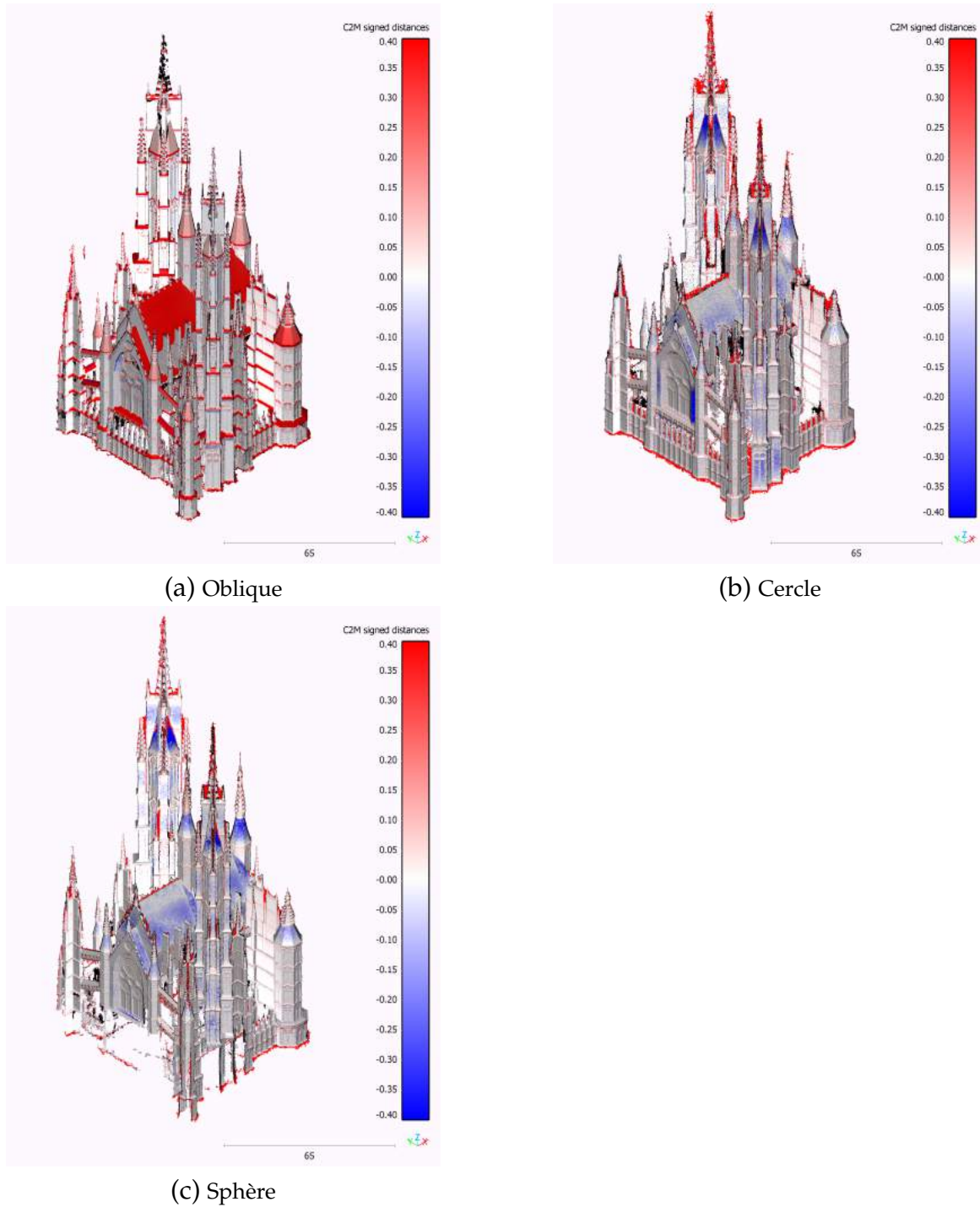


FIGURE 3.21 – Vue isométrique des distances au modèle de référence pour le modèle élaboré - suite



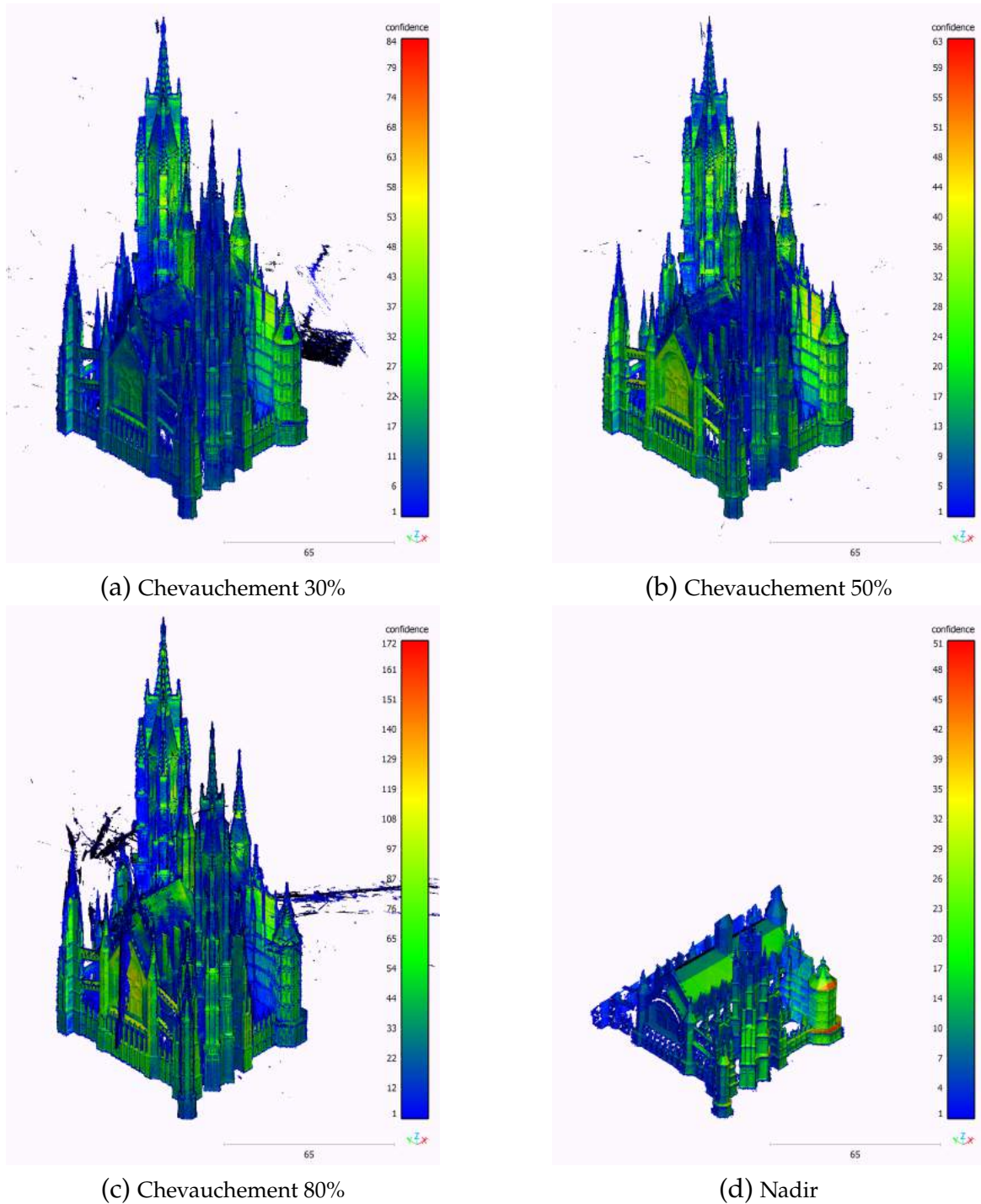
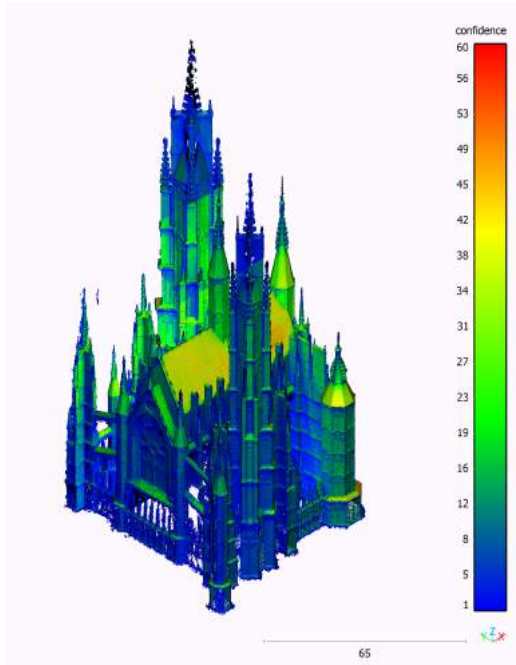
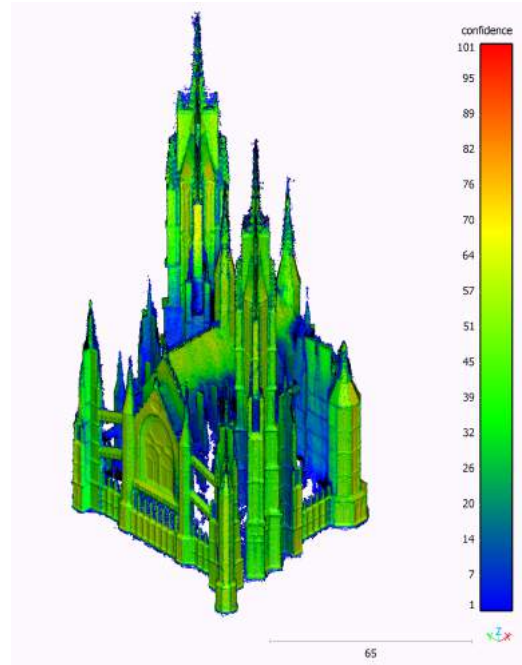


FIGURE 3.22 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle élaboré

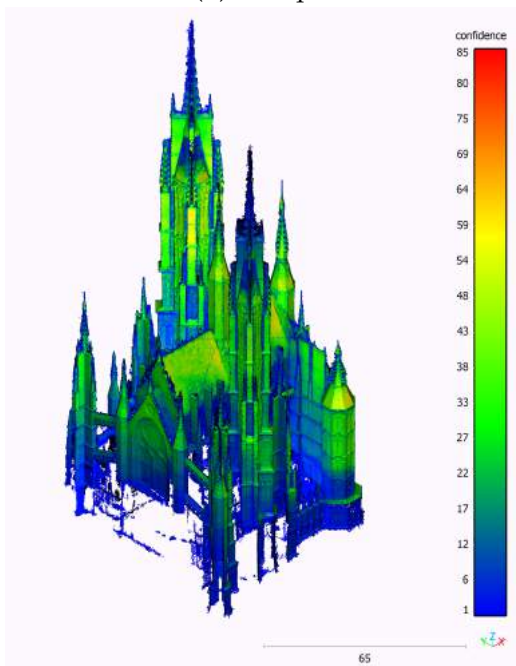
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



(a) Oblique

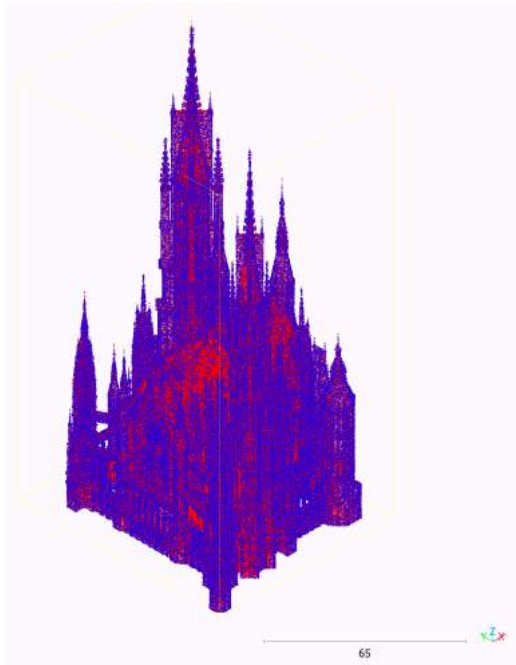


(b) Cercle

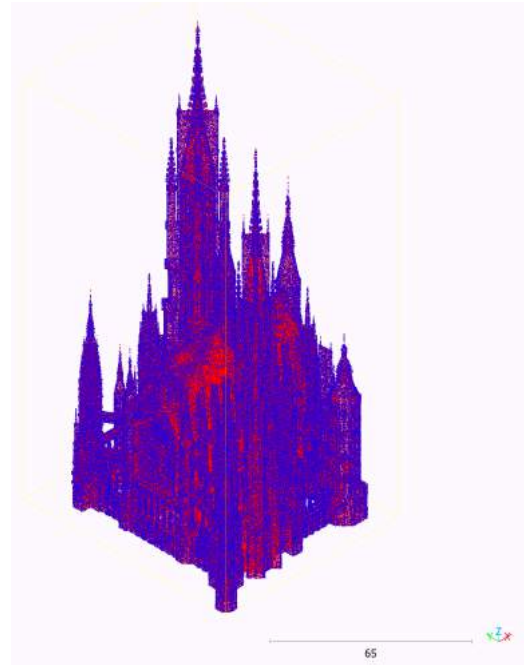


(c) Sphère

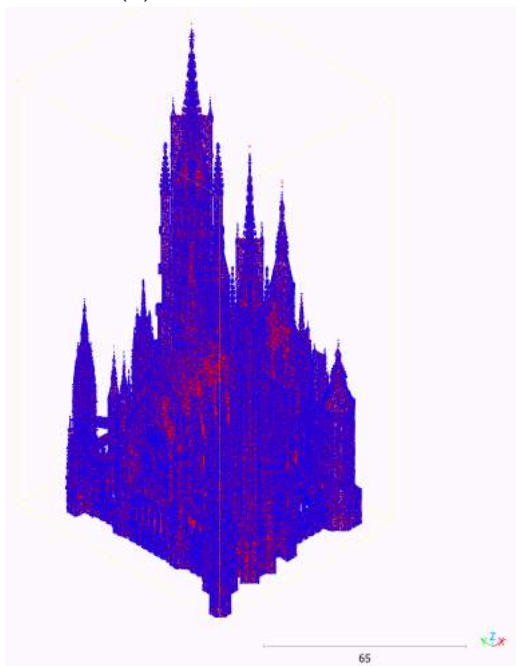
FIGURE 3.23 – Vue isométrique des confiances dans la reconstruction pour le modèle élaboré - suite



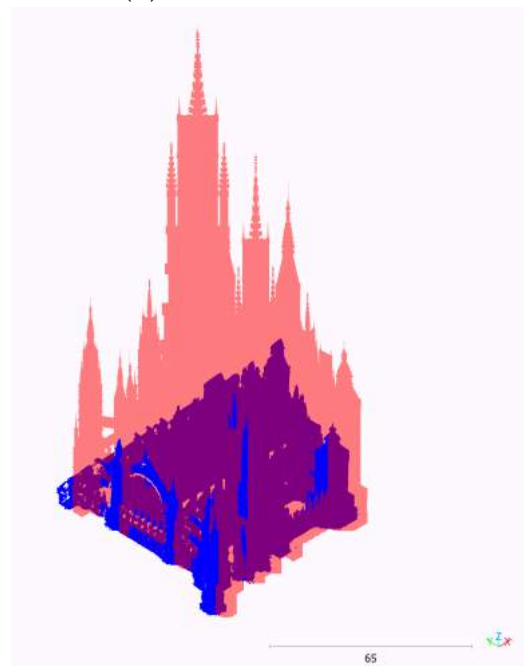
(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



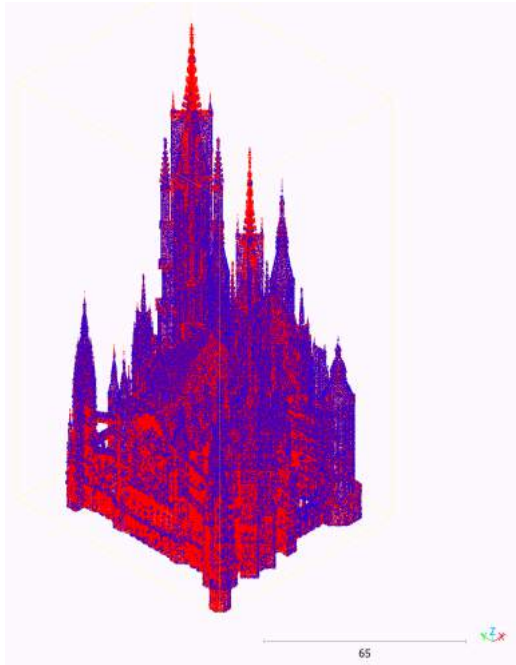
(c) Chevauchement 80%



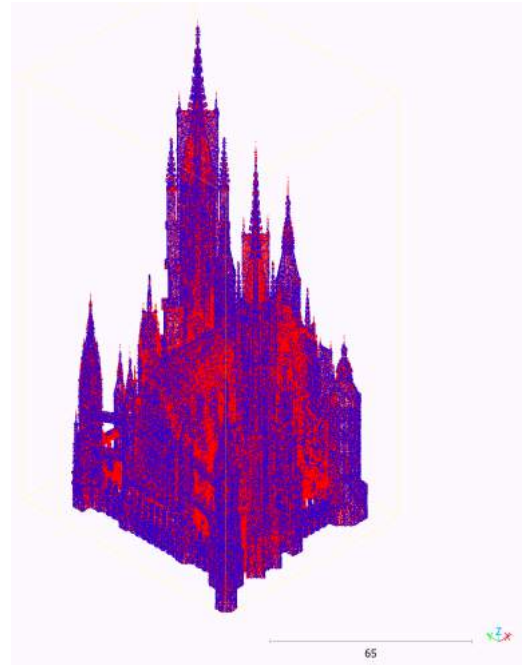
(d) Nadir

FIGURE 3.24 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle élaboré

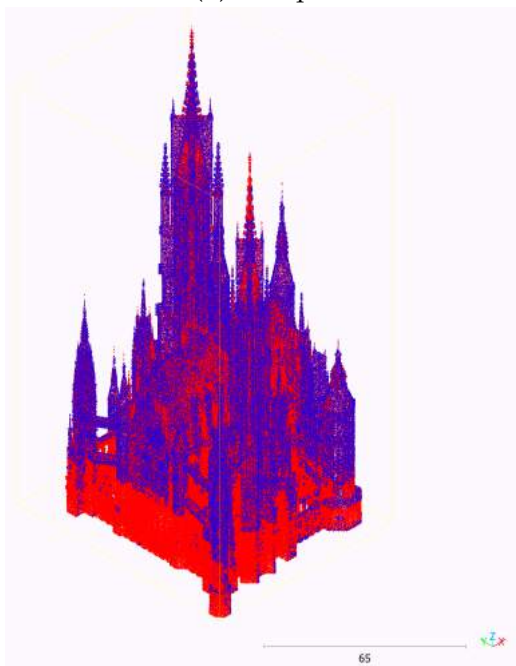
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



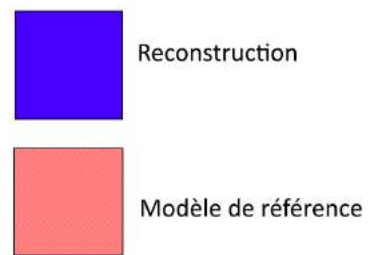
(a) Oblique



(b) Cercle

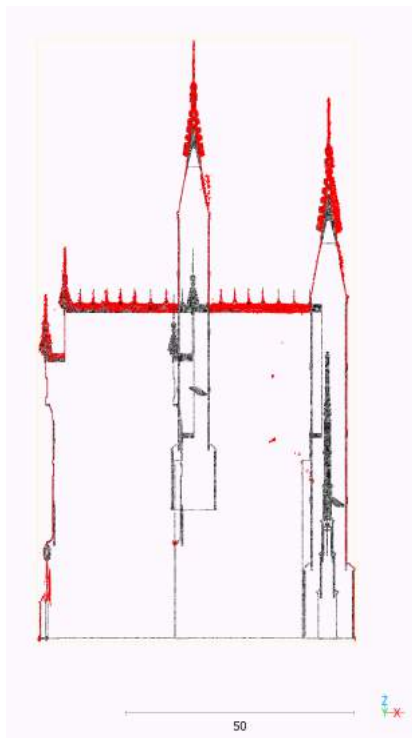


(c) Sphère

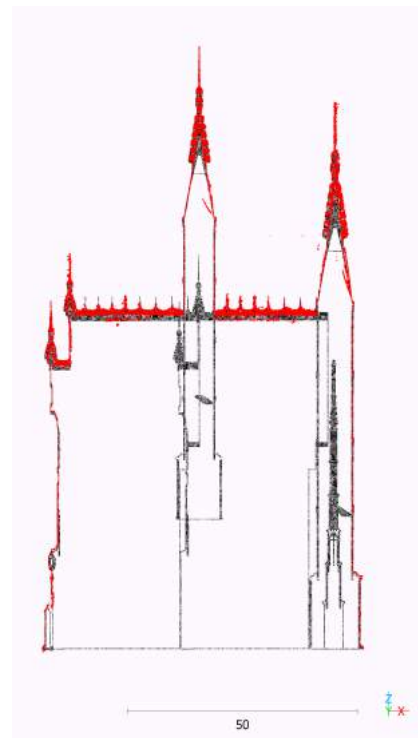


(d) Légende

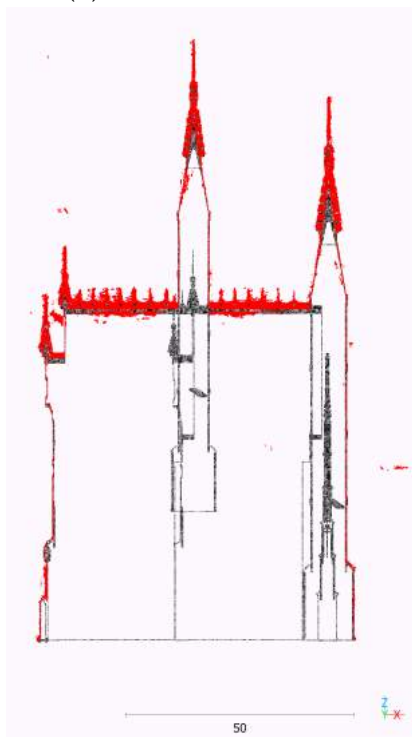
FIGURE 3.25 – Vue isométrique de l'exhaustivité des reconstructions pour le modèle élaboré - suite



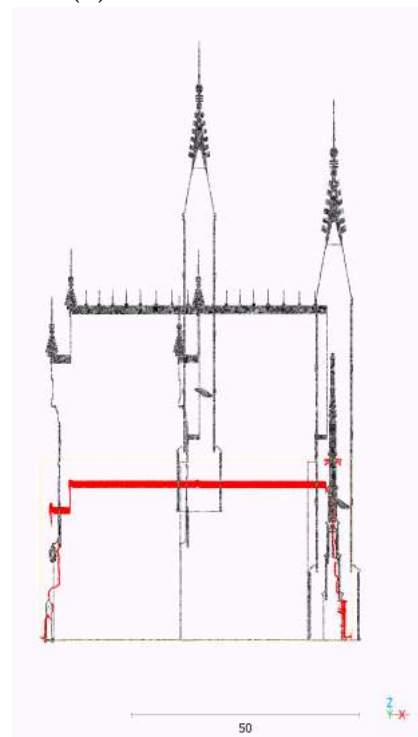
(a) Chevauchement 30%



(b) Chevauchement 50%



(c) Chevauchement 80%

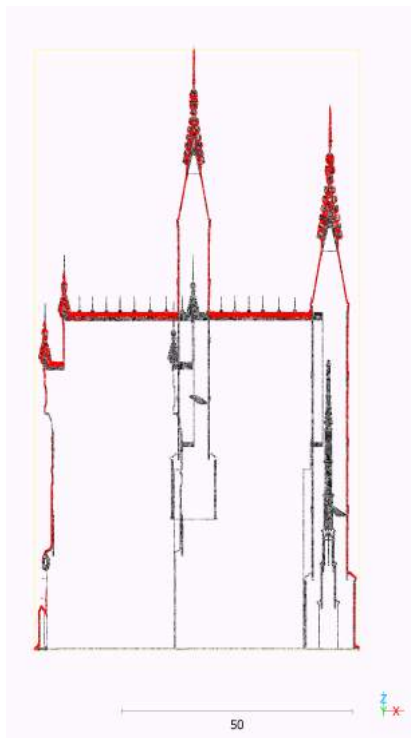


(d) Nadir

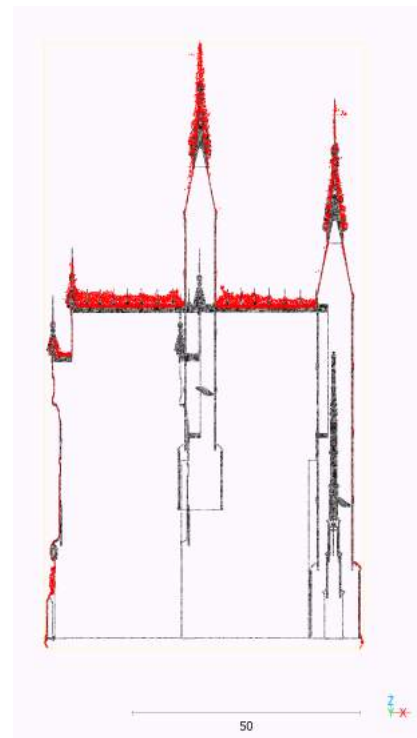
FIGURE 3.26 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence élaboré



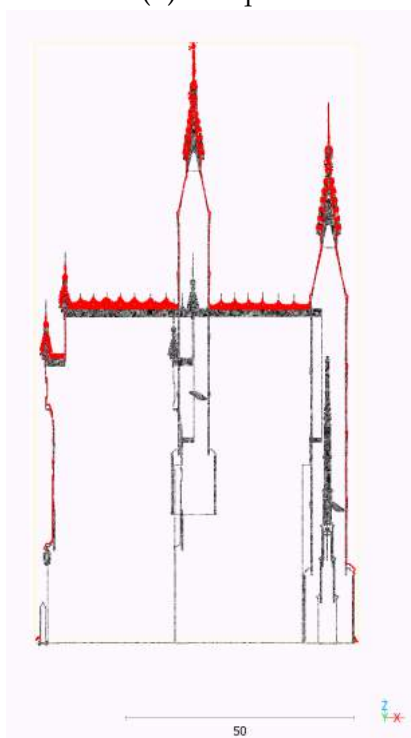
CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION



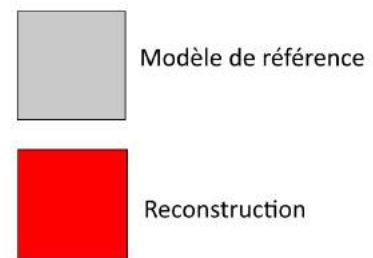
(a) Oblique



(b) Cercle



(c) Sphère



(d) Légende

FIGURE 3.27 – Comparaison des sections extraites entre la reconstruction et le modèle de référence élaboré - suite

## 3.4 Effets de la complexité des modèles

Le but de cette section est de comparer les effets de la complexité des modèles sur les reconstructions et non pas l'effet des différentes prises d'images. Elle présente ces effets en termes de similitudes, là où les modèles de références se comportent de la même manière, et en termes de différences, là où la complexité des modèles impacte les reconstructions.

### 3.4.1 Similitudes

Pour l'ensemble des modèles de références, le planificateur de vol disponible dans Meta-shape obtient les meilleurs résultats en termes de complétion (% de complétude), distance à la référence (RMSE) et résolution (GSD). Cependant, il nécessite un grand nombre de photos pour un recouvrement d'image correct (80%) et une connaissance préalable de l'objet à capturer, rendant son application sur le terrain contraignante et la puissance de calcul impliquée conséquente. L'opérateur doit en effet effectuer son relevé HD en 2 temps :

Une première capture de l'objet élémentaire, numérisée via un logiciel de photogrammétrie pour obtenir une reconstruction grossière. Cette première numérisation exige du temps et de la puissance de calcul.

La génération des plans de vol et la capture via drone. Celle-ci est contraignante car la capture de nombreuses photos implique un temps de vol conséquent. L'emploi de plusieurs batteries est alors nécessaire. Un grand nombre de photos implique également un plus long traitement des images pour effectuer le relevé HD.

De plus, le planificateur de vol n'est pas adapté à des valeurs de recouvrement d'image trop faible.

Face à cela, la prise d'image circulaire obtient des résultats presque équivalents, à l'exception de la résolution, qui diminue toujours face au planificateur de vol. Elle a cependant l'avantage de ne pas nécessiter de connaissance préalable de l'objet et d'être reconstruite depuis bien moins de photos que le planificateur de vol. Le temps de traitement des images diminue en conséquence.

De plus, une prise d'image circulaire est beaucoup plus accessible qu'un vol planifié. Là où ce dernier contraint l'utilisation d'un drone, matériel coûteux et fragile, un vol circulaire peut être réalisé à partir d'un simple appareil photo monté sur un perche. Ce type de relevé n'est naturellement pas applicable pour des grands bâtiments, où il est incapable de prendre des photos de son sommet. Une conclusion similaire est développée dans (CHIABRANDO et al., 2017).

Dans les trois cas étudiés, la reconstruction nadir n'a pas été à même de retranscrire correctement la géométrie du modèle de référence. Elle a toujours mal estimé les distances dans le plan vertical. Les images sous-échantillonnent les surfaces verticales (murs) en sur-

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

échantillonnant les surfaces horizontales (toit), rendant impossible la retranscription fidèle des objets.

Face à cela, la prise d'image oblique, réalisée aux mêmes emplacements que la prise d'image nadir, reconstitue bien plus fidèlement les géométries. Bien que celle-ci ne soit pas parfaite, elle fournit une reconstruction cohérente. Son déploiement dans la réalité est facile : seul le réglage de l'angle "*pitch*" doit être adapté pour un relevé drone réel.

La prise d'image sphérique, censée maximiser les angles de vue ne s'avère pas plus efficace qu'une reconstruction circulaire. Bien que celle-ci ait une meilleure résolution que pour une reconstruction circulaire, elle ne reconstruit pas l'ensemble du modèle de référence, liée à l'orientation des images en direction du centre de la *bounding box*. De plus, son déploiement réel est contraignant : elle implique un changement d'orientation des images régulier.

### 3.4.2 Différences

Naturellement, le nombre de photos prises par le planificateur de vol augmente avec la taille des modèles. La longueur de la focale est fixée et détermine l'angle de champ, qui conditionne la surface de l'objet capturée par l'image. Un objet plus grand implique donc plus de photos.

Avec l'augmentation de la complexité des modèles apparaît de plus en plus de "taches", résultant de points homologues mal placés lors de la détection de ceux-ci. Ces points ont une grande distance par rapport au modèle de référence et influent sur les paramètres utilisant celles-ci (RMSE, boxplot et statistiques descriptives). Afin de limiter l'apparition de ces "taches", il est possible de filtrer les points du nuage de point dense par confiance, mais au risque de supprimer une partie des points cohérents de la reconstruction.

Dans un cas réel, les points homologues aberrants sont beaucoup plus fréquents que dans le cas virtuel : le ciel ou les nuages favorisent leur apparition. Ainsi, pour un relevé drone réel, le filtrage par confiance est recommandé, mais au risque de supprimer une partie du relevé HD. L'autre solution consiste à enlever manuellement les points homologues mal placés.

Enfin, pour un modèle élaboré, l'utilisation d'un planificateur de vol permet d'obtenir une reconstruction plus fidèle de l'objet à capturer. Le relevé final est de meilleure résolution, plus complet mais implique un temps de calcul plus long, conséquence du nombre de photos plus élevé.



## 3.5 Perspectives

### 3.5.1 Amélioration de la méthode

Diverses améliorations peuvent être apportées au travail. Une partie a déjà été évoquée *supra* :

Simuler une erreur de positionnement et d'orientation lors de la génération des différents plans de vol (section 2.3).

En effet, les drones actuels embarquent des systèmes de géoréférencement embarqué permettant de déterminer la position du drone dans l'espace. Un module précis et disponible est le GNSS RTK (*Global Navigation Satellite System, Real-Time Kinematic*) (ŠTRONER et al., 2020). Ces systèmes de géoréférencement introduisent une erreur dans la précision de la position de l'appareil dans l'espace (environ 1,5 cm pour un DJI Phantom 4 RTK (MULAKALA, 2019)). La génération des plans de vol n'intègre pas cette variabilité. Intégrer une erreur de positionnement des images lors de la génération des plans de vol rendrait la méthode ici proposée plus représentative de la réalité.

Afin de réaliser celle-ci, on pourrait imaginer créer une sphère de rayon égale à l'erreur de positionnement de l'appareil à simuler autour de la position du centre de perspective de l'image. On sélectionnerait alors de manière aléatoire un point dans la sphère.

L'emploi de modèle creux permettrait d'éviter l'échantillonnage de surface impossible à reconstruire (section 2.5). En effet, lors du calcul du pourcentage de complétude, l'échantillonnage se fait sur l'ensemble du modèle et les surfaces internes sont impossibles à reconstruire (voir les coupes 3.26). Un pourcentage de 100% n'est dès lors pas atteignable.

Le filtrage des points par confiance permettrait de limiter l'apparition de "taches", résultant de points homologues mal placés (section 2.5). Le risque est de supprimer une partie du modèle correctement reconstruite. Une autre technique visant à filtrer ces "taches" serait de supprimer les points situés plus loin que la limite haute des outliers, calculée comme  $Q3 + 1,5 * IQR$ .

Affiner l'utilisation de la distance entre la reconstruction et le modèle de référence (section 2.5). Actuellement, cette distance est utilisée comme un tout. Une division de celle-ci permettrait d'affiner les informations qu'elle contient. Par exemple, extraire la distance des points formant les arêtes des reconstructions permettrait de mettre en évidence les déviations géométriques introduites par la reconstruction photogrammétrique.

D'autres améliorations sont possibles mais nécessitent plus de temps pour leur mise en oeuvre :

Travailler dans un système de coordonnées différents que le WGS84 pour se passer de l'algorithme d'ICP de CloudCompare. En effet, les unités utilisées par le système de

## CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

coordonnées du projet sont celle par défaut du drone DJI : en degré pour les longitudes et latitudes et en mètre pour les altitudes. CloudCompare gère mal les unités géographiques et la transformation du projet dans un système de coordonnées métrique permettrait l'alignement direct du modèle de référence avec sa reconstruction et éliminerait les erreurs possibles de l'algorithme d'ICP. Il permettrait ainsi de travailler sur uniquement une partie de l'objet à capturer (par exemple, si le modèle de référence contient un édifice à côté d'un arbre, un alignement réussi d'une représentation photogrammétrique de l'édifice seul est possible).

Ajouter des zones d'exclusion et des hauteurs de vol maximale dans la prise d'image virtuelle pour simuler d'éventuels obstacles ou la législation en vigueur.

Utiliser le simulateur de drone virtuel AirSim (AIRSIM, 2022) pour la prise d'image plutôt que le logiciel de photogrammétrie Metashape. Le simulateur de vol étant créé depuis des projets Unreal Engine (UNREAL ENGINE, 2022) ; il permettrait de simuler le drone de manière plus fidèle (vitesse de vol, flous dans les images, obstacles) et d'introduire des paramètres climatiques et physique comme le vent, la pluie ou la luminosité sur une reconstruction photogrammétrique.

L'utilisation du simulateur requiert la création de l'objet à capturer dans le moteur de jeu vidéo Unreal Engine et la transformation des positions des images du système de coordonnées WGS84 au système de coordonnée NED (*north-east-down*), système par défaut dans le moteur de jeu vidéo.

Considérer des combinaisons de prise d'image. On pourra ainsi imaginer créer un scénario combinant prise d'image oblique et nadir, ou circulaire et nadir et tester directement leur effet sur la qualité générale de la reconstruction.

### 3.5.2 Utilisation de la méthode

L'application de la méthode se fait ici sur l'impact de la prise d'image mais peut être appliquée à d'autres paramètres influençant la qualité d'une reconstruction (voir section 1.4).

Elle permet d'isoler le paramètre étudié pour observer son impact seul dans des conditions identiques, en s'affranchissant de contraintes temporelles, spatiales ou administratives.

Elle vient alimenter la recherche sur le sujet en fournissant une méthode rapide, virtuelle et automatisée et peut être adaptée à différents projets. En voici quelques exemples :

Étudier l'impact d'autres paramètres influençant la qualité d'une reconstruction : résolution des images, texture de l'objet, distance focale de l'appareil photo, distance à l'objet d'intérêt, paramètres utilisés lors de la reconstruction du logiciel de photogrammétrie.

Déterminer l'impact d'une géométrie particulière sur l'objet à capturer et en définir les meilleures pratiques.

### CHAPITRE 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Effectuer une calibration des images extérieures (iWitness, PhotoModeler (iWITNESS PRO V4, [2022](#); PHOTOMODELER, [2022](#))) et bloquer le processus de calibration de Metashape pour évaluer l'impact de l'algorithme de calibration sur la reconstruction photogrammétrique finale.

## 4 | Conclusion

Dans le domaine de la construction, la photogrammétrie est aujourd'hui couramment utilisée pour capturer la réalité. Cependant, elle laisse un grand nombre de libertés à l'opérateur et la qualité d'un relevé dépend de tellement de facteurs différents que l'impact de ceux-ci sur la qualité finale du relevé est difficile à évaluer.

Ce travail construit une nouvelle manière d'observer l'effet d'un de ces paramètres en simulant une campagne de relevé directement dans le logiciel de photogrammétrie MetaShape.

L'application de la méthode se fait ici sur l'impact de la prise d'image, et permet de mettre en évidence qu'une reconstruction issue de prise d'image circulaire est presque aussi qualitative qu'une reconstruction issue d'un planificateur de vol, sa faiblesse résidant dans la résolution moindre de la reconstruction finale.

Elle peut néanmoins être appliquée à d'autres paramètres influençant la qualité d'une reconstruction.

Elle permet d'isoler le paramètre étudié pour observer son impact seul dans des conditions identiques, en s'affranchissant de contraintes temporelles, spatiales ou administratives.

Elle vient alimenter la recherche sur le sujet en fournissant une méthode rapide, virtuelle et automatisée de comparaison qui peut être adaptée à différents projets.



## 5 | Bibliographie

- AGISOFT LLC (4 juill. 2021). *Planificateur de mission pour les sites complexes avec Agisoft Metashape*. URL : <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000157953-mission-planning-for-complex-structures> (visité le 03/03/2022).
- (2022). “Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 1.8”. In :
- AHN, Song Ho (2022). *Quaternion to Rotation Matrix*. URL : [http://www.songho.ca/opengl/gl\\_quaternion.html](http://www.songho.ca/opengl/gl_quaternion.html) (visité le 07/08/2022).
- AIRSIM (2022). : *A simulation platform for AI research and experimentation*. URL : <https://microsoft.github.io/AirSim/> (visité le 07/08/2022).
- ALMUKHTAR, Avar et al. (2021). “Reality Capture of Buildings Using 3D Laser Scanners”. In : *CivilEng* 2.1, p. 214-235. ISSN : 2673-4109. DOI : [10.3390/civileng2010012](https://doi.org/10.3390/civileng2010012).
- BAYRAK, Turker et al. (2005). “Evaluation of digital photogrammetry and 3D CAD modelling application in construction management”. In : p. 9.
- BEYER, HA et al. (1995). *Quality control in industry with digital photogrammetry*. Heidelberg : Wichmann Verlag, p. 29-38.
- BIRCHER, Andreas et al. (fév. 2018). “Receding horizon path planning for 3D exploration and surface inspection”. In : *Autonomous Robots* 42.2, p. 291-306. ISSN : 1573-7527. DOI : [10.1007/s10514-016-9610-0](https://doi.org/10.1007/s10514-016-9610-0). URL : <https://doi.org/10.1007/s10514-016-9610-0>.
- BLENDER (2022). - *Free and Open 3D Creation Software*. URL : <https://www.blender.org/> (visité le 07/08/2022).
- BROWN, Duane (1971). “Close-Range Camera Calibration”. In :
- CHIABRANDO, F. et al. (2017). “The influence of flight planning and camera orientation in UAVs photogrammetry .A test in the area of Rocca San Silverstro (LI), Tuscany”. In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W3*, p. 163-170. DOI : [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-163-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-163-2017).
- CLOUDCOMPARE (2022). : *3D point cloud and mesh processing software - Open Source project*. URL : <https://cloudcompare.org/> (visité le 07/08/2022).
- CRAGGS, David et al. (2016). “REALITY CAPTURE for BIM – Application, evaluation and integration within an architectural plan of works”. In : p. 16.

- DAI, Fei, Youyi FENG et al. (avr. 2014). “Photogrammetric error sources and impacts on modeling and surveying in construction engineering applications”. In : *Visualization in Engineering* 2.1, p. 2. ISSN : 2213-7459. DOI : [10.1186/2213-7459-2-2](https://doi.org/10.1186/2213-7459-2-2). URL : <https://doi.org/10.1186/2213-7459-2-2>.
- DAI, Fei et Ming LU (2008). “Photo-based 3D modeling of construction resources for visualization of operations simulation : Case of modeling a precast façade”. In : *2008 Winter Simulation Conference*, p. 2439-2446. DOI : [10.1109/WSC.2008.4736352](https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736352).
- (fév. 2010). “Assessing the Accuracy of Applying Photogrammetry to Take Geometric Measurements on Building Products”. In : *Journal of Construction Engineering and Management* 136.2, p. 242-250. ISSN : 0733-9364, 1943-7862. DOI : [10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000114). (Visité le 03/08/2022).
- DJI Mavic Pro (2022). DJI Official. URL : <https://www.dji.com/be/mavic> (visité le 07/08/2022).
- DJI : FLIGHT PLANNER (2022). *Flight planning software for DJI drones*. DJIFlightPlanner. URL : <https://www.djiflightplanner.com/> (visité le 07/08/2022).
- DUBOIS, Samuel et al. (oct. 2018). “Le relevé 3D à l’heure du BIM. Capturer la réalité en haute définition”. In : p. 12-28, 31-35.
- EISENBEISS, Henri (jan. 2009). “UAV Photogrammetry”. Thèse de doct., p. 235.
- FEDERMAN, A. et al. (2017). “UAV photogrammetric workflow : A best practise guideline”. In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W5*, p. 237-244. DOI : [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-237-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-237-2017).
- FRASER, CS. (1996). *Atkinson, K.B. .Close-range photogrammetry and machine vision*. UK : Whittles Publishing, p. 256-282.
- HARDIN, D. P. et al. (2016). *A Comparison of Popular Point Configurations on  $\mathbb{S}^2$* . DOI : [10.48550/ARXIV.1607.04590](https://doi.org/10.48550/ARXIV.1607.04590). URL : <https://arxiv.org/abs/1607.04590>.
- HART, John C. et al. (1<sup>er</sup> juill. 1994). “Visualizing quaternion rotation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 13.3, p. 256-276. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/195784.197480](https://doi.org/10.1145/195784.197480). (Visité le 07/08/2022).
- HEPP, Benjamin et al. (28 fév. 2019). “Plan3D : Viewpoint and Trajectory Optimization for Aerial Multi-View Stereo Reconstruction”. In : *ACM Transactions on Graphics* 38.1, p. 1-17. ISSN : 0730-0301, 1557-7368. DOI : [10.1145/3233794](https://doi.org/10.1145/3233794). (Visité le 23/02/2022).
- HOPPE, Christof et al. (1<sup>er</sup> jan. 2012). “Photogrammetric Camera Network Design for Micro Aerial Vehicles”. In.
- iWITNESS PRO V4 (2022). *Photometrix Photogrammetry Software*. URL : <https://www.photometrix.com.au/iwitnesspro-v4/> (visité le 07/08/2022).
- KOCH, Tobias et al. (2019). “Automatic and Semantically-Aware 3D UAV Flight Planning for Image-Based 3D Reconstruction”. In : *Remote Sensing* 11.13. ISSN : 2072-4292. DOI : [10.3390/rs11131550](https://doi.org/10.3390/rs11131550).

## CHAPITRE 5. BIBLIOGRAPHIE

- KRAUSE, Andreas et al. (6 fév. 2014). "Submodular Function Maximization". In : *Tractability*. Sous la dir. de Lucas BORDEAUX et al. 1<sup>re</sup> éd. Cambridge University Press, p. 71-104. ISBN : 978-1-107-02519-6 978-1-139-17780-1. DOI : [10.1017/CB09781139177801.004](https://doi.org/10.1017/CB09781139177801.004). (Visité le 07/08/2022).
- LAMAILLE, G et al. (2016). "L'utilisation du Scanning Laser 3D pour la documentation as-built des projets BIM". In : p. 18.
- LINGUA, A. et al. (2017). "3d Model Generation Using Oblique Images Acquired by UAV". In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W2*, p. 107-115. DOI : [10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-107-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W2-107-2017).
- MA, Zhiliang et al. (2018). "A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications". In : *Advanced Engineering Informatics* 37, p. 163-174. ISSN : 1474-0346. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.05.005>.
- MARTIN, Ronald A. et al. (jan. 2016). "Evolutionary View Planning for Optimized UAV Terrain Modeling in a Simulated Environment". In : *Remote Sensing* 8.1. Number : 1 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 26. ISSN : 2072-4292. DOI : [10.3390/rs8010026](https://doi.org/10.3390/rs8010026). (Visité le 07/08/2022).
- MULAKALA, Jay (2019). "Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & Photogrammetry". In : *DroneDeploy*.
- NEX, Francesco et al. (mars 2014). "UAV for 3D mapping applications : a review". In : *Applied Geomatics* 6.1, p. 1-15. ISSN : 1866-928X. DOI : [10.1007/s12518-013-0120-x](https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x). URL : <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>.
- OLAGUE, Gustavo et al. (2007). "Development of a practical photogrammetric network design using evolutionary computing". In : *The Photogrammetric Record* 22.117, p. 22-38. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00403.x>.
- PALAZZOLO, Emanuele et al. (2018). "Effective Exploration for MAVs Based on the Expected Information Gain". In : *Drones* 2.1. ISSN : 2504-446X. DOI : [10.3390/drones2010009](https://doi.org/10.3390/drones2010009).
- PHOTOMODELER (2022). – *Software for photogrammetry measurement and mapping from photos*. URL : <https://www.photomodeler.com/> (visité le 07/08/2022).
- PIROTTI, Francesco et al. (2013). "State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface". In : *European Journal of Remote Sensing* 46.1, p. 66-78. DOI : [10.5721/EuJRS20134605](https://doi.org/10.5721/EuJRS20134605).
- PIX4D (2022). *Professional photogrammetry and drone mapping software*. Pix4D. URL : <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture/> (visité le 07/08/2022).
- PLANNER, ArduPilot : Mission (2022). *Mission Planner Home — Mission Planner documentation*. URL : <https://ardupilot.org/planner/> (visité le 07/08/2022).
- PRECISIONHAWK (2022). *Geospatial Data Analytics for the Enterprise*. URL : <https://www.precisionhawk.com/precisonflight/> (visité le 07/08/2022).



- RAY, FS. (1984). *Photography for the scientist (4th ed., Vol. 2, pp. 104–124)*. Photographic optics. Orlando, FL : Academic Press Inc., p. 104-124.
- REMONDINO, Fabio et al. (2006). “Digital camera calibration methods. Considerations and comparisons”. en. In : sous la dir. d’Hans-Gerd MAAS et al. T. XXXVI. 5. ISPRS Commission V Symposium ‘Image Engineering and Vision Metrology’ ; Conference Location : Dresden, Germany ; Conference Date : September 25-27, 2006. Rio de Janeiro : ISPRS, p. 266-272. DOI : [10.3929/ethz-b-000158067](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067).
- ROBERTS, Mike et al. (4 août 2017). “Submodular Trajectory Optimization for Aerial 3D Scanning”. In : *arXiv :1705.00703 [cs]*. arXiv : [1705.00703](https://arxiv.org/abs/1705.00703). (Visité le 01/03/2022).
- ROSSI, Paolo et al. (1<sup>er</sup> jan. 2017). “Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography : methodology and feasibility analysis”. In : *European Journal of Remote Sensing* 50.1. Publisher : Taylor & Francis, p. 211-221. ISSN : null. DOI : [10.1080/22797254.2017.1313097](https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1313097). (Visité le 26/07/2022).
- SALERI, Renato et al. (9 juill. 2019). “Relevé photogrammétrique d’objets patrimoniaux : un protocole expérimental pour l’optimisation du placement de caméras pour le relevé aérien”. In : *In Situ. Revue des patrimoines* 39. Number : 39 Publisher : Ministère de la culture et de la communication, direction générale des patrimoines. ISSN : 1630-7305. DOI : [10.4000/insitu.21409](https://doi.org/10.4000/insitu.21409). (Visité le 11/02/2022).
- SKETCHFAB (2022). - *Buy sell 3D models. Find everything from low poly assets to animated rigs digital scans for your 3D projects*. URL : <https://sketchfab.com/feed> (visité le 07/08/2022).
- SMITH, Neil et al. (4 déc. 2018). “Aerial path planning for urban scene reconstruction : a continuous optimization method and benchmark”. In : *ACM Transactions on Graphics* 37.6, 183 :1-183 :15. ISSN : 0730-0301. DOI : [10.1145/3272127.3275010](https://doi.org/10.1145/3272127.3275010). (Visité le 28/02/2022).
- ŠTRONER, Martin et al. (jan. 2020). “Evaluation of the Georeferencing Accuracy of a Photogrammetric Model Using a Quadcopter with Onboard GNSS RTK”. In : *Sensors* 20.8. Number : 8 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2318. ISSN : 1424-8220. DOI : [10.3390/s20082318](https://doi.org/10.3390/s20082318). (Visité le 06/08/2022).
- SUN, Zheng et al. (juill. 2018). “Using Drones and 3D Modeling to Survey Tibetan Architectural Heritage : A Case Study with the Multi-Door Stupa”. In : *Sustainability* 10.7. Number : 7 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 22. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su10072259](https://doi.org/10.3390/su10072259). (Visité le 26/07/2022).
- UNREAL ENGINE (2022). : *3D computer graphics game engine developed by Epic Games, Unreal Engine*. URL : <https://www.unrealengine.com/en-US> (visité le 07/08/2022).
- ZHANG, S. et al. (3 août 2020). “Three-dimensional path planning of UAVS imaging or complete photogrammetric reconstruction”. In : *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* V-1-2020, p. 325-331. ISSN : 2194-9050. DOI : [10.5194/isprs-annals-V-1-2020-325-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-1-2020-325-2020). (Visité le 03/03/2022).

## **6 | Annexes**

## 6.1 Les quaternions comme rotations dans l'espace 3D

Soit un vecteur 3D  $\vec{p} = (x_p, y_p, z_p)$  tournant autour du vecteur unitaire de l'axe  $\vec{r} = (x_r, y_r, z_r)$  d'un angle  $\theta$

Le vecteur  $\vec{p}$  peut être converti sous sa forme de quaternion par :  $p = 0 + ix_p + jy_p + kz_p$

Et la représentation sous forme de Quaternion de la rotation du vecteur  $\vec{r}$  d'un demi-angle  $\frac{\theta}{2}$  peut être écrite comme :

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + \sin \frac{\theta}{2} * \vec{r} \tag{6.1}$$

$$= \cos \frac{\theta}{2} + (i * \sin \frac{\theta}{2} * x_r + j * \sin \frac{\theta}{2} * y_r + k * \sin \frac{\theta}{2} * z_r) \tag{6.2}$$

$$\tag{6.3}$$

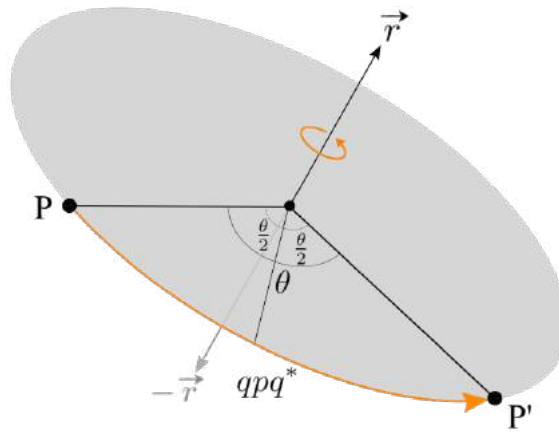


FIGURE 6.1 – Rotation du vecteur  $\vec{p}$  autour de l'axe  $\vec{r}$  d'un angle  $\theta$

Pour faire tourner le quaternion  $p$ , il faut le multiplier par le quaternion  $q$ . Cependant, la longueur de  $p$  est modifiée lors de la multiplication, et il est donc nécessaire de la multiplier à nouveau par  $q^*$  (conjugué de  $q$ ) à l'arrière de  $p$  afin d'annuler les changements de longueur. Comme nous multiplions  $q$  deux fois, à l'avant et à l'arrière, seul un demi-angle de rotation est nécessaire pour  $q$ . Par conséquent, l'équation finale pour la rotation en quaternion devient  $qpq^*$  (AHN, 2022).

## 6.2 Statistique descriptive des distances à la référence pour les différents modèles

CHAPITRE 6. ANNEXES

TABLE 6.1 – Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle simple

	<b>Chev. 30%</b>	<b>Chev. 50%</b>	<b>Chev. 80%</b>	<b>Nadir</b>	<b>Oblique</b>	<b>Circle</b>	<b>Sphere</b>
moyenne [m]	0,005	-0,004	0,002	/	-0,003	-0,020	-0,028
écart-type [m]	0,210	0,076	0,056	/	-0,047	0,110	0,197
min [m]	-0,750	-19,482	-0,811	/	-0,240	-0,740	-2,082
25% [m]	-0,008	-0,010	-0,007	/	-0,008	-0,011	-0,014
médiane [m]	0,000	-0,003	-0,001	/	0,001	-0,002	-0,002
75% [m]	0,007	0,005	0,004	/	0,010	0,005	0,006
max [m]	18,236	5,437	1,705	/	0,176	0,724	1,812
Outliers [%]	11,77	6,65	7,62	/	21,47	13,27	12,34

TABLE 6.2 – Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle intermédiaire

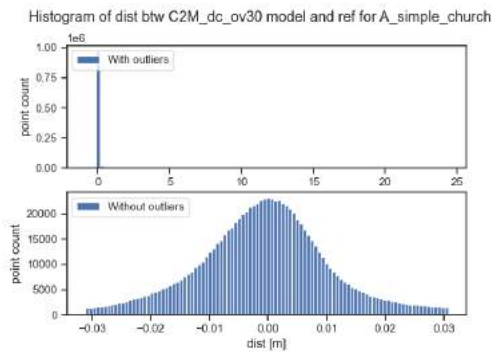
	<b>Chev. 30%</b>	<b>Chev. 50%</b>	<b>Chev. 80%</b>	<b>Nadir</b>	<b>Oblique</b>	<b>Circle</b>	<b>Sphere</b>
mean [m]	0,003	0,011	0,002	/	/	-0,001	-0,015
std [m]	0,155	0,392	0,045	/	/	0,056	0,069
min [m]	-4,318	-11,346	-1,063	/	/	-1,107	-1,237
25% [m]	-0,010	-0,012	-0,008	/	/	-0,016	-0,019
50% [m]	0,000	-0,001	0,000	/	/	-0,001	-0,004
75% [m]	0,011	0,008	0,007	/	/	0,014	0,005
max [m]	32,655	34,876	1,022	/	/	0,908	6,204
Outliers [%]	9,71	12,4	9,32	/	/	10,45	11,13

TABLE 6.3 – Statistique descriptive des distances à la référence. Modèle élaboré

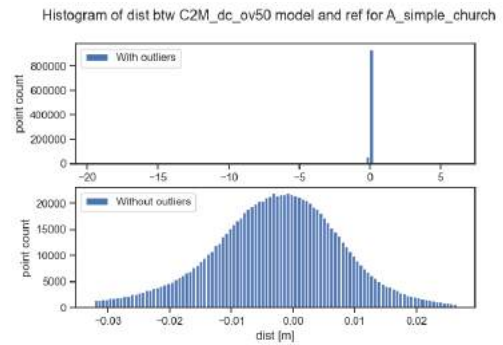
	<b>Chev. 30%</b>	<b>Chev. 50%</b>	<b>Chev. 80%</b>	<b>Nadir</b>	<b>Oblique</b>	<b>Circle</b>	<b>Sphere</b>
mean [m]	0,142	0,028	0,292	/	0,081	0,033	0,006
std [m]	1,953	0,459	2,148	/	0,218	0,194	0,143
min [m]	-28,866	-24,832	-25,695	/	-0,717	-2,149	-2,532
25% [m]	-0,013	-0,014	-0,015	/	-0,011	-0,026	-0,024
50% [m]	0,003	0,003	0,017	/	0,017	0,014	0,008
75% [m]	0,028	0,027	0,155	/	0,101	0,057	0,036
max [m]	39,666	28,923	61,254	/	18,777	3,609	2,850
Outliers [%]	12,43	12,89	11,9	/	14,42	11,49	11,41

### 6.3 Histogramme des distances au modèle de référence

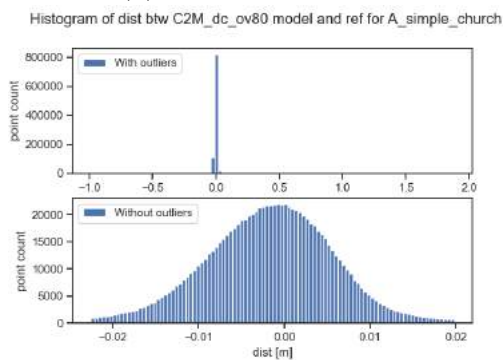
## CHAPITRE 6. ANNEXES



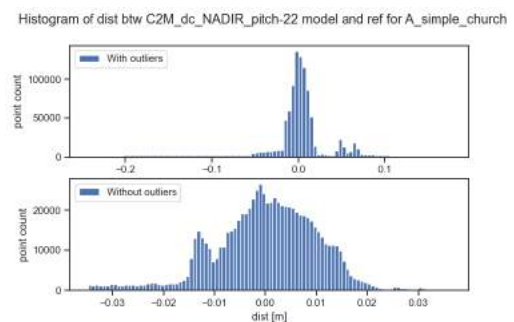
(a) Chevauchement 30%



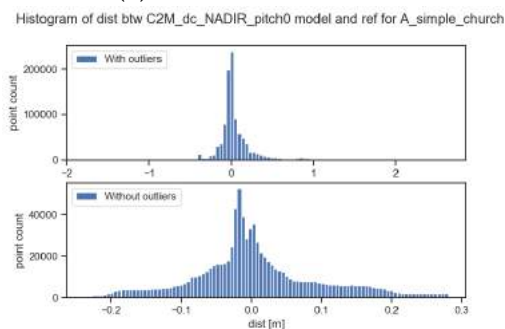
(b) Chevauchement 50%



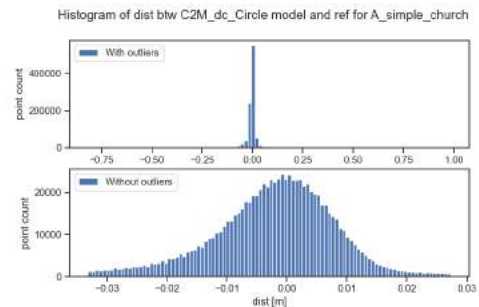
(c) Chevauchement 80%



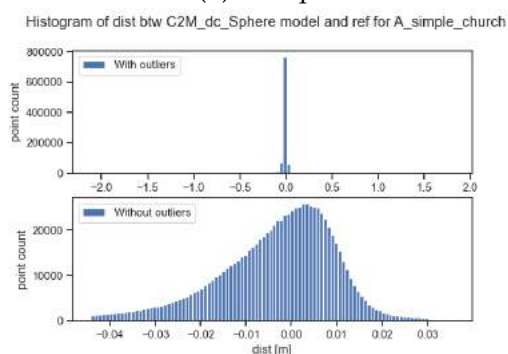
(d) Nadir



(e) Oblique



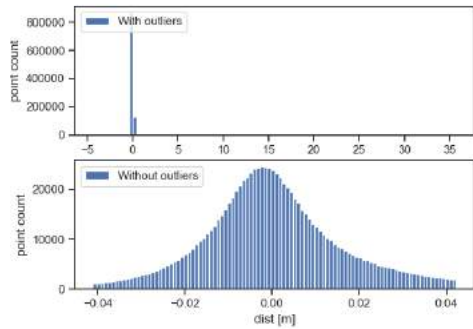
(f) Cercle



(g) Sphère

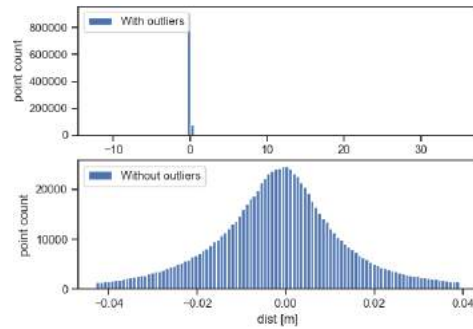
FIGURE 6.2 – Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle simple

Histogram of dist btw C2M\_dc\_ov30 model and ref for B\_middle\_church



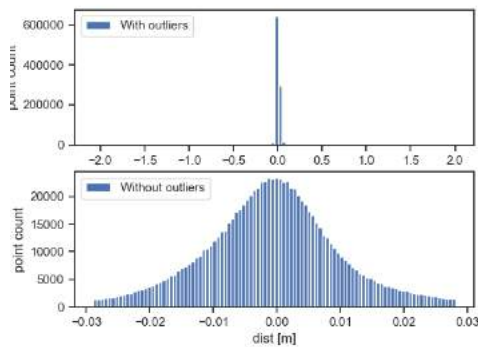
(a) Chevauchement 30%

Histogram of dist btw C2M\_dc\_ov50 model and ref for B\_middle\_church



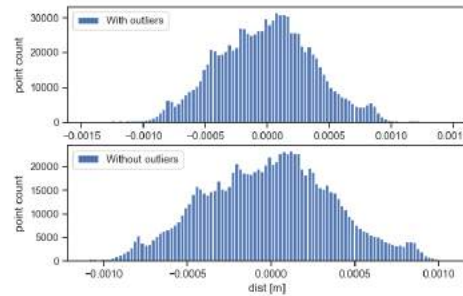
(b) Chevauchement 50%

Histogram of dist btw C2M\_dc\_ov80 model and ref for B\_middle\_church



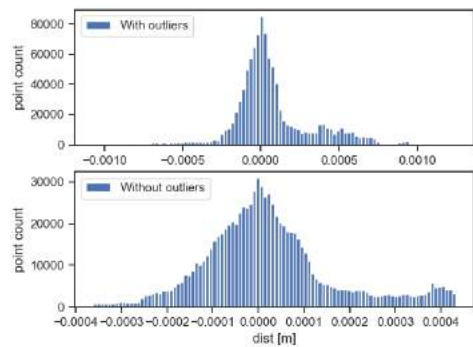
(c) Chevauchement 80%

Histogram of dist btw C2M\_dc\_NADIR\_pitch0 model and ref for B\_middle\_church



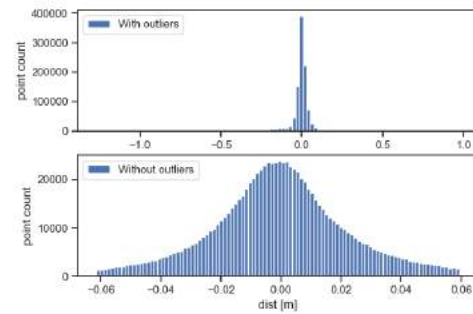
(d) Nadir

Histogram of dist btw C2M\_dc\_NADIR\_pitch-22 model and ref for B\_middle\_c



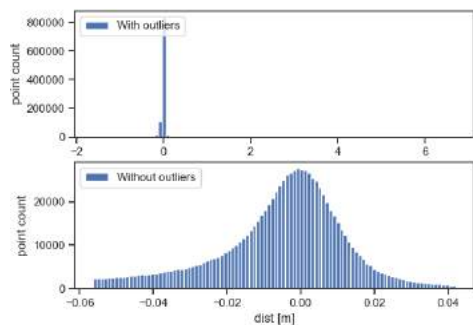
(e) Oblique

Histogram of dist btw C2M\_dc\_Circle model and ref for B\_middle\_church



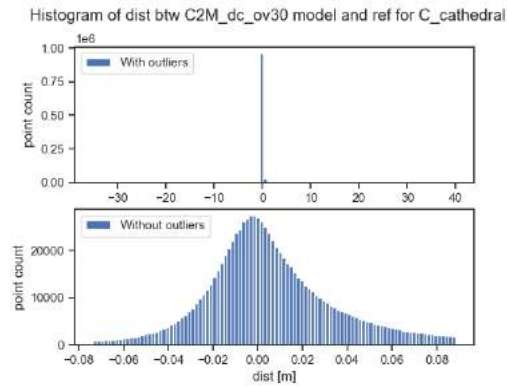
(f) Cercle

Histogram of dist btw C2M\_dc\_Sphere model and ref for B\_middle\_church

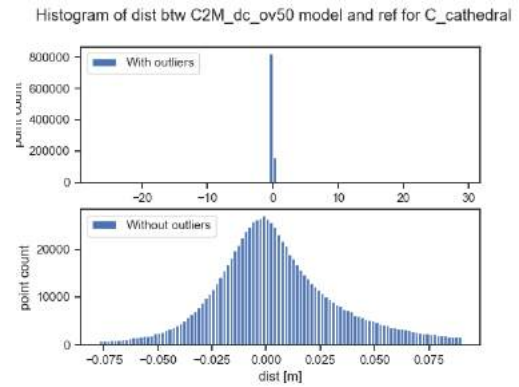


(g) Sphère

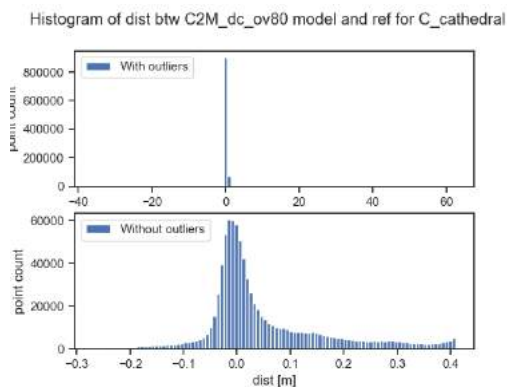
FIGURE 6.3 – Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle intermédiaire



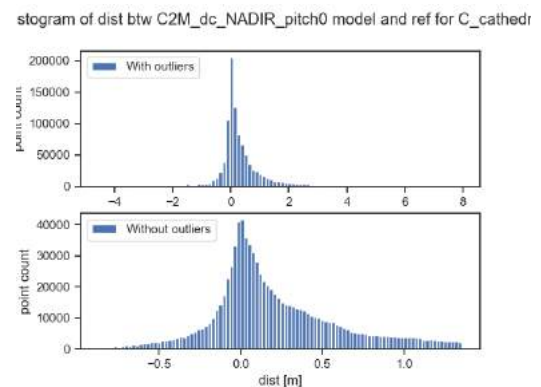
(a) Chevauchement 30%



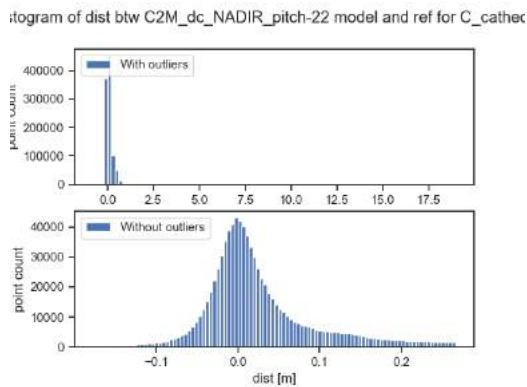
(b) Chevauchement 50%



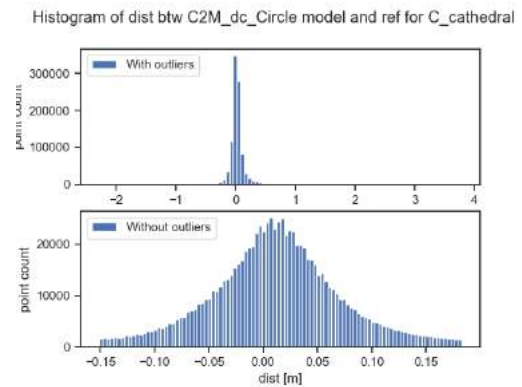
(c) Chevauchement 80%



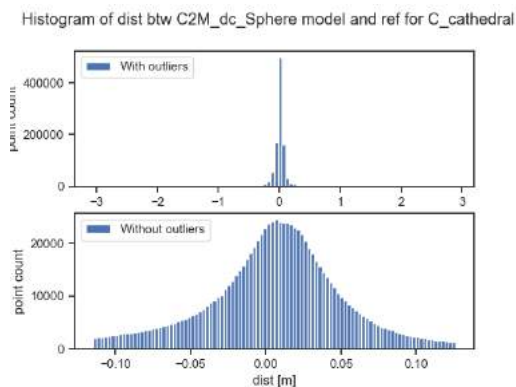
(d) Nadir



(e) Oblique



(f) Cercle



(g) Sphère

FIGURE 6.4 – Histogrammes de la distance au modèle de référence pour le modèle élaboré