



**HAL**  
open science

Mise en place d'une chaîne de production  
photogrammétrique terrestre à l'aide d'un capteur  
photogrammétrique 360° permettant d'avoir une capture  
de réalité qui sera interopérable avec des données  
tridimensionnelles

Ahkim Yassine

► To cite this version:

Ahkim Yassine. Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique terrestre à l'aide d'un capteur photogrammétrique 360° permettant d'avoir une capture de réalité qui sera interopérable avec des données tridimensionnelles. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04359889

**HAL Id: dumas-04359889**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04359889v1>**

Submitted on 21 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**par**

**Yassine AHKIM**

---

Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique terrestre à l'aide d'un capteur photogrammétrique 360° permettant d'avoir une capture de réalité qui sera interopérable avec des données tridimensionnelles

**Soutenu le 06 septembre 2023**

---

**JURY**

Monsieur Christophe Charlet	Président du jury
Monsieur Pierre Fouquet	Maître de stage
Madame Elisabeth Simonetto	Enseignant référent

## Remerciements

Je tiens d'abord à remercier l'ensemble du personnel de l'agence Colas Île Saint Denis pour m'avoir accueilli.

Je remercie plus particulièrement mes encadrants en entreprise : M. Pierre Fouquet et M. Oussama Abouzeid, pour m'avoir aidé en me permettant de travailler de manière autonome, et en me donnant toute l'aide et les outils dont j'ai pu avoir besoin durant ces 5 derniers mois pour répondre au mieux à ma problématique.

Je souhaite également remercier M. Louka Mary, M. Benoît Matelin et M. Christopher Moutinho. L'apport de leur connaissance dans le domaine de la 3D et du BIM m'a été très précieux et je les remercie grandement pour cette enrichissante contribution. Merci aussi à M. Clément Dao d'avoir répondu à mes nombreuses questions techniques dans le domaine des TP/VRD. Je remercie également mes amis qui m'ont soutenu, encouragé et conseillé.

Enfin, pour son soutien depuis le début du cycle ingénieur et bien avant, je remercie ma mère. Merci à toi d'avoir investi en moi et d'avoir su garder ton sang-froid.

## Liste des abréviations

-GCP: Ground Control Point

-RMSE: Root Mean Square Error

-SVM: Super View Max

-GBA: Glissière en béton armé

-HQ : Haute qualité

-FOV : Field of View

## Glossaire

- Les points homologues sont des points qui correspondent à un même détail sur les images
- Les points d'appui sont des points connus en coordonnées sur le terrain et identifiables sur les images.
- Les points de contrôle sont des points connus en coordonnées sur le terrain et identifiables sur les images mais qui ne sont pas utilisés dans le calcul.
- Le géoréférencement est l'opération permettant d'associer des coordonnées à des entités.
- L'étalonnage d'une caméra est une opération permettant de calculer les paramètres internes de la caméra.
- Les modèles 3D sont des représentations virtuelles d'un paysage à partir de prises de vue aériennes ou terrestres.
- Le mode SVM est le mode d'acquisition de la GoPro MAX permettant d'acquérir des vidéos ou des images avec un champ de vision avoisinant 200°, grâce à une lentille fisheye.
- Dans ce mémoire, « modèle 360° » (resp. « modèle SVM ») désigne un maillage texturé généré en utilisant des données issues d'un mode d'acquisition 360° (resp. du mode SVM)

# Table des matières

<b>I</b>	<b>ETAT DE L'ART .....</b>	<b>8</b>
I.1	LES APPAREILS D'ACQUISITION OMNIDIRECTIONNELS .....	8
I.1.1	Cas des caméras omnidirectionnelles dioptriques .....	9
I.2	ASSEMBLAGE D'IMAGES ISSUES DE CAMERAS A DOUBLE OBJECTIF FISHEYE .....	10
I.3	EXEMPLES DE MODELISATION 3D PAR PHOTOGRAMMETRIE TERRESTRE.....	11
I.3.1	Modélisation d'un tronçon de tunnel en utilisant une caméra 360° .....	11
	Tableau 1: Paramètres utilisés dans le logiciel Reality Capture pour l'étape de l'alignement [9].....	13
	Tableau 2: Résultats obtenus après la génération du nuage de points pour les trois méthodes [9]....	14
I.3.2	Modélisation de façades en utilisant une caméra 360° .....	14
<b>II</b>	<b>BENCHMARK DES CAMERAS OMNIDIRECTIONNELLES DANS LE MARCHE.....</b>	<b>16</b>
II.1	ETUDE PREALABLE.....	16
II.2	CRITERES DE SELECTION .....	17
	Tableau 3: Tableau récapitulatif des caméras 360° dans le marché et leurs caractéristiques (Source : Production personnelle) .....	18
II.3	CHOIX FINAL DE LA CAMERA.....	18
<b>III</b>	<b>ELABORATION DE LA METHODOLOGIE D'ACQUISITION .....</b>	<b>19</b>
III.1	MOYENS MIS A DISPOSITION .....	19
III.2	DEROULEMENT DE L'ACQUISITION .....	19
III.2.1	Étapes .....	19
III.2.2	Démonstration de la relation de la distance de recul.....	20
III.3	PREMIERS ESSAIS .....	21
III.3.1	Façade de l'agence .....	21
III.3.2	Chantier rénovation Neuilly-sur-Seine .....	21
III.4	ÉTALONNAGE DE LA CAMERA .....	22
III.5	CHAINE DE PRODUCTION : PARTIE ACQUISITION .....	25
<b>IV</b>	<b>TRAITEMENT DES DONNEES ET COMPARAISON DES RESULTATS.....</b>	<b>26</b>
IV.1	RESULTATS DES ESSAIS REALISES.....	26
IV.1.1	Paramètres de traitement.....	26
IV.1.2	Résultats des traitements.....	27
IV.1.2.1	Façade de l'agence Colas .....	27
IV.1.2.2	Chantier de Neuilly-sur-Seine .....	29
IV.1.3	Comparaison par CloudCompare .....	30
IV.1.4	Synthèse.....	32
IV.2	ETUDE DE PRECISION.....	33
IV.2.1	Traitement avec 6 GCP uniformément répartis .....	33
IV.2.2	Traitement avec 4 GCP mal répartis .....	34
IV.2.3	Conclusion .....	35
IV.3	CHAINE DE TRAITEMENT .....	35
IV.3.1	Importation et mise au point des données .....	35
IV.3.2	Premiers résultats .....	36
IV.3.3	Optimisation de l'alignement .....	37
IV.3.4	Fusion .....	37
IV.3.5	Formats d'export et interopérabilité.....	37
<b>V</b>	<b>EXEMPLE D'APPLICATION DE LA CHAINE DE PRODUCTION .....</b>	<b>38</b>
V.1	ACQUISITION .....	39
V.2	GEOREFERENCEMENT .....	39

V.3	TRAITEMENT.....	40
V.4	AJOUT DES DONNEES GOOGLE EARTH ET HARMONISATION DES RESULTATS.....	42
	Conclusion.....	43
	Bibliographie .....	44
	Table des annexes .....	47
	Annexe 1 Résultats CloudCompare de l'article [5] .....	48
	Annexe 2 Maillage obtenu en utilisant le mode SVM pour le chantier de Neuilly-sur-Seine (Production personnelle) .....	50
	Annexe 3 Chaîne de production : partie traitement (Production personnelle) .....	51
	Annexe 4 Nuages obtenus après nettoyage des façades SVM (haut) et 360 (bas) (Production personnelle) .....	52
	Annexe 5 Tableaux des résultats de l'étude de précision en fonction des GCP (Production personnelle) .....	53
	Annexe 6 Modèle 3D d'un chantier de réhabilitation de voirie (Production personnelle)...59	
	Annexe 7 Modèle 3D de façade généré lors de la phase d'essai sur le chantier Neuilly-sur-Seine (mode 360°) (Production personnelle) .....	60
	Annexe 8 Nuage de points utilisé pour le calcul de cubatures dans une carrière (Production personnelle) .....	61
	Liste des figures .....	64
	Liste des tableaux.....	65

## Introduction

L'agence Colas Paris Nord, filiale du groupe Bouygues, réalise des opérations de travaux de voirie et réseaux divers. Celle-ci s'occupe tant de la partie étude et chiffrage lors des phases d'appel d'offre, que de la partie exécution des travaux. L'équipe de production se compose d'un bureau d'étude, d'un secteur chargé d'exécution et d'une cellule topographie.

L'objectif de la cellule topographie est de fournir des services topographiques de haute qualité pour soutenir les activités de l'entreprise. Celle-ci joue un rôle essentiel dans la collecte, le traitement et l'analyse des données spatiales nécessaires à la réalisation des projets de construction. Avec l'aide du bureau d'étude, la cellule contribue également à la phase de réponse aux appels d'offres, notamment à travers la réalisation de plans de métrés et de présentations 3D. Les plans de métrés servent à quantifier les éléments présents dans un chantier et les différentes surfaces remarquables dans celui-ci. Par exemple, ces plans permettent de compter le nombre de regards, le nombre d'arbre, les surfaces de trottoirs, de voirie... etc. Le rôle des présentations 3D est de créer un environnement immersif du chantier, de calculer des volumes et de compléter les informations contenues dans les plans.

C'est dans ce contexte que cette étude sera réalisée.

En effet, notre objectif principal consiste à explorer les limites de la modélisation 3D des caméras 360°, et à mettre en place une chaîne de production photogrammétrique dont le but sera d'améliorer la qualité des rendus 3D de la cellule topographie.

Pour répondre à cette problématique, nous avons décidé de procéder de la manière suivante. La première partie de ce mémoire fait un état de l'art des études qui ont été réalisées sur le sujet des caméras omnidirectionnelles, en commençant par les généralités et allant jusqu'au fonctionnement de l'assemblage d'images de celles-ci. Cette partie présentera également certaines études dont le but est de réaliser des modèles 3D de différentes scènes en utilisant cette même technologie.

La deuxième partie consiste à faire un récapitulatif des caméras 360° présente dans le marché qui peuvent servir à notre étude. Nous avons commencé cette partie par une étude préalable réalisée avec une caméra low-cost, ensuite nous nous sommes basés sur ces résultats afin d'établir des critères de sélection pour choisir la bonne caméra 360°. Nous présenterons à la fin de cette partie la caméra choisie pour notre étude ainsi que ces avantages.



La troisième partie concerne la chaîne d'acquisition. Celle-ci présente les différentes étapes à suivre afin d'obtenir des données pertinentes en entrée du logiciel de traitement. Nous verrons donc les étapes à suivre sur le terrain (distances clés à respecter, recouvrement minimal, ...) mais aussi au bureau (gestion des GCP, contrôle des paramètres internes de la caméra, ...).

La quatrième partie présente la chaîne de traitement dans laquelle nous examinerons les différentes étapes de traitement, notamment l'étalonnage de la caméra, la génération de nuages de points, la création de maillages 3D et la texture des modèles. Nous aborderons également les paramètres et les options avancées permettant d'optimiser les résultats en fonction des spécificités du projet. Nous verrons finalement un exemple d'application de la chaîne.

## **I Etat de l'art**

### **I.1 Les appareils d'acquisition omnidirectionnels :**

Une caméra omnidirectionnelle (du latin omni, signifiant tout) est une caméra qui possède un champ de vision de 360 degrés dans le plan horizontal, ou qui couvre un hémisphère ou (approximativement) une sphère entière. [3]

Il existe plusieurs types de caméras omnidirectionnelles, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients en fonction des besoins spécifiques de l'application :

- Les caméras dioptriques utilisent des lentilles spéciales pour capturer des images à angle de vue large, souvent avec des distorsions minimales.
- Les caméras catadioptriques combinent des miroirs et des lentilles pour capturer une vue complète à 360 degrés.
- Les caméras polydioptriques utilisent plusieurs caméras placées dans différentes directions pour fournir une vue panoramique à 360 degrés.

La figure 1 présente ces différents types de caméras avec leurs FOV correspondants.

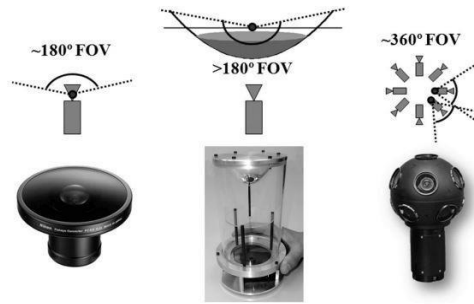


Figure 1 : (a) caméra dioptrique (fisheye) ; (b) caméra catadioptrique ; (c) caméra polydioptrique (Source : [5])

### I.1.1 Cas des caméras omnidirectionnelles dioptriques

Les caméras omnidirectionnelles dioptriques sont construites à l'aide d'une combinaison de lentilles sphériques et/ou asphériques qui peuvent produire une distorsion très élevée.

Leur conception optique se concentre sur la projection de la scène complète sur un plan image plat. La lentille sphérique ou asphérique est placée devant un capteur d'image pour obtenir un grand angle de vue. Les caméras dioptriques sont classées en deux types : les caméras à une seule lentille (monoculaire) et les caméras à plusieurs lentilles.

Les caméras dioptriques à une seule lentille sont les plus courantes, car elles sont relativement simples et peu coûteuses à fabriquer. Elles utilisent une lentille fisheye qui est conçue pour couvrir un champ de vision de plus de 180 degrés. [3]

L'avantage principal des caméras 360 est leur capacité à capturer un champ plus large de l'environnement de la scène 3D. Cela facilite donc la phase d'acquisition des données puisqu'elle requiert moins d'images et procure un recouvrement conséquent entre ces dernières. Cela implique que le processus d'acquisition est aussi plus simple, chose qui réduit la probabilité d'effectuer des erreurs. [5]

La génération d'images panoramiques ainsi que leur visualisation est une procédure complexe, bien que certaines marques de caméras panoramiques proposent leurs propres algorithmes d'assemblages intégrés dans leurs logiciels de visualisation.

Dans les parties qui suivent, nous présenterons quelques techniques utilisées pour l'assemblage d'images panoramiques.

## I.2 Assemblage d'images issues de caméras à double objectif fisheye

La génération d'images ou vidéos panoramiques n'est pas automatique à la sortie de l'appareil d'acquisition. Il existe une série de transformations à réaliser afin de parvenir à une image panoramique qui représente une vue large et continue de la scène photographiée. [2, 3]

Les équations présentées dans l'article [6] réalisé par l'université de Stanford sont utilisées pour modéliser la géométrie de la caméra fisheye, afin de pouvoir reconstruire la scène 3D à partir des images capturées par la caméra.

Ces équations constituent un modèle mathématique qui décrit comment la lumière est projetée de la scène sur l'image capturée par la caméra. Elles peuvent être implémentées dans des codes informatiques pour automatiser la reconstruction 3D à partir d'images brutes de la caméra.

Ainsi, comme indiqué dans la figure 2, un point P de la scène correspond à un point  $p^*$  de la sphère de projection et à un point p sur le plan de l'image. Les équations qui lient chacun de ces points sont :

$$\begin{aligned} P &= [X_p \quad Y_p \quad Z_p]^T \\ p^* &= [f_s \sin \varphi \cos \theta \quad f_s \sin \varphi \sin \theta \quad f_s \cos \varphi]^T \\ p^* &= \lambda P \end{aligned}$$

Avec :

$$\lambda = \frac{f_s}{\rho} \quad \text{et} \quad \rho = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2}$$

Où :

- $f_s$  : rayon de la sphère de projection
- $\rho$  : distance du centre de projection O au point P
- $\varphi, \theta$ : coordonnées sphériques du point P

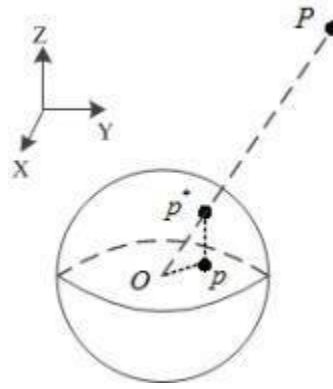


Figure 2 : Modèle de caméra fisheye en géométrie sphérique (Source : [10])

Ces équations sont utilisées pour calculer la position et l'orientation de la caméra, la distance focale, la position du centre optique de l'image et la matrice d'étalonnage de la caméra, qui sont ensuite utilisées pour projeter les points 3D sur l'image 2D et reconstruire la scène. [10]

### I.3 Exemples de modélisation 3D par photogrammétrie terrestre

#### I.3.1 Modélisation d'un tronçon de tunnel en utilisant une caméra 360°

L'étude [5] vise à déterminer comment accélérer l'acquisition d'images dans les tunnels souterrains pour la reconstruction photogrammétrique SfM-MVS tout en maintenant le coût du matériel à un niveau bas.

La caméra omnidirectionnelle utilisée durant cette étude est la caméra Insta360 Pro. Celle-ci dispose de six objectifs fisheye de 2mm (f/2.4) et d'un capteur de dimension 6.311 x 4.721 mm. Sa résolution est de 4000 x 3000 pixels. Avec ces paramètres, l'appareil capture 6 photos différentes, qui sont par la suite combinées en un seul panorama équirectangulaire. Les tests réalisés lors de cette étude ont été mis en place sur un tronçon de tunnel de 10 mètres de long, comme indiqué dans la figure 3.

Le traitement des données a été réalisé à l'aide du logiciel RealityCapture v.1.2 et la configuration de la machine utilisée est celle d'un PC avec Intel i9-9900K @3.60 GHz CPU, 64 GB RAM et une carte graphique NVIDIA TITAN RTX GPU (24GB de mémoire).

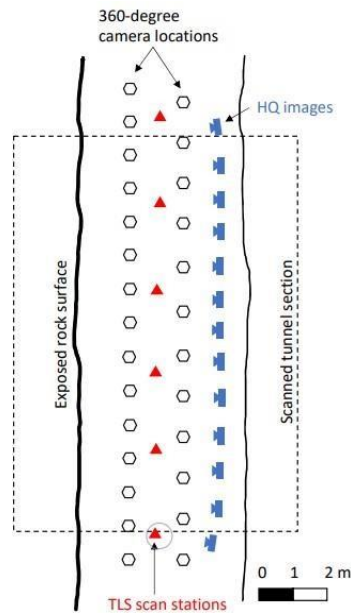


Figure 3 : Configuration de l’acquisition des images dans le tunnel (Source : [9])

Ensuite, après avoir importé les images ainsi que les points de contrôle, la distorsion de la caméra a été supprimée grâce à la méthode “K + Brown 4 with tangential2”, régie par les équations suivantes : [7]

- Pour la distorsion radiale :

Soit  $\tau$  une fonction polynomiale en  $r$  définie par la relation suivante :

$$\tau = (1 + k_1 \times r^2 + k_2 \times r^4 + k_3 \times r^6)$$

Alors :

$$\begin{aligned} x_{\text{corrigé}} &= \tau(r) \cdot x \\ y_{\text{corrigé}} &= \tau(r) \cdot y \end{aligned}$$

Où :

- $x_{\text{corrigé}}$  et  $y_{\text{corrigé}}$  sont les coordonnées corrigées d’un point dans l’image après correction de la distorsion.
- $x$  et  $y$  sont les coordonnées non corrigées du même point dans l’image.
- $r$  est la distance radiale du point par rapport au centre optique de l’image.
- $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  sont les coefficients de distorsion qui déterminent l’amplitude de la distorsion radiale.
- Pour la distorsion tangentielle :

$$x_{\text{corrigé}} = x + [2 \times p_1 \times x \times y + p_2 \times (r^2 + 2 \times x^2)]$$

$$y_{\text{corrigé}} = y + [2 \times p_2 \times x \times y + p_1 \times (r^2 + 2 \times y^2)]$$

Où  $p_1$  et  $p_2$  représentent les coefficients de distorsion tangentielle de la caméra.

Le tableau 1 présente les paramètres utilisés dans le logiciel RealityCapture lors de l'étape d'alignement.

Alignment Parameter	Value
Image overlap	Low
Max features per Mpx	10,000
Max features per image	40,000
Detector sensitivity	Medium
Preselector features	10,000
Image downscale factor	1
Maximal feature reprojection error [pixels]	1.00
Use camera positions	True
Lens distortion model	K + Brown4 with tangential2

**Tableau 1:** Paramètres utilisés dans le logiciel Reality Capture pour l'étape de l'alignement [9]

Ensuite, le nuage de points dense a été reconstruit à l'aide de l'algorithme MVS en projetant tous les points identifiés des images 2D vers un nuage de points 3D.

Le premier modèle photogrammétrique a été obtenu par la méthode SfM-MVS en utilisant une caméra Canon EOS RP Mirrorless DSLR avec un capteur plein format de 36 x 24 mm, équipé d'une lentille Canon EF 14 mm f/2.8L II USM. Au total, 111 images ont été acquises avec une résolution de 26.2 Mégapixels.

Le deuxième modèle photogrammétrique a été obtenu en combinant les données acquises par la caméra 360° avec d'autres images de haute résolution (HQ) du mur en roche acquis grâce à la caméra DSLR. L'objectif derrière cette méthode est de vérifier s'il est possible d'améliorer la qualité visuelle du modèle issu des données de la caméra 360, tout en gardant un temps de traitement et d'acquisition court.

Ainsi, 13 images haute résolution ont été prises avec une caméra Canon 5Ds R full-frame DSLR avec une lentille Canon EF 35 mm f/1.4 L II USM prime.

Le tableau 2 résume les informations des trois modèles comparés :

Photogrammetric Method	360	DSLR	360 + HQ
Number of images	162	111	162 + 13
Capture time	10 min	34 min	10 + 4 min
Alignment time	2 min 19 s	1 min 17 s	2 min 59 s
Mesh reconstruction and texturing time	22 min 23 s	49 min 04 s	32 min 29 s
Overall processing time	24 min 42 s	50 min 21 s	35 min 28 s
Surface point density	20.7 pts/cm <sup>2</sup>	33.2 pts/cm <sup>2</sup>	87.4 pts/cm <sup>2</sup>
Surface point density–mapping wall	24.5 pts/cm <sup>2</sup>	24.2 pts/cm <sup>2</sup>	96.9 pts/cm <sup>2</sup>

**Tableau 2:** Résultats obtenus après la génération du nuage de points pour les trois méthodes [9]

Les résultats obtenus pour la densité de points pour les méthodes énoncées sont présentés dans l'annexe 1.

D'après ces résultats, il est clair que le modèle amélioré utilisant simultanément les données de la caméra omnidirectionnelle appuyée par les données de la caméra DSLR est intéressant à prendre en compte dans la mesure où il offre une densité de points élevée sur la zone souhaitée en ajoutant 4 minutes d'acquisition. Le modèle amélioré permet d'obtenir une densité de points presque 4 fois plus élevée alors que le temps de capture n'est que de 4 minutes plus long et que le temps de traitement global n'est que de 11 minutes plus long.

### I.3.2 Modélisation de façades en utilisant une caméra 360°

L'étude faite par l'entreprise 3DForensics [9] commence par expliquer l'avantage principal des caméras 360°, qui se traduit par le fait qu'il n'y a pas besoin de pointer la caméra vers un endroit précis puisque la caméra capte les détails de la scène quelle que soit l'orientation de la caméra à une position fixée. Cela fait que l'ensemble des données utilisé par la suite pour la reconstruction 3D n'est pas aussi volumineux que pour un appareil DSLR classique.

En revanche, un des désavantages de ces capteurs est le fait que la distorsion induite par les lentilles de ces appareils est très importante. Il est donc plus difficile d'estimer les paramètres de cette distorsion, et d'appliquer ensuite les corrections nécessaires aux images acquises. De plus, il y a un processus d'assemblage des photos issues des deux objectifs de la caméra appelé en anglais "Stitching", qui est susceptible de faire perdre à l'image un certain nombre d'informations sur la scène.

L'objectif de cette étude est la reconstruction 3D d'une scène comportant une façade de bâtiment d'environ 7 mètres de haut et 15 mètres de large (figure 4), et un mur de

soutènement de 1 mètre de haut et 15 mètres de large. Lors de cette étude, nous ne nous intéresserons pas au géoréférencement et la mise à l'échelle du modèle.



Figure 4 : Photo de la scène à reconstruire (Source : Google Maps)

L'appareil utilisé pour la réalisation de cette étude est la caméra insta360 One X qui dispose de deux objectifs fisheye. Une canne a aussi été utilisée pour prendre des photos en hauteur. Les images utilisées ont été acquises en réalisant 3 rangées de photos éloignées d'environ deux mètres les unes des autres, et en se limitant à l'espace entre la façade et le mur de soutènement.

Le traitement a été réalisé par le logiciel Agisoft Metashape en utilisant les paramètres de traitement par défaut. Le maillage 3D texturé obtenu est représenté dans les figures 5 et 6 :

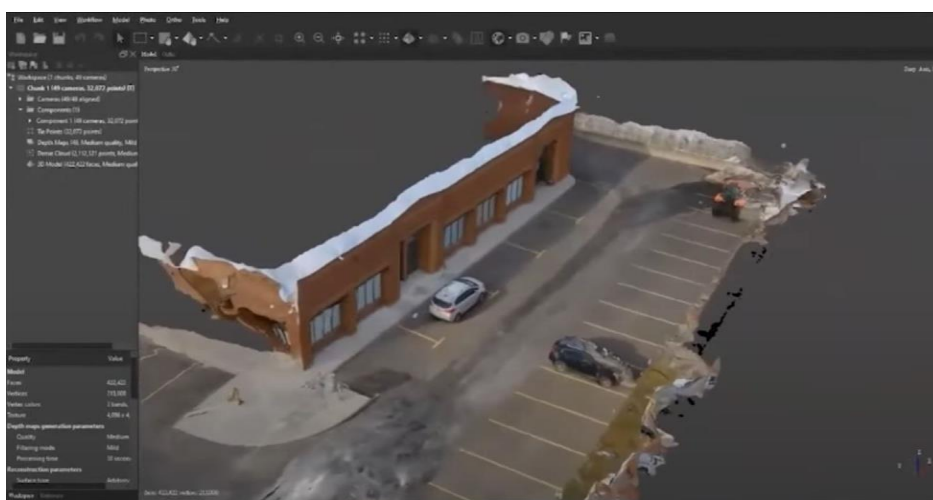


Figure 5 : Capture d'écran de l'interface du logiciel Agisoft Metashape affichant le maillage texturé généré (Source : [8])



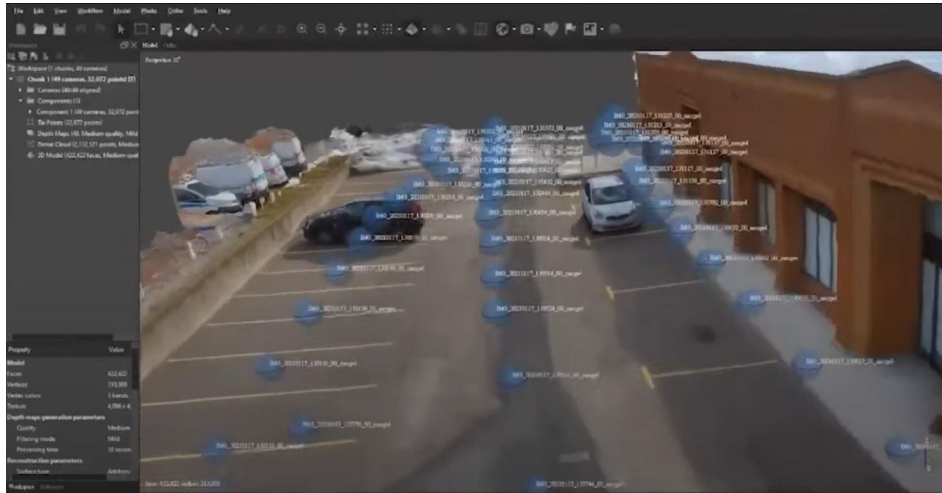


Figure 6 : Capture d'écran de l'interface du logiciel Agisoft Metashape affichant les positions calculées des caméras lors de l'alignement et le maillage texturé généré (Source :[8])

Les figures 6 et 7 présentent les résultats générés par le logiciel de traitement Agisoft Metashape. Dans la figure 7, les positions des caméras calculées lors de l'étape d'alignement sont représentées par des sphères bleues.

Nous pouvons remarquer que l'objectif de reconstruction de la façade et du mur de soutènement a bien été réalisé. Néanmoins, la précision de certains détails tel que la limite haute de la façade reste faible puisque le ciel a été considéré par le logiciel comme étant un détail attaché à l'objet reconstruit. La qualité de la texture reste bonne. La profondeur de certains objets tels que les fenêtres et les portes ont été bien calculés aussi.

## II Benchmark des caméras omnidirectionnelles dans le marché

Pour assurer la reproductibilité et la cohérence des résultats, il est nécessaire de choisir une caméra 360° qui sera utilisée pour chaque acquisition lors de la mise en place de la chaîne de production.

### II.1 Etude préalable

Avant de procéder à l'étude des différents choix disponibles dans le marché, nous avons décidé d'essayer la caméra dont dispose le bureau. Il s'agit d'une caméra 360° de la marque Ricoh Theta, modèle SC2. Cette caméra a une résolution de 12 mégapixels, une focale de 1.57 mm, son autonomie de batterie est limitée à 60 minutes et elle a coûté à peu près 200 euros.

Nous avons commencé par réaliser un test d'acquisition de données sur la façade de l'agence, puis nous avons traité ces données. Ce test nous a servi de base afin de connaître les points forts et points faibles à prendre en compte lors de la sélection de la caméra panoramique.

La figure 7 présente les résultats obtenus après le traitement :



Figure 7 : Maillage texturé obtenu à partir d'un relevé photogrammétrique en utilisant la caméra 360° Ricoh Theta SC2 (Source : production personnelle)

Nous avons choisi de garder les paramètres de traitement fixés par défaut proposés par le logiciel.

À la suite de ce traitement, nous remarquons que le maillage présente un effet de flou horizontal. Cet effet est dû au fait que les appareils Ricoh Theta SC2 ne disposent pas de stabilisateurs électroniques leur permettant de stabiliser leurs prises de vue. [13]

Cette première étude nous aide à définir les premiers critères à prendre en compte lors du choix de la caméra omnidirectionnelle :

- Il faut que la caméra dispose d'un stabilisateur numérique intégré afin d'éviter l'effet de flou horizontal obtenu sur ce modèle.
- Il faut choisir une caméra disposant d'une meilleure résolution que la Ricoh Theta SC2 pour améliorer la qualité des textures.

## II.2 Critères de sélection

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel de choisir une caméra 360° appropriée qui répond aux exigences spécifiques des levés photogrammétriques.

Dans un premier temps, le critère le plus important est de choisir une caméra qui pourra être utilisée par l'équipe topographie dans l'entreprise pour générer des maillages

texturés 3D de bonne qualité. Or d’après la partie I.3.2 de l’état de l’art, arriver à ce résultat peut être parfois difficile en vue des distorsions présentés par ce type de caméras.

Il serait donc judicieux de choisir une caméra qui pourra modifier son champ de vision et/ou sa distorsion au cas où ses déformations seraient trop importantes pour un traitement photogrammétrique.

En plus des conclusions établies dans la partie II.1, plusieurs autres critères doivent être pris en compte pour assurer des résultats de haute qualité. Nous aurons donc besoin d’une caméra dont la distance focale est suffisamment courte pour capturer un bâtiment en entier, sans être contraint de trop s’éloigner de celui-ci. [12]

Le coût de la caméra est aussi un élément important à prendre en considération, en équilibrant les fonctionnalités et les performances nécessaires avec le budget disponible.

Ainsi, le tableau 3 résume les caméras choisies pour notre étude, leurs paramètres respectifs, ainsi que leur compatibilité ou non avec les critères énoncés :

	Résolution (Mégapixel)	Focale 360° (mm)	Stabilisation numérique	Autonomie de la batterie	Prix 2023 (Euro)	Contrôle du champ de vision
Insta360 X2	18	2.68	Oui	80 min	415	Non
Insta360 X3	18	3.25	Oui	70 min	540	Non
GoPro MAX	17	2.3	Oui	90 min	430	Oui
Ricoh Theta Z1	23	7.6	Oui	180 min	1300	Non
Ladybug5+	51	4.5	Oui	120 min	3500	Oui

**Tableau 3:** Tableau récapitulatif des caméras 360° dans le marché et leurs caractéristiques (Source : Production personnelle)

### II.3 Choix final de la caméra

Nous avons décidé de choisir la caméra GoPro MAX car sa résolution est correcte, sa focale respecte bien le critère énoncé, elle dispose d’une stabilisation numérique, chose qui permettra de supprimer les flous remarqués lors de l’étude de la caméra Ricoh Theta SC2 (II.1). L’autonomie de sa batterie est bonne comparée aux

modèles du même calibre. Son prix entre dans le budget de l'agence. Et elle permet de naviguer entre le mode Hero qui est un mode de capture fisheye à champs de vision variable, et le mode de capture 360°.

La GoPro Max propose plusieurs champs de vision pour l'acquisition de photos ou vidéos : on dénombre en effet jusqu'à 3 changements d'objectif en mode photo (large équivalent à une focale de 16mm et SuperViewMax équivalent à une focale de 13mm), 4 changements d'objectif en mode vidéo (SVM 13 mm, Large 16 mm, linéaire 19 mm, étroit 27 mm) et le mode 360°.

### **III Elaboration de la méthodologie d'acquisition**

#### **III.1 Moyens mis à disposition**

Pour réaliser l'acquisition des photos, nous avons utilisé une canne GoPro acquise anciennement par l'agence. Celle-ci a été pratique pour l'acquisition de photos en hauteur puisqu'elle arrive jusqu'à 5 mètres de haut. S'ajoutant à cela la caméra en elle-même équipée d'une carte SD de 64 Go.

Pour le géoréférencement des modèles, nous avons à disposition une station mobile GNSS R10 de la marque Trimble, ainsi qu'une station totale Trimble.

#### **III.2 Déroulement de l'acquisition**

##### **III.2.1 Etapes**

La première étape à la réception d'une demande de modélisation 3D par méthode photogrammétrique terrestre est de rassembler le plus d'informations possibles sur l'objet à modéliser. En effet, la topographie des lieux ainsi que l'état de l'environnement peut jouer un rôle important dans la construction du modèle.

Ainsi, nous commençons par rassembler toutes les informations disponibles sur le chantier, telles que les plans, les relevés topographiques, les contraintes techniques, les spécifications du projet, et tout autre document fourni par le client. Ces informations fournissent une base solide pour la planification et l'exécution de la mission.

Cela nous permet d'élaborer un plan détaillé pour la mission photogrammétrique. Cela comprend la détermination des zones d'intérêt à couvrir, la définition des itinéraires de déplacement, l'estimation du nombre de prises de vue nécessaires, et la sélection des équipements appropriés.

A partir de cette étape, nous pouvons choisir la technique de capture adaptée au chantier et aux objectifs de la mission, c'est-à-dire si l'acquisition se fera par le mode photo ou le mode vidéo. En effet, comme indiqué dans l'article [5], les photos 360° sont particulièrement efficaces dans les environnements couverts, fermés ou étroits. Le mode vidéo SVM sera utilisé lors des levés comportant des zones larges ou avec des contraintes (zones vertes, tranchées de réseaux...) afin d'obtenir des modèles ciblés.

La deuxième étape est la détermination des paramètres de notre levé photogrammétrique. Nous avons choisi d'estimer la distance par rapport à la façade afin de connaître la distance à partir de laquelle la façade pourra être vue en entier. Cette distance, appelée distance de recul, nous permettra de savoir où arrêter notre levé photogrammétrique en étant sûr que nous aurons assez d'éléments pour modéliser la façade dans son entièreté lors de la phase de traitement.

### III.2.2 Démonstration de la relation de la distance de recul

Soient  $f$  la focale,  $TC_v$  la taille du capteur verticale de l'objectif,  $H$  la hauteur de la façade,  $Av$  l'angle de champs vertical et  $D$  la distance caméra-façade, comme définis dans le schéma optique représenté dans la figure 8 :

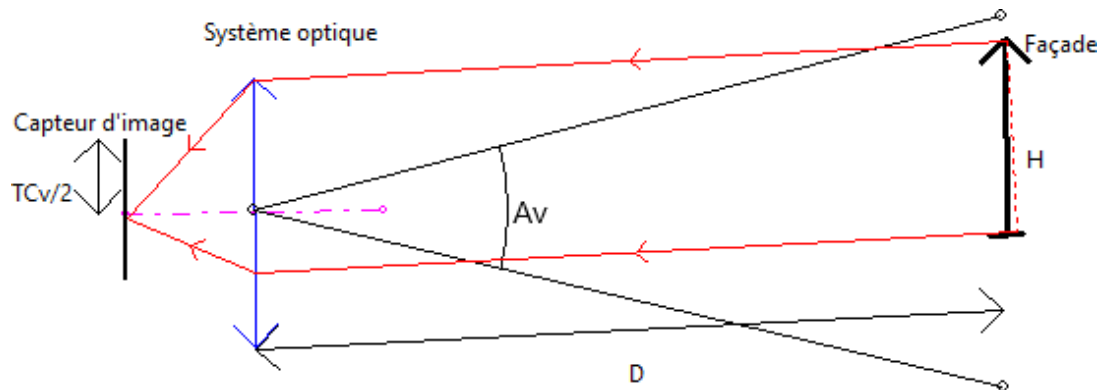


Figure 8 : Schéma optique représentant la formation de l'image dans la caméra  
(Source : production personnelle)

A partir de ce schéma, nous pouvons déduire que :

$$\tan\left(\frac{Av}{2}\right) = \frac{H}{D} \quad \text{et} : \quad \tan\left(\frac{Av}{2}\right) = \frac{TC_v}{2f}$$

En développant ces équations, nous obtenons la distance de recul à respecter pour qu'une façade de hauteur  $H$  soit entièrement incluse dans le champ de vision de la caméra :

$$D = \frac{H}{\tan\left(\frac{Av}{2}\right)}$$

Avec :

$$Av = 2 \times \arctan\left(\frac{TC_{verticale}}{2f}\right)$$

### III.3 Premiers essais :

#### III.3.1 Façade de l'agence

Nos premiers essais ont été réalisés dans les locaux de l'agence. Cela a permis de comparer les résultats de la caméra Ricoh Theta SC2 aux résultats potentiels obtenus par la GoPro MAX. D'autre part, ces tests ont permis d'essayer les différents modes d'acquisition de la GoPro MAX ainsi que leur compatibilité avec les logiciels de photogrammétrie du marché.

Afin d'explorer les fonctionnalités de la caméra, nous avons décidé de faire deux acquisitions : la première en prenant des photos 360° de la façade, et la deuxième en prenant une vidéo en mode Superview MAX (environ 200° de champs de vision pour 13 mm de focale équivalente [14]).

D'après le manuel de la GoPro, la taille du capteur vertical est d'environ 7.2 mm. Nous avons alors réalisé les calculs suivants :

- Acquisition mode photo 360° : la valeur de la focale est de 2.8mm. Nous obtenons ainsi :

$$Av = 51.63^\circ$$

$$D = 3.40 \text{ m}$$

- Acquisition mode vidéo SVM : la valeur de la focale est de 13 mm. Nous obtenons alors :

$$Av = 36.23^\circ$$

$$D = 8.84 \text{ m}$$

#### III.3.2 Chantier rénovation Neuilly-sur-Seine :

Le chantier de Neuilly se divise en plusieurs phases. Nous avons décidé d'essayer notre caméra dans la phase « Place du marché » puisque l'environnement de cette phase est plus propice à l'utilisation au mode 360°. En effet, les façades des bâtiments entourent le chantier, chose qui permet de générer des modèles 3D plus complets et de meilleure

qualité. Il s'agit ici de bâtiments allant de R+5 à R+8 donc nous considérons une hauteur maximale de 25 mètres. On obtient alors selon les modes d'acquisition :

- Acquisition mode photo 360° : la valeur de la focale est de 2.8mm. Nous obtenons ainsi :

$$Av = 101.20^\circ$$

$$D = 10.26 \text{ m}$$

- Acquisition mode vidéo SVM : la valeur de la focale est de 13 mm. Nous obtenons alors :

$$Av = 24.30^\circ$$

$$D = 58.60 \text{ m}$$

Les résultats du traitement de ce chantier sont présentés en annexe 2 (SVM) et dans la partie IV.1.2 (360°).

### III.4 Étalonnage de la caméra

L'étalonnage de la caméra apporte des informations supplémentaires qui peuvent s'avérer cruciales durant le traitement photogrammétrique. En effet, à l'issue de l'étalonnage, nous obtenons la matrice de la caméra contenant les valeurs des paramètres de mise à l'échelle en x ( $f_x$ ) et y ( $f_y$ ) respectivement, dont le rôle est d'indiquer comment convertir les coordonnées 2D de l'image en coordonnées 3D de la scène. Dans cette même matrice se trouvent les coordonnées du point principal  $c_x$  et  $c_y$ . Celui-ci représente le centre optique de l'image. La matrice  $K$  de la caméra et le vecteur de distorsions s'écrivent

$$\text{sous la forme : } K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ et } Dist = (k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2 \ k_3). [10]$$

Où  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$  représentent les coefficients de distorsion radiale, et  $p_1$ ,  $p_2$  les coefficients de distorsion tangentielle.

Ces paramètres sont estimés par le logiciel lors de la phase initiale du traitement. Les différentes valeurs générées seront comparées avec les valeurs obtenues lors de l'étalonnage.

L'objectif du code Python en annexe 10 est de calculer les paramètres interne de la caméra à partir d'images d'un damier, acquises par la caméra GoPro. Pour ce faire, nous avons utilisé un ensemble de données composé de 11 images.

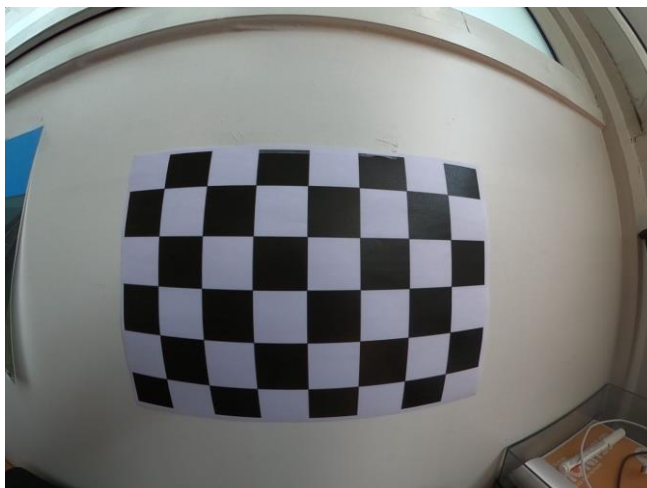


Figure 9 : Image extraite de l'ensemble de données utilisé pour l'étalonnage du mode SVM

(Source : production personnelle)

Le damier représente un motif redondant que l'algorithme pourra détecter pour estimer les différents paramètres que nous avons cité. La fonction utilisée pour réaliser ce calcul est « findChessboardCorners » qui prend en paramètre les images en niveaux de gris et la taille du damier. La figure 10 montre la détection des coins par cette fonction.

Cette fonction permet de remplir la liste des points objets et des points images.

Les points objets (objpoints) représentent la position des coins du damier dans l'espace réel. (Référentiel arbitraire)

Les points images (imgpoints) sont représentés dans le code par une liste de tableaux contenant les coordonnées 2D des coins du damier dans le référentiel de l'image.

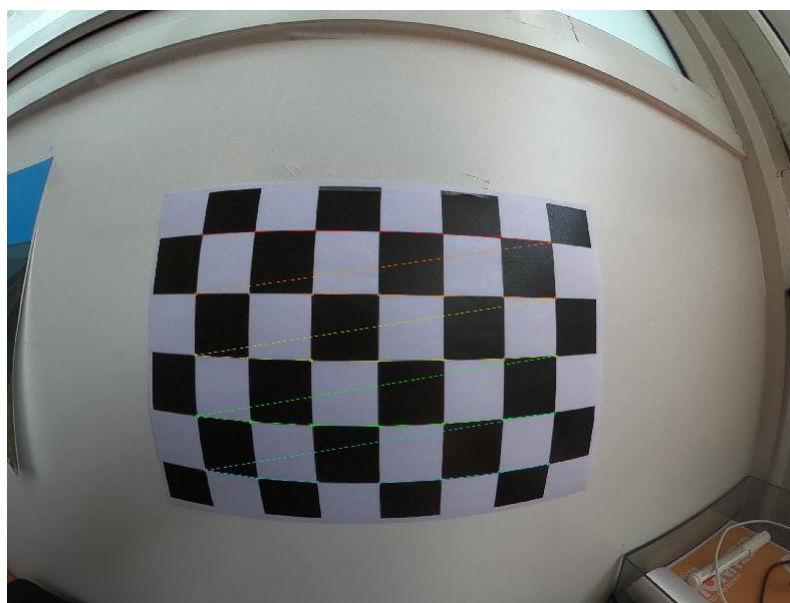


Figure 10 : Coins du damier détectés par la fonction « findChessboardCorners »  
(Source : production personnelle)



Il est important de noter que la taille du damier est comptée suivant les intersections des lignes formant le damier, et non le nombre de carrés en longueur et en largeur.

Ensuite la fonction « cornersSubPix » a permis d'affiner la position des coins des carrés formant le damier. Dans notre cas, le damier choisi a pour dimensions (7,5) et les carrés mesurent 30 mm de côté.

Finalement, le calcul des paramètres de la caméra s'est fait grâce à la fonction cv2.calibrateCamera() qui prend en entrée la liste des points objets et images extraits par les fonctions citées ci-dessus, et la taille de l'image.

Nous obtenons ainsi la matrice intrinsèque et le vecteur de distorsion de la caméra GoPro MAX 360° :

```
K = array([[1.11933013e+03, 0.00000000e+00, 2.79924070e+03],
          [0.00000000e+00, 1.02510232e+03, 1.43891761e+03],
          [0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 1.00000000e+00]])
Dist = array([[-0.35887548, 0.13944183, -0.00137316, -0.00157528, -0.02488417]])
```

Et pour le mode SVM :

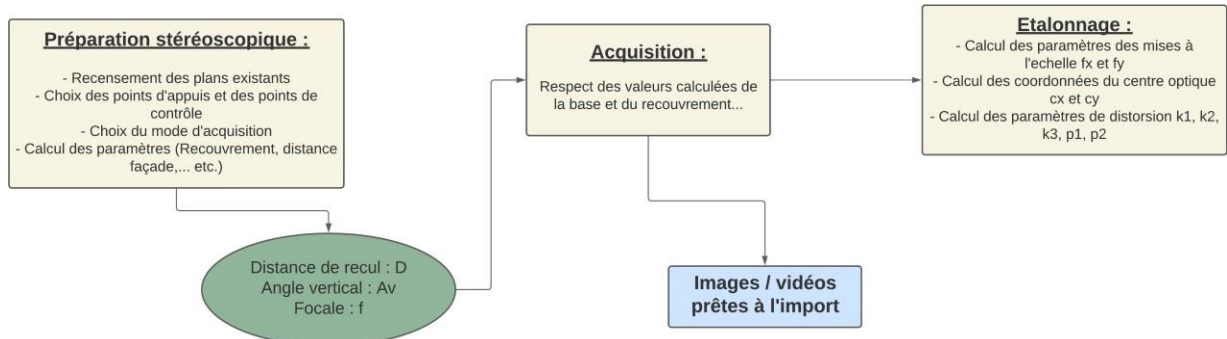
```
K = array([[9.31230330e+02, 0.00000000e+00, 1.33226015e+03],
          [0.00000000e+00, 9.24340246e+02, 1.01822977e+03],
          [0.00000000e+00, 0.00000000e+00, 1.00000000e+00]])
Dist = array([[-0.21034168, 0.04493208, -0.0003848, 0.00139497, -0.00408888]])
```

Les résultats obtenus à partir des données du mode SVM affichent des valeurs inférieures à celles obtenues à partir du mode 360, principalement en raison de distorsions optiques plus prononcées dans ce mode d'acquisition.

Nous pourrions donc comparer par la suite, les résultats ci-dessus avec l'estimation faite par le logiciel Pix4dmapper de ces paramètres.

### III.5 Chaîne de production : partie acquisition

La chaîne de production ci-dessous représente l'ensemble des étapes et des outils utilisés pour collecter les informations nécessaires à la création des modèles 3D.



La première étape de la chaîne est la préparation stéréoscopique, qui consiste à rassembler le maximum d'informations à propos du chantier et à prendre en compte tous les aspects logistiques. Cela inclut la sélection du mode d'acquisition approprié, la définition des objectifs spécifiques de la capture des données et le choix et positionnement des points d'appuis et points de contrôle. A l'issue de cette étape, l'utilisateur doit obtenir en sortie la distance caméra-objet, l'emprise et la base des sommets de prises de vues. Cette étape comprend aussi l'identification des éléments clés, des angles de vue optimaux et des détails importants à prendre en compte lors de l'acquisition des données. L'observation permet de déterminer les meilleures approches pour la capture des images et d'ajuster les paramètres de l'appareil en conséquence.

La deuxième étape est l'acquisition, où l'opérateur réalise la prise de vues en utilisant le mode d'acquisition sélectionné. Cela implique la capture d'images fixes 360° ou la réalisation de vidéos grâce au mode SuperView MAX, en fonction des besoins du projet. Pendant cette étape, il est crucial de respecter les valeurs calculées lors de l'étape précédente pour couvrir l'ensemble de la scène et capturer suffisamment de données pour assurer une reconstruction précise.

La troisième étape est l'étalonnage, qui vise à déterminer les paramètres intrinsèques de la caméra utilisée pour la capture des données. Cela comprend la mesure des distorsions optiques de l'objectif et l'estimation des paramètres de distorsion. L'étalonnage est effectué à l'aide du code python fourni en annexe. Ces valeurs sont fixes mais il est préférable de les recalculer dans le cas où un traitement n'aboutit pas, ou ne respecte pas les normes établies initialement. L'étalonnage doit aussi être réalisée dans le

cas où le mode d'acquisition a été changé (changement de focale), et les déformations des images changent aussi, chose qui fait varier les paramètres internes de la caméra.

En combinant ainsi ces étapes de préparation, observation, acquisition et étalonnage il est possible d'obtenir des données de haute qualité et précises pour la création de modèles 3D.

## IV Traitement des données et comparaison des résultats

### IV.1 Résultats des essais réalisés

Comme cité dans la partie III.3, nous avons réalisé deux essais sur la façade de l'agence et sur le chantier d'aménagement de la ville de Neuilly-sur-Seine, en utilisant à chaque fois les deux modes d'acquisition SVM et 360°.

Nous allons présenter dans cette partie les résultats obtenus pour chaque mode d'acquisition en utilisant le logiciel Pix4DMapper. Ensuite nous allons comparer ces résultats à travers la densité des nuages de points générés en utilisant le logiciel CloudCompare.

#### IV.1.1 Paramètres de traitement

Le tableau 4 résume les paramètres que nous avons utilisés pour ces traitements :

	Echelle de l'image des points homologues	Densité des points	Nombre minimal de correspondances	Résolution du maillage texturé
Acquisition 360	1 (Originale)	Haute	3	Haute résolution
Acquisition vidéo SVM	1 (Originale)	Optimale	3	Haute résolution

**Tableau 4:** Résumé des paramètres de traitement utilisés (agence) (Source : production personnelle)

Nous avons choisi dans un premier temps de réaliser le traitement en utilisant les paramètres par défaut du logiciel, c'est-à-dire : la taille de l'image sur laquelle les points

homologues seront extraits est la taille normale de l'image. Pour la génération du nuage de points dense et du maillage 3D, les paramètres par défaut sont : échelle de l'image ½, densité des points moyenne et pas de classification du nuage de points et le maillage en sortie aura une résolution moyenne.

Nous avons décidé de modifier dans les paramètres par défaut seulement la densité des points et la résolution du maillage texturé car l'un des objectifs principaux de cette étude est d'obtenir un modèle 3D ayant la meilleure qualité possible. Nous avons choisi la densité haute pour le mode d'acquisition 360 car le nombre d'images utilisées est largement inférieur à celui de l'acquisition en mode vidéo SVM.

#### IV.1.2 Résultats des traitements

##### IV.1.2.1 Façade de l'agence Colas

Le tableau 5 résume les résultats photogrammétriques obtenus à l'issue des deux traitements cités précédemment :

	Médiane des points d'intérêts extraits	Nombre d'images calibrées	Médiane des points homologues détectés	Nombre de points 3D générés
Acquisition 360	14 289	100% (44/44)	1 052	816 069
Acquisition vidéo SVM	8 822	76% (214/279)	2 022	704 333

**Tableau 5:** Résultats du rapport de qualité pour la phase d'alignement (Source : production personnelle)

Les paramètres interne estimés par Pix4Dmapper sont les suivants :

Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
640.377 [pixel] 8.472 [mm]	953.655 [pixel] 12.616 [mm]	518.916 [pixel] 6.865 [mm]	-0.203	0.045	-0.005	-0.000	0.001

(Source : production personnelle)

Où R1, R2 et R3 représentent les coefficients de distorsion radiale, et T1, T2 représentent les coefficients de distorsion tangentielle. [11] Nous remarquons que cette estimation concorde bien avec les coefficients obtenus dans la partie III.4.

Les figures 11 et 12 représentent les maillages 3D texturés générés par ces traitements :



Figure 11 : Maillage 3D texturé obtenu par le mode 360° (Source : production personnelle)

D'après les résultats obtenus, on remarque que le modèle SVM a une meilleure qualité visuelle que le modèle 360°. Cela peut s'expliquer par le fait que le premier modèle dispose d'un nombre d'images plus élevé que le deuxième modèle. En effet, malgré le fait que le nuage de points dense du modèle 360 dispose de plus de points 3D que le nuage du modèle SVM, le nombre de points homologues du modèle SVM représente le double de la valeur médiane des points homologues du modèle 360°.



Figure 12 : Maillage 3D texturé obtenu par le mode SVM (Source : production personnelle)

Cela s'explique par le fait que le logiciel pix4Dmapper utilise le modèle de projection plate carrée pour la lecture des images 360°. [16]

La perte d'informations induite par ce type de projection fait que la détection des points homologues est restreinte au centre de l'image, chose qui réduit la qualité du modèle.

#### IV.1.2.2 Chantier de Neuilly-sur-Seine

Pour la modélisation des façades du chantier de Neuilly, Nous avons décidé d'augmenter le nombre d'images acquises afin d'apporter une solution au problème rencontré lors du dernier traitement. Les résultats de l'étape d'alignement sont résumés dans le tableau 6 :

	Médiane des points d'intérêts extraits	Nombre d'images calibrées	Médiane des points homologues détectés	Nombre de points 3D générés
Acquisition 360	19 257	100% (64/64)	2 848	2 090 011
Acquisition vidéo SVM	8 622	70% (375/501)	2685	1 529 357

**Tableau 6:** Résumé des paramètres de traitement utilisés (Neuilly-sur-Seine) (Source : production personnelle)

Nous avons observé une différence significative entre la médiane des points d'intérêt extraits pour l'acquisition en mode 360 par rapport à l'acquisition en mode SVM. En effet, la médiane des points d'intérêt pour le mode 360 est environ 2.5 fois plus élevée que celle du mode SVM. Cette disparité s'explique par plusieurs facteurs : tout d'abord, l'emprise du chantier est beaucoup plus étendue dans le cas du mode 360, ce qui entraîne une plus grande variété de points d'intérêt détectée.

Ces différences de médiane reflètent donc les caractéristiques spécifiques de chaque mode d'acquisition, et soulignent l'importance de choisir le mode le mieux adapté en fonction des besoins spécifiques du chantier.

Le maillage texturé obtenu par le mode 360° est présenté sur la figure 13, tandis que le modèle SVM est présenté dans l'annexe 2. Nous remarquons dans ce cas de figure que le modèle 360° a une qualité quasiment similaire à celle du modèle SVM.

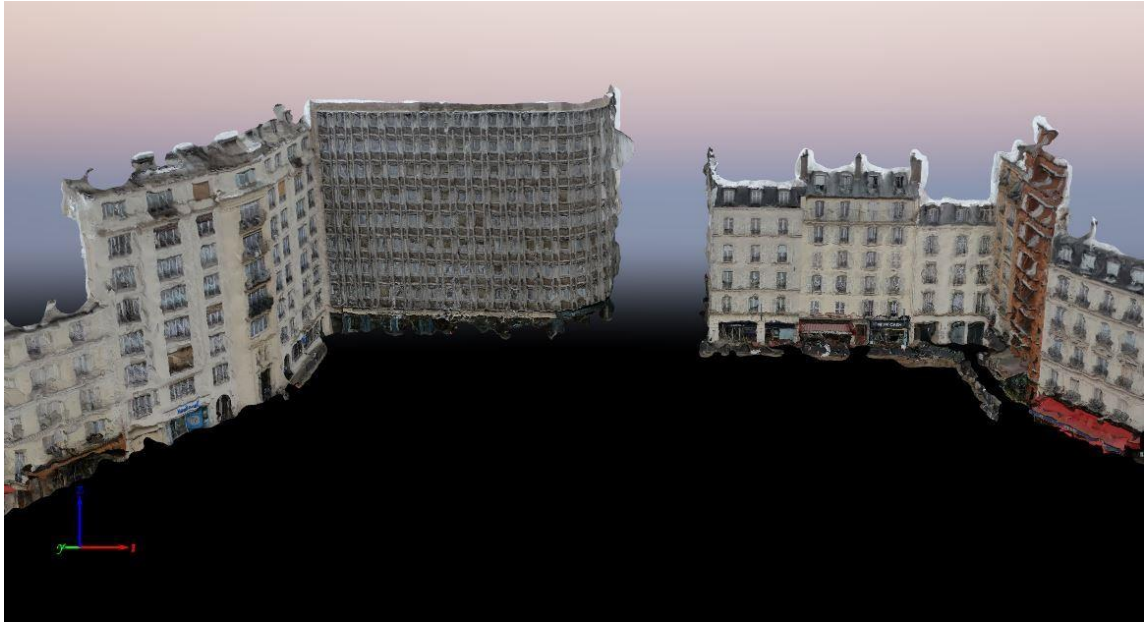


Figure 13 : Maillage 3D texturé de façades obtenu par le mode 360° (Source : production personnelle)

#### IV.1.3 Comparaison par CloudCompare

Nous avons décidé de n'effectuer cette comparaison que sur les modèles de l'agence. L'objectif de cette comparaison est de visualiser la densité de points de chaque nuage généré par Pix4Dmapper. En effet, comme dans l'étude [5], nous souhaitons comparer la densité volumique de points sur chaque façade. Cela permettra de mettre en évidence les zones qui ont été capturées de manière plus détaillée et celles qui ont été moins bien échantillonnées, et ainsi mettre en évidence les lacunes de l'acquisition.

Nous avons donc commencé par importer les deux nuages de points sur le logiciel, puis nous les avons nettoyés pour ne garder que les façades de l'agence. Nous avons ensuite utilisé la fonction "SOR Filter" pour ne garder que les points pertinents à la comparaison. En effet, le filtre SOR calcule d'abord la distance moyenne de chaque point par rapport à ses voisins. Ensuite, celui-ci rejette les points qui sont plus éloignés que la distance moyenne plus un certain nombre de fois l'écart type (deuxième paramètre). [15] Nous obtenons ainsi les deux nuages en annexe 4.

Ensuite, nous avons pu comparer ces deux nuages grâce à l'outil "Compute Geometric Features", qui se traduit par le calcul des entités géométriques du nuage. En d'autres termes, le logiciel estime la densité de points volumique ou surfacique en comptant pour chaque point le nombre de voisins  $N$  à l'intérieur d'une sphère ou d'un cercle dont le rayon  $R$  est déterminé par l'utilisateur. [15] Nous avons le choix entre le

calcul de la densité surfacique et la densité volumique. Nous avons choisi de ne calculer que la densité volumique puisque les façades comportent des détails qui ne sont pas toujours dans le même plan. La sphère choisie pour le calcul de la densité est la sphère unitaire. ( $R=1$ )

Ainsi, nous avons obtenus le champ scalaire représentés dans la figure 14 pour l'acquisition 360° et la figure 15 pour l'acquisition SVM :

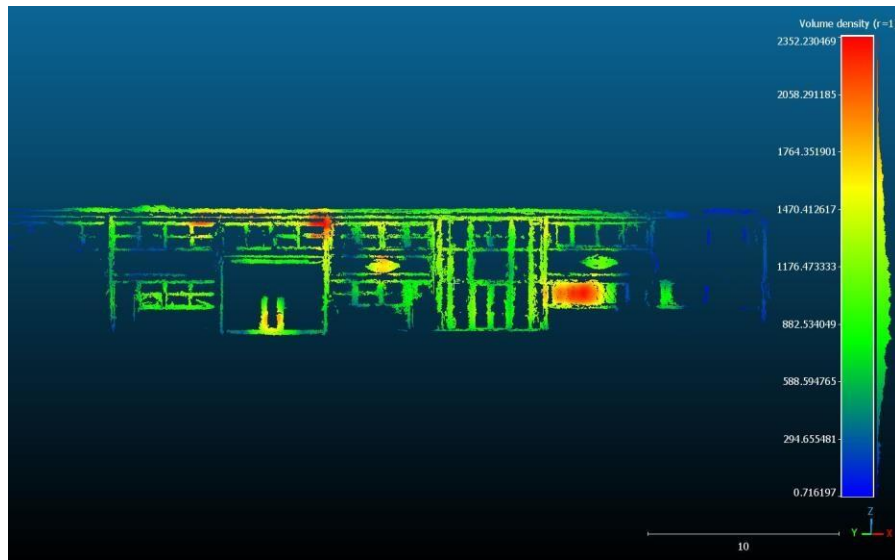


Figure 14 : Nuage de points issu du mode d'acquisition 360° auquel un champ scalaire de densité volumique a été appliqué (Source : production personnelle)

La densité de points dans un nuage de points représente le nombre de points par unité de volume, ce qui indique la précision et le niveau de détail de la représentation 3D. Une densité plus élevée de points peut fournir une meilleure résolution et une représentation plus détaillée de la surface, tandis qu'une densité plus faible peut résulter en une représentation plus grossière. [5]

La première remarque est que la détection des points d'intérêts est bonne pour les deux nuages, mais la densité de points 3D est moins bonne pour le nuage 360° que pour le nuage SVM. En effet, les bords de la façade ont une densité beaucoup moins élevée pour le nuage 360° avec une densité avoisinant la valeur :  $dV = 170$  contrairement au nuage SVM dans lequel cette valeur est approximativement :  $dV = 781$ .



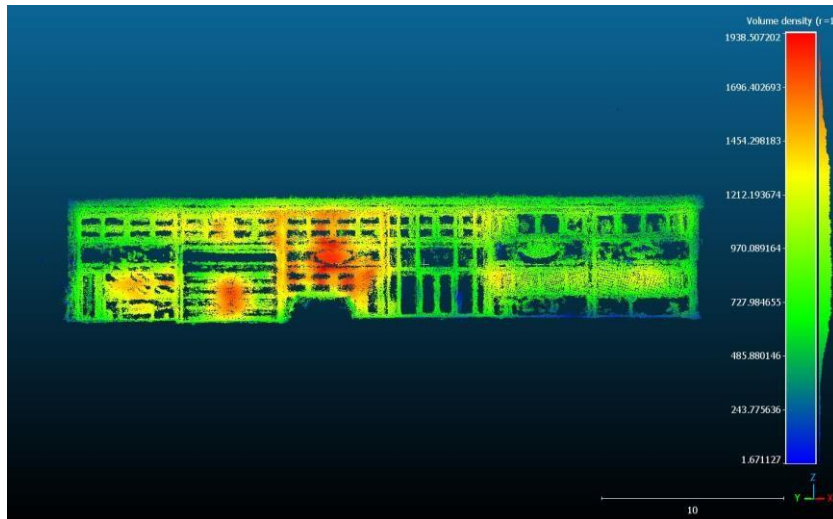


Figure 15 : Nuage de points issu du mode d'acquisition SVM auquel un champ scalaire de densité volumique a été appliqué (Source : production personnelle)

La différence de densité volumique entre le nuage de points issu des données du mode SuperView MAX et celui issu du mode 360 de la GoPro Max peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'abord, le mode SuperView MAX capture une séquence vidéo, ce qui permet d'obtenir un plus grand nombre d'images avec un recouvrement meilleur. Cela conduit à un plus grand volume d'informations, chose qui permet de mieux couvrir la scène, et se traduit par une densité de points plus élevée dans le nuage de points final.

En revanche, le mode 360 capture une seule image panoramique qui projette le champ de vision sur une surface plane, suivant la projection équirectangulaire. Bien que cela permette de capturer un large champ de vision, les informations sont moins redondantes et la densité de points dans le nuage de points peut donc être plus faible. De plus, la projection plate carrée utilisée par les logiciels de photogrammétrie pour traiter les images 360 peut entraîner une distorsion de l'image et une réduction de la qualité des points correspondants. Ainsi, la combinaison de la redondance d'informations et de la qualité des points correspondants contribuent à une plus grande densité du champ scalaire dans le nuage de points issu du mode SuperView MAX par rapport au mode 360.

#### IV.1.4 Synthèse

Jusqu'à présent, nous avons réussi à générer des modèles 3D grâce au mode 360° de la GoPro MAX. Cependant, nous avons constaté que ces modèles ne sont pas les plus optimaux pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise.

Par conséquent, nous allons désormais nous concentrer sur l'amélioration de la qualité des modèles 3D obtenus à partir du mode SVM de la caméra. Cette étape vise à atteindre des résultats plus satisfaisants et plus précis pour les applications liées à la construction et à la topographie, répondant ainsi aux exigences de l'entreprise en termes de rendus 3D.

## IV.2 Etude de précision

Afin de quantifier la précision de nos modèles SVM, nous avons réalisé un test sur la façade de l'agence. Celui-ci consiste à faire deux levés : un levé en utilisant la caméra GoPro et un levé à la station totale. Le but étant de calculer les écarts entre les coordonnées des points levés à la station et les points du nuage dense.

### IV.2.1 Traitement avec 6 GCP uniformément répartis

Les figures 16 et 17 illustrent respectivement les positions choisies pour les 6 GCP sur la façade, et les positions des points de contrôle levés sur la façade en utilisant la station totale. Le tableau 7 présente les écarts en mètre entre les coordonnées station/GoPro pour une partie des points de contrôles :

Id point	dE	dN	dH
1012	0,036	0,070	0,033
1013	0,034	0,032	0,050
1015	0,057	0,021	0,028

**Tableau 7:** Echantillon des écarts obtenus entre les coordonnées station et les coordonnées nuage de point (6 GCP) (Source : production personnelle)



Figure 16 : Positions des GCP sur la façade (Source : production personnelle)

Dans l'annexe 5, le tableau 1 présente les coordonnées des points relevés par la station totale tandis que le tableau 2 présente les coordonnées de ces mêmes points extraits du nuage dense. Le tableau 3 résume les écarts obtenus entre ces coordonnées.



Figure 17 : Positions des points de contrôle levés sur la façade (Source : production personnelle)

La moyenne des écarts obtenus entre le levé à la GoPro MAX et le levé à la station totale est de 3 cm en planimétrie et 4 cm en altimétrie. Ces moyennes sont relativement faibles, ce qui suggère que la précision de notre modèle 3D généré est plutôt bonne. Ces résultats sont encourageants car ils montrent que malgré la simplicité de la GoPro par rapport à la station totale, nous sommes parvenus à obtenir des résultats qui entrent dans les attentes du projet.

L'étape suivante consistera à diminuer le nombre de GCP et affaiblir leur répartition afin de quantifier l'impact de ces deux paramètres sur la précision du modèle.

#### IV.2.2 Traitement avec 4 GCP mal répartis

Dans cette partie, nous n'avons gardé que les points : C1, C2, C3 et C4 en GCP. La répartition est réalisée sur la partie centrale de la façade seulement.

Comme dans la partie précédente, dans l'annexe 5, le tableau 4 présente les coordonnées des points de contrôle dans le nuage et le tableau 5 présente les écarts en valeur absolue entre ces coordonnées et les coordonnées des points levés par la station totale.

Le tableau 8 présente les écarts en mètre entre les coordonnées station/GoPro pour une partie des points de contrôles :

Id point	dE	dN	dH
1012	0,086	0,022	0,037
1013	0,112	0,108	0,030
1015	0,005	0,005	0,042

**Tableau 8:** Echantillon des écarts obtenus entre les coordonnées station et les coordonnées nuage de point (6 GCP) (Source : production personnelle)

Nous obtenons cette fois-ci une moyenne de 5 cm d'écart en planimétrie et 4 cm en altimétrie. Ce résultat affirme donc l'hypothèse qui stipule que la précision du modèle augmente à mesure que le nombre de GCP augmente.

### IV.2.3 Conclusion

Les résultats obtenus avec seulement 4 GCP mal répartis montrent qu'une approche rigoureuse dans la collecte et l'utilisation des GCP est cruciale pour garantir la précision des modèles 3D générés. En augmentant le nombre de GCP et en les répartissant de manière adéquate, il est possible d'améliorer significativement la précision du modèle et d'obtenir des résultats plus fiables pour les applications nécessitant une haute précision topographique.

## IV.3 Chaîne de traitement

La chaîne de production dans l'annexe représente l'ensemble des étapes et des outils utilisés pour traiter les informations en sortie de la chaîne d'acquisition, pour obtenir un modèle 3D à l'échelle et géoréférencé au format .FBX. Dans les sous-parties suivantes, nous allons expliquer en détail les étapes de la chaîne.

### IV.3.1 Importation et mise au point des données

Cette première étape consiste à importer les données et à régler le logiciel sur les bons paramètres afin d'optimiser le rendu final, qui est le maillage 3D texturé.

La mise au point des données dépend du type d'acquisition réalisé. Le tableau 9 résume les étapes de mise au point :

	Acquisition 360°	Acquisition SVM
Trames	Non	Oui (*)
Système de coordonnées des caméras	Arbitraire	Arbitraire
Modèle de caméra sélectionné	Sphérique	Fisheye

Système de coordonnées des résultats	RGF93 / CC49	RGF93 / CC49
Modèle d'options de traitement	3D models	3D models
Échelle d'images du nuage de points	1	1/2
GCP	> 6	> 6

**Tableau 9:** Paramètres utilisés lors de la création d'un projet (Source : production personnelle)

Dans ce tableau, les trames représentent les images extraites d'une vidéo. Pix4dmapper permet de choisir la fréquence d'échantillonnage de la vidéo. Par exemple, pour un ensemble de données contenant 1000 images, en entrant dans le logiciel la valeur 10 nous obtiendrons 100 images

Nous avons choisi une échelle d'images double à utiliser lors de la génération du nuage de points de l'acquisition 360. Ce choix est motivé par le fait que le nombre d'images acquises avec ce mode n'est pas aussi grand que pour le mode SVM. Ainsi pour compenser cela, nous avons décidé de maximiser le nombre de points homologues extraits.

Nous avons aussi choisi 6 GCP ou plus pour le traitement, à pointer sur au moins 10 images chacun. Nous avons obtenu de bons résultats de précision lors de la phase de test (IV.2), nous avons donc choisi de nous baser sur celle-ci pour mettre à l'échelle et géoréférencer les modèles 3D. D'où le choix d'ajouter au moins 6 GCP au projet.

#### IV.3.2 Premiers résultats

A la fin du traitement initial et de la génération du rapport de qualité, il est possible de visualiser les positions calculées des caméras. Il est déjà possible de juger la pertinence de la génération du nuage de points et du maillage. En effet, si les caméras sont déjà mal orientées et mal positionnées, il est possible d'annuler le traitement du nuage de points. Si les caméras sont bien positionnées, alors il ne reste plus qu'à nettoyer le nuage de points obtenu grâce à l'outil "éditer nuage de points", puis relancer le maillage avec la commande "générer le maillage texturé" dans l'onglet traitement. Le modèle est alors directement enregistré dans le dossier 2\_densification\3d\_mesh qui est dans le dossier du projet.

### IV.3.3 Optimisation de l'alignement

Cette étape advient lorsque le premier résultat est insatisfaisant, c'est-à-dire lorsque l'alignement des images ne donne pas un résultat conforme à la réalité. La solution préconisée est de sectionner le traitement en plusieurs parties.

L'objectif à travers cette démarche est de trouver un point d'équilibre de l'alignement des images afin d'obtenir un résultat cohérent. Nous commençons par diviser l'ensemble des données en fonction de la géométrie de l'objet à modéliser.

Par exemple, dans le cas où l'objet est un bâtiment, nous avons choisi de traiter chaque façade de manière séparée. Ainsi, nous obtenons un jeu de données par façade, et par la suite un projet Pix4D par façade.

### IV.3.4 Fusion

Après avoir obtenu un projet pix4D par façade, et obtenu un nuage de points dense et cohérent, il faut fusionner les différents projets obtenus. Pour cela, il faut impérativement que les systèmes de coordonnées des résultats et des GCP des différents projets soient les mêmes. Autrement la fusion des projets affichera une erreur. A la fin du traitement de la fusion, il faudra nettoyer le nuage de point global et relancer une génération de maillage texturé. Si les résultats ne sont toujours pas cohérents, il est possible de reprendre la chaîne depuis la partie 4.3 jusqu'à obtenir un résultat satisfaisant.

### IV.3.5 Formats d'export et interopérabilité

Le fichier du maillage 3D (par défaut .fbx) se trouve dans le dossier choisi à la première étape du traitement, dans lequel se trouve le dossier "2-densification". Il est aussi possible d'exporter les maillages, selon les besoins, aux formats : .PLY, .DXF et .OBJ.

Ces formats sont compatibles avec la totalité des logiciels de traitement du marché. Il est possible de convertir ces données au format IFC afin de respecter pleinement les normes d'échange de données BIM, mais il faudra investir dans un logiciel spécialisé tel que « CAD Exchanger » pour les maillages de plus de 20 Mo. Si le fichier fait moins de 20 Mo, il est possible d'utiliser des convertisseurs en ligne tel que « conholdate.app ».

L'interopérabilité ne se limite pas seulement aux formats de fichiers. Elle concerne également la cohérence des unités de mesure, des coordonnées géospatiales et des références de système. L'utilisation de systèmes de coordonnées universels et la conversion précise des données géoréférencées garantissent que les différents éléments du projet sont

correctement alignés, ce qui est essentiel pour la précision et la cohérence des résultats finaux.

## **V Exemple d'application de la chaîne de production**

Nous avons réalisé plusieurs applications de la chaîne de production proposée, notamment pour la génération de modèles 3D géoréférencés et pour le calcul de cubatures d'un dépôt de matériaux dans une carrière. Les résultats sont présentés en annexe 7 et 9.

D'autre part, dans le cadre d'une réponse à un appel d'offre, nous avons eu aussi l'opportunité de mettre en application la chaîne de production.

Le projet concerne un chantier de VRD dans la ville d'Aubervilliers, qui s'étend sur l'avenue Jean Jaurès (Figure 18). Celui-ci se divise en plusieurs phases de travaux.

Ainsi, dans le but de maximiser nos chances d'obtenir ce marché, nous avons décidé de réaliser la première phase en 3D en combinant : des données Mensura, un modèle 3D obtenu par photogrammétrie terrestre, et un MNS obtenu par extraction de données 3D Google Earth.

L'objectif de ce travail est d'obtenir en sortie un modèle 3D du chantier, au cours de la phase choisie par le responsable du projet.

Les principales contraintes sont :

- La façade du bâtiment doit être géoréférencée dans le même système de coordonnées du projet Mensura, c'est-à-dire en RGF93/CC49.
- Le modèle doit avoir une résolution meilleure que celle du MNT proposé par Google Earth.

Nous allons à présent expliquer les étapes réalisées pour arriver à ce résultat.



Figure 18 : Photographie du bâtiment à modéliser et à intégrer au projet  
(Source : Google Maps) (Source : production personnelle)

## V.1 Acquisition

Pour l'acquisition des images, nous avons utilisé uniquement le mode SVM pour ce cas de figure. Cette décision a été motivée par la présence d'une densité importante de végétation (principalement d'arbres) devant le bâtiment que nous souhaitons modéliser.

En effet, des tentatives de modélisation dans des conditions similaires ont été réalisées pour d'autres projets, mais la présence de végétation brouillait la génération du maillage.

Ainsi, nous obtenons avec les mêmes relations que dans la partie III.3 pour le mode vidéo SVM et une façade de 15 m (R+4) :

$$A_v = 23.37^\circ$$

$$D = 35.05 \text{ m}$$

Ces paramètres seront respectés au mieux car la présence de végétation restreint le champ de vision de la caméra.

La vidéo acquise comprend deux façades sur 3 hauteurs de canne différentes.

## V.2 Géoréférencement

Pour géoréférencer le projet, nous avons utilisé la station GNSS mobile Trimble R10 pour mesurer la position de trois références, que nous avons ensuite importées dans le dossier des données de la station totale, afin de réaliser une mise en station libre. La figure 19 présente les 9 GCP choisis pour géoréférencer le modèle.





Figure 19 : Positions des GCP levés sur la façade à modéliser (étoiles rouges)

(Source : Google Maps) (Source : production personnelle)

### V.3 Traitement

Les paramètres de traitement sont présentés dans le tableau 10 :

Mode d'acquisition	SVM
Nombre de trames	583
Fréquence d'échantillonnage de la vidéo	1/40
Taille de l'image utilisée	1
Système de coordonnées des résultats	RGF93 - CC49
Nombre de GCP	6

**Tableau 10:** Résumé des paramètres de traitement (Source : production personnelle)

Comme indiqué dans la figure 20, après avoir mis au point les paramètres de traitement, nous avons lancé un premier traitement et nous avons obtenu des résultats d'alignement qui ne coïncident pas avec la réalité. Cela est dû au fait qu'une partie des positions des caméras ayant acquis la façade Est ont été mal positionnées et mal orientées.

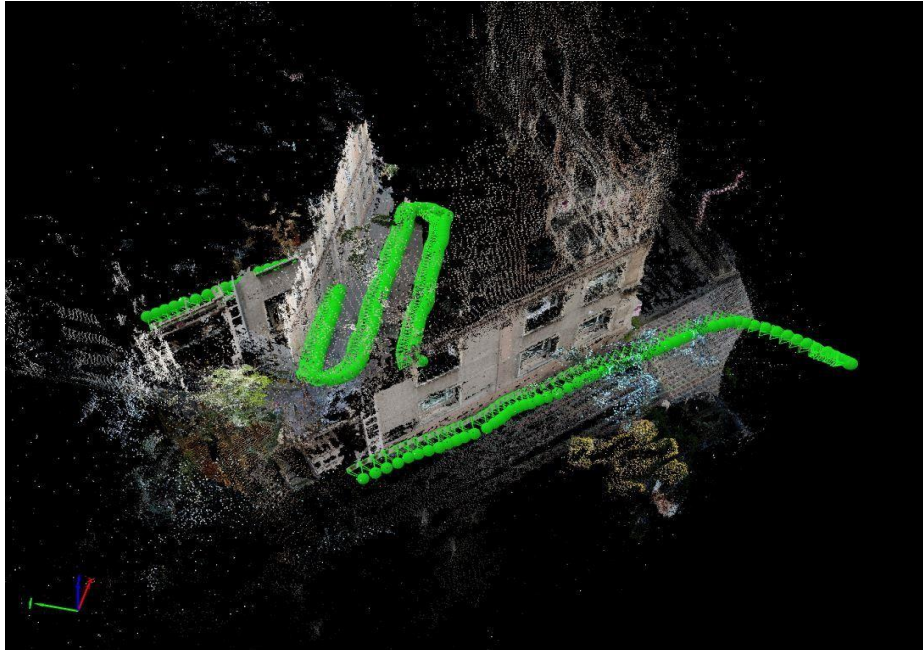


Figure 20 : Résultats issus du premier traitement (position des caméras en vert) (Source : production personnelle)

Après avoir vérifié que les coefficients de distorsion ont été correctement estimés, nous avons décidé de diviser l'ensemble des données en deux sous-groupes : un par façade. Nous avons ensuite relancé le traitement, puis fusionné les résultats comme indiqué dans la chaîne de production énoncée dans la partie IV.3. Nous obtenons ainsi les résultats de la figure 21 :

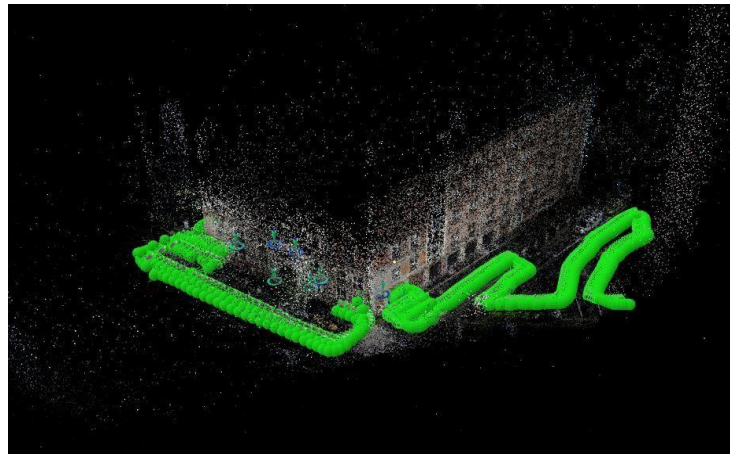


Figure 21 : Positions des caméras après fusion des projets (Source : production personnelle)



Figure 22 : Maillage texturé obtenu à partir du projet fusionné (Source : production personnelle)

La figure 22 présente le maillage texturé obtenu avant nettoyage du nuage de points et la régénération du modèle. Nous avons ainsi obtenu un maillage fusionné avec une précision de 3.9 cm en planimétrie et 5.1 cm en altimétrie, chose qui s'accorde avec l'étude de géoréférencement réalisée précédemment.

#### **V.4 Ajout des données Google Earth et harmonisation des résultats**

L'extraction des données du MNS Google Earth se fait grâce au logiciel Render. Il s'agit d'un logiciel d'extraction de données 3D à partir de sites web tels que Google Maps. Après avoir configuré le logiciel, il suffit de se rendre sur le site web en question pour extraire les données 3D souhaitées.

Les données extraites sont au format .rvc. Pour les convertir en .FBX, il faut réaliser un export en utilisant le logiciel Blender. Finalement, il suffit d'importer toutes les données au format .FBX dans le logiciel Twinmotion afin de mettre en forme les rendus. La mise en forme comprend les étapes suivantes :

- Import des différentes données 3D. (Google Earth, maillage texturé...)
- Mise en place des éléments 3D du chantier (GBA, grilles, panneaux...)
- Mise en forme du rendu (ajout de détails de météo, ombres...)

La figure 23 illustre le modèle 3D final rendu en réponse à l'appel d'offre.



Figure 23 : Résultat du traitement sur Twinmotion (Source : production personnelle)

## Conclusion

En conclusion, ce mémoire permet d'explorer les techniques de capture d'images à l'aide de la caméra 360° GoPro MAX en utilisant le logiciel Pix4Dmapper pour la génération de modèles 3D de façades. Les résultats obtenus ont démontré qu'il est parfaitement possible de générer des maillages texturés en utilisant les modes 360° et SVM pour documenter et modéliser de manière précise et détaillée les éléments architecturaux.

L'utilisation du mode 360° offre une couverture panoramique complète des façades, permettant une acquisition rapide et facile des données. La reconstruction 3D par ce mode a donné des résultats dont la qualité est non négligeable, mais les logiciels de photogrammétrie ont du mal à interpréter ces images et à en extraire le maximum d'informations pour un alignement cohérent. Nous avons conclu que cette mauvaise interprétation résulte dans notre cas d'une mauvaise estimation des paramètres de distorsion radiale et tangentielle. Pour appuyer cet argument, une estimation de ces paramètres a été réalisée grâce à la bibliothèque python OpenCV, qui a permis l'étalonnage de la caméra GoPro MAX et de comparer les valeurs des paramètres internes obtenus aux valeurs calculées par le logiciel Pix4Dmapper.

D'autre part, le mode SVM proposé par la caméra est une alternative efficace et rapide tant pour l'acquisition que pour le traitement. En effet, en utilisant le mode vidéo SVM, les résultats obtenus ont été satisfaisant tant pour la résolution du maillage et la densité du nuage de points que pour la précision du modèle et du temps de traitement.

De plus, la densité volumique de points issus du mode SVM était nettement supérieure à celle obtenue par le mode 360°. Cela a été démontré par la comparaison sur le logiciel CloudCompare des nuages de points denses issus des deux modes d'acquisition SVM et 360°.

Finalement, cette étude soulève des perspectives intéressantes pour la capture et la modélisation des façades à l'aide des caméras 360°. Les résultats obtenus mettent en évidence l'importance de prendre en compte des paramètres tels que la distance de recul, l'angle de champ vertical et la résolution des capteurs pour obtenir des modèles 3D précis et complets. Cependant, il reste encore des aspects à explorer et à approfondir, tels que l'impact de différentes configurations de caméras, l'utilisation de techniques de post-traitement avancées et l'intégration de données complémentaires pour améliorer la qualité des modèles générés.

## Bibliographie

### Travaux universitaires

- [1]: L. Barazzetti, M. Previtali, F. Roncoroni, “Can we use low-cost 360 degree cameras to create accurate 3D models?”. In “*Towards photogrammetry 2020*”, 4-7 Juin 2018, Riva del Garda, Italie.
- [2]: I-Chan Lo, Kuang-Tsu Shih, Homer H. Chen. “Efficient and accurate stitching for 360° Dual-Fisheye images and videos”. In : “*IEEE Trans. Image Process.*”, vol. 31, pp. 251-262, 2018.
- [3]: Davide Scaramuzza “Omnidirectional Camera”, University of Pennsylvania, 2014, p.3-5.
- [4]: Shaohua Gao, Kailun Yang, Hao Shi “Review on panoramic imaging and its applications in scene understanding”. In : « *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* », Octobre 2022.
- [5]: Mateusz Janiszewski, Masoud Torkan, Lauri Uotinen, Mikael Rinne “Rapid photogrammetry with a 360-Degree camera for tunnel mapping”. In : “*Remote Sensing*”, Volume 14, issue 21, 2022.
- [6]: Chuiwen Ma, Liang Shi, Hanlu Huang, Mengyuan Yan “3-D Reconstruction from Full-view Fisheye camera”, Stanford University, 2015, p.3-7.
- [7] : Pierre Drap, Julien Lefèvre, “An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions”. In : “*Sensors*”, 2016, 16 (6), pp.807.

### Sites web

- [8] : Eugene Liscio, 3D Forensics, [en ligne]. Disponible sur : <[\(276\) 3D Models from 360° images ? | Photogrammetry | 3D Forensics CSI | Click3D EP 7 - YouTube](#)> (consulté le 10/04/2023)
- [9] : Eugene Liscio, 3D Forensics, [en ligne]. Disponible sur : <[Photogrammetry using 360° cameras | 3D Forensics CSI](#)> (consulté le 12/04/2023)
- [10] : Dimitri van Heesch, Doxygen, [en ligne]. Disponible sur : <[https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial\\_py\\_calibration.html](https://docs.opencv.org/4.x/dc/dbb/tutorial_py_calibration.html)> (consulté le 20/05/2023)
- [11] : Pix4D support, [en ligne]. Disponible sur : < [Rapport de qualité - PIX4Dmatic](#)> (consulté le 15/05/2023)
- [12] : “Understanding Camera Lenses”. Disponible sur :

<https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/camera-lenses.htm> (consulté le 15/03/2023)

[13] : Site de comparaison de caméras [en ligne]. Disponible sur :

<https://versus.com/fr/ricoh-theta-sc2> (consulté le 19/03/2023)

[14] : Fiche technique de la GoPro MAX [en ligne]. Disponible sur :

<https://www.magazinevideo.com/fiche-technique/gopro-max/39528.htm> (consulté le 01/04/2023)

[15] : Documentation CloudCompare [en ligne]. Disponible sur :

[https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/SOR\\_filter](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/SOR_filter) (consulté le 05/05/2023)

[16] : Spécifications techniques à propos de la GoPro MAX [en ligne]. Disponible sur :

<https://gopro.com/fr/fr/news/max-tech-specs-stitching-resolution> (consulté le 16/06/2023)

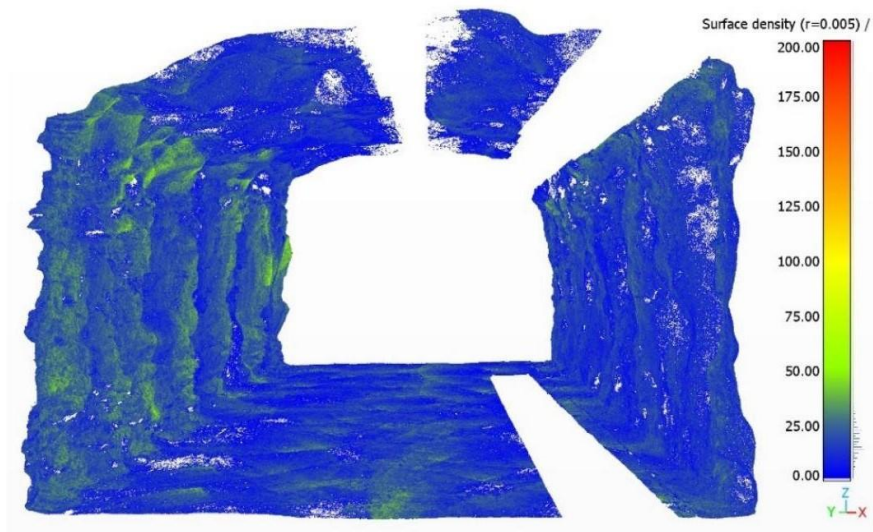
## Table des annexes<sup>1</sup>

Annexe 1 Résultats CloudCompare de l'article [5].....	48
Annexe 2 Maillage obtenu en utilisant le mode SVM pour le chantier de Neuilly-sur-Seine (Production personnelle).....	50
Annexe 3 Chaîne de production : partie traitement (Production personnelle).....	51
Annexe 4 Nuages obtenus après nettoyage des façades SVM (haut) et 360 (bas) (Production personnelle).....	52
Annexe 5 Tableaux des résultats de l'étude de précision en fonction des GCP (Production personnelle).....	53
Annexe 6 Modèle 3D d'un chantier de réhabilitation de voirie (Production personnelle) .....	59
Annexe 7 Modèle 3D de façade généré lors de la phase d'essai sur le chantier Neuilly-sur-Seine (mode 360°) (Production personnelle).....	60
Annexe 8 Nuage de points utilisé pour le calcul de cubatures dans une carrière (Production personnelle).....	61

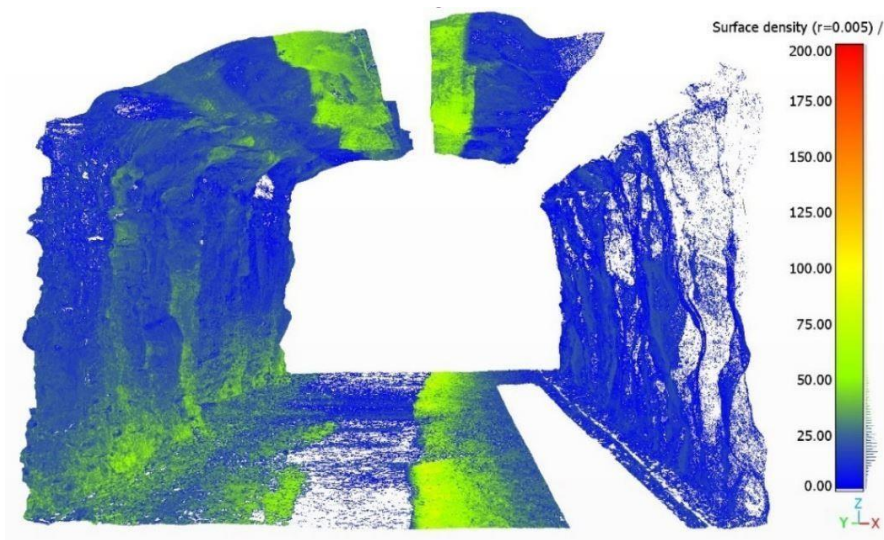


# Annexe 1

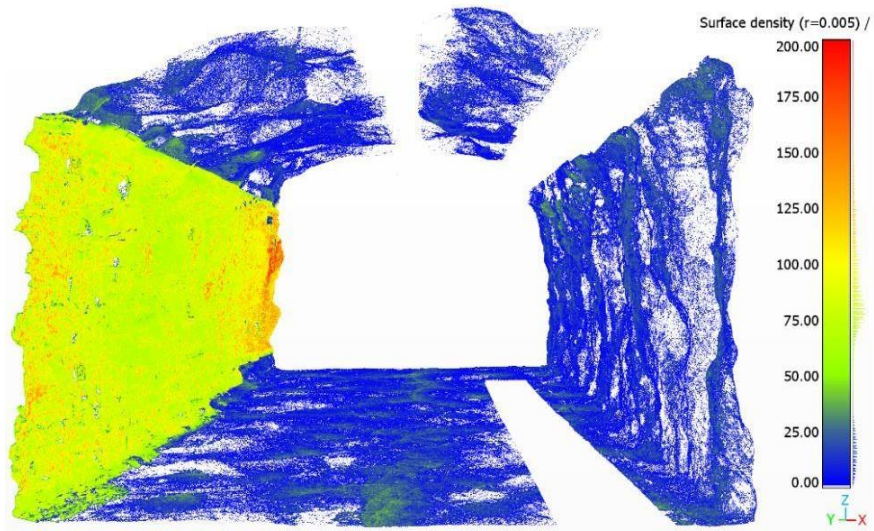
## Résultats CloudCompare de l'article [5]



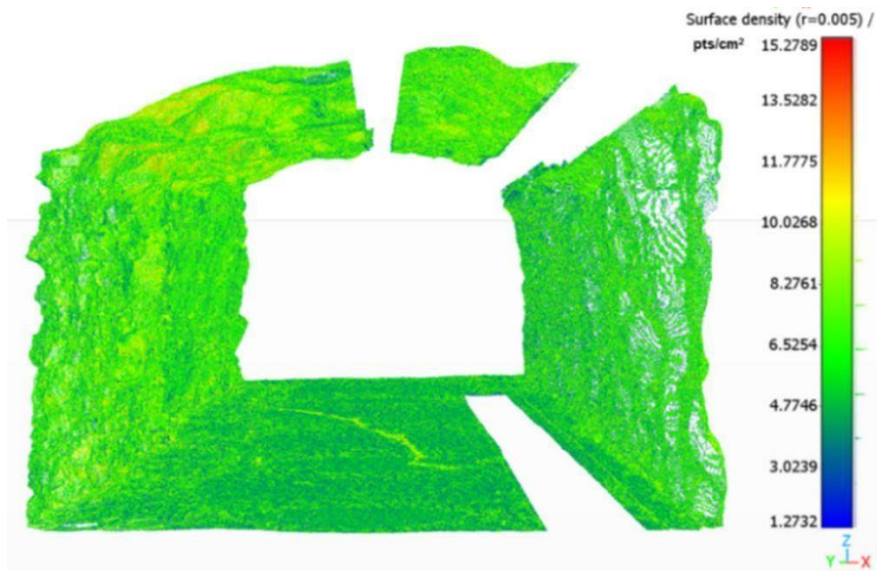
a. : Caméra 360°



b. : Caméra DSLR



(c) : Caméra 360° + DSLR



(d) : Scanner laser

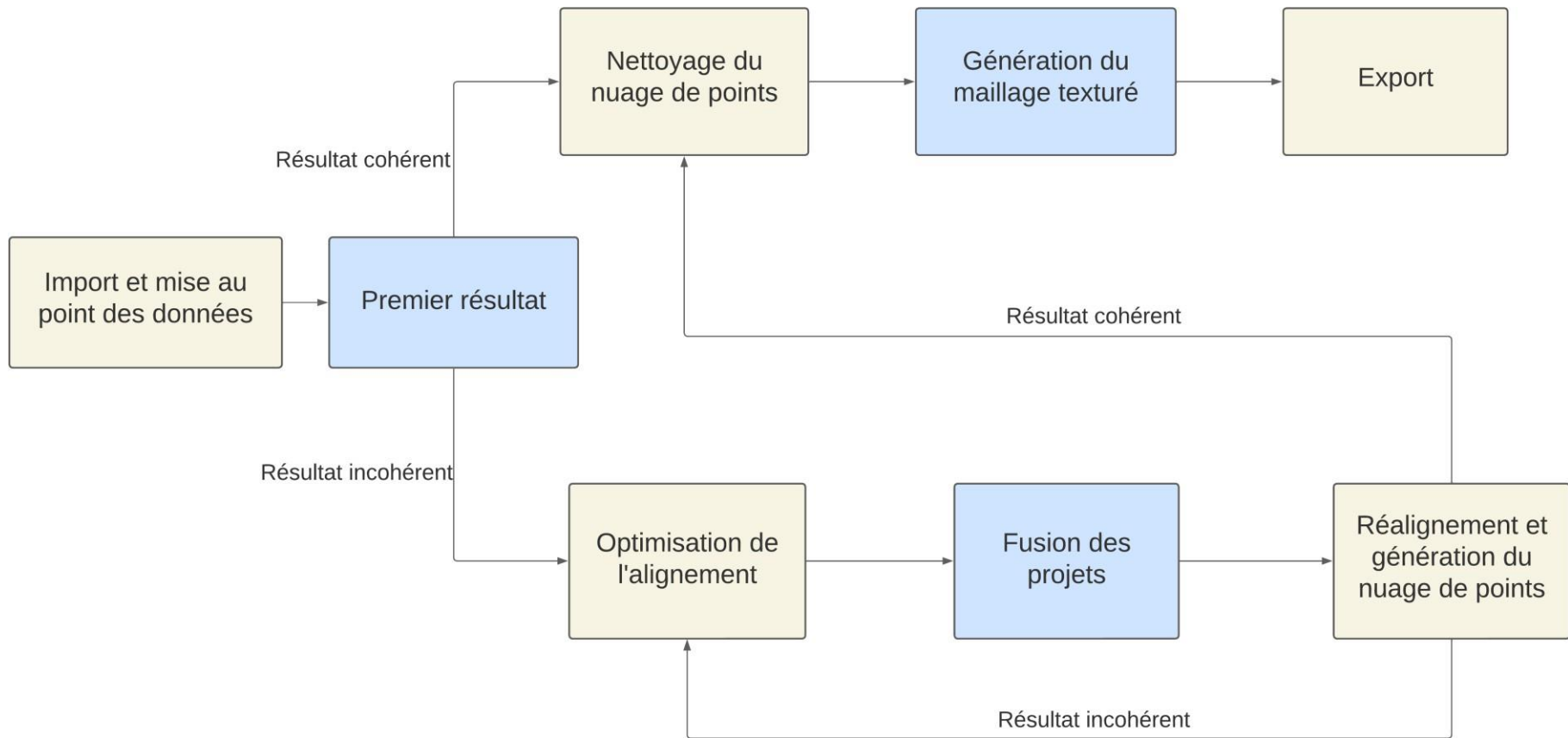
## Annexe 2

Maillage obtenu en utilisant le mode SVM pour le chantier de Neuilly-sur-Seine (Production personnelle)



### Annexe 3

## Chaîne de production : partie traitement (Production personnelle)



**Annexe 4**  
**Nuages obtenus après nettoyage des façades SVM (haut) et 360 (bas)**  
**(Production personnelle)**



**Annexe 5**  
**Tableaux des résultats de l'étude de précision en fonction des GCP**  
**(Production personnelle)**

Id point	E	N	H
2001	1651489,058	8192378,811	30,09
2002	1651489,800	8192379,902	30,17
1001	1651503,275	8192373,685	36,61
1002	1651474,819	8192392,780	36,53
1023	1651502,185	8192375,183	34,70
1020	1651492,120	8192381,438	36,07
1021	1651490,431	8192382,570	34,54
1007	1651493,476	8192380,537	32,85
1010	1651493,479	8192380,527	30,38
1011	1651489,103	8192383,455	30,38
1008	1651489,096	8192383,463	32,85
1012	1651484,114	8192387,045	34,11
1013	1651479,729	8192389,993	34,12
1015	1651479,914	8192390,261	30,12
1050	1651486,418	8192385,267	33,35



1051	1651486,416	8192385,256	33,99
1054	1651495,176	8192379,395	33,88
1055	1651496,826	8192378,288	33,88

Tableau 1 : Positions des points levés à la station totale dans le système de coordonnées RGF93/CC49

Id point	E	N	H
2001	1651489,069	8192378,819	30,14
2002	1651489,773	8192379,898	30,21
1001	1651503,302	8192373,710	36,68
1002	1651474,911	8192393,003	36,52
1023	1651502,175	8192375,088	34,67
1020	1651492,067	8192381,423	36,11
1021	1651490,437	8192382,567	34,61
1007	1651493,457	8192380,536	32,88
1010	1651493,463	8192380,514	30,42
1011	1651489,066	8192383,411	30,42
1008	1651489,130	8192383,477	32,91
1012	1651484,078	8192386,975	34,08
1013	1651479,763	8192390,025	34,07



1015	1651479,971	8192390,282	30,15
1050	1651486,433	8192385,299	33,38
1051	1651486,446	8192385,252	34,05
1054	1651495,237	8192379,403	33,91
1055	1651496,803	8192378,330	33,87

Tableau 2: Positions des points levés dans le nuage de points en RGF93/CC49 (6 GCP)

Id point	E	N	H
2001	0,011	0,008	0,048
2002	0,027	0,004	0,039
1001	0,027	0,025	0,075
1002	0,092	0,223	0,011
1023	0,010	0,095	0,025
1020	0,053	0,015	0,036
1021	0,006	0,003	0,066
1007	0,019	0,001	0,028
1010	0,016	0,013	0,037
1011	0,037	0,044	0,038
1008	0,034	0,014	0,057
1012	0,036	0,070	0,033

1013	0,034	0,032	0,050
1015	0,057	0,021	0,028
1050	0,015	0,032	0,027
1051	0,030	0,004	0,062
1054	0,061	0,008	0,031
1055	0,023	0,042	0,009

Tableau 3: Écarts en mètre et en valeur absolue entre les coordonnées des points levés par station totale et le nuage de points (6 GCP)

Id point	E	N	H
2001	1651489,058	8192378,816	30,14
2002	1651489,773	8192379,898	30,22
1001	1651503,450	8192373,820	36,64
1002	1651474,812	8192393,052	36,51
1023	1651502,179	8192375,136	34,74
1020	1651492,068	8192381,423	36,12
1021	1651490,445	8192382,548	34,61
1007	1651493,458	8192380,511	32,88
1010	1651493,447	8192380,520	30,41
1011	1651489,066	8192383,410	30,45

1008	1651489,070	8192383,441	32,89
1012	1651484,028	8192387,023	34,15
1013	1651479,841	8192390,101	34,09
1015	1651479,919	8192390,256	30,08
1050	1651486,415	8192385,252	33,36
1051	1651486,466	8192385,255	34,01
1054	1651495,248	8192379,394	33,89
1055	1651496,755	8192378,272	33,91

Tableau 4: Coordonnées des points levés dans le nuages de points (4 GCP)

Id point	E	N	H
2001	0,000	0,005	0,048
2002	0,027	0,004	0,049
1001	0,175	0,135	0,035
1002	0,007	0,272	0,024
1023	0,006	0,047	0,045
1020	0,052	0,015	0,046
1021	0,014	0,022	0,066
1007	0,018	0,026	0,028
1010	0,032	0,007	0,027

1011	0,037	0,045	0,068
1008	0,026	0,022	0,037
1012	0,086	0,022	0,037
1013	0,112	0,108	0,030
1015	0,005	0,005	0,042
1050	0,003	0,015	0,007
1051	0,050	0,001	0,022
1054	0,072	0,001	0,011
1055	0,071	0,016	0,031

Tableau 5: Ecart obtenu entre les coordonnées des points levé par station totale et nuage de points (4 GCP)

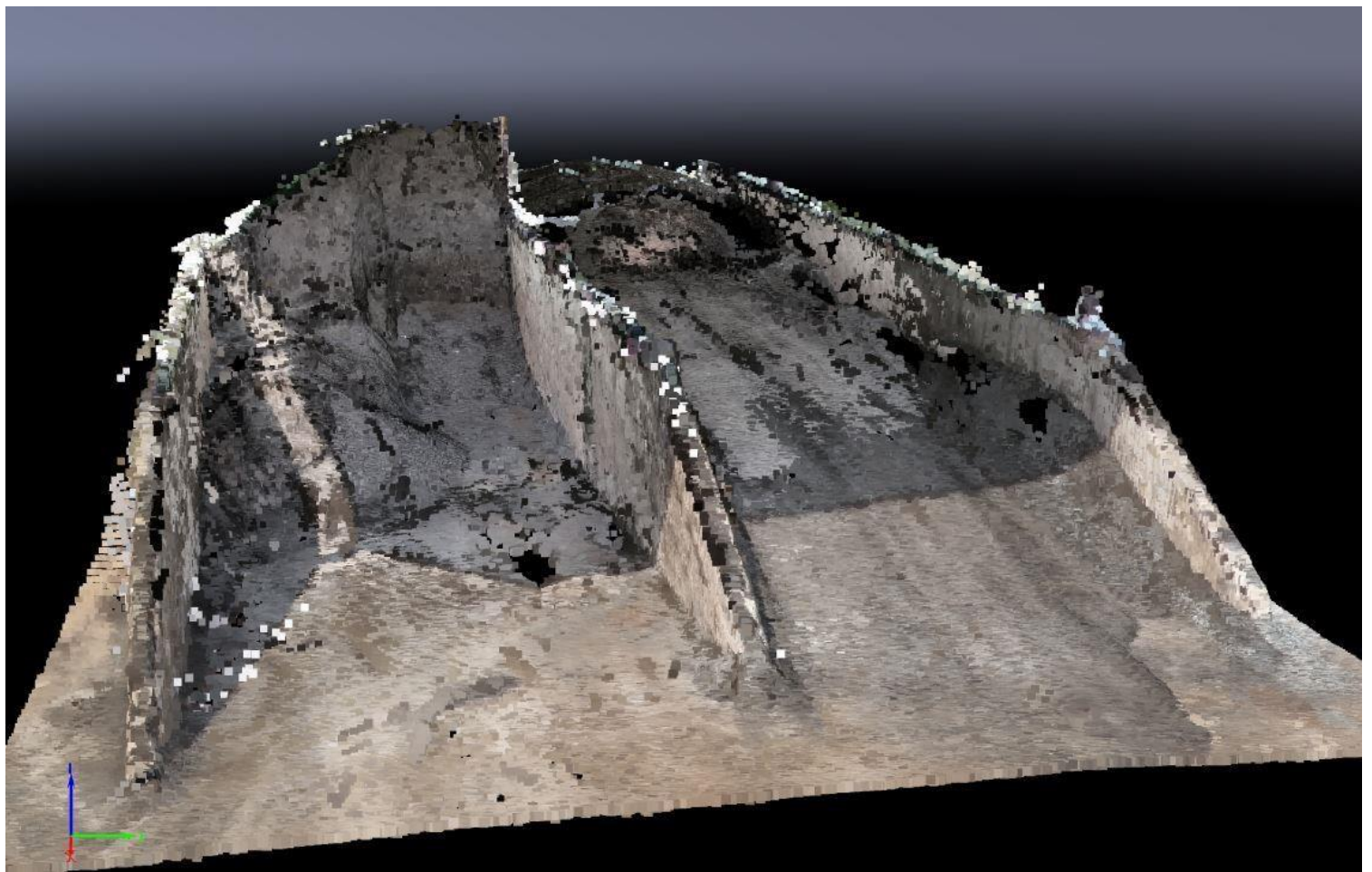
**Annexe 6**  
**Modèle 3D d'un chantier de réhabilitation de voirie (Production personnelle)**



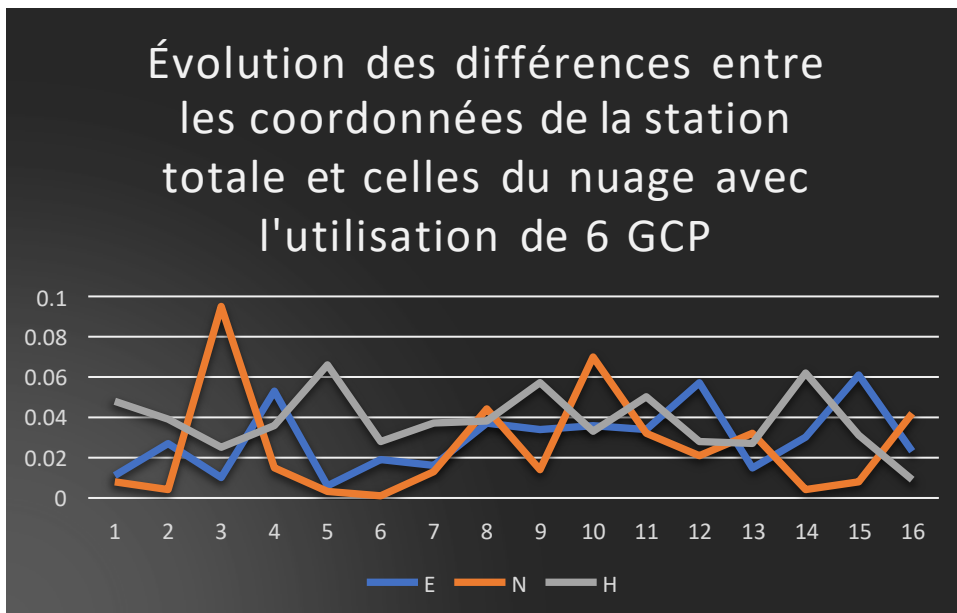
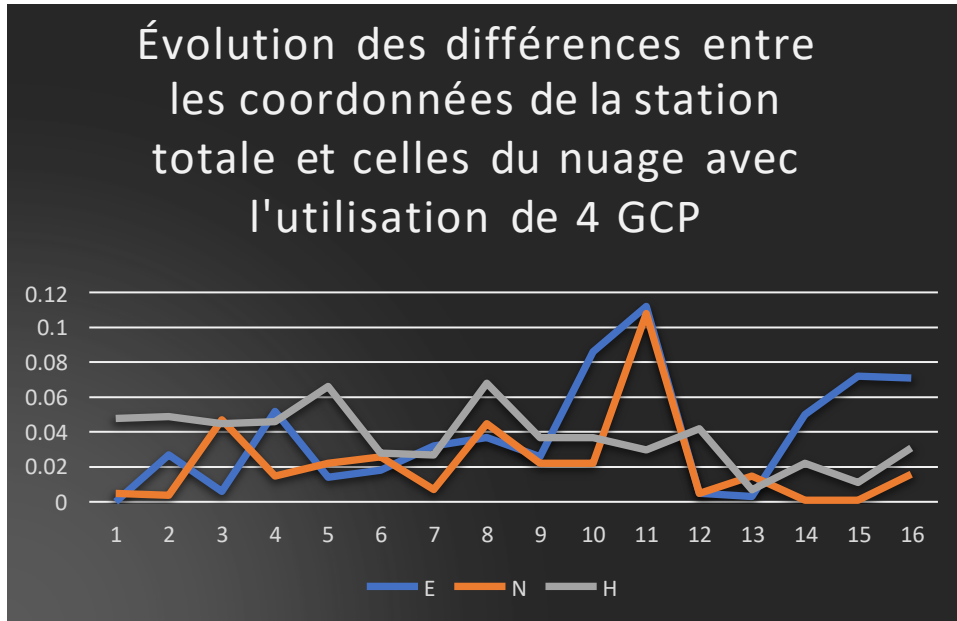
**Annexe 7**  
**Modèle 3D de façade généré lors de la phase d'essai sur le chantier**  
**Neuilly-sur-Seine (mode 360°) (Production personnelle)**



**Annexe 8**  
**Nuage de points utilisé pour le calcul de cubatures dans une carrière**  
**(Production personnelle)**



**Annexe 9**  
**Variation des écarts en coordonnées station-nuage avec 4 GCP puis 6 GCP**  
**(Production personnelle)**





## Annexe 10

### Code python utilisé pour la calibration manuelle de la caméra GoPro MAX [20]

```
import numpy as np
import cv2 as cv
import glob
import pickle
import matplotlib as plt

##### FIND CHESSBOARD CORNERS - OBJECT POINTS AND IMAGE POINTS #####

chessboardSize = (7,5)
frameSize = (640,480)

# termination criteria
criteria = (cv.TERM_CRITERIA_EPS + cv.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 30, 0.001)

# prepare object points, like (0,0,0), (1,0,0), (2,0,0) ....,(6,5,0)
objp = np.zeros((chessboardSize[0] * chessboardSize[1], 3), np.float32)
objp[:, :2] = np.mgrid[0:chessboardSize[0], 0:chessboardSize[1]].T.reshape(-1,2)

size_of_chessboard_squares_mm = 31
objp = objp * size_of_chessboard_squares_mm

# Arrays to store object points and image points from all the images.
objpoints = [] # 3d point in real world space
imgpoints = [] # 2d points in image plane.

images = glob.glob( r'c:\users\AHKIMY\OneDrive - Colas\Desktop\CameraCalibration-main\*.JPG')

for image in images:
    img = cv.imread(image)
    #image_grises = cv.imread(r'c:\users\AHKIMY\OneDrive - Colas\Desktop\CameraCalibration-main\*.JPG', cv.IMREAD_GRAYSCALE)

    gray = cv.cvtColor(img, cv.COLOR_BGR2GRAY)

    # Find the chess board corners
    ret, corners = cv.findChessboardCorners(gray, chessboardSize, None)

    # If found, add object points, image points (after refining them)
    if ret == True:
        objpoints.append(objp)
        corners2 = cv.cornerSubPix(gray, corners, (11,11), (-1,-1), criteria)
        imgpoints.append(corners)

        # Draw and display the corners
        cv.drawChessboardCorners(img, chessboardSize, corners2, ret)
        cv.namedWindow("img", cv.WINDOW_NORMAL)

        cv.imshow('img', img)
        cv.waitKey(1000)
    else :
        print('ret is false')
ret, mtx, dist, rvecs, tvecs = cv.calibrateCamera(objpoints, imgpoints, img.shape[1::-1], None, None)
cv.destroyAllWindows()
```

## Liste des figures<sup>2</sup>

Figure 1 : (a) caméra dioptrique (fisheye) ; (b) caméra catadioptrique ; (c) caméra polydioptrique (Source : [5]) .....	9
Figure 3 : Modèle de caméra fisheye en géométrie sphérique (Source : [10]) .....	11
Figure 4 : Configuration de l'acquisition des images dans le tunnel (Source : [9]) .....	12
Figure 5 : Photo de la scène à reconstruire (Source : Google Maps) .....	15
Figure 6 : Capture d'écran de l'interface du logiciel Agisoft Metashape affichant le maillage texturé généré (Source : [8]).....	15
Figure 7 : Capture d'écran de l'interface du logiciel Agisoft Metashape affichant les positions calculées des caméras lors de l'alignement et le maillage texturé généré (Source :[8]) .....	16
Figure 8 : Maillage texturé obtenu à partir d'un relevé photogrammétrique en utilisant la caméra 360° Ricoh Theta SC2 (Source : production personnelle) .....	17
Figure 9 : Schéma optique représentant la formation de l'image dans la caméra.....	20
Figure 10 : Image extraite de l'ensemble de données utilisé pour l'étalonnage du mode SVM.....	23
Figure 11 : Coins du damier détectés par la fonction « findChessboardCorners » .....	23
Figure 12 : Maillage 3D texturé obtenu par le mode 360° (Source : production personnelle) .....	28
Figure 13 : Maillage 3D texturé obtenu par le mode SVM (Source : production personnelle) .....	28
Figure 14 : Maillage 3D texturé de façades obtenu par le mode 360° (Source : production personnelle).....	30
Figure 15 : Nuage de points issu du mode d'acquisition 360° auquel un champ scalaire de densité volumique a été appliqué (Source : production personnelle) .....	31
Figure 16 : Nuage de points issu du mode d'acquisition SVM auquel un champ scalaire de densité volumique a été appliqué (Source : production personnelle) .....	32
Figure 17 : Positions des GCP sur la façade (Source : production personnelle).....	33
Figure 18 : Positions des points de contrôle levés sur la façade (Source : production personnelle).....	34
Figure 19 : Photographie du bâtiment à modéliser et à intégrer au projet .....	39
Figure 20 : Positions des GCP levés sur la façade à modéliser (étoiles rouges).....	40
Figure 21 : Résultats issus du premier traitement (position des caméras en vert) (Source : production personnelle) .....	41
Figure 22 : Positions des caméras après fusion des projets (Source : production personnelle) .....	41
Figure 23 : Maillage texturé obtenu à partir du projet fusionné (Source : production personnelle) .....	42
Figure 24 : Résultat du traitement sur Twinmotion (Source : production personnelle) .....	43

## Liste des tableaux

Tableau 1: Paramètres utilisés dans le logiciel Reality Capture pour l'étape de l'alignement [9] ...	13
Tableau 2: Résultats obtenus après la génération du nuage de points pour les trois méthodes [9]...	14
Tableau 3: Tableau récapitulatif des caméras 360° dans le marché et leurs caractéristiques (Source : Production personnelle) .....	18
<b>Tableau 4:</b> Résumé des paramètres de traitement utilisés (agence) (Source : production personnelle).....	26
<b>Tableau 5:</b> Résultats du rapport de qualité pour la phase d'alignement (Source : production personnelle).....	27
<b>Tableau 6:</b> Résumé des paramètres de traitement utilisés (Neuilly-sur-Seine) (Source : production personnelle).....	29
<b>Tableau 7:</b> Echantillon des écarts obtenus entre les coordonnées station et les coordonnées nuage de point (6 GCP) (Source : production personnelle).....	33
<b>Tableau 8:</b> Echantillon des écarts obtenus entre les coordonnées station et les coordonnées nuage de point (6 GCP) (Source : production personnelle).....	35
<b>Tableau 9:</b> Paramètres utilisés lors de la création d'un projet (Source : production personnelle) ...	36
<b>Tableau 10:</b> Résumé des paramètres de traitement (Source : production personnelle).....	40

**Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique terrestre à l'aide d'un capteur photogrammétrique 360° permettant d'avoir une capture de réalité qui sera interopérable avec des données tridimensionnelles.**

**Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2023**

---

## **RESUME**

Ce mémoire propose une étude axée sur la génération de modèles 3D de façades en utilisant des images capturées avec deux modes d'acquisition de la caméra 360° GoPro MAX. L'étalonnage manuel de la caméra est réalisé avec la bibliothèque OpenCV, les données des façades sont ensuite traitées par le logiciel Pix4Dmapper et l'analyse du nuage de points par le logiciel CloudCompare.

Cette recherche contribue à mieux comprendre les enjeux et les limites des techniques de modélisation 3D à partir de vidéos et images 360°. Pour cela, une étude préalable est réalisée afin de visualiser le potentiel de la caméra, et plusieurs cas de figure ont été traités pour appliquer la chaîne de production. Une comparaison a été effectuée en variant le nombre et la répartition des points de contrôle géoréférencés (GCP) pour évaluer leur impact sur la précision planimétrique et altimétrique des modèles 3D.

**Mots clés : Caméra 360°, photogrammétrie terrestre, nuage de points, Pix4Dmapper, géoréférencer, chaîne de production.**

---

## **SUMMARY**

This thesis proposes a comprehensive study of the generation of 3D models of facades using images captured with two acquisition modes of the GoPro MAX 360° camera. Manual camera calibration is performed using the OpenCV library, and facade data is then processed using Pix4Dmapper software and point cloud analysis using CloudCompare software.

This research contributes to a better understanding of the challenges and limits of 3D modeling techniques based on videos and 360° images. To achieve this, a preliminary study was carried out to visualize the camera's potential, and several case studies were processed to apply the production chain. A comparison was made by varying the number and distribution of georeferenced control points (GCP) to assess their impact on the planimetric and altimetric accuracy of 3D models. *arsley* (*Petroselinum sativum* Hoffm), and tarragon (*Artemisia dracunculus* L.) were used to optimise the drying process by minimizing browning and aroma loss.

**Keywords : 360° camera, terrestrial photogrammetry, point cloud, Pix4Dmapper, georeferencing, production line.**