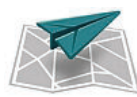


Mémoire de soutenance de Diplôme d'Ingénieur INSA  
Spécialité Topographie



DRONE ALSACE  
PRISE DE VUE AERIEENNE

---

Protocoles d'acquisition d'images et de  
traitement des données par drone

Modélisation 3D de bâtiments remarquables par  
photogrammétrie

---

*Présenté au 21 septembre 2016 par Arnadi MURTIYOSO*

*Société d'accueil :*

Drone Alsace  
4 Rue Sainte Catherine  
67000 Strasbourg, France  
[www.drone-alsace.fr](http://www.drone-alsace.fr)

*En collaboration avec :*

ICube UMR 7357 Équipe TRIO  
INSA de Strasbourg, Groupe PAGE  
24 Boulevard de la Victoire  
67084 Strasbourg, France  
[icube-trio.unistra.fr](http://icube-trio.unistra.fr)

*Directeur du PFE :*

Tristan FREVILLE (*Drone Alsace, Gérant*)

*Correcteurs-encadrants :*

Mathieu KOEHL (*INSA de Strasbourg, Maître de conférences*)  
Pierre GRUSSENMEYER (*INSA de Strasbourg, Professeur des universités*)



# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Tristan FREVILLE, le directeur de mon PFE, pour ses temps, patience et discussions pendant le déroulement de ce stage. Je voudrais également remercier mes encadrants qui sont aussi mes correcteurs, Mathieu KOEHL pour ses discussions sur le sujet de drone et Pierre GRUSSENMEYER pour ses directions et connaissances dans le domaine de la photogrammétrie. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour la confiance qu'il m'a donné jusqu'à présent, sans laquelle je n'aurais jamais arrivé en France.

Je voudrais également remercier mes camarades stagiaires Thomas DELACOURT et Maxime BALLAND du temps consacré pour les discussions sur les problèmes de photogrammétrie. Je remercie également Marine LEMPEREUR et Arnaud BREITWIESER pour ses aides sur le terrain, sans lesquelles il serait impossible de finir mon projet. Un très grand merci à Julie ROY qui m'a donné des vérifications et suggestions importantes au niveau de français. Je remercie aussi Julien VANDERMEERSCHEN, mon collègue stagiaire chez la société Drone Alsace pour toutes ses aides.

Je tiens à remercier les personnels de laboratoire de photogrammétrie, notamment Samuel GUILLEMIN pour tous conseils ainsi que ses aides sur le terrain. Je voudrais remercier également David SCHERRER et les doctorants Hélène MACHER, Elise LACHAT, Elena BOURNEZ et Emmanuel MOISAN pour ses discussions, encouragements et suggestions.

Il faudrait qu'au moment donné que je remercie Fabio REMONDINO qui m'a donné le lien vers l'INSA de Strasbourg pendant notre rencontre en 2011. Un grand merci aussi à Saretta PARAMITA et mes parents pour leur soutien moral.

Finalement, une grande partie de ma formation d'ingénieur a été financée par la bourse d'éducation indonésienne du Fonds de dotation pour l'éducation (LPDP) de la République d'Indonésie.





# Table des matières

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Remerciements</b>                                             | <b>3</b>  |
| <b>Table des matières</b>                                        | <b>5</b>  |
| <b>Résumé</b>                                                    | <b>7</b>  |
| <b>1 Introduction</b>                                            | <b>9</b>  |
| <b>2 État de l’art</b>                                           | <b>11</b> |
| 2.1 À propos des drones . . . . .                                | 11        |
| 2.1.1 Types de drones . . . . .                                  | 11        |
| 2.1.2 Applications de drones . . . . .                           | 13        |
| 2.2 Législation sur l’utilisation du drone . . . . .             | 14        |
| 2.2.1 Aperçu de législation dans les autres pays . . . . .       | 14        |
| 2.2.2 Législation en France . . . . .                            | 15        |
| 2.3 Documentation du patrimoine par la photogrammétrie . . . . . | 15        |
| 2.3.1 Notions théoriques importantes . . . . .                   | 16        |
| 2.3.2 Protocoles d’acquisition existants . . . . .               | 22        |
| 2.4 Calibration de l’appareil photo . . . . .                    | 23        |
| 2.4.1 Méthodes de calibration . . . . .                          | 23        |
| 2.4.2 Notions mathématiques . . . . .                            | 24        |
| 2.4.3 Démarche de calibration . . . . .                          | 25        |
| 2.5 Solutions logicielles . . . . .                              | 27        |
| 2.5.1 Logiciels commerciaux . . . . .                            | 27        |
| 2.5.2 Logiciels libres . . . . .                                 | 30        |
| <b>3 Moyens et méthodes</b>                                      | <b>33</b> |
| 3.1 Moyens . . . . .                                             | 33        |
| 3.1.1 Drones utilisés . . . . .                                  | 33        |
| 3.1.2 Instruments terrestres . . . . .                           | 33        |
| 3.1.3 Outils de documentation . . . . .                          | 34        |
| 3.2 Méthodes . . . . .                                           | 35        |
| 3.2.1 Démarche de calibration . . . . .                          | 35        |
| 3.2.2 Protocole d’acquisition . . . . .                          | 36        |
| 3.2.3 Stratégie de traitement . . . . .                          | 37        |
| 3.2.4 Calcul de précision théorique attendue . . . . .           | 39        |
| 3.3 Résumé . . . . .                                             | 41        |
| <b>4 Résultats et discussions</b>                                | <b>43</b> |
| 4.1 Calibration de l’appareil photo . . . . .                    | 43        |
| 4.2 Test préliminaire : le Pavillon Joséphine . . . . .          | 47        |
| 4.2.1 Comparaison des résultats d’appariement dense . . . . .    | 47        |

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.2    | Remarques préliminaires . . . . .                                    | 48        |
| 4.3      | Cas d'étude I : le Palais Rohan . . . . .                            | 50        |
| 4.3.1    | Résultat et analyse de l'aérotiangulation . . . . .                  | 50        |
| 4.3.2    | Résultat et analyse de l'appariement dense . . . . .                 | 51        |
| 4.3.3    | Résumé . . . . .                                                     | 57        |
| 4.4      | Cas d'étude II : l'église catholique Saint-Pierre-le-Jeune . . . . . | 57        |
| 4.4.1    | Résultat et analyse de l'aérotiangulation . . . . .                  | 58        |
| 4.4.2    | Résultat et analyse de l'appariement dense . . . . .                 | 60        |
| 4.4.3    | Résumé . . . . .                                                     | 63        |
| <b>5</b> | <b>Conclusions et perspectives</b>                                   | <b>69</b> |
|          | <b>Table des figures</b>                                             | <b>73</b> |
|          | <b>Liste des tableaux</b>                                            | <b>75</b> |
|          | <b>Bibliographie</b>                                                 | <b>77</b> |
|          | <b>Annexes</b>                                                       | <b>83</b> |

## Résumé

L'utilisation de la photogrammétrie pour la documentation du patrimoine s'est répandue ces dernières années, en partie grâce au développement des capteurs optiques et à l'amélioration de la puissance de calcul. L'essor des drones accompagne ces progrès grâce au potentiel des vues aériennes en complément des méthodes terrestres classiques. Plus récemment les drones ont commencé à être de plus en plus spécialisés pour des tâches spécifiques de modélisation et de reconstruction 3D. Dans cette étude, l'utilisation d'un drone nouveau dédié à l'inspection à distance rapprochée de l'objet est analysée. Plusieurs cas d'études sont proposés sur des bâtiments remarquables de la ville de Strasbourg (France). Un test préliminaire a été effectué sur le Pavillon Joséphine en décembre 2015, puis deux études approfondies ont été réalisées sur le Palais Rohan et l'église catholique St-Pierre-le-Jeune. Dans le cas de l'église, les données issues de deux drones différents ainsi que des images terrestres ont été fusionnées. Le traitement est effectué en utilisant des solutions photogrammétriques et SfM (*Structure from Motion* ou structure par le mouvement) commerciales et libres. La qualité de l'aérotriangulation et de l'appariement dense est étudiée. Le palais et l'église ont été scannés par un scanner laser pour disposer de données de référence en vue de la comparaison des résultats d'appariement dense. Les résultats donnent des précisions centimétriques dans tous les cas mais soulèvent des problèmes liés à la qualité d'images. L'objectif final de ce projet est de pouvoir adapter les protocoles existants d'acquisition et de traitement d'images terrestres pour les données issues de relevés par drones sur des bâtiments.

**Mots-clés** : drone, documentation, photogrammétrie, rapprochée, protocoles, patrimoine.

## Abstract

The use of image-based techniques to document heritage sites has seen resurgence in recent years with advancements in optical sensors as well as computing power. The rise of UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) also complements this technique, by providing the advantage of aerial view over traditional terrestrial image acquisition. Recently UAVs began to become more and more specialized towards specific tasks, 3D modeling and reconstruction being some of them. In this study the use of state of the art UAV dedicated for close range inspection is analyzed. Several case studies were performed on historical buildings in Strasbourg, France. A preliminary test was performed on the Joséphine Pavillion, while two case studies were conducted on the Rohan Palace and the St-Pierre-le-Jeune Catholic church. In the case of the church, data from two different UAVs as well as terrestrial images were combined. Processing was then done by utilizing both commercial and open source photogrammetry and SfM (Structure from Motion) solutions. Both the quality of the aerotriangulation and the dense matching were studied. In addition, the palace and the church were scanned using a laser scanner. This data is then used as references in comparing the results of the photogrammetric dense matching. Results show a centimetric precision in all cases, while highlighting some problems with the quality of images. The final objective of this project is to adapt existing terrestrial image acquisition and processing protocols for use by UAVs.

**Keywords** : UAV, documentation, photogrammetry, close range, protocols, heritage buildings.

## Ringkasan

Selama beberapa tahun terakhir, penggunaan teknik berbasis citra untuk dokumentasi cagar budaya telah mengalami kemajuan pesat mengikuti perkembangan di bidang sensor optik dan komputer. Maraknya wahana nirawak turut mendukung teknik ini dengan kelebihanannya dibanding teknik darat dalam menangkap citra udara. Belakangan ini wahana nirawak menjadi semakin terspesialisasi untuk tujuan-tujuan khusus seperti pemodelan dan rekonstruksi 3D. Dalam makalah ini, penggunaan wahana nirawak yang dibuat khusus untuk pemeriksaan jarak dekat akan dipelajari. Beberapa studi kasus telah dilakukan pada sejumlah bangunan bersejarah di kota Strasbourg, Perancis. Uji coba awal dilakukan di Paviliun Joséphine, sedangkan dua kasus studi dilaksanakan di Istana Rohan dan gereja Katolik St-Pierre-le-Jeune. Untuk gereja tersebut, data dari dua wahana nirawak digabungkan dengan foto dari kamera terestris. Pengolahan data kemudian dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak fotogrametri dan SfM (*Structure from Motion*) baik yang bersifat komersil maupun sumber terbuka. Kualitas hasil dari proses aerotriangulasi dan korespondensi citra kemudian dipelajari. Selain itu, objek istana dan gereja dipindai dengan menggunakan pemindai laser. Data pindaian ini kemudian digunakan sebagai referensi dalam perbandingan hasil korespondensi citra fotogrametri. Hasil dari studi ini menunjukkan ketelitian sentimetrik untuk semua kasus, tetapi juga menekankan sejumlah masalah yang berkaitan dengan kualitas citra. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan protokol pengambilan dan pengolahan data citra dari wahana nirawak.

**Kata kunci** : wahana nirawak, dokumentasi, fotogrametri, rentang dekat, protokol, cagar budaya.

# Chapitre 1

## Introduction

La photographie aérienne a une longue histoire d'être employé à des fins de cartographie. Elle permet un grand champ d'application et une minimisation des travaux sur le terrain. La photogrammétrie est un outil standard souvent utilisé pour les applications à grande échelle. Elle permet à l'utilisateur d'obtenir des données planimétriques et altimétriques de la zone prise, et éventuellement des orthophotos. Elle a également vu l'utilisation croissante des drones (véhicules aériens sans pilote) pour la cartographie à petite échelle. En outre, de nos jours, les drones peuvent être déployés pour résoudre les problèmes qui nécessitent une réponse rapide, y compris dans le cas de l'inspection des façades d'un bâtiment.

Depuis sa première conception en tant que support militaire, l'utilisation des drones a évolué de façon importante vers le domaine civil. Dans le domaine de la géomatique, cette vulgarisation de la technologie aérienne et sa miniaturisation ont ouvert la voie à de nouvelles méthodes de photogrammétrie aérienne rapprochée. Couplé au développement rapide des capteurs optiques et de la puissance de calcul, le potentiel de ce type de relevé est important pour de nombreuses applications. Le domaine de la documentation du patrimoine profite naturellement de ces évolutions, en complément des méthodes déjà établies en photogrammétrie terrestre [NEX et REMONDINO (2014)]. Plus récemment, les drones ont commencé à être utilisés pour des secteurs spécifiques tels que le levé de zones agricoles et l'inspection industrielle à courte distance. Quelques exemples d'utilisation de drones dans le cadre d'inspection ou de la documentation du patrimoine sont présentés dans les articles de REICH et al. (2012); BAIOCCHI et al. (2013); ACHILLE et al. (2015); ALIDOOST et AREFI (2015).

Dans le domaine de l'imagerie, l'optique du capteur embarqué sur un drone joue un rôle très important. Quelques fabricants de drone ont essayé d'intégrer des lentilles de qualité supérieure, mais le poids des optiques reste un facteur limitant. Les progrès dans le domaine de la vision par ordinateur ont largement facilité la chaîne des traitements photogrammétriques. Celle-ci commence avec une extraction et un appariement automatique des points homologues, suivis par une détection robuste des fautes et leur élimination. Un ajustement des faisceaux en bloc est ensuite effectué afin de calculer les positions et les orientations de chaque station d'appareil photo REMONDINO et DEL PIZZO (2012); CHIABRANDO et al. (2015).

La société Drone Alsace<sup>1</sup> est un opérateur de drone et membre de la Fédération Professionnelle du Drone Civil<sup>2</sup> (FPDC) qui travaille dans les domaines de la géomatique, de l'inspection technique et de l'audiovisuel. Sa flotte comprend non seulement des drones à voilure tournante, mais aussi à voilure fixe pour des applications à grande échelle. Drone Alsace réalise des études de faisabilité, des acquisitions de données ainsi que leur exploitation et analyse. Pour notre étude, nous avons à notre disposition un drone dédié pour faire des inspections industrielles (le modèle Albris de Sensefly).

L'objectif de ce projet sera d'étudier les protocoles d'acquisition et de traitement existants

---

1. <http://www.drone-alsace.fr/> consulté le 27 avril 2016

2. <http://www.federation-drone.org/> consulté le 23 février 2016

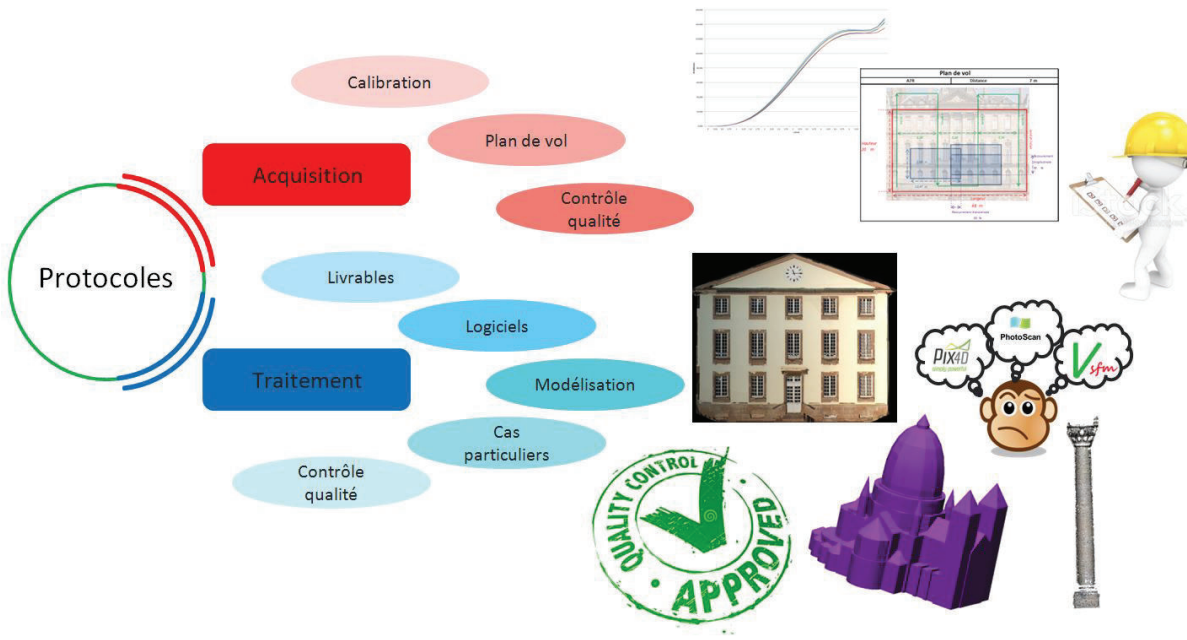


FIGURE 1.1 – Les différents aspects et enjeux du projet de fin d'études.

afin de pouvoir les implémenter pour des projets de drone. Ceci implique l'étude de la calibration du capteur, la planification du vol, la comparaison des logiciels, la modélisation 3D des objets et l'étude sur les différents livrables. De plus, une étude sur la qualité géométrique et visuelle du résultat sera effectuée (cf. FIGURE 1.1).

La calibration des capteurs se fait sur différents logiciels afin de pouvoir comparer les résultats. Un site de calibration dédié a été créé pour ce but au sein de l'INSA de Strasbourg. Ce site suit les consignes de calibration trouvées dans la littérature. Ce dispositif fixe, avec des cibles mesurées par une station totale, nous permet d'avoir un moyen pour calibrer de façon rigoureuse d'autres capteurs à l'avenir.

Au niveau de l'acquisition des données, cette étude présente des protocoles pour récupérer le plus de détails de l'objet. Il s'agit de l'implémentation des images à grand recouvrement sous forme d'images obliques. Cette méthode nous permettra de reconstruire des angles difficiles et des parties normalement cachées dans un vol perpendiculaire classique. Les plans de vol pour toutes ces acquisitions sont calculés en avant-projet, ce qui permet de réduire le temps sur le terrain. Des documents de support existent également avec pour l'objectif de documenter la mission ainsi que les métadonnées de l'objet à numériser.

Cette étude présentera également une stratégie de traitement de données. Cette stratégie peut être implémentée pour des projets ayant un grand nombre d'images. La méthode proposée divise les images en quelques blocs indépendants avant de les fusionner ultérieurement après l'étape de maillage. Un ajustement radiométrique est ensuite effectué afin de générer un modèle 3D homogène.

Deux bâtiments remarquables de la ville de Strasbourg ont été étudiés : une partie de la façade du Palais Rohan et l'Église catholique Saint-Pierre-le-Jeune. L'acquisition des données a été réalisée par voie photogrammétrique à l'aide du drone et un relevé lasergrammétrique a également été effectué pour disposer de données de référence. Ces bâtiments sont choisis avec l'accord de l'Eurométropole de Strasbourg en tenant compte des différents défis liés à l'acquisition et au traitement. Il s'agit d'un projet pilote pour la numérisation des bâtiments remarquables de la ville de Strasbourg avec l'objectif de les intégrer dans le SIG (Système d'information géographique) 3D de la ville.

## Chapitre 2

# État de l'art

### 2.1 À propos des drones

La Fédération Professionnelle de Drone Civil a défini le drone en tant qu'aéronef télécommandé, c'est-à-dire sans pilote à bord. Il embarque une charge utile qui lui permet de réaliser des missions diverses et variées. Le terme « drone » vient de la notation anglo-saxonne qui signifie « faux-bourdon ». Le terme privilégié par l'Organisation Météorologique Mondiale<sup>1</sup> est « aéronef téléguidé », alors que le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie préfère l'expression « aéronef télépilote ».

Dans la littérature anglo-saxonne, plusieurs termes existent. Le plus connu dans le domaine de la géomatique est le terme UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), mais il existe également d'autres noms tels que RPV (*Remotely Piloted Vehicle*), ROA (*Remotely Operated Aircraft*), MAV (*Micro Aerial Vehicles*), UCAV (*Unmanned Combat Air Vehicle*), SUAV (*Small UAV*), LADP (*Low Altitude Deep Penetration*) UAV, LALE (*Low Altitude Long Endurance*) UAV, MALE (*Medium Altitude Long Endurance*) UAV, etc. L'appellation est souvent adaptée au système de propulsion de l'appareil, à l'altitude et à l'automatisation du vol. Le terme UAS (*Unmanned Aerial System*) désigne le système composé de la plateforme de drone et de la station de contrôle sur le terrain [COLOMINA et MOLINA (2014); REMONDINO (2014); ACHILLE et al. (2015)].

Au début de son invention, le développement de drone a été ciblé pour des buts militaires y compris la surveillance, la reconnaissance et l'inspection autonome. En effet, l'utilisation des drones pour des projets géomatiques est plutôt récente. La photogrammétrie, en utilisant le drone, ouvre plusieurs possibilités d'application en distance rapprochée. Elle permet de compléter des levés sur le terrain et offre une alternative à bas coût à la photogrammétrie classique pour le levé des informations terrestres en 3D [NEX et REMONDINO (2014)].

De plus, REMONDINO (2014) a remarqué que le succès du drone est dû à la disponibilité des plateformes à bas coût combinées avec des appareils photos et des systèmes de GNSS/INS. La télédétection classique reste toujours une méthode de levé importante et sa résolution est de plus en plus souvent sub-métrique. Cependant, les drones sont des alternatives fiables surtout pour les domaines de la documentation du patrimoine et des applications qui nécessitent des réponses rapides (cf. FIGURE 2.1).

#### 2.1.1 Types de drones

Plusieurs types de drone existent pour répondre aux différents besoins des utilisateurs, sachant que le premier drone a été conçu pour des applications militaires. FRITSCH et al. (2013) ont donné une catégorisation plutôt complète sur les types de drones (cf. TABLEAU 2.1). Puis à partir de ces catégories, REMONDINO et al. (2011) ont également évoqué trois catégories principales selon

---

1. <https://www.wmo.int/> consulté le 23 février 2016

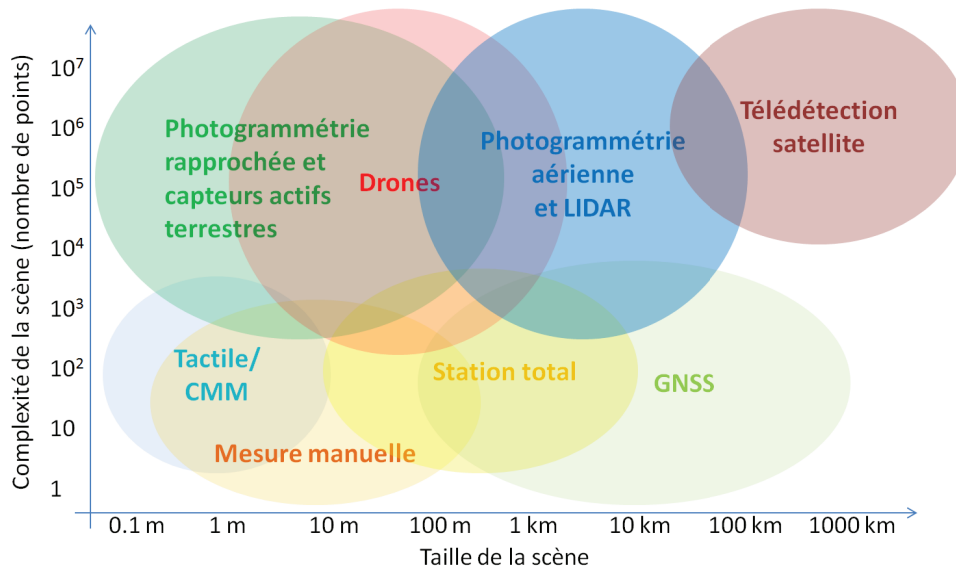


FIGURE 2.1 – Techniques pour la géomatique, capteurs et plateformes pour le levé 3D en fonction de la dimension du scène et sa complexité, modifié depuis REMONDINO (2014).

leurs tailles, poids, endurances, distances et altitudes. Cette catégorisation est aussi basée sur celle de l'association *UVS (Unmanned Vehicle System) International*<sup>2</sup>.

1. *Drones tactiques*, y compris le micro, mini, CR, SR, MR ainsi que MRE, LADP, LALE et MALE.
2. *Drones stratégiques*, y compris le HALE et des systèmes volant dans la stratosphère voire exo-stratosphère avec une altitude jusqu'à 20000 mètres et une autonomie de 2 à 4 jours.
3. *Drones pour des tâches spéciales*, y compris des systèmes militaires destinés au combat.

Dans le domaine de la géomatique, deux catégories de drones existent [REMONDINO (2014)] :

1. *Plateformes sans alimentation*, par exemple des montgolfières, des cerfs-volants, des parapentes.
2. *Plateformes avec alimentation*, par exemple des avions, des hélices, des moteurs électriques, des moteurs à combustion.

En fonction de sa structure physique ainsi qu'aérodynamique, le drone en utilisation courante par la communauté géomatique est catégorisé en trois groupes ayant des caractéristiques spécifiques [REMONDINO (2014); ACHILLE et al. (2015)] :

1. *Aérostats*, par exemple les ballons et les avions.
2. *Voilure fixe*, ces drones suivent le principe de fonctionnement des avions classiques avec une ou plusieurs hélices avec un sens de vol rectiligne. La plupart des drones de ce type fonctionne de manière autonome en suivant un plan de vol pré-établi. C'est le plus adapté pour le besoin de la photogrammétrie classique, étant donné que sa surface de recouvrement est beaucoup plus grande que celles des drones du type voilure tournante. L'inconvénient de ce type est sa basse résistance au vent ainsi que la limite du poids.
3. *Voilure tournante*, ces drones sont des versions plus petites basés sur le principe de l'hélicoptère. De grands drones de ce type existent ; qui souvent nécessitent une alimentation en carburant. C'est un type de drone très adaptable à plusieurs buts, mais qui nécessite un entretien et d'une préparation plus importante avant de voler.

2. <http://uvs-international.org/> consulté le 21 mars 2016



4. *Voilure tournante à multiples hélices*, c'est-à-dire les drones ayant trois hélices ou plus fixées à leur structure. La position et le mouvement sont contrôlés par les vitesses de rotation de chaque hélice. Ce type de drone est très flexible puisque le nombre d'hélices peut être augmenté en fonction du poids embarqué.

TABLEAU 2.1 – Catégorisation des drones, adaptée de FRITSCH et al. (2013).

|        | Classe du système                | Poids (kg)     | Distance (km) | Altitude (m) | Duration (h) |
|--------|----------------------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| $\eta$ | <i>Nano</i>                      | < 0,025        | < 1           | 100          | < 1          |
| $\mu$  | <i>Micro</i>                     | < 5            | < 10          | 250          | 1            |
| Mini   | <i>Mini</i>                      | < 20/25/30/150 | < 10          | 150          | < 2          |
| CR     | <i>Close Range</i>               | 25-150         | 10-30         | 3000         | 2-4          |
| SR     | <i>Short Range</i>               | 50-250         | 30-70         | 3000         | 3-6          |
| MR     | <i>Medium Range</i>              | 150-500        | 70-200        | 5000         | 6-10         |
| MRE    | <i>Med. Range Endurance</i>      | 500-1500       | > 500         | 8000         | 10-18        |
| LADP   | <i>Low Alt. Deep Penetration</i> | 250-2500       | > 250         | 50-9000      | 0,5-1        |
| LALE   | <i>Low Alt. Long Endurance</i>   | 15-25          | > 500         | 3000         | > 24         |
| MALE   | <i>Med. Alt. Long Endurance</i>  | 1000-1500      | > 500         | 5/8000       | 24-48        |
| HALE   | <i>High Alt. Long Endurance</i>  | 2500-5000      | > 2000        | 20000        | 24-48        |

### 2.1.2 Applications de drones

En géomatique, les drones ont été utilisés dans divers domaines [REMONDINO (2011); NEX et REMONDINO (2014)] :

1. Agriculture, en tant qu'aide de décision pour économiser du temps et de l'argent (par exemple en agriculture de précision). Le drone peut aussi être utilisé pour une inspection rapide de l'état du terrain et pour la détection de problèmes éventuels.
2. Gestion forestière, surveillance des feux, auscultation de la végétation, identification d'espèces, calcul du volume ainsi que sylviculture à grande précision.
3. Archéologie et architecture, c'est-à-dire le relevé des structures bâties et du patrimoine en profitant de la capacité du drone à capter des images à une certaine hauteur du sol.
4. Environnement, pour faire des levés réguliers à bas coût afin d'ausculter le terrain et les ressources en eau à plusieurs époques. Il peut aussi être appliqué pour le levé des routes, le calcul de remblai et déblai, l'auscultation des côtes, la documentation des ressources naturels, le relevé post-catastrophe naturelle, etc.
5. Gestion d'urgence, en profitant du fait que le drone peut être déployé rapidement et sans danger pour l'opérateur sur des zones contaminées.
6. Gestion routière, par exemple pour surveiller l'état de circulation, estimer le temps de trajet, etc.
7. Reconstruction 3D, en tant que source indispensable d'images pour la reconstruction 3D des objets et des artefacts.

CRAMER (2013) a également cité quelques applications du drone au sein des services gouvernementaux :

1. Cadastre, surtout lorsque l'accès direct à la parcelle est difficile.
2. Relevé 3D de petites zones, par exemple pour la détection de changement. Cela peut être par exemple dans le cas d'un remembrement, afin de documenter l'avancement du projet pour les acteurs.
3. Relevé d'urgence, par exemple pour une réponse rapide en cas de catastrophe naturelle surtout dans des zones difficilement accessibles.
4. Auscultation, par exemple un levé régulier des systèmes de protection contre l'inondation comme les digues.

Les drones ont vu plusieurs utilisations dans le domaine de l'archéologie, souvent afin de fournir une vue générale de l'environnement autour d'un site [REMONDINO et al. (2011)]. Cela peut être fait en utilisant un drone à voilure fixe [SUWARDHI et al. (2015)] ou à voilure tournante [REMONDINO et al. (2011); CHIABRANDO et al. (2015)] en fonction des dimensions du site en question. Une autre utilisation courante du drone dans ce domaine est la modélisation et l'inspection des façades de bâtiments en distance rapprochée par les systèmes à voilure tournante. Ce type d'acquisition est souvent complété par des images terrestres et parfois par des techniques basées sur la mesure de distance comme le scanner laser [ACHILLE et al. (2015); GRENZDÖRFFER et al. (2015)]. Dans ce cas-là, le drone présente un avantage par rapport aux techniques terrestres grâce à sa vue aérienne. Celle-ci permet au drone de couvrir les parties qui sont difficiles voire impossibles à lever depuis le sol.

## 2.2 Législation sur l'utilisation du drone

Les réglementations concernant l'utilisation du drone s'appuient sur la fiabilité des plateformes afin d'assurer la sécurité de chaque mission. S'agissant d'un véhicule sans pilote, les règles concernent plus particulièrement la sécurité des citoyens en cas d'impact. Historiquement, le premier essai a eu lieu en 1999 au niveau européen pour établir les règlements liés à la coopération entre l'OTAN (Organisation du Traité de l'Atlantique Nord) et l'organisme EuroControl. Ce travail n'a pas encore été suivi par une standardisation internationale, surtout dans le cas des drones civils. Cependant, la vulgarisation récente de cette technologie a accéléré le processus de réglementation, bien que chaque pays le fasse indépendamment. À cause de l'absence de coopération entre ces différents organismes nationaux, il est difficile de trouver une généralité entre les règles existantes [NEX et REMONDINO (2014)].

### 2.2.1 Aperçu de législation dans les autres pays

Quelques descriptions courtes sur la réglementation du drone dans quelques pays du monde seront abordées par la suite [MORALES et al. (2015)] :

1. *États-Unis* : Aux États-Unis, l'organisme qui gère les réglementations de drone est le FAA (*Federal Aviation Administration*). Le FAA délivre des permis pour voler en fonction des cas rencontrés. Cependant, pour des buts récréatifs, le FAA donne simplement des consignes de sécurité : voler à une hauteur de moins de 120 m, garder l'aéronef toujours à vue, ne pas déranger les autres opérations aériennes, ne pas voler dans un rayon de 8 km autour d'un aéroport, ne pas voler près des gens ou des stades et avoir le poids de l'aéronef inférieur à 25 kg. Un permis n'est pas obligatoire dans ce cas-là.
2. *Canada* : La situation au Canada est un peu similaire à celle existant en France. Il existe des scénarios de vol, mais un vol sans permis est aussi possible en suivant quelques consignes. Il est interdit de voler à moins de 9 km d'un aéroport et à plus de 90 m de hauteur ou à moins de 150 m des communes. Au niveau des télépilotes, il y a trois cas où un télépilote doit être détenteur d'un permis. Il s'agit du cas où l'aéronef pèse plus de 35 kg, mais n'est pas utilisé pour des buts scientifiques, du cas où l'objectif est de l'investigation et le poids est supérieur à 25 kg ou inférieur à 2 kg et finalement, du cas où la mission n'est pas conforme aux conditions stipulées par le gouvernement canadien.
3. *Espagne* : En Espagne, l'utilisation du drone est limitée à des buts scientifiques ou agricoles, à des opérations d'urgence et de secours et à d'autres travaux spéciaux. L'enregistrement de vidéo à partir d'un drone est interdit sauf dans un espace clos avec des plafonds. La distance maximale du drone à partir du télépilote est de 500 m avec une vue directe, alors que le poids maximal est de 25 kg et la hauteur maximale 120 m au-dessus du sol. Le télépilote doit avoir un certificat de compétence à soumettre à l'AESA (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne).

4. *Royaume-Uni* : Au Royaume-Uni, le drone est régulé par le CAA (*Civil Aviation Authority*). Les règles sont en général similaires à celles d'autre pays déjà cités, notamment concernant l'obligation de garder l'aéronef à vue. Des images ou vidéos d'objets qui portent atteinte la vie privée des personnes sont interdites. La législation au Royaume-Uni est cependant plus claire dans certains cas comparés aux pays décrits précédemment. Par exemple, le terme « centre urbain » ou « centre de population » est utilisé lorsque la population dépasse 1000 habitants.
5. *Indonésie* : En Indonésie, les règles concernant l'utilisation des drones évoluent rapidement. Au moment de la rédaction de ce mémoire, officiellement il n'existe que des réglementations issues du Ministère des Transports (qui n'a pas encore le statut de loi) datées du 12 mai 2015 [KEMENHUB (2015)]. En principe, le vol du drone n'est pas permis pour les zones interdites, les zones restreints, les zones autour d'un aéroport où l'espace aérien est contrôlé. Le drone est également interdit dans un espace aérien non-contrôlé au-delà de 150 m en hauteur. L'utilisation des appareils photos aéroportés sont soumis à un permis délivré par le gouvernement provincial. Cependant, l'interprétation de ces clauses reste assez vague.

### 2.2.2 Législation en France

En France, l'utilisation du drone est gérée par le DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile)<sup>3</sup>. Les missions de drone doivent suivre les scénarios établis en fonction des conditions de vol et de la nature du drone. Ces règles évoluent rapidement en prenant en compte le développement des drones. En effet, la dernière version de la réglementation d'utilisation de drone était décrite par les arrêtés du 11 avril 2015 [DGAC (2015a)] et du 17 décembre 2015 [DGAC (2015b)], en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2016. Ces arrêtés remplacent les réglementations qui existaient depuis 2012. Les quatre cas définis pour une mission sont expliqués ci-dessous (cf. également la FIGURE 2.2) :

1. *S-1* : utilisation hors zone peuplée, sans survol de tiers, à vue et à une distance horizontale maximale de 200 m du télépilote. Il n'y a pas de limitation particulière sur le poids du drone.
2. *S-2* : utilisation hors zone peuplée, sans tiers au sol dans la zone d'évolution, ne répondant pas aux critères du scénario S-1, à une distance horizontale maximale de un kilomètre du télépilote. Uniquement les aéronefs de masse inférieure ou égale à 2 kg peuvent voler à une hauteur de plus de 50 m.
3. *S-3* : utilisation en zone peuplée, sans survol de tiers, à vue et à une distance horizontale maximale de 100 m du télépilote. Uniquement pour les aéronefs captifs ou les aéronefs non-captifs de masse inférieure ou égale à 8 kg.
4. *S-4* : utilisation hors zone peuplée ne répondant pas aux critères des scénarios S-1 et S-2. Uniquement pour les aéronefs de masse inférieure ou égale à 2 kg utilisés à des fins de relevés, photographies, observation ou surveillance aériennes.

## 2.3 Documentation du patrimoine par la photogrammétrie

Dans le cadre de la documentation du patrimoine, une reconstruction en 3D est souvent nécessaire pour l'analyser, l'interpréter et éventuellement le reconstruire physiquement [BARSANTI et al. (2014)]. Aujourd'hui, ce type de travail est souvent effectué en utilisant des techniques basées sur la mesure de distance (par exemple, le scanner laser terrestre) ou sur les images (la photogrammétrie et/ou SfM) [REMONDINO et DEL PIZZO (2012)]. L'approche de la photogrammétrie a comme avantages la facilité d'acquisition et l'existence d'outils peu onéreux.

3. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Secteur-Aerien,1633-.html> consulté le 6 juillet 2016

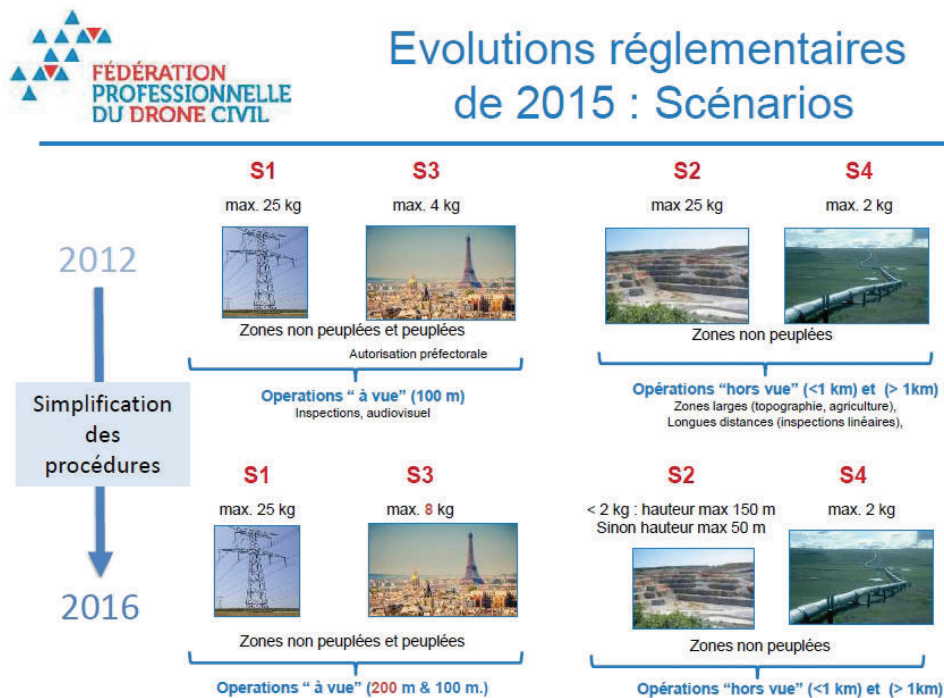


FIGURE 2.2 – Résumé des scénarios pour une mission de drone selon la législation en cours et des changements par rapport aux réglementations de 2012 (<http://www.federation-drone.org/> consulté le 6 juillet 2016).

Au niveau de l'acquisition, une règle générale est de prendre des images ayant de grandes surfaces de recouvrement autour de l'objet. Le levé est fait tout en respectant les contraintes géométriques afin que le réseau des stations soit favorable. Des mesures de coordonnées ou de dimensions sur l'objet sont effectuées afin de disposer de données de géoréférencement. Ces mesures serviront également pour contrôler le résultat final.

La chaîne de traitement des données photogrammétriques commence avec la recherche des points communs entre les images. Cette démarche est aujourd'hui très automatisée grâce à des algorithmes de correspondance automatique basés sur les caractéristiques des objets. Un ajustement de faisceaux en bloc est ensuite effectué pour calculer les positions et les orientations (que nous appelons également les paramètres d'orientation externe) de chaque caméra. À ce stade, un calcul d'auto-calibration est possible en tenant compte des paramètres de calibration dans le modèle mathématique d'ajustement. L'orientation absolue ou géoréférencement peut être réalisée à la suite de cette étape ou intégré dans le calcul d'ajustement en bloc. En suite, un algorithme d'appariement dense peut être implémenté pour rechercher la correspondance entre pixels et générer ainsi le nuage de points dense. À partir de ce nuage de points dense, plusieurs livrables peuvent être produits (orthophoto, modèle 3D, MNT, etc.).

### 2.3.1 Notions théoriques importantes

#### *Détection automatique des points d'intérêts et correspondances entre les images*

Afin de pouvoir reconstruire les paramètres d'orientation externe d'un jeu de données d'images, des points homologues entre les images sont indispensables. En photogrammétrie classique, il s'agit de l'étape de pointé des points communs dans le but de l'orientation relative. Par défaut, au moins six points communs entre chaque image sont nécessaires. Il s'agit des points de Gruber [WOLF et al. (2014)]. Avec les développements dans le monde de la vision par ordinateur, cette étape devient de plus en plus automatique. Il existe des algorithmes de détection des points et de recherche de correspondance automatique basés sur les caractéristiques, comme par exemple

la méthode de Harris [HARRIS et STEPHENS (1988)], SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) [LOWE (2004)] ou bien sa version plus rapide SURF (*Speeded Up Robust Features*) [BAY et al. (2006)]. La méthode de Harris est une amélioration de l'algorithme de Moravec, qui calcule la valeur maximale dans une fenêtre depuis un seuil particulier.

SIFT fait l'extraction des points d'intérêt en quatre étapes principales. Tout d'abord, l'algorithme utilise la différence de la fonction Gaussienne pour identifier des points d'intérêt potentiels. Un filtrage est ensuite effectué ; les points ayant un contraste faible sont éliminés. Une matrice Hessienne est alors utilisée afin de calculer les valeurs de courbures principales. Un seuil de courbure principale est déterminé et les points qui sont en dessous de ce seuil sont supprimés. Ensuite, un histogramme d'orientation est formé à partir des gradients d'orientation des points échantillonnés dans une région autour du point d'intérêt. À partir de cet histogramme, une orientation est assignée pour chaque point d'intérêt qui devient désormais son descripteur. Cependant, SIFT peut être très lent à calculer, d'où le développement d'une version plus rapide qui s'appelle SURF. SURF introduit des nouveaux éléments (par exemple, l'utilisation des signes Laplacien dans la recherche d'un point d'intérêt) afin de gagner plus de rapidité de calcul. En effet, SURF est capable d'atteindre une vitesse de calcul jusqu'à trois fois celle de SIFT, tout en gardant la fiabilité du résultat. SURF est bien adapté pour des images floues ou tournées, mais n'est pas idéal pour des brusques changements de point de vue ainsi que d'illumination [CHIABRANDO et al. (2015)].

#### *Calcul des paramètres d'orientation externe*

L'orientation externe sert à déterminer la relation entre l'espace image et l'espace objet. Cette relation est établie par la position de la caméra dans le système de coordonnées de l'espace objet. La position de la caméra elle-même est déterminée par la position de son centre de projection et ses attitudes qui sont exprimées par des angles indépendants [SCHENK (2005)]. Cette condition est formalisée sous forme de six paramètres externes dont 3 rotations et 3 translations. Notons que dans la vision par ordinateur, ces paramètres externes sont appelés les paramètres extrinsèques [GRANSHAW (2016)]. Il existe quelques méthodes pour résoudre ce problème d'orientation externe dans la photogrammétrie :

1. *L'équation de colinéarité* : Il s'agit de la relation mathématique qui lie un point objet, son image et le centre de perspective de la caméra dans une droite (cf. FIGURE 2.3). Mathématiquement, cette condition est décrite par les équations suivantes [BROWN (1971); FRASER (2013); LUHMANN et al. (2014); WOLF et al. (2014); HASTEDT et LUHMANN (2015); HE et HABIB (2015)] :

$$\begin{aligned} x' + \Delta x &= x_0 - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_s) + r_{12}(Y - Y_s) + r_{13}(Z - Z_s)}{r_{31}(X - X_s) + r_{32}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} \\ y' + \Delta y &= y_0 - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_s) + r_{22}(Y - Y_s) + r_{23}(Z - Z_s)}{r_{31}(X - X_s) + r_{32}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Où :

- $f$  : longueur de focale
- $x_0, y_0$  : coordonnées du point principal
- $x', y'$  : coordonnées dans l'espace image
- $\Delta x, \Delta y$  : paramètres de correction de distorsion
- $r$  : matrice de rotation
- $X, Y, Z$  : coordonnées dans l'espace objet
- $X_s, Y_s, Z_s$  : centre de projection du cliché

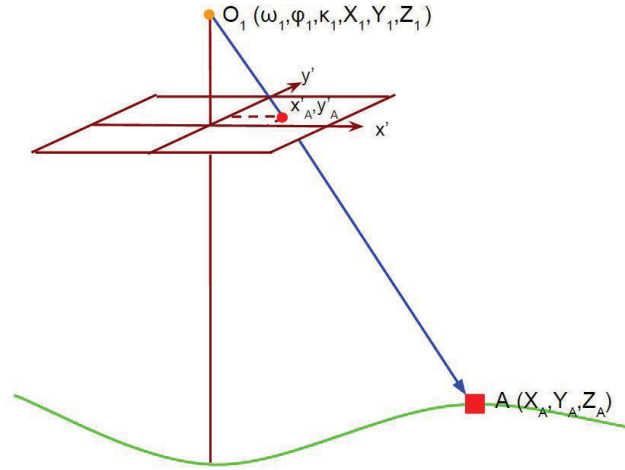


FIGURE 2.3 – Illustration de la condition de colinéarité.

L'aérotriangulation par ajustement de faisceaux en bloc est un exemple typique de l'application de cette condition de colinéarité [GRUSSENMEYER et AL KHALIL (2002)]. Remarquons que ces équations ne sont pas linéaires d'où le besoin de valeurs approchées pour chaque paramètre inconnu. Notons également que l'Équation (2.1) est dite « étendue » parce qu'elle contient aussi les paramètres d'orientation interne (c'est-à-dire les paramètres de calibration), notamment les coefficients de distorsion.

2. *L'équation de coplanarité* : Dans la plupart des projets photogrammétriques, un point quelconque est normalement photographié sur deux images ou plus. Pour deux images, les deux faisceaux provenant du même point objet vers ses projections respectives doivent être coplanaires. La formulation mathématique de cette condition est contenue dans les équations de coplanarité. Ces équations établissent le lien entre deux stations de caméra, deux points images et le point objet dans la même surface épipolaire. Puisque les coordonnées du point objet ne sont pas dans l'équation, des valeurs approximatives ne sont pas nécessaires. La condition de coplanarité est souvent utilisée pour déterminer les éléments d'orientation externe d'une image relative à une autre image [GRUSSENMEYER et AL KHALIL (2002)].

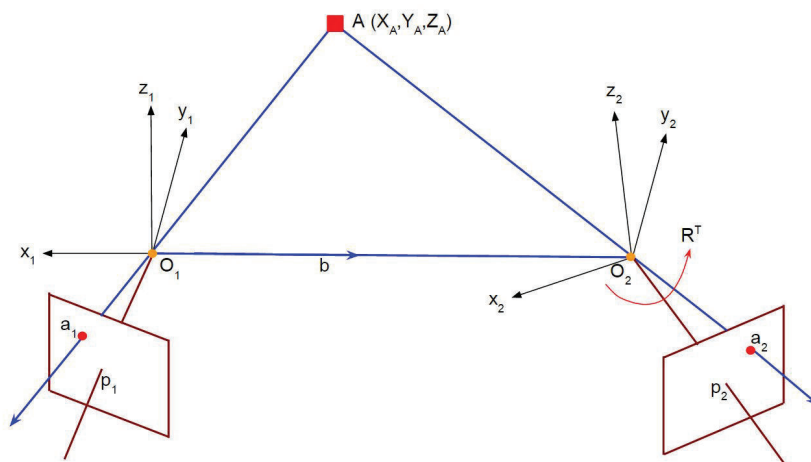


FIGURE 2.4 – Illustration de la condition de coplanarité.

À partir de la FIGURE 2.4, les équations sont écrites en fonction du vecteur de base (vecteur  $b$  entre les deux centres de perspectives) et les vecteurs de chaque point image ( $a_1$  et  $a_2$ ). Ces vecteurs sont donnés dans le système de coordonnées de l'image de gauche avec  $O_1$  son

centre de projection.

$$\begin{aligned} a_1 &= -\lambda \begin{pmatrix} x'_1 & y'_1 & -c \end{pmatrix}^T \\ a_2 &= -\mu R^T \begin{pmatrix} x'_2 & y'_2 & -c \end{pmatrix}^T \\ b &= \begin{pmatrix} b_x & b_y & b_z \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (2.2)$$

Où  $R$  est la matrice de rotation,  $\lambda$  et  $\mu$  sont des scalaires positifs. De plus, le volume du parallélépipède formé par ces trois vecteurs doit être égal à zéro.

$$b \cdot (a_1 \times a_2) = 0 \quad (2.3)$$

3. *DLT (Direct Linear Transformation)* : La DLT est une méthode qui présente le problème d'orientation externe sous forme de fonctions linéaires. L'avantage de cette méthode est que le calcul peut être résolu sans avoir besoin de valeurs approchées. Le modèle mathématique est dérivé de l'équation de colinéarité vue en Équation (2.1) [GRUSSENMEYER et AL KHALIL (2002); LUHMANN et al. (2014)] :

$$\begin{aligned} x' - \Delta x &= \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y' - \Delta y &= \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Où  $x'$  et  $y'$  sont les coordonnées en espace image et  $X, Y, Z$  les coordonnées en espace objet.  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont les erreurs systématiques (principalement les distorsions de la lentille). Nous avons donc 11 paramètres inconnus ( $L_1$  à  $L_{11}$ ). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle devient instable lorsqu'elle est appliquée à des objets plans.

4. *Relèvement spatial* : Il s'agit de la résolution d'orientation externe d'une image isolée. Dans ce cas-là, les paramètres d'orientation externe peuvent être résolus en connaissant trois points en coordonnées objet (cf. FIGURE 2.5) toujours en se basant sur les équations de colinéarité [GRUSSENMEYER et AL KHALIL (2002); LUHMANN et al. (2014); WOLF et al. (2014)].

Remarquons que dans le domaine de la vision par ordinateur, le problème de détermination de paramètres d'orientation externe est souvent abordé par la notion de la matrice de projection plutôt que la condition de colinéarité ou coplanarité. Cette matrice décrit la projection de perspective d'un espace 3D vers une image. Cette transformation entre les espaces est représentée par la matrice de projection  $P$  [GRUSSENMEYER et AL KHALIL (2002)] :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = C \langle R \mid T \rangle \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Où :

$$C = \begin{pmatrix} f & k & x'_0 \\ 0 & rf & y'_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

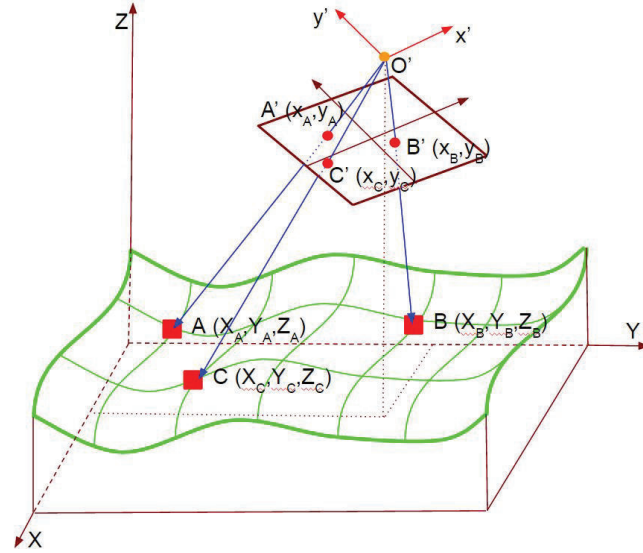


FIGURE 2.5 – Illustration du relèvement spatial, inspiré de LUHMANN et al. (2014).

$P$  (3x4) est la matrice de projection alors que  $C$  (3x3) est la matrice de calibration.  $R$  (3x3) représente la matrice de rotation tandis que  $T$  (3x1) le vecteur de translation. La matrice  $C$  contient la distance principale  $f$ , les coordonnées du centre de projection  $x'_0$  et  $y'_0$ , le ratio  $r$  entre les facteurs d'échelles horizontal et vertical et le paramètre  $k$  qui représente l'asymétrie d'image.

#### Calcul de l'orientation absolue

Quant à l'orientation externe, elle peut être faite en deux grandes étapes. La première concerne le calcul de coordonnées 3D des points à partir des images. Sans points d'appui, cette opération ne génère que des coordonnées 3D en système arbitraire ou relatif, d'où le nom d'orientation relative. Afin de rattacher ces coordonnées arbitraires au système global ou absolu, des points d'appui sont introduits. Il s'agit de l'étape d'orientation absolue.

L'orientation absolue concerne la transformation du système de coordonnées arbitraire ou relatif du modèle issu de l'orientation relative vers celui de l'espace objet absolu (cf. FIGURE 2.6). Elle fait partie de l'orientation externe et utilise la transformation de similitude 3D. Cette transformation contient trois translations, trois rotations et un facteur d'échelle [GRANSHAW (2016)]. Avec sept paramètres à résoudre, le problème d'orientation absolue nécessite au moins 3 points d'appui (dont 3 observations pour chaque point). Le modèle mathématique de cette transformation de similitude 3D est exprimé par ces équations [LUHMANN et al. (2014); WOLF et al. (2014)] :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{pmatrix} + m \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Où :

$X, Y, Z$  : coordonnées en système absolu (espace objet)

$x, y, z$  : coordonnées en système arbitraire/relatif (espace modèle)

$X_M, Y_M, Z_M$  : translations en 3D

$r$  : matrice de rotation contenant les rotations  $\xi, \eta, \zeta$

$m$  : facteur d'échelle



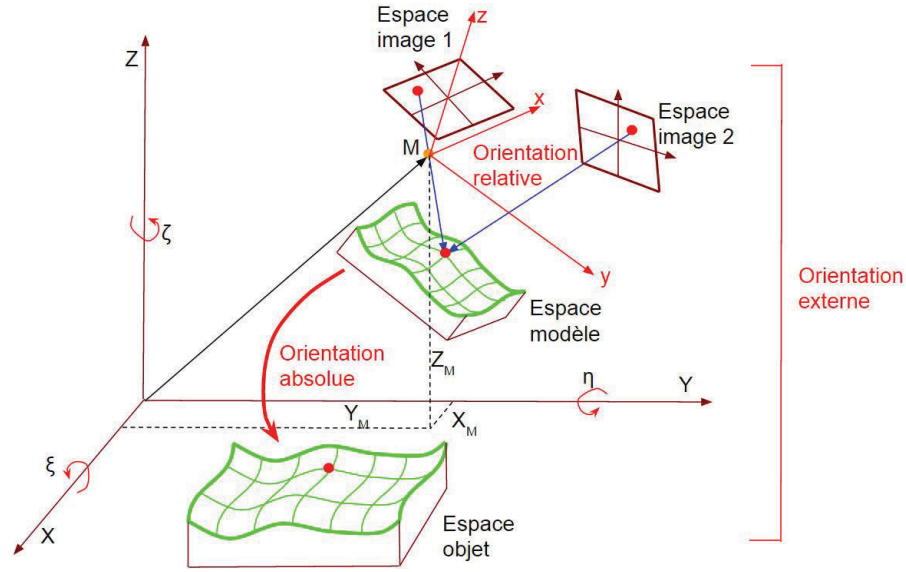


FIGURE 2.6 – Illustration de l'orientation externe dont l'orientation absolue, inspiré de LUHMANN et al. (2014).

Les équations étant non-linéaires, une linéarisation doit être effectuée pour résoudre ce problème. En effet, la présence des redondances permet un ajustement par les moindres carrés. La linéarisation de ces équations de la transformation de similitude 3D est présentée par LUHMANN et al. (2014); WOLF et al. (2014) tandis que WOLF et al. (2014) donnent également un algorithme pour calculer les valeurs approchées utilisées dans le calcul de l'orientation absolue.

#### Remarque sur les méthodes d'appariement d'images

La plupart des logiciels de reconstruction 3D qui sont basés sur les images dispose d'un algorithme de génération d'un nuage de points dense. REMONDINO et al. (2013) et plus récemment REMONDINO et al. (2014) ont essayé de classer les différentes approches d'appariement dense qui existent aujourd'hui. La classification la plus basique est entre l'appariement des caractéristiques (c'est-à-dire comparaison des descripteurs) et l'appariement des valeurs de niveau de gris dans une fenêtre de recherche. Une fois la correspondance identifiée, un calcul mathématique simple est effectué pour déterminer les coordonnées de l'objet dans l'espace objet. Dans le cas d'appariement par caractéristiques, nous parlons du *feature-based matching* (FBM), alors que dans l'autre cas, il s'agit d'*area-based matching* (ABM) [REMONDINO et al. (2013)].

Les algorithmes qui suivent la classification d'ABM sont très puissants, avec une possibilité d'atteindre une précision d'appariement jusqu'à 1/50 pixels. Cependant, ABM nécessite des objets ayant des textures ainsi que des valeurs approchées. Par contre, FBM est moins dépendant des textures, mais le nuage résultant n'est souvent pas assez dense. Exemples d'algorithmes de FBM sont SIFT, SURF, détecteurs de Harris, etc.

SZELISKI (2010) a noté que FBM permet justement de générer un nuage dit clairsemé, ce qui sert souvent comme valeur approchée pour la densification par ABM. Au niveau d'ABM, selon l'espace où l'appariement est fait, il existe deux sous-catégories. La première utilise les lignes épipolaires et donc l'espace image pour effectuer l'appariement. SZELISKI (2010) a divisé cette approche en méthode locale et méthode globale. Dans la méthode locale (basée sur une fenêtre de recherche) la disparité ou parallaxe pour chaque pixel est calculée. L'utilisation d'une fenêtre implique également un lissage, ce qui nous donne souvent des bords d'objet trop lissés [HIRSCHMÜLLER (2011)]. La méthode globale calcule une minimisation d'énergie sur la globalité de l'image avec un lissage explicite. Par contre, la méthode *Semi-Global Matching* (SGM) proposée par HIRSCHMÜLLER (2005) calcule une minimisation d'énergie sur toute la longueur de la ligne

épipolaire ainsi que quelques autres directions autour du pixel.

L'autre sous-catégorie de l'ABM fait l'appariement en se basant sur l'espace objet. Dans cette approche, un nuage clairsemé est indispensable pour fournir des valeurs approchées. Comme évoqué dans le paragraphe précédent, un tel nuage peut être généré en utilisant la méthode FBM. Lorsqu'un nuage clairsemé est disponible, l'algorithme classe les images selon ses positions relativement à l'objet. Puis la densification se fait sur une parcelle de l'objet vue par un groupe particulier d'images [FURUKAWA et PONCE (2009)]. Un schéma résumant ces classifications est affiché en FIGURE 2.7.

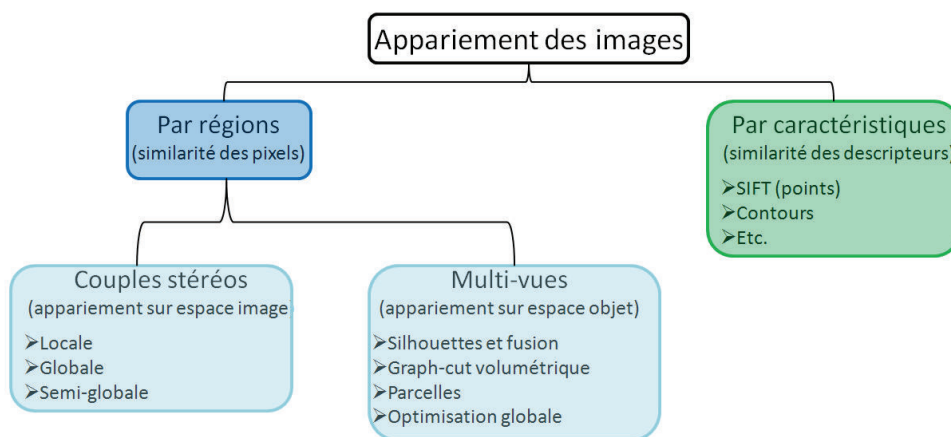


FIGURE 2.7 – Classification des méthodes d'appariement d'images, résumée à partir de SZELISKI (2010) et REMONDINO *et al.* (2013, 2014).

### 2.3.2 Protocoles d'acquisition existants

Dans la littérature, il existe déjà quelques protocoles qui abordent la calibration ainsi que l'acquisition des images pour la documentation du patrimoine. Ces protocoles sont normalement ciblés pour des prises de vues terrestres. Un des objectifs de cette étude est ainsi d'adapter ce savoir-faire pour des projets avec drones. Trois protocoles existants seront abordés dans ce paragraphe (cf. aussi FIGURE 2.8).

Les 3x3 règles du CIPA existent déjà depuis 1994 avec des mises à jour [GRUSSENMEYER *et al.* (2002)]. La version la plus récente se trouve sur le site du CIPA<sup>4</sup>. Ce protocole ne concerne pas seulement l'acquisition proprement dite, mais aussi des consignes pour la calibration et la procédure à implémenter pour chaque mission de levé.

PIERROT-DESEILLIGNY *et al.* (2011) ont évoqué les protocoles qu'ils ont rédigés pour la documentation du patrimoine par des images terrestres, appelés TAPENADE<sup>5</sup> (« *Tools and Acquisition Protocols for Enhancing Artifacts Documentation* »). Ces protocoles sont plutôt bien rédigés avec différents cas d'objets à numériser, par exemple des éléments architecturaux [IGN (2011a)] ou des façades [IGN (2011b)]. Ils suivent une configuration des prises de vue conseillée pour le logiciel Micmac afin de permettre de lancer une chaîne de traitements de bonne qualité sur cette suite logicielle.

L'ifp de l'Université de Stuttgart a également créé un protocole d'acquisition adapté pour son logiciel de densification SURE [WENZEL *et al.* (2013a)]. Le protocole appelé « *One panorama each step* » est ciblé pour un bon appariement dense en utilisant des images ayant des grandes surfaces de recouvrement. Ces protocoles sont déjà testés pour des données issues de drone.

Quelques similarités peuvent être tirées de ces 3 protocoles vus dans la littérature :

4. <http://cipa.icomos.org/> consulté le 15 avril 2016

5. <http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPENADE/Protocols.html> consulté le 18 avril 2016

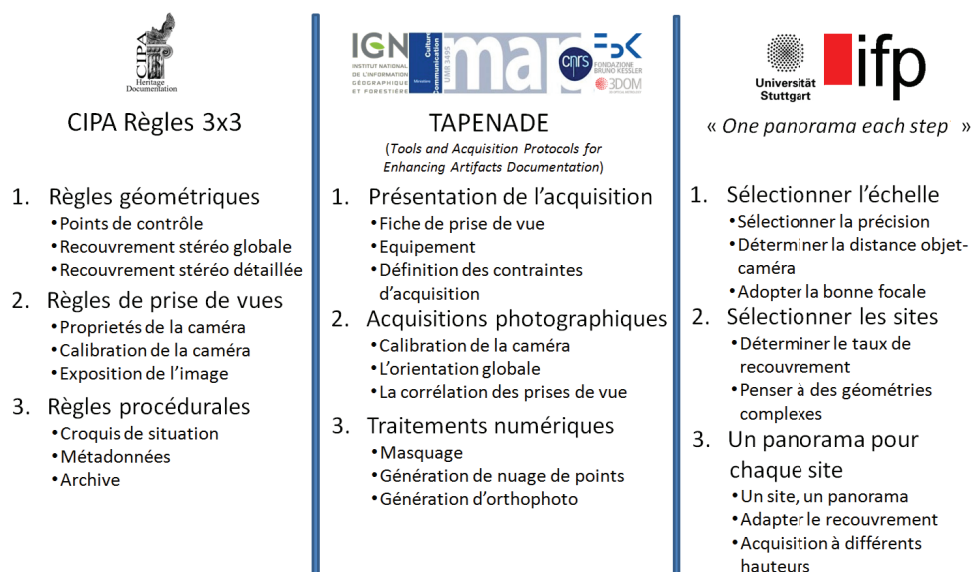


FIGURE 2.8 – Les protocoles existants pour la prise des images pour la documentation du patrimoine par la photogrammétrie.

1. Une bonne calibration est toujours conseillée avec une géométrie contrôlée (convergente). Celle-ci peut éventuellement augmenter la qualité géométrique du résultat.
2. La documentation de démarche de la mission ainsi qu'une description de l'objet sont des opérations souvent oubliées mais qui sont cependant importantes.
3. Deux types de prises de vues sont considérés. Le premier concerne une acquisition globale de l'objet avec des images ayant une géométrie d'intersection favorable. Le deuxième est une série des images ayant des grandes surfaces de recouvrement qui servent à faciliter le processus de l'appariement dense.

## 2.4 Calibration de l'appareil photo

La calibration est une étape très importante pour chaque projet de photogrammétrie. Elle est indispensable dans des projets qui nécessitent une précision élevée. Une caméra calibrée est celle où les paramètres d'orientation interne comme la distance principale (ou encore la longueur de focale), les coordonnées du point principal et les distorsions sont connues. Notons que dans le domaine de la vision par ordinateur, normalement seule la distance principale est récupérée. Cela nous montre la différence de perspective entre les communautés de la photogrammétrie et de la vision par ordinateur. La première recherche la précision du résultat tandis que l'autre recherche l'automatisation [REMONDINO et FRASER (2006)].

### 2.4.1 Méthodes de calibration

La calibration au laboratoire était faite traditionnellement pour les caméras aériennes en utilisant un multi-collimateur ou un goniomètre [FRYER (1996); CLARKE et FRYER (1998)]. Cependant, cette approche est souvent incompatible avec les petits capteurs que nous trouvons aujourd'hui sur le marché à cause du coût et du besoin de la faire dans un laboratoire dédié.

BROWN (1971) a élaboré une autre méthode qui est devenue très répandue dans le domaine de la calibration d'images. Il s'agit de la méthode de calibration analytique multi-image simultanée (*Simultaneous Multi-Frame Analytical Calibration*/SMAC). Cette approche utilise la compensation de faisceaux pour déterminer les paramètres de calibration en utilisant plusieurs images convergentes. Les seuls inconvénients sont les hypothèses selon lesquelles la déformation et la

planéité du capteur ainsi que le focus reste fixe. Cela nous donne un autre sens du terme « calibration au laboratoire » qui est celui d'une calibration faite en utilisant la méthode SMAC sous des conditions contrôlées (réseau fortement convergent, utilisation des cibles automatiques, etc.). Cette méthode est également appelée la calibration autonome (*stand-alone calibration*) qui est souvent faite de manière automatique [REMONDINO et FRASER (2006)].

De plus, CLARKE et FRYER (1998) ont parlé également d'une méthode qui s'appelle la calibration sur le terrain (*field calibration*). Contrairement à la calibration au laboratoire, cette méthode effectue la prise des images sur un réseau régulier des points topographiques connus en coordonnées directement sur le terrain. Cette approche a pour but de simuler le plus possible les conditions du projet. PÉREZ et al. (2011) ont effectué ce type de calibration et l'ont comparé avec la calibration standard au laboratoire. Ils ont conclu que la calibration sur le terrain est meilleur parce qu'elle simule la condition de prises de vue. Cependant, la difficulté de la mise-en-place la rend inefficace.

Quelques autres méthodes de calibration existent selon FRYER (1996) :

1. *Calibration à pied d'œuvre (on-the-job calibration)* : Il s'agit d'une calibration faite directement sur le terrain (*in situ*) en utilisant un réseau de cibles connues en coordonnées réparties sur l'objet à lever. L'avantage de cette méthode est d'avoir un jeu de données d'images de calibration dans les conditions les plus similaires à celles du projet proprement dit. En effet, pour des caméras dites non-métriques, il est très important de faire la calibration avec le même réglage que le projet (focus, ISO, etc.). Cette méthode permet donc de faire la calibration en même temps que le levé photogrammétrique. Cependant, l'inconvénient est justement lié aux cibles qui sont nécessaires pour l'application de cette méthode. En effet, pour que la calibration donne un résultat satisfaisant, il faudra que les cibles remplissent le plus possible l'image. Cela devient alors difficile à implémenter avec des objets de grande taille.
2. *Auto-calibration (self-calibration)* : Il s'agit d'une méthode de calibration qui utilise les conditions de colinéarité modifiées, que nous appelons désormais la colinéarité étendue. Cette condition de colinéarité prend en compte les paramètres de l'orientation interne, nous parlons alors des paramètres supplémentaires (*additional parameters/AP*). CLARKE et FRYER (1998) et FRYER (1996) ont remarqué que cette approche est souvent confondue avec la calibration à pied d'œuvre. La principale différence est liée à l'utilisation des cibles. La calibration à pied d'œuvre s'appuie sur un réseau de cibles connues en coordonnées tandis que l'auto-calibration ne requiert pas des cibles.
3. *Calibration analytique par le fil à plomb* : C'est une méthode développée particulièrement pour l'identification des distorsions radiales ainsi que tangentielles. Cependant, la distance principale et le décalage du point principal ne peuvent pas être déterminés en utilisant cette approche. Ainsi, cette méthode est plutôt utilisée pour contrôler le résultat d'auto-calibration ou pour obtenir des valeurs approchées pour la compensation par faisceaux.

L'auto-calibration est la méthode la plus répandue, surtout grâce à sa flexibilité d'utilisation avec des caméras non-métriques. Néanmoins, il existe plusieurs scénarios où la géométrie du réseau des caméras est simplement défavorable pour faire une bonne calibration. D'où l'importance d'une calibration au laboratoire pour des projets nécessitant une grande précision [REMONDINO et FRASER (2006)].

## 2.4.2 Notions mathématiques

Le modèle mathématique utilisé dans le processus d'auto-calibration par la compensation des faisceaux est le modèle de colinéarité étendu déjà exprimé dans l'Équation 2.1. Dans ce cas-là, le modèle de BROWN (1971) est le plus souvent utilisé. Les paramètres de  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont des corrections pour les distorsions radiales et tangentielles. La distorsion radiale déplace les pixels de l'image en fonction de leur distance radiale à partir du point principal [MOE et al. (2010)]. La

distorsion tangentielle est quant à elle présente à cause du déplacement du point principal par rapport au centre de projection du lentille. Les valeurs de  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont définies comme suit [MOE et al. (2010); BARAZZETTI et al. (2011); TANG (2013)] :

$$\begin{aligned}\Delta x &= -\delta x_r - \delta x_t \\ \Delta y &= -\delta y_r - \delta y_t\end{aligned}\tag{2.8}$$

Où  $\delta x_r$  et  $\delta y_r$  expriment l'effet de la distorsion radiale [DRAP et LEFÈVRE (2016)] :

$$\begin{aligned}\delta x_r &= \bar{x}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6) \\ \delta y_r &= \bar{y}(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)\end{aligned}\tag{2.9}$$

Avec  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$  les coordonnées du point d'intérêt corrigées par  $x_0$  et  $y_0$ , tandis que  $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ .  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  sont les coefficients de distorsion radiale. Ensuite, la distorsion tangentielle ( $\delta x_t$  et  $\delta y_t$ ) est modélisée par les équations suivantes [DRAP et LEFÈVRE (2016)] :

$$\begin{aligned}\delta x_t &= P_1(2\bar{x}^2 + r^2) + 2P_2\bar{x}\bar{y} \\ \delta y_t &= 2P_1\bar{x}\bar{y} + P_2(2\bar{y}^2 + r^2)\end{aligned}\tag{2.10}$$

$P_1$  et  $P_2$  sont les coefficients de distorsions tangentielles. Dans le cas de  $\delta x_t$  et  $\delta y_t$ , les termes d'ordre supérieur à 2 ont été négligés parce qu'ils sont très faibles [TANG (2013)].

Le modèle mathématique final est ainsi le résultat de l'addition des Équation (2.9), Équation (2.10) et Équation (2.1) [MOE et al. (2010)] :

$$\begin{aligned}x &= x_0 - f \cdot \frac{r_{11}(X - X_s) + r_{12}(Y - Y_s) + r_{13}(Z - Z_s)}{r_{31}(X - X_s) + r_{32}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} + \delta x_r + \delta x_t \\ y &= y_0 - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_s) + r_{22}(Y - Y_s) + r_{23}(Z - Z_s)}{r_{31}(X - X_s) + r_{32}(Y - Y_s) + r_{33}(Z - Z_s)} + \delta y_r + \delta y_t\end{aligned}\tag{2.11}$$

Cependant, les différents logiciels utilisent souvent différentes notations pour ces paramètres de calibration. De plus, le modèle mathématique peut être aussi différent entre les logiciels. Afin de pouvoir harmoniser et ainsi rendre la calibration interchangeable et comparable, le TABLEAU 2.2 présente la comparaison des modèles mathématiques de calibration implémentés dans chaque logiciel utilisé. Le TABLEAU 2.3 présente de plus les expressions de chaque paramètre de calibration dans différents logiciels [IGN (2015); AGISOFTLLC (2016); EOSSYSTEMS (2016); PIX4D (2016)].

### 2.4.3 Démarche de calibration

Afin d'avoir un projet de calibration de bonne précision, quelques règles sont à respecter [REMONDINO et FRASER (2006); REMONDINO (2014); LUHMANN et al. (2015)] :

1. Utilisation d'un réseau multi-stations avec une forte convergence. L'exactitude du projet augmente en fonction de l'angle de convergence entre les images. Cela implique l'augmentation du ratio base/éloignement ( $B/Z$ ).
2. Variation de l'angle de roulis orthogonal de la prise de vue (portrait et paysage). Cette astuce permet de couper le couplage projectif des paramètres supplémentaires et ainsi éviter la forte corrélation entre certains paramètres, par exemple entre  $P_1$  et  $P_2$  avec  $x_0$  et  $y_0$  [BROWN (1971); FRASER (2013)].

TABLEAU 2.2 – Comparaison des modèles mathématiques de distorsion entre les logiciels de calibration.

| Logiciel     | Modèle mathématique de distorsion                                                                                                                                                 |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pix4D        | $x_{hd} = (1 + R_1r^2 + R_2r^4 + R_3r^6)x_h + 2T_1x_hy_h + T_2(r^2 + 2(x_h)^2)$ $y_{hd} = (1 + R_1r^2 + R_2r^4 + R_3r^6)y_h + 2T_2x_hy_h + T_1(r^2 + 2(y_h)^2)$                   |
| Photoscan    | $x' = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + P_2(r^2 + 2x^2) + 2P_1xy$ $y' = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6 + K_4r^8) + P_1(r^2 + 2y^2) + 2P_2xy$                             |
| Photomodeler | $xc = x(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy$ $yc = y(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy$                                               |
| Apero (IGN)  | $C_x = (1 + R_3\rho^2 + R_5\rho^4 + R_7\rho^6)d_u + P_1(2d_u^2 + \rho^2) + P_2(2d_ud_v)$ $C_y = (1 + R_3\rho^2 + R_5\rho^4 + R_7\rho^6)d_v + P_1(2d_ud_v) + P_2(2d_v^2 + \rho^2)$ |

TABLEAU 2.3 – Définition des paramètres de distorsion dans différents logiciels.

| Logiciel     | $\Delta x$ | $\Delta y$ | $\bar{x}$ | $\bar{y}$ | $r$    | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $P_1$ | $P_2$ |
|--------------|------------|------------|-----------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pix4D        | $x_{hd}$   | $y_{hd}$   | $x_h$     | $y_h$     | $r$    | $R_1$ | $R_2$ | $R_3$ | $T_2$ | $T_1$ |
| Photoscan    | $x'$       | $y'$       | $x$       | $y$       | $r$    | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $P_2$ | $P_1$ |
| Photomodeler | $xc$       | $yc$       | $x$       | $y$       | $r$    | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $P_1$ | $P_2$ |
| Apero (IGN)  | $C_x$      | $C_y$      | $d_u$     | $d_v$     | $\rho$ | $R_3$ | $R_5$ | $R_6$ | $P_1$ | $P_2$ |

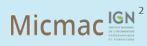
- Un niveau de zoom/focus ainsi qu'un réglage d'ouverture constants sont préconisés. Une préférence est donc donnée aux appareils ayant des lentilles uniques sous mode manuel sans aucune automatisation.
- Des images nettes ayant des points de calage bien définis permettant de les mesurer précisément. Souvent, ces points sont sous la forme de cibles automatiques (codes-barres) ou de points naturels ayant des coordonnées connues avec une grande précision.
- Des variations d'échelle sur l'image pour permettre un calcul fiable des paramètres d'orientation interne, notamment la distance principale et le décalage du point principal. Cette condition peut être atteinte en utilisant un objet de calibration ayant une différence de profondeur comme des objets 3D. REMONDINO et FRASER (2006) précisent qu'une calibration sur des cibles planes est faisable en gardant une forte convergence, des changements orthogonaux d'angle de roulis et différentes distances caméra-objet sont préconisées. L'idée est de regrouper différentes échelles d'image sur l'ensemble du capteur.
- L'exactitude du projet augmente avec le nombre de points mesurés dans une image, mais moins significative au delà d'une dizaine de points. La répartition des cibles sur l'ensemble de l'image est importante et permet d'améliorer la détermination des distorsions.
- L'exactitude augmente aussi avec le nombre de faisceaux pour un point quelconque. Cependant, l'amélioration est proportionnelle à la racine du nombre d'images dans lesquelles le point est trouvé. Ainsi, le gain en précision commence à se stabiliser à partir d'environ 8 faisceaux par point.
- L'auto-calibration n'est fiable que lorsqu'une géométrie de réseau favorable est présente, c'est-à-dire une configuration des caméras fortement convergente, avec des variations en angle de roulis orthogonales et un grand nombre de points bien répartis.

## 2.5 Solutions logicielles

Dans le cadre de ce projet, les logiciels principalement utilisés sont Pix4D et Photoscan (Agisoft LLC). Quelques autres logiciels ont été utilisés afin de comparer les résultats. Photomodeler (EosSystems Inc.), disponible au laboratoire, est un autre logiciel utilisé dans ce projet. Les logiciels libres Micmac [PIERROT-DESEILLIGNY et PAPARODITIS (2006); PIERROT-DESEILLIGNY et al. (2011)] de l'IGN et VisualSFM [WU (2016)] de l'Université de Washington ont également été testés. Dans le cas de VisualSFM qui ne donne que les orientations des images, la densification de nuage de points a été testée en utilisant l'algorithme PMVS (*Patch-based Multi View Stereo*) de l'Université de Washington et de l'École Normale Supérieure de Paris [FURUKAWA et PONCE (2009)]. Le logiciel SURE (nFrames, Stuttgart) a également été testé pour le calcul des nuages de points.

Une comparaison rapide des modules de chaque logiciel testé est affichée dans le TABLEAU 2.4. La comparaison a été faite suivant la chaîne de traitement classique normalement vue en photogrammétrie.

TABLEAU 2.4 – Comparaison des modules pour chaque logiciel testé par rapport à la chaîne de traitements photogrammétriques.

| Logiciel                                                                                                                   |             | Recherche des pts. homologues                    | Orientation relative | Orientation absolue  | Densification de nuage                  | Maillage          | Génération d'orthophoto  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------------|-------------------|--------------------------|
|                                           |             | Initial Processing                               |                      | rayCloud Editor      | Point Cloud & Mesh                      |                   | DSM, Orthomosaic & Index |
| <br>PhotoScan                             |             | Align Photos                                     |                      | Markers              | Build Dense Cloud                       | Build Mesh        | Build Texture            |
|  PHOTOMODELER                           |             | SmartPoints                                      | Project Process      | External Geometry    | Dense Surface Modeling                  |                   | Export Orthophoto        |
|  SURE <sup>1</sup>                      |             | Pix4D/Photoscan/VisualSFM/Bundler/Inpho/iWitness |                      |                      | Dense Cloud Generation                  |                   | DSM Generation           |
|  Micmac <small>IGN</small> <sup>2</sup> | Standard    | Pastis                                           | Apero                | GCPBascule + Campari | Micmac                                  | TiPunch + Tequila | Porto                    |
|                                                                                                                            | Simplifié   | Tapioca                                          | Tapas                |                      | Malt                                    |                   | Tawny                    |
|                                                                                                                            | Automatique |                                                  |                      |                      | C3DC                                    |                   |                          |
|  <sup>3</sup>                           |             | Compute Missing Match                            | Reconstruct 3D       | GCP-based Transform  | PMVS*/SURE/<br>CMPMVS/MVE/<br>MeshRecon | -                 | -                        |

 Commercial

 Code source libre

Dépendances externes en italique

Version gratuite de SURE est disponible pour des fins de recherche

<sup>1</sup> Wenzel et al. (2013)

<sup>2</sup> Pierrot-Deseilligny & Paparoditis (2006)

<sup>3</sup> Wu (2016)

<sup>4</sup> Furukawa et Ponce (2009)

### 2.5.1 Logiciels commerciaux

#### Pix4D

Pix4D<sup>6</sup> a été conçu par une société dérivée de l'École polytechnique fédérale de Lausanne spécialisée dans le traitement des images. La suite logicielle comporte quelques modules avec différentes spécialisations, en particulier sur l'utilisation dans l'agriculture de précision.

Étant un logiciel commercial, l'algorithme derrière Pix4D n'est pas disponible. Néanmoins, un rapport relativement complet est disponible à la fin de chaque étape de traitement ce qui nous permet de contrôler le résultat. Au niveau du résultat visuel, Pix4D ressemble beaucoup à Photoscan.

Le traitement sous Pix4D commence par le chargement des images. À partir de celles-ci le logiciel va déterminer les informations préliminaires comprises dans leur fichier EXIF. Avec ces informations, un modèle de calibration prédéfini est identifié dans la base de données de la caméra.

6. <https://www.pix4d.com/> consulté le 22 mars 2016

Après la détermination des paramètres du projet, l'utilisateur est dirigé vers le « *MapView* ». Il peut ainsi déterminer la zone de travail du projet. Il s'agit alors d'une sorte de masque pour limiter la zone de traitement permettant de diminuer le temps de calcul. Cette étape est cependant optionnelle. Le premier calcul se fait sur la fonction « *Initial Processing* », dans laquelle des points homologues sont recherchés et appariés [KÜNG et al. (2011)].

En suite, l'onglet « *rayCloud* » permet d'ajouter des points d'appui. Malheureusement **Pix4D** ne supporte pas l'identification automatique des cibles ; cependant, l'ajout des points d'appui est fait de manière semi-automatique. Après une identification d'un point sur au moins deux images, le logiciel projette ses coordonnées calculées sur les images.

La densification du nuage de points se fait par la fonction « *Point Cloud & Mesh* », où un maillage est tout de suite appliqué sur le nuage densifié. Enfin, la fonction « *DSM, Orthophoto & Index* » crée l'orthophoto ainsi que le MNT (Modèle numérique de terrain).

### *Photoscan*

**Agisoft Photoscan**<sup>7</sup> est un logiciel autonome qui effectue un traitement photogrammétrique des images numériques afin de générer des données 3D. Basée à Saint-Petersbourg, la société **Agisoft** a été fondée en 2006 en tant qu'entreprise de recherche spécialisée en vision par ordinateur. Le logiciel **Photoscan** est son produit principal, il peut être exploité pour des images terrestres et aériennes. Le fonctionnement de **Photoscan** est très simple, ce qui peut être un atout mais aussi un inconvénient lorsque nous parlons d'utilisations plus avancées qui nécessitent plus de paramètres. Nous parlons ainsi d'un système « boîte-noire ». Il est composé notamment de 4 étapes principales :

1. Étape d'orientation des images : c'est l'étape où les positions et les orientations des images sont déterminées. Il s'agit de la partie d'orientation externe/relative rencontrée dans la photogrammétrie. Dans ce cas-là, nous pouvons insérer directement les coordonnées de chaque cliché mesurées par GPS, si elles existent. Pour le faire, **Photoscan** cherche des points homologues pour chaque couple stéréoscopique et il calcule l'orientation en utilisant la méthode d'ajustement des faisceaux. Le résultat est ainsi un nuage de points dit clairsemé.
2. Étape d'appariement dense : c'est un processus qui va créer le nuage de points dense à partir des données d'orientation fournies par l'étape précédente. REMONDINO et al. (2014) ont signalé que l'algorithme implementé par **Photoscan** est similaire à celui de stéréo SGM. Nous observons également que **Photoscan** travaille en choisissant des couples stéréos parmi l'ensemble des images. Des cartes de profondeur sont ensuite calculées à partir de ces paires et converties en nuages de points. A la fin du processus, une étape d'assemblage fusionne les nuages venant des couples stéréos pour créer un nuage de points unique. Au vu du nombre de points réduit du produit final, un filtrage avec contrainte épipolaire est très probablement également effectué dans cette étape.
3. Étape de maillage : il s'agit d'une étape où le logiciel va générer le modèle maillé à partir des nuages de points établis dans l'étape d'appariement (soit dense, soit clairsemé). **Photoscan** nous donne le choix de l'algorithme dans ce processus. Nous pouvons faire le maillage en utilisant l'algorithme dédié pour des images nadirales (comme les images aériennes par exemple) ou un autre algorithme pour des images convergentes (comme c'est souvent le cas pour l'application terrestre). À partir de nos observations, **Photoscan** utilise plus probablement une implémentation de la méthode de reconstruction de surface de Poisson à plusieurs niveaux d'octree.
4. Étape de texturage : cette étape génère la texture pour le modèle maillé. Nous pouvons ainsi créer l'orthophoto en utilisant cette fonctionnalité de **Photoscan** après avoir généré le nuage de points et son maillage.

---

7. <http://www.agisoft.com/> consulté le 22 mars 2016



### Photomodeler

**Photomodeler**<sup>8</sup> est un logiciel canadien qui génère des modèles et mesures 3D à partir des images prises par des appareils photo. C'est un logiciel basé sur **Windows** qui est relativement connu et beaucoup utilisé dans des applications de l'archéologie et l'architecture [GRUSSENMEYER et al. (2002)]. Étant un logiciel de photogrammétrie à la base, **Photomodeler** a un module dédié pour la calibration des caméras. Cette calibration est effectuée à l'aide d'une mire des cibles automatiques, mais une possibilité pour faire la calibration à pied d'œuvre est aussi disponible.

**Photomodeler** permet de faire une orientation manuelle (interactive) en identifiant des points homologues. Cela permet à l'utilisateur de contrôler ainsi qu'affiner la qualité de l'orientation, même si le processus peut devenir long [REMONDINO et DEL PIZZO (2012)]. Depuis la version 2014, **Photomodeler** a également implémenté des principes de la SfM dans son logiciel. Le mode « *Smart Match* » est en fait une recherche automatique et appariement des points de caractéristiques sur les images. Une compensation en bloc est ensuite effectuée sur l'ensemble des images pour déterminer les paramètres externes de chaque photo. Cette compensation permet alors un calcul d'auto-calibration.

Une fois que les positions et orientations des images sont calculées, des points d'appui peuvent être intégrés en utilisant la fenêtre « *External Geometry* ». Un calcul de compensation en utilisant ces points d'appui en tant que contraintes peut éventuellement être effectué après cette étape.

Au niveau de la modélisation 3D, **Photomodeler** offre une possibilité de dessiner interactivement, ce qui est utile pour numériser des vecteurs d'intérêt [REMONDINO et al. (2011); REMONDINO (2011)]. Comme les autres suites de logiciels, la création d'un nuage de points dense est aussi possible.

Il existe deux approches de densification dans **Photomodeler**. La première est appelée le DSM (« *Dense Surface Matching* ») qui va générer un nuage dense à partir des couples stéréo. En principe, cette méthode utilise plus probablement une approche qui ressemble au SGM [HIRSCHMÜLLER (2005)], avec une compensation à l'aide des contraintes épipolaires à la fin du traitement des couples. L'inconvénient de cette approche est le long temps de calcul ainsi que le choix des couples donnant les meilleurs nuages. La deuxième approche est appelée le MVS (« *Multi View Stereo* »). Très peu d'explications sur l'algorithme qui se trouve derrière cette approche sont disponibles, mais d'après nos observations c'est plus probablement un algorithme d'appariement basé sur l'objet similaire au PMVS de FURUKAWA et PONCE (2009).

### SURE

**SURE**<sup>9</sup> est un logiciel développé par Konrad WENZEL et Matthias ROTHERMEL. Il a pour but de réaliser un appariement dense de haute qualité en utilisant plusieurs images de grandes tailles de couverture ainsi que leurs paramètres d'orientation [WENZEL et al. (2013a)]. **SURE** est basé sur un algorithme de reconstruction de surface 3D à partir d'images. Cet algorithme concerne l'appariement dense des images ayant des zones de recouvrement importantes. En faisant la mise en correspondance des pixels sur plusieurs images, la projection de ces points d'intérêt peut être intersectée dans l'espace. Cela nous donne la position 3D de chaque point dit homologue. Idéalement, la correspondance est faite pour chaque pixel, ce qui nous fournit une information de surface 3D de haute densité [WENZEL et al. (2013b)].

Pour faire cela, **SURE** emploie la méthode de *Semi-Global Matching* (SGM) comme proposé par HIRSCHMÜLLER (2005) et encore élaboré dans HIRSCHMÜLLER (2011). SGM utilise une approche semi-globale pour faire l'appariement. Elle tient compte du voisinage, comme les approches locales, mais elle a une autre contrainte sous forme de la limite de disparité fixée pour l'ensemble d'images. De plus, une structure de tube est utilisée pour stocker le coût d'appariement [REMONDINO et al. (2014)]. Cela permet une diminution importante du temps de calcul.

8. <http://www.photomodeler.com/> consulté le 22 mars 2016

9. <http://nframes.com/> consulté le 22 mars 2016

Cette approche de SGM modifiée est appelée la méthode de *tSGM* [WENZEL et al. (2013b)].

Le logiciel **SURE** est dédié à l'appariement dense des images déjà orientées. La donnée principale d'entrée est le fichier où figurent les paramètres d'orientation externe, ainsi que les images proprement dites. Ce fichier peut être lu directement comme dans le cas du projet de **VisualSFM**, ou importé comme dans le cas des fichiers **Bundler** ou **Inpho** (qu'il est d'ailleurs possible d'exporter à partir de **Photoscan**). Ensuite, le chemin vers les images est demandé, pour que le logiciel puisse automatiquement identifier chaque photo avec ses orientations.

L'avantage de **SURE** par rapport à d'autres logiciels commerciaux comme **Photoscan** est son paramétrage. Nous pouvons donc déterminer la valeur de quelques paramètres afin d'affiner le résultat d'appariement dense. Le logiciel travaille en quelques étapes. Nous distinguons l'étape d'analyse des zones de recouvrement entre chaque image, l'étape d'appariement dense proprement dite, la création d'un modèle numérique d'élévation (MNE) du format raster, le filtrage du nuage de points et le maillage. Un calcul en bloc est possible, mais le choix de faire un calcul indépendant est également proposé.

## 2.5.2 Logiciels libres

### *Apero et Micmac*

**Apero** et **Micmac**<sup>10</sup> sont des logiciels libres développés par le laboratoire MATIS de l'IGN. Ces deux logiciels peuvent être liés également au module de recherche des points homologues, **Pastis** (qui est d'ailleurs une interface de **SIFT**) et au module de génération d'orthophoto, **Porto**.

Le module **Apero** a pour but de reconstruire la position et l'orientation des stations de prises de vue [PIERROT-DESEILLIGNY et CLERY (2012)]. Cette reconstruction est faite à l'aide des points homologues récupérés par **Pastis**. Les points homologues sont appariés et les paramètres d'orientation externe calculés en faisant une compensation des faisceaux en bloc. Le résultat d'**Apero** est constitué des orientations de chaque prise de vue ainsi que du résultat de calcul d'auto-calibration.

**Micmac** prend le résultat d'**Apero** pour créer un nuage de points dense. Ce logiciel travaille avec le principe « grossière à fine », c'est-à-dire que les images sont ré-échantillonnées à plusieurs niveaux de zoom (des pyramides). L'appariement est fait d'abord sur les images à faible résolution. Le résultat de cet appariement est ensuite utilisé en tant que valeur approchée pour le prochain appariement utilisant le niveau de résolution plus élevé. Ce processus est répété jusqu'au niveau de résolution souhaité avec une possibilité d'aller jusqu'à la pleine résolution [PIERROT-DESEILLIGNY et al. (2011)].

**Micmac** travaille en deux stratégies, la première est une stratégie dite « image » qui nécessite une image maîtresse et ses images filles pour l'appariement. Pour chaque point 3D candidat, une parcelle est identifiée dans l'image maîtresse. Cette parcelle est alors projetée vers chaque image fille et une similitude globale est calculée. La deuxième stratégie dite « terrain » est ciblée vers la photogrammétrie aérienne. Dans ce cas-là, aucune image maîtresse n'est nécessaire ; par contre un voxel est défini en fonction de la taille du bloc d'images et de la distance caméra-objet. De façon similaire à l'autre approche, les points 3D candidats sont ré-projetés vers toutes les images et une similitude globale est calculée. Enfin pour les deux approches une approche de minimisation d'énergie similaire à SGM est implémentée afin de forcer la régularité des surfaces et d'éviter des pics indésirables [PIERROT-DESEILLIGNY et al. (2011); REMONDINO et al. (2013, 2014)].

Le processus de densification par **Micmac** génère également des parcelles d'orthophotos. Le module **Porto** est ainsi destiné à l'intégration de ces parcelles ainsi qu'à la correction radiométrique afin d'homogénéiser l'orthophoto finale.

Dans **Micmac** il existe plusieurs façons de traiter les données (voir aussi TABLEAU 2.4). Le mode standard règle les modules **Pastis**, **Apero**, **Micmac** et **Porto** en utilisant des fichiers XML.

10. <http://logiciels.ign.fr/?-Micmac,3-> consulté le 22 mars 2016

Il existe également des outils simplifiés pour chaque module, qui travaillent en lignes de commandes :

1. **Tapioca** est une interface de **Pastis**, avec quelques possibilités de régler la résolution d'image ainsi que le mode de recherche de points homologues. Ces paramètres peuvent être affinés en fonction des cas rencontrés.
2. **Tapas** est une interface d'**Apero**. **Tapas** supporte plusieurs modèles mathématiques d'auto-calibration y compris le modèle standard de Brown et le modèle pour les caméras à lentille hypergone.
3. **Malt** est l'interface simplifiée de **Micmac**. Trois stratégies de densification sont disponibles : « image » pour des projets convergents et souvent terrestres, « terrain » surtout pour des projets aériens et « urbaine » pour des projets aériens sur des zones urbaines. Ces stratégies ont été expliquées dans le paragraphe précédent.
4. **Tawny** est une interface très simplifiée de **Porto** qui sert à générer une orthophoto.

De plus, une approche automatique est aussi disponible qui simplifie beaucoup de fonctionnements de **Micmac**. Cette approche automatique est utilisable avec la commande **C3DC**.

### *VisualSFM et PMVS*

Le logiciel libre **VisualSFM** est une implémentation des principes de SfM par Changchang WU, à l'époque post-doctorant informatique à l'Université de Washington. Il s'agit d'une interface graphique pour l'algorithme de correspondance d'images SIFT, suivi par un calcul d'ajustement des faisceaux. Il est bien adapté pour un grand nombre d'images [WU (2016)].

L'orientation des images sur **VisualSFM** est faite en deux étapes. Premièrement, le logiciel va chercher des points homologues en implémentant l'algorithme de SIFT. Ensuite, il va calculer la correspondance de chaque point homologue et calculer les positions et les orientations de chaque station à partir de cette correspondance en faisant un ajustement des faisceaux. **VisualSFM** ne fait que l'orientation des images par la méthode de SfM. Son fonctionnement natif d'appariement dense est en fait un module externe de **PMVS/CMVS**. L'utilisateur doit télécharger ce module séparément.

**PMVS** (*Patch-based multi-view stereo*) utilise une approche différente des autres solutions pour l'appariement dense. Il s'agit de l'approche basée sur l'objet et non sur les pixels (cf. aussi le sous-chapitre 2.3.1 sur la classification des algorithmes d'appariement dense). Il effectue un appariement stéréo multi-vues en commençant par un nuage clairsemé généré par les points de SIFT calculé par **VisualSFM**. La « parcelle » appariée autour d'un point homologue est alors élargie à plusieurs reprises vers les pixels voisins. Les pixels pris en compte dans ce processus sont filtrés par des contraintes de visibilité [FURUKAWA et PONCE (2009)].



## Chapitre 3

# Moyens et méthodes

### 3.1 Moyens

Les capteurs principalement utilisés dans ce projet sont les drones. Deux drones sont employés pour l'acquisition des données aériennes. L'**Albris** est un drone de pointe dédié pour des inspections à courte distance et équipé par plusieurs capteurs qui lui permettent d'automatiser plusieurs processus. Le **Phantom 3**, aussi sorti très récemment, est un drone qui figure parmi les plus répandus grâce à sa facilité d'utilisation et à son coût bas. Cependant, il est ciblé surtout pour les loisirs et non pour l'utilisation géomatique. Afin de compléter les images prises sous des angles difficiles, un appareil photo de type reflex est aussi employé pour récupérer des images terrestres. De plus, un scanner laser a été utilisé pour générer des nuages de points de références sur certaines parties des objets étudiés. Enfin, des fiches signalétiques ont été créées dans le but de bien documenter l'acquisition des données.

#### 3.1.1 Drones utilisés

Le premier drone employé dans cette étude est une plateforme à voilure-tournante multi-hélices construite par la société **Sensefly** (modèle **Exom**, rebaptisé **Albris** en avril 2016). Ce drone est apparu sur le marché pour la première fois en mai 2015 et est dédié aux inspections rapprochées à haute résolution, aux levés topographiques et à la modélisation 3D. L'**Albris** est équipé de plusieurs capteurs dont un appareil photo à 38 mégapixels, un capteur thermique et un capteur vidéo. Quelques capteurs à ultrasons fournissent des mesures approximatives de distances entre le drone et les objets environnants, lui permettant ainsi de se positionner à une distance arbitraire de l'objet. L'appareil photo lui-même est fourni avec une lentille de 8 mm et un capteur de 10 mm x 7,5 mm. Cette configuration lui permet théoriquement d'atteindre une taille de pixel sur l'objet de 1 mm à une distance de 6 m.

Nous avons également utilisé le drone **DJI Phantom 3 Professional**, pourvu d'une voilure-tournante multi-hélice. Le **Phantom 3** est une plateforme légère et relativement peu onéreuse (env. 1000 €), mais n'est pas, a priori, destiné à des tâches d'inspection à courte distance. Contrairement aux versions précédentes, le **Phantom 3** n'est plus équipé d'une lentille hypergone. Ceci pourrait éventuellement augmenter la qualité géométrique de ses images, mais le capteur reste très petit par rapport aux appareils photos terrestres. En effet, il est équipé d'une focale de 4 mm et d'un capteur de 6,5 mm x 5 mm. La FIGURE 3.1 affiche les caractéristiques principales des drones employés.

#### 3.1.2 Instruments terrestres

Bien que le drone nous permet de photographier un objet d'un point de vue surélevé par rapport au sol, des images terrestres sont requises dans certains cas. C'est notamment le cas



| <b>Sensefly Albris</b>   |                    |
|--------------------------|--------------------|
| <i>Plateforme</i>        |                    |
| <i>Poids</i>             | 1.8 kg             |
| <i>Autonomie</i>         | ~22 minutes        |
| <i>Appareil photo</i>    |                    |
| <i>Focale</i>            | 8 mm               |
| <i>Taille du capteur</i> | 10 x 7.5 mm        |
|                          | 7152 x 5368 pixels |
| <i>Angle d'ouverture</i> | 63°                |



| <b>DJI Phantom 3 Professional</b> |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| <i>Plateforme</i>                 |                    |
| <i>Poids</i>                      | 1.3 kg             |
| <i>Autonomie</i>                  | ~23 minutes        |
| <i>Appareil photo</i>             |                    |
| <i>Focale</i>                     | 4 mm               |
| <i>Taille du capteur</i>          | 6.5 x 5 mm         |
|                                   | 4000 x 3000 pixels |
| <i>Angle d'ouverture</i>          | 94°                |

FIGURE 3.1 – Caractéristiques principales des drones utilisés dans ce projet.

lorsqu'un objet est partiellement caché par des végétations. Dans ce projet, la zone située devant la façade du Palais Rohan à numériser est dégagée. Cependant, dans le cas de l'église, il existe des arbres autour du bâtiment. Un levé d'images terrestres a été réalisé pour compléter ces parties cachées. Dans ce but, un appareil photo de type reflex a été utilisé pour prendre des images terrestres de l'objet à numériser. Il s'agit d'un Nikon D3200 avec des images à 24 mégapixels. La longueur de focale utilisée dans ce cas-là est 24 mm, pour avoir un compromis entre l'angle d'ouverture et la taille de pixel-objet théorique à atteindre. Notons que la taille de pixel-objet est adaptée de façon à être proche de celle des images acquises par drone. Les images terrestres peuvent ensuite être intégrées dans le projet de photogrammétrie en gardant leurs propres paramètres de calibration.

Un levé lasergrammétrique a été également effectué sur les deux objets d'étude. Un scanner laser à différence de phase de type FARO Focus 3D X330 a été utilisé dans ce but. Ce scanner laser peut générer jusqu'à 976000 points par seconde pour une distance de 0,6 à 330 m. Il est couplé au logiciel FARO Scene qui sert à consolider et géoréférencer les nuages de points issus de différentes stations d'acquisition. La consolidation peut être facilitée par l'utilisation des sphères détectées automatiquement dans Scene. Une consolidation manuelle est également possible en identifiant des points communs entre les nuages de points. Les caractéristiques des instruments terrestres sont affichées dans la FIGURE 3.2.

En introduisant des points d'appui connus en coordonnées (au moins 2, mais de préférence 3 ou plus), le géoréférencement sur le nuage assemblé est possible. Ce géoréférencement est basé sur le même principe que celui de la transformation de similitude 3D vu dans le sous-chapitre 2.3.1 sur l'orientation absolue. La transformation est cependant faite sans facteur d'échelle comme paramètre puisque les mesures de scanner laser sont des mesures directes.

### 3.1.3 Outils de documentation

Suivant les consignes des protocoles existants dans la littérature, quelques règles procédurales sont mises en place pour bien documenter chaque projet de levé par drone. Afin d'identifier les attributs de chaque objet levé, une fiche de métadonnées a été préparée. Cette fiche permet de saisir les informations principales de l'objet afin de pouvoir les intégrer éventuellement dans une



FIGURE 3.2 – Caractéristiques principales des instruments terrestres employés.

base de données.

Une autre fiche a été préparée pour bien documenter la démarche du relevé sur le terrain. Cette fiche contient des données techniques telles que les spécifications du drone ainsi que du capteur utilisé, les conditions météorologiques, le matériau de l'objet (important pour l'étape de densification de nuage) et un croquis de situation expliquant en général les positions de prises de vue. Ces fiches sont consultables dans l'ANNEXE B.

## 3.2 Méthodes

Les méthodes concernées dans cette partie sont la méthode de calibration, la technique d'acquisition d'images et la stratégie de traitement des données. La calibration est faite en suivant les consignes de la littérature sur un site dédié qui a une nature quasi-permanente. Le principe des images obliques est introduit dans l'étape d'acquisition des images aériennes. Il s'agit d'une façon de récupérer le plus de détails possible sur l'objet tout en gardant des géométries d'intersections favorables entre les prises de vue. Des images terrestres sont aussi acquises afin de compléter les données aériennes. Au niveau des traitements, une stratégie de sous-division des données par bloc est proposée. Cette stratégie sert à économiser le temps de calcul ainsi que les ressources de traitement surtout pour les projets ayant de grands nombres d'images.

### 3.2.1 Démarche de calibration

Dans cette étude, un site de calibration dédié a été établi (FIGURE 3.3). Afin de respecter les consignes de la littérature à propos de la variation d'échelle, un angle d'une salle a été choisi. Quelques cibles à codes-barres sont collées sur les murs de l'angle afin de permettre aux logiciels de les identifier automatiquement. Quelques particularités de ce site de calibration sont listées ci-dessous :

1. Réseau de stations autour de l'angle, ce qui constitue une façon de forcer la convergence des prises de vues ainsi que de mettre une variation d'échelle sur les images.
2. Trois hauteurs de prises de vues pour mettre en évidence la nature 3D du réseau des stations, comme conseillé par le protocole TAPENADE [PIERROT-DESEILLIGNY et al. (2011)]. Environ 5 à 7 images sont prises pour chaque hauteur.
3. Variation de l'orientation en paysage et en portrait afin de couper le couplage de certains paramètres, comme indiqué dans BROWN (1971) et REMONDINO et FRASER (2006). Cependant, cette opération peut être impossible à effectuer en fonction du type de capteur. Par exemple, avec le capteur de Phantom 3 une image en mode portrait est difficile à prendre à cause de compensateur horizontal intégré dans le système.

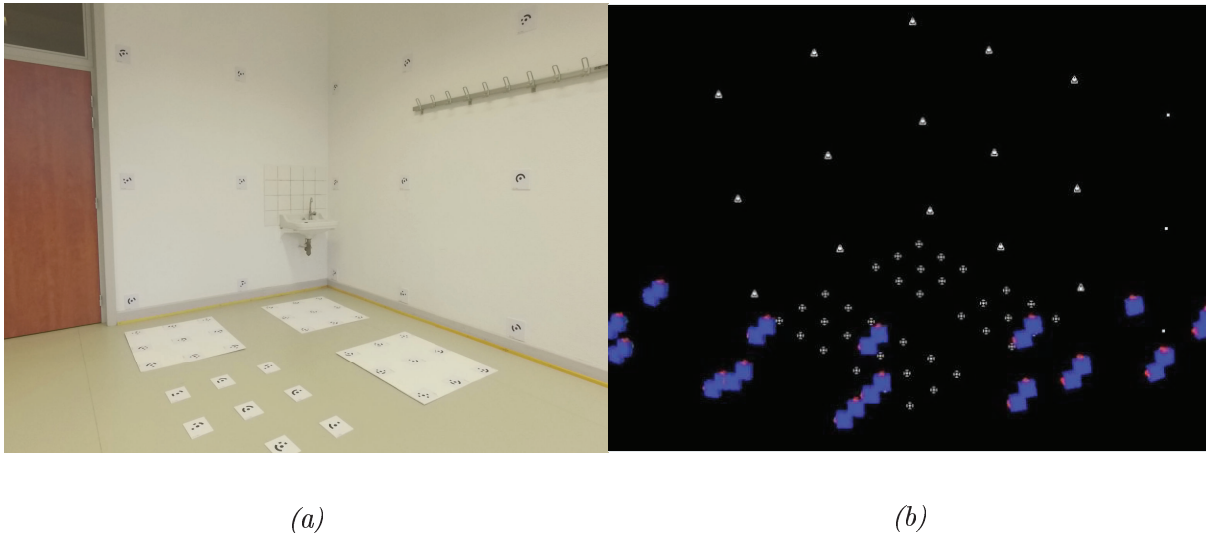


FIGURE 3.3 – Le site de calibration (a) et la configuration des prises de vue (b).

4. Les coordonnées des cibles automatiques sont mesurées par un tachéomètre dans un système de référence local (cf. ANNEXE A). Ces mesures nous permettent d'effectuer une calibration dite sur le terrain en mettant des contraintes sur les coordonnées. Un calcul plus rigoureux est ainsi envisageable.

Les cibles automatiques sont collées de manière quasi-permanente, ce qui permet d'établir un site de calibration plutôt stable. Ceci nous permet de plus de refaire ultérieurement des calibrations avec les mêmes contraintes géométriques si nécessaire.

### 3.2.2 Protocole d'acquisition

Avant de lancer une mission de levé, il est toujours important de bien planifier les étapes et les caractéristiques souhaitées. Dans une mission de photogrammétrie, ces caractéristiques sont souvent liées au type du capteur, à la hauteur de vol et aux spécifications de l'avion. Les relations géométriques nécessaires à l'établissement du plan d'un vol photogrammétrique classique sont présentées dans KRAUS et WALDHÄUSL (1998). Ces formules sont assez basiques et peuvent être intégrées facilement à un fichier **Excel** pour une utilisation aisée. En effet, un tel fichier a été créé en adaptant les formules pour une mission de drone (cf. ANNEXE B).

Notons toutefois que ces formules sont valables pour un vol photogrammétrique classique, c.à.d. nadiral. Le levé par drone étant un cas de photogrammétrie rapprochée, il est souhaitable de récupérer le plus de détails possible. Comme en photogrammétrie terrestre, il est important de disposer d'images à fort recouvrement des détails de l'objet. Ceci est traduit dans les protocoles de GRUSSENMEYER et al. (2002); PIERROT-DESEILLIGNY et al. (2011); WENZEL et al. (2013a) respectivement en tant qu'images stéréo du détail, images de corrélation et panorama. Afin d'adapter cette notion d'images du détail, des vues obliques sont également acquises pendant le vol en plus des images perpendiculaires à l'objet. Dans le cas de la façade d'un bâtiment, les images obliques sont prises en suivant le même chemin de vol, mais en tournant l'appareil photo vers les quatre directions obliques (cf. FIGURE 3.4).

La configuration des bandes de vol est fixée pour tous les vols afin de créer une géométrie convergente avec des images aux très grandes zones de recouvrements sur l'ensemble de l'objet. Néanmoins, l'inconvénient de cette méthode est que le même plan de vol doit être effectué au moins cinq fois (le vol perpendiculaire et les quatre vols obliques). Cela augmente le temps de vol et ainsi pose des problèmes additionnels au niveau de la gestion des batteries et de l'homogénéité de la texture sur les images. Remarquons que'en photogrammétrie aérienne, cinq caméras sont



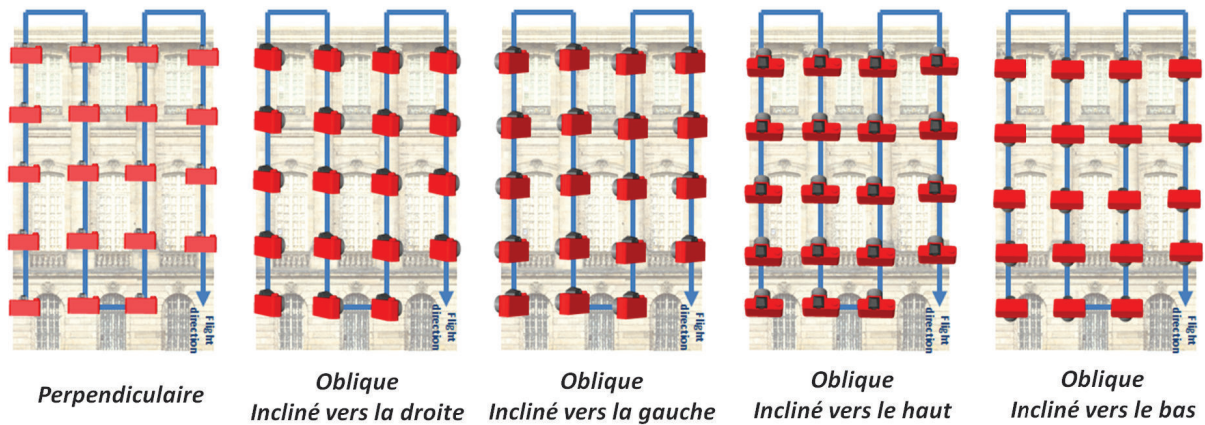


FIGURE 3.4 – Illustration des cinq vols y compris le vol perpendiculaire et les quatre vols obliques. Notons que le plan de vol reste le même pour les cinq vols.

intégrées dans le capteur ce qui permet d'enregistrer simultanément 5 images [MURTIYOSO et al. (2014); RUPNIK et al. (2014)].

### 3.2.3 Stratégie de traitement

La stratégie de traitement photogrammétrique des images est assez simple et suit une chaîne de traitement qui a été décrite dans la section 2.3. En général, la chaîne de traitements commence avec la recherche et l'appariement de points homologues, suivis par un calcul d'orientation externe (avec l'orientation absolue comprise) et une densification de nuage de points basée sur les pixels. En effet, dans la plupart des solutions logicielles, cette chaîne de traitements est bien intégrée dans les fonctions prédéfinies. L'utilisateur peut générer les livrables souhaités simplement en suivant le tutoriel donné par le développeur. Ceci est un peu plus compliqué pour les logiciels libres à cause du manque de support dédié. Souvent, l'utilisateur du logiciel libre est dirigé vers des forums ou des communautés des utilisateurs dans lesquelles des questions, des réponses et des informations sont échangées.

Cependant, dans le cas d'un projet ayant un grand nombre d'images (1000+), une gestion d'images et de ressources est indispensable. Un traitement simultané de toutes les images dans le projet nécessite des ressources (processeur, mémoire, etc.) immenses, ce qui pose forcément un problème. Nous proposons donc une approche de gestion d'images et de traitements pour aborder ces problèmes, rencontrés pendant le projet sur l'église St-Pierre-le-Jeune qui faisait intervenir plus de 2500 images.

Dans cette approche, le principe est de diviser le projet en quelques petits blocs (cf. illustration dans la FIGURE 3.5a). Cette décomposition a l'avantage de faciliter la gestion des ressources de traitement et nous permet également d'avancer dans le calcul du projet sans devoir attendre la fin de l'étape d'acquisition sur le terrain. En effet, les blocs peuvent être traités individuellement. Par contre, cette stratégie ne permet pas une compensation globale. De plus, les points qui sont générés ne sont pas filtrés, d'où la présence de points redondants. L'homogénéisation radiométrique se fait sur la génération de la texture à partir des images et d'un modèle maillé complet.

La chaîne de traitement utilisée dans ce projet est illustrée dans la FIGURE 3.5b. Dans ce cas-là, seuls les traitements sur les logiciels commerciaux *Photoscan* et *Pix4D* utilisés pour traiter les données de l'église sont abordés. Nous remarquons que *Photoscan* est plus adapté pour ce type de décomposition du projet. La notion des « *chunks* » dans *Photoscan* nous permet d'implémenter la chaîne de traitements vue dans la FIGURE 3.5b sans problème. *Pix4D* permet également la sous-division du projet en petit blocs, mais la fusion doit être faite avant la densification, bien que l'étape de densification soit la plus exigeante en ressources. Bien évidemment, un traitement

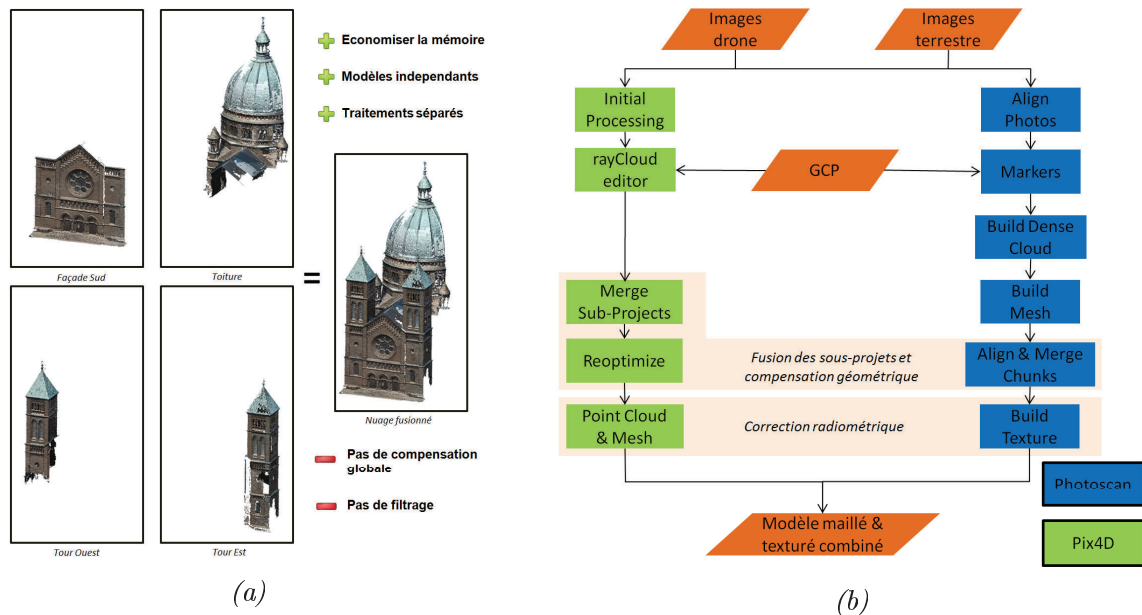


FIGURE 3.5 – Illustration du principe de décomposition du projet (a) et de la chaîne de traitements avec sous-division du projet sur Photoscan et Pix4D (b). Notons que sur Pix4D la fusion se fait avant l'étape de la densification.

séparé peut être envisagé pour chaque bloc avec une fusion éventuelle grâce au système de coordonnées commun des blocs. Cette fusion se fait dans un logiciel externe de traitement de données 3D tels que CloudCompare<sup>1</sup> ou 3DReshaper (Technodigit)<sup>2</sup>. Cependant, dans ce cas-là aucune compensation n'est effectuée sur le résultat final, en particulier au niveau radiométrique.

Dans Photoscan, le traitement commence séparément pour chaque bloc avec l'étape d'orientation d'images (« *Align Photos* ») dont la recherche des points homologues, leur appariement et le calcul en bloc des paramètres externe de chaque prise de vue. À ce moment là, les points d'appui (GCP/*Ground Control Point*) peuvent être introduits sous forme de marqueurs. Les paramètres de calibration, calculés pendant l'étape précédente peuvent être également appliqués aux images en utilisant la fonction « *Reoptimize* ». À cette étape, le modèle est orienté, calibré et transformé en système de coordonnées des points d'appui. Ensuite, la densification et le maillage sont effectués sur les blocs individuels. Le résultat obtenu est constitué de nuages de points denses et de modèles maillés individuels qui sont tous dans le même système de coordonnées. Notons que dans cette étape aucune compensation n'est encore effectuée entre les blocs. Ensuite, il suffit de fusionner ces blocs en utilisant la fonction « *Align & Merge Chunks* ». Enfin, la fonction de génération de texture (« *Build Texture* ») est appliquée sur le modèle fusionné. Cela permet une compensation radiométrique au niveau de la texture du modèle 3D combiné.

Le traitement sur Pix4D commence également avec la recherche de points homologues et le calcul d'orientation externe pour chaque bloc (appelé un sous-projet dans Pix4D). Ceci est suivi par l'ajout des points d'appui sur le menu « *rayCloud* ». Pour que le géoréférencement soit effectué, l'utilisateur doit cliquer sur le bouton « *Optimize* ». À ce moment-là, les sous-projets peuvent être fusionnés. La fonction « *Reoptimize* » sert à calculer une compensation géométrique pour cette fusion, qui est aussi une forme de la transformation de similitude 3D. La densification est faite sur ce projet d'ensemble, afin de générer un nuage de points dense complet. Puisque la création de texture dans Pix4D se trouve dans la même fonction que la densification, la compensation radiométrique se fait également pendant cette étape.

1. <http://www.cloudcompare.org/> consulté le 19 juillet 2016

2. <http://www.3dreshaper.com/> consulté le 19 juillet 2016

### 3.2.4 Calcul de précision théorique attendue

#### *Précision théorique de l'aérotriangulation*

Avant de lancer les calculs d'aérotriangulation, nous pouvons effectuer quelques études théoriques qui nous permettent d'estimer la précision a priori. Tout d'abord, il faudra déterminer la précision de pointé et par conséquent la taille de pixel-objet. Cette valeur est obtenue à partir d'un calcul simple en utilisant la relation entre la longueur de focale et la distance moyenne entre le capteur et l'objet :

$$Pixel_{objet} = \frac{H}{c} * w \quad (3.1)$$

Où

$Pixel_{objet}$  : la taille de pixel-objet

$H$  : la distance caméra-objet

$c$  : la longueur de focale

$w$  : la taille du pixel sur le capteur

La taille de pixel-objet nous donne déjà une idée sur la précision attendue, sachant que dans le cas de photogrammétrie rapprochée cette valeur peut être très variable en fonction de la distance caméra-objet. De plus, un pointé manuel des points d'appui peut atteindre une précision inférieure au pixel. La question de la précision de pointé manuel est souvent abordée de façon empirique. GÜLCH (1995) a remarqué qu'un opérateur expérimenté pouvait atteindre une précision de pointé jusqu'à 0,13 pixel. Cependant, KRAUS et WALDHÄUSL (1998) et plus récemment AFSHARNIA et al. (2015) ont donné une estimation plus modeste de 0,3 pixel, ce qui est d'ailleurs validé par les essais faits sur **Photoscan**. Nous établissons donc la précision de pointé attendue sur l'espace objet comme suite :

$$\sigma_{xyz} = 0,3 * Pixel_{objet} \quad (3.2)$$

Avec  $\sigma_{xyz}$  la valeur de précision planimétrique et altimétrique du pointé. Remarquons que dans KRAUS et WALDHÄUSL (1998),  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_z$  sont différenciés.  $\sigma_z$  est déterminé en fonction de la hauteur de vol, avec l'hypothèse que la caméra est très éloignée de l'objet. Cette hypothèse n'est pas valable dans notre cas de photogrammétrie rapprochée, d'où la fusion de ces valeurs en tant que  $\sigma_{xyz}$ .

Nous pouvons également noter que KRAUS et WALDHÄUSL (1998) ont introduit un coefficient de sécurité pour la précision de pointé dans le cas où des points naturels sont utilisés comme points d'appui. Ce coefficient a été déterminé de manière empirique pour des projets de photogrammétrie à grande échelle ; son utilisation dans notre cas n'est donc pas pertinente. Néanmoins, puisque quasiment tous les points d'appui de ce projet sont des points naturels, nous pouvons éventuellement introduire un autre coefficient de sécurité arbitraire d'une valeur de 2, en tenant compte de quelques sources d'erreur de pointé (par exemple le bruit d'image, le taux de compression du format de l'image, la stabilité du capteur, etc.) :

$$\sigma_{xyz} = 0,3 * Pixel_{objet} * 2 \quad (3.3)$$

Ensuite, KRAUS et WALDHÄUSL (1998) ont cité quelques formules pour calculer les précisions de l'aérotriangulation à partir de cette précision de pointé. Cependant, cet ouvrage a été ciblé surtout pour des images argentiques en photogrammétrie aérienne classique. Les formules de calcul théorique trouvées dans ce livre sont fonctions de la configuration de points d'appui, sachant qu'elles sont également établies empiriquement. KRAUS et WALDHÄUSL (1998) ont proposé quatre scénarios ainsi que leur modèle mathématique afin d'évaluer leur précision planimétrique. La précision altimétrique dépend du nombre de modèles entre deux points de calage successifs en altimétrie. Nous remarquons que pour conserver la précision planimétrique, seuls les points

d'appui sur le périmètre sont pertinents. Le rajout de points d'appui planimétriques à l'intérieur du bloc n'entraînera aucune augmentation significative de la précision.

Cependant, les équations données par KRAUS et WALDHÄUSL (1998) ne s'appliquent que si : le format des clichés est de 23 cm x 23 cm, le recouvrement longitudinal est d'environ 60 % et seule la zone comprise entre les deux points principaux est restituée. Dans la situation de photogrammétrie rapprochée, dans la plupart des cas ces conditions ne sont pas respectées. Nous restons donc avec l'Équation 3.3 pour estimer la valeur théorique du résultat d'aérottriangulation.

#### *Précision du nuage de points dense*

Dans le cadre de l'estimation de la précision théorique du nuage de points dense, il faudra tout d'abord connaître les paramètres qui jouent dans le processus d'appariement dense. Il s'agit donc d'un calcul théorique de la résolution du résultat de l'appariement dense. Bien évidemment, chaque logiciel a ses propres paramètres qui peuvent être réglés en fonction de l'algorithme implémenté. Certains logiciels, notamment commerciaux, ne présentent que des modes d'appariement prédéfinis. À présent, nous essayons de récapituler quelques paramètres communs qui ont été trouvés dans les différents algorithmes testés :

1. *Niveau pyramidal d'images d'entrée ( $N_p$ )* : Il s'agit du niveau de sous-échantillonnage d'images utilisé dans l'appariement. Bien entendu, l'appariement dense est un processus très exigeant au niveau des ressources de calcul. La plupart des logiciels disponibles présentent plusieurs niveaux pyramidaux d'images d'entrée afin de faire un compromis entre la qualité et le temps de calcul (et par conséquent aussi la mémoire nécessaire pour le faire). Ce niveau pyramidal est normalement une sous-division de deux pour chaque niveau et peut être de 1 (c.à.d. pleine résolution) jusqu'à 0,03125 (c.à.d. résolution à 1/32 de l'originale).
2. *Taux de sous-échantillonnage ( $T_s$ )* : À la fin d'un processus d'appariement dense, le nuage résultant est souvent beaucoup trop dense. Quelques logiciels donnent la possibilité de réduire la densité du nuage résultant en limitant le nombre de points généré. Le taux de sous-échantillonnage détermine le pas d'appariement ; par exemple, un coefficient de 4 va chercher un point tous les 4 pixels de l'image d'entrée. Notons que l'image d'entrée est elle-même fonction de  $N_p$ , donc le pas final d'appariement ( $P$  exprimé en pixel) est déterminé par la formule :

$$P = \frac{T_s}{N_p} \quad (3.4)$$

Ce coefficient de sous-échantillonnage va normalement de 1 (pas de sous-échantillonnage) jusqu'à 16 voire plus.

3. *Filtrage post-traitement* : Dans chaque algorithme, l'appariement se fait de manière itérative. Dans l'approche qui cherche et utilise les couples stéréos parmi le jeu de données d'images (Photoscan, Pix4D, SURE et Photomodeler), un nuage est créé pour chaque couple et le filtrage est fait après que les nuages de tous les couples possibles soient générés, souvent en utilisant les contraintes épipolaires. Dans l'approche qui utilise plutôt la relation d'images maîtresses et filles (Micmac), le filtrage est fait avant l'appariement justement en cherchant le meilleur couplage d'image maîtresse et fille. Enfin dans l'approche basée sur l'objet (PMVS), le filtrage se fait selon des contraintes de visibilité.
4. *Coefficient de corrélation* : Il s'agit d'une valeur qui sert de seuil de fiabilité du point apparié. Lorsque la valeur de ce coefficient est élevée, plus de points sont générés. Cependant, une valeur élevée risque également d'impliquer la création de plus de bruit. Avec une valeur de coefficient plus faible, les résultats sont filtrés de manière plus rigoureuse. Moins de bruit est ainsi détecté, mais cela peut aussi réduire le nombre de points sur le nuage résultant. Dans certains logiciels commerciaux comme Photoscan et Pix4D, cette valeur

est prédéfinie et ne peut pas être modifiée. Ce type de logiciel emploie normalement également un filtrage, voire une interpolation post-traitement afin de rendre le résultat plus « acceptable » au niveau de la densité. Au contraire **Micmac** et **Photomodeler** permettent la modification de ce coefficient, ce qui donne aux utilisateurs plus de contrôle sur le résultat souhaité. Cependant, en fonction des cas, le bon coefficient de corrélation peut être difficile à trouver.

La valeur  $P$  nous donne déjà une idée sur la résolution du nuage résultant. Afin de rattacher cette valeur au système de coordonnées de l'espace objet, le  $Pixel_{objet}$  est introduit dans l'Équation 3.4. Cela nous donne une valeur de résolution théorique ( $R_{theorique}$ ) du nuage de points dense résultant :

$$R_{theorique} = P * Pixel_{objet} = \frac{T_s}{N_p} * Pixel_{objet} \quad (3.5)$$

La valeur de cette résolution est similaire à la notion de résolution en lasergrammétrie. Il s'agit de l'écartement entre deux points dans le nuage. Nous pouvons ainsi utiliser cette résolution comme une mesure d'estimation théorique de la précision de l'appariement dense comme proposé par REMONDINO et al. (2013, 2014).

### 3.3 Résumé

Deux drones sont employés dans ce projet. Le premier, l'**Albris**, est un drone à voilure-tournante multi-hélices équipé d'un capteur de 38 mégapixels. Ce drone peut se positionner par rapport à un objet grâce à ses capteurs à ultrasons. Le deuxième drone, le **Phantom 3**, est aussi à voilure-tournante multi-hélices. Cependant, ce drone étant destiné au grand public, son capteur est plut petit avec une taille d'image de 12 mégapixels. Au niveau des outils terrestres, un appareil photo **Nikon D3200** a été utilisé afin de compléter les images. De plus, le levé lasergrammétrique a été effectué en utilisant un scanner laser de type **FARO Focus 3D X330**.

Dans le cas du levé par drone par photogrammétrie rapprochée, il est souhaitable de récupérer le plus de détails possible. Comme en photogrammétrie terrestre, il est important que le taux de recouvrement entre prises de vues consécutives des détails de l'objet soit élevé. Des vues obliques sont également acquises pendant le vol en plus des images perpendiculaires à l'objet. Dans le cas de la façade d'un bâtiment, les images obliques sont prises en suivant le même plan de vol mais en orientant l'appareil photo vers les quatre directions obliques.

Afin de gérer le grand nombre d'images dans le projet, une décomposition en plusieurs petits blocs a été proposée. Cette stratégie sert à économiser les ressources disponibles dans la gestion du projet. L'avantage principal de cette sous-division est le traitement individuel de chaque bloc, permettant ainsi de réaliser le traitement parallèlement à l'acquisition. Cependant, l'inconvénient de cette stratégie est l'absence de compensation globale sur l'ensemble du projet.



## Chapitre 4

# Résultats et discussions

### 4.1 Calibration de l'appareil photo

La calibration a été faite pour les capteurs des deux drones utilisés dans nos projets. Différents logiciels sont utilisés pour effectuer la calibration afin de comparer les résultats : **Photomodeler**, **Photoscan** et le module **Apero** de la suite logicielle **Micmac**. Pour le capteur d'**Albris**, la calibration a été faite également sur **PostFlightTerra3D** qui est une version réduite de **Pix4D**. En raison de la limitation de la licence, ce calcul ne fonctionne qu'avec l'**Albris**. Cependant, il est aussi possible de comparer les valeurs calculées avec celles pré-calibrées fournies par **Pix4D**.

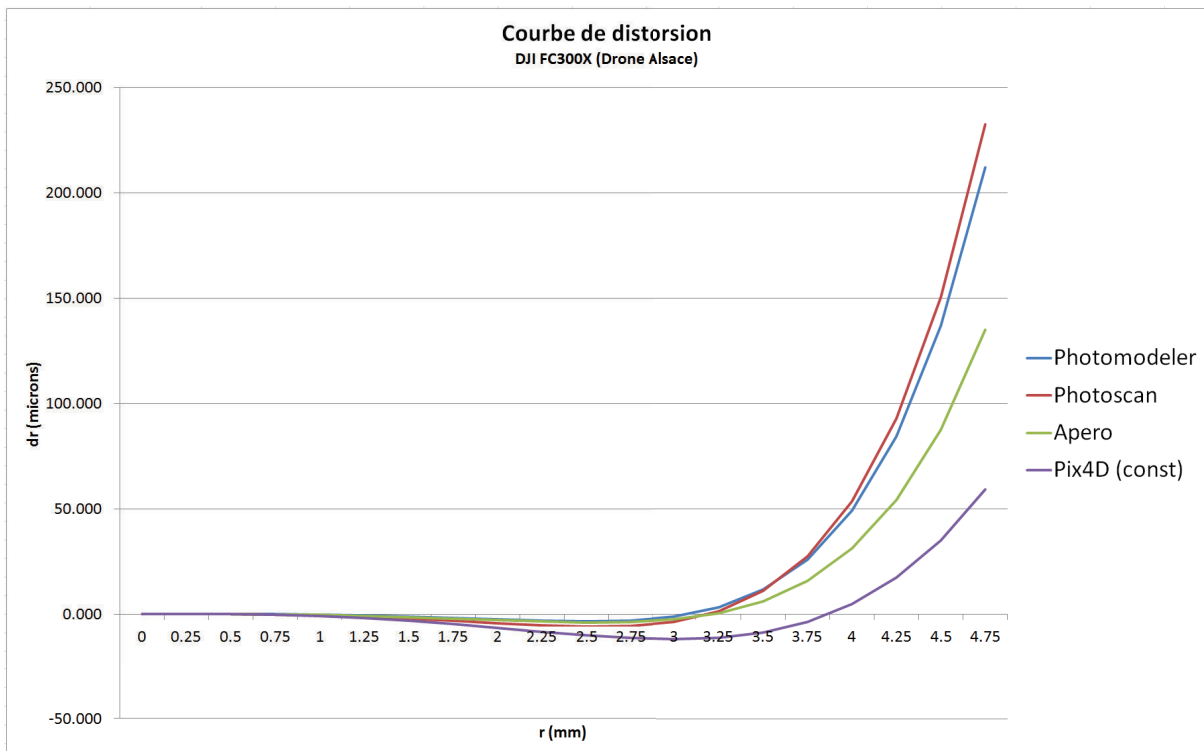
Au niveau de l'acquisition d'images, le seul critère d'acquisition qui n'a pas été implémenté est la rotation du capteur en mode portrait. Les deux drones ont des dispositifs de compensation horizontale qui leur permettent de garder l'horizontalité du capteur pendant le vol. Par conséquent, la prise de vue en mode portrait n'était pas possible. Cela peut éventuellement générer une corrélation entre les paramètres  $P_1$  et  $P_2$  comme déjà expliqué dans la sous-section 2.4.3, d'où l'intérêt de désactiver ces deux paramètres pendant le calcul de calibration.

Les résultats des calibrations sont montrés dans le TABLEAU 4.1, où **Pix4D (const)** désigne les valeurs pré-calibrées données par **Pix4D**. De plus à partir des valeurs de distorsion radiale, des courbes de distorsions peuvent être tracées (cf. FIGURE 4.1).

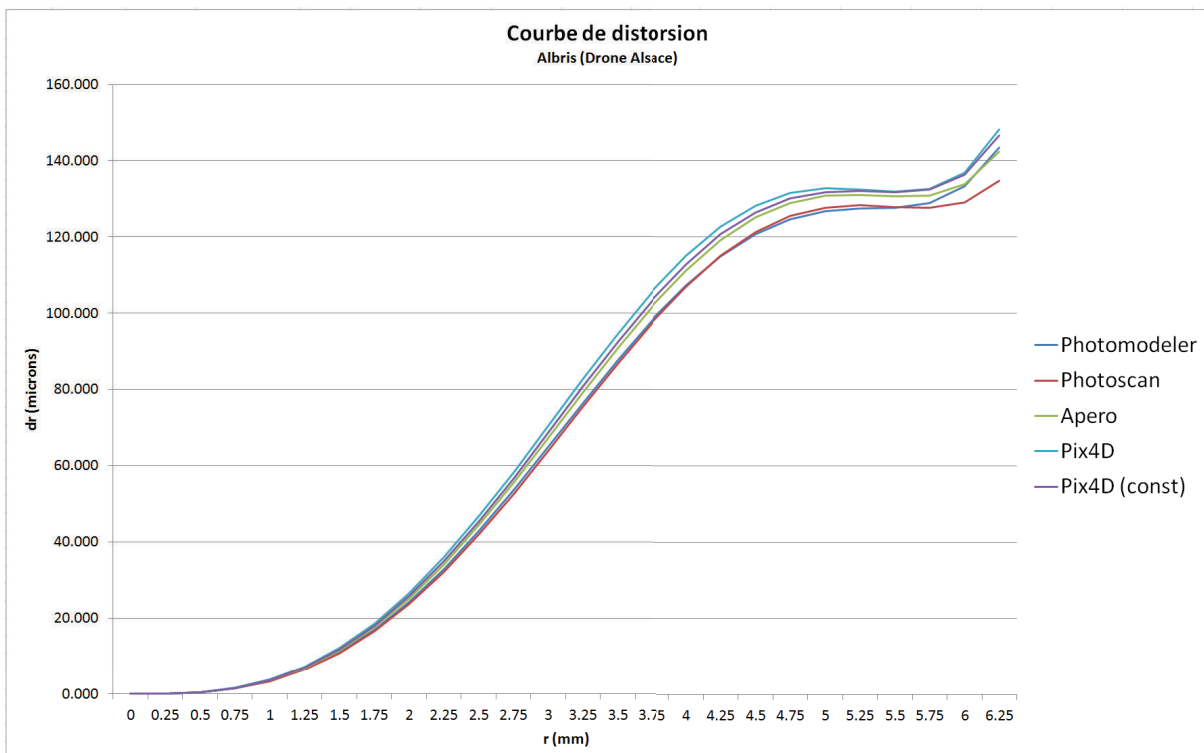
Les paramètres obtenus avec les différents logiciels sont variables, ce qui montre l'instabilité des capteurs. Ceci provient bien entendu du fait que les appareils intégrés dans les deux drones ont des petits capteurs. Dans le cas du **Phantom 3**, il existe un petit systématisme au niveau des valeurs de la longueur de focale ( $c$ ) et des coordonnées du point principal ( $x_0$  et  $y_0$ ). Afin de détecter ce systématisme, les trois résultats issus de **Photoscan**, **Apero** et **Photomodeler** sont moyennés et ensuite comparés à la valeur fournie par **Pix4D**. Un écart compris entre 0,1 et 0,2 mm est détecté pour ces trois paramètres, ce qui nous donne une idée sur l'erreur systématique. Par contre, dans le cas de l'**Albris**, seul un écart de l'ordre de 0,04 mm est détecté pour ces 3 paramètres.

Au niveau de la distorsion radiale, la courbe de distorsion du **Phantom 3** (FIGURE 4.1a) montre une anomalie au niveau de la forme. Dans le cadre de cette comparaison, toutes les valeurs de distorsions issues de chaque solution ont été converties au format habituellement rencontré sur **Photomodeler**. Il s'agit alors d'un modèle mathématique de calibration dit « *unbalanced* » [FRYER (1996)]. Dans ce type de modèle mathématique, normalement la courbe aura toujours une valeur positive ou négative, alors que la FIGURE 4.1a donne des valeurs en dessous de zéro.

Cette anomalie peut être expliquée par les statistiques complémentaires qui sont fournies après un calcul de projet dans **Photomodeler**. Notamment, il existe une forte corrélation entre les paramètres  $K_2$  et  $K_3$  jusqu'à 96,9 %. De plus, l'écart-type sur  $K_2$  est plutôt élevé (1,6 fois plus élevé que la valeur du coefficient lui-même). FRASER (2013) a mentionné que pour des capteurs à faible précision,  $K_3$  voire  $K_2$  sont souvent supprimés. En effet la suppression de ces coefficients nous donne une courbe qui suit mieux la tendance attendue (FIGURE 4.2).



(a)



(b)

FIGURE 4.1 – Les courbes de distorsions radiales tracées à partir des paramètres calculés pendant la calibration pour (a) DJI Phantom 3 (10 mm x 7,5 mm) et (b) Sensefly Albris (6,5 mm x 5 mm).



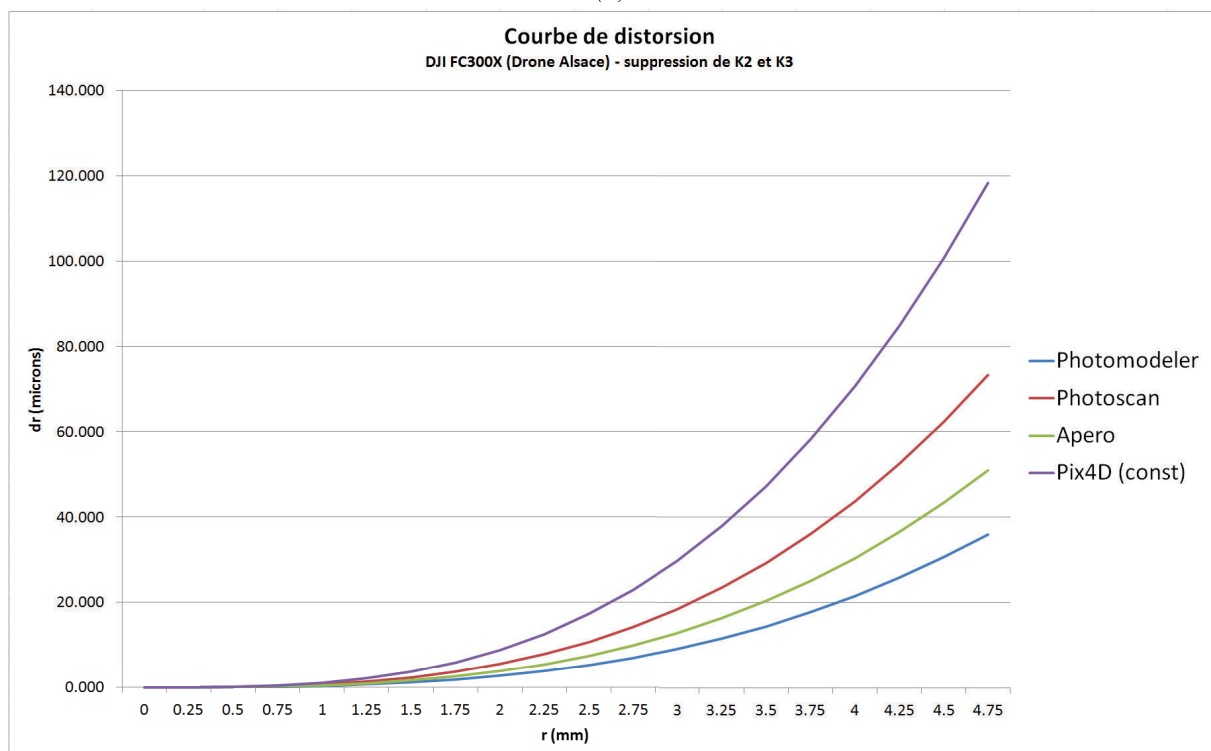
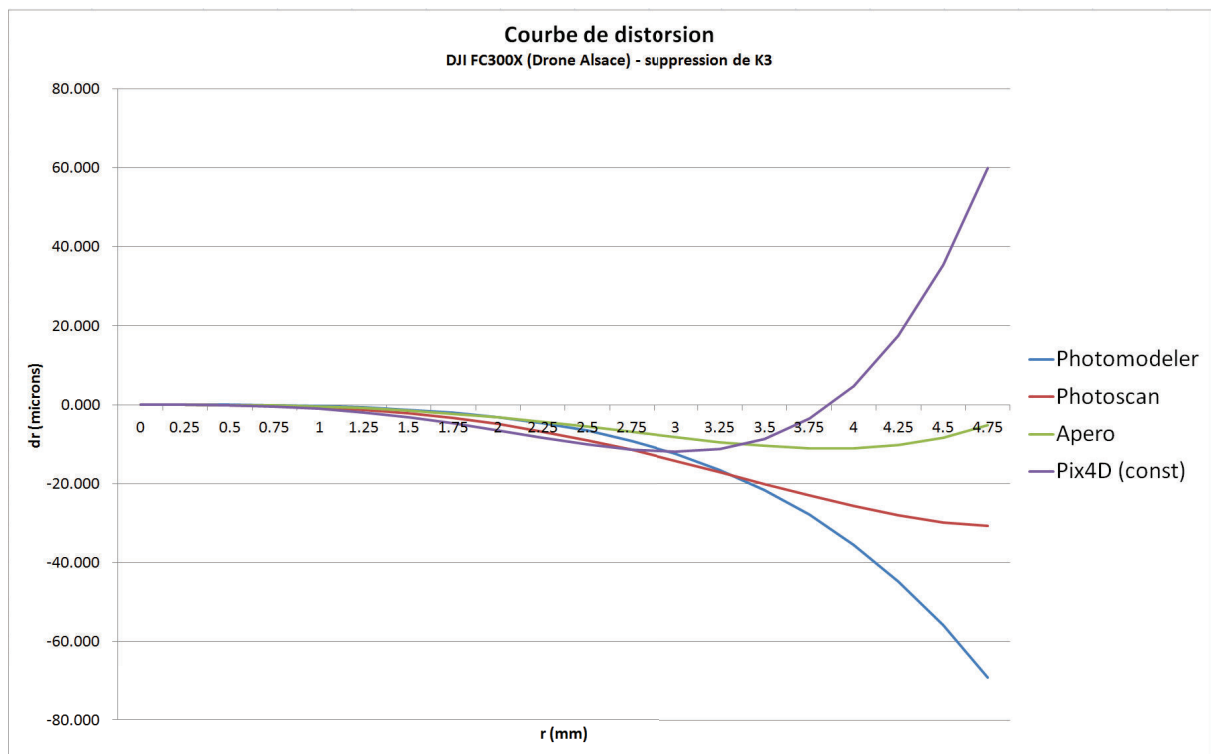


FIGURE 4.2 – Les courbes de distorsions radiales du Phantom 3 : (a) avec le coefficient  $K_3$  supprimé et (b)  $K_2$  et  $K_3$  supprimés.

TABLEAU 4.1 – Résultats de la calibration sur les différents logiciels.

| DJI Phantom 3 (10 mm x 7,5 mm) |              |            |            |               |  |
|--------------------------------|--------------|------------|------------|---------------|--|
|                                | Photomodeler | Photoscan  | Apero      | Pix4D (const) |  |
| $c$ (mm)                       | 3,779        | 3,6107     | 3,7224     | 3,5520        |  |
| $x_0$ (mm)                     | 3,2464       | 3,1024     | 3,1926     | 2,9642        |  |
| $y_0$ (mm)                     | 2,4026       | 2,3136     | 2,3548     | 2,2448        |  |
| $K_1$                          | -3,360E-04   | -6,837E-04 | -4,756E-04 | -1,104E-03    |  |
| $K_2$                          | -1,371E-05   | 1,763E-05  | 1,893E-05  | 7,368E-05     |  |
| $K_3$                          | 5,156E-06    | 4,824E-06  | 2,568E-06  | -1,007E-08    |  |

| Sensefly Albris (6,5 mm x 5 mm) |              |            |            |                   |               |
|---------------------------------|--------------|------------|------------|-------------------|---------------|
|                                 | Photomodeler | Photoscan  | Apero      | PostFlightTerra3D | Pix4D (const) |
| $c$ (mm)                        | 7,9699       | 8,0255     | 7,9579     | 7,9530            | 7,9422        |
| $x_0$ (mm)                      | 5,0519       | 5,0954     | 5,0515     | 5,0500            | 5,0064        |
| $y_0$ (mm)                      | 3,7872       | 3,8322     | 3,7915     | 3,7990            | 3,7576        |
| $K_1$                           | 3,606E-03    | 3,497E-03  | 3,731E-03  | 3,963E-03         | 3,831E-03     |
| $K_2$                           | -1,506E-04   | -1,410E-04 | -1,550E-04 | -1,696E-04        | -1,615E-04    |
| $K_3$                           | 1,877E-06    | 1,679E-06  | 1,905E-06  | 2,144E-06         | 2,017E-06     |

Au niveau de la calibration de l'**Albris**, les résultats sont plutôt stables entre les différentes solutions (cf. FIGURE 4.1b). La courbe montre également les caractéristiques d'un modèle de distorsion « *unbalanced* ». Cependant, la différence entre les résultats calculés et les valeurs fournies démontre le besoin d'effectuer une calibration avant de lancer une mission pour vérifier la fiabilité de ces données pré-calibrées.

Quelques sources d'erreurs dans cette étape de la calibration sont listées ci-dessous :

1. *La qualité du capteur* : les drones utilisés dans ce projet ont tous des petits capteurs. Le **Phantom 3** est fourni avec un capteur de 6,5 mm x 5 mm. La taille du capteur de l'**Albris** est légèrement plus grande (10 mm x 7,5 mm) mais cela reste très petit. Ce type de capteur est normalement ciblé pour des travaux visuels et n'est pas adapté pour des utilisations à haute précision. En effet, les valeurs de distorsions radiales calculées peuvent théoriquement donner des erreurs jusqu'à 40 pixels pour le **Phantom 3** et 90 pixels pour l'**Albris** (au niveau des bords des images).
2. *L'instabilité du capteur* : étant des petits capteurs, leur géométrie interne est facilement changée par des mouvements ou des changements de conditions de prise de vue. L'acquisition des images se fait en mode auto-focus ; ceci donne plus d'instabilité sur les valeurs de paramètres obtenues car chaque image est prise avec une focale légèrement différente.
3. *La qualité d'images* : dans notre cas, la calibration a été faite en utilisant des cibles à code barre qui sont détectées automatiquement par **Photoscan** et **Photomodeler**. Cependant, les autres solutions ne disposent pas de cette fonction de détection automatique des cibles. La qualité des images devient donc un facteur très important au niveau du pointé des cibles sur les images. De même, la détection des points homologues qui sert à augmenter la qualité de positionnement des stations de prises de vue est influencée par la qualité d'image. Dans le cas du **Phantom 3**, ce facteur est limité par sa taille d'image de 12 MP. Pour l'**Albris**, il existe du bruit important sur les images qui est présent sur tous les jeux de données. Ce bruit peut être un facteur qui diminue la qualité de la calibration.

## 4.2 Test préliminaire : le Pavillon Joséphine

Un test préliminaire a été effectué sur le Pavillon Joséphine, situé dans le Parc de l'Orangerie de Strasbourg. Cette mission a été faite en utilisant le drone DJI Phantom 3. Les prises de vue ont été réalisées à une distance moyenne de 8 m de l'objet et de sorte à recouvrir les 4 façades du pavillon. Des images nadirales ont également été prises autour de l'objet. S'agissant d'un projet d'essai, seuls quelques points d'appui ont été levés sur les façades au tachéomètre avec l'aide de l'Eurométropole de Strasbourg. La particularité de cet objet est le matériau de ses façades. Son côté nord (arrière) est constitué de grès rose, typique de l'Alsace. Par contre, la façade sud (avant) est peinte en blanc, donc peu texturée (cf. FIGURE 4.3).

Le résultat de la génération du nuage de points dense ainsi que les modèles maillés obtenus avec **Photoscan** sont présentés sur la FIGURE 4.3. La façade arrière a été bien modélisée hormis quelques problèmes liés aux masques de végétation sur la gauche. Cependant, la façade sud montre un résultat très bruité surtout au niveau du mur. Notons que le nuage sur les fenêtres qui sont d'ailleurs bien texturées est plutôt propre. Dans ce cas précis, l'existence de la texture sur l'objet devient très importante, car l'algorithme d'appariement dense s'appuie sur le calcul d'un coefficient de corrélation entre les pixels des différentes images. Le manque de texture empêche ce calcul de correspondance puisqu'avec un mur blanc l'algorithme n'arrive pas à distinguer les différents points d'intérêt. Ces points constituent alors du bruit.

Afin de valider cette hypothèse, une partie réduite de la façade a été traitée en utilisant différentes solutions logicielles. La façade centrale a notamment été traitée sur **Photoscan**, **Photomodeler**, **Micmac**, **SURE** et **PMVS**. Dans le cas du **PMVS** et **SURE**, les orientations des images nécessaires en donnée d'entrée sont fournies par le logiciel **VisualSFM**.

### 4.2.1 Comparaison des résultats d'appariement dense

Une comparaison visuelle des résultats est présentée sur la FIGURE 4.4. Puisqu'aucun point d'appui n'existe au niveau de cette façade centrale, une analyse géométrique ne peut pas être effectuée. Toutefois une comparaison visuelle notamment des résultats de l'appariement dense peut être faite. Dans le cas du logiciel **Photoscan**, le traitement a été fait en utilisant la qualité « *High* » ce qui veut dire que le logiciel effectue l'appariement en réduisant la résolution des images par deux. Comme déjà constaté dans le dernier paragraphe, le nuage dense résultant comprend des points sur le mur peu texturé. Cependant, ces points sont très bruités avec une dispersion atteignant 15 cm alors que le mur est normalement plan.

De façon similaire aux résultats de **Photoscan**, le logiciel **SURE** arrive à détecter des points sur le mur. Le traitement a été fait en mode « *Full Resolution* » afin de permettre un appariement pour chaque pixel dans les images en pleine résolution. Ces paramètres donnent toujours des résultats bruités, mais de façon moins perceptible qu'avec **Photoscan**.

Le traitement sur **Photomodeler** a été fait avec le mode MVS plutôt que l'ancien DSM. Ce mode implique l'utilisation d'une géométrie multi-vue dans l'appariement, similaire à l'approche de **PMVS**. Dans le nuage résultant très peu de points sont identifiés au niveau du mur. En effet, seules les bordures de la façade sont modélisées. Au contraire, les fenêtres sont bien représentées, ce qui montre a priori un problème au niveau de la texturation (sachant que le matériau des fenêtres est du grès contrairement au mur).

**Micmac** et **PMVS** donnent à peu près des résultats similaires à celui de **Photomodeler**. Les deux n'arrivent pas non plus à générer le nuage de points dense sur le mur lissé. Le traitement sur **Micmac** utilise le mode automatique de **C3DC** qui lui permet de déterminer automatiquement les meilleurs couples ou sites de corrélation et d'en effectuer un appariement pixel par pixel. Par contre, le traitement sur **PMVS** n'était pas paramétrable et le résultat est celui généré avec la configuration par défaut.



FIGURE 4.3 – Les deux façades principales du Pavillon Joséphine et les résultats de l'appariement dense ainsi que du calcul de maillage sur Photoscan. Les dernières images montrent les positions des caméras lors de la prise de vue.

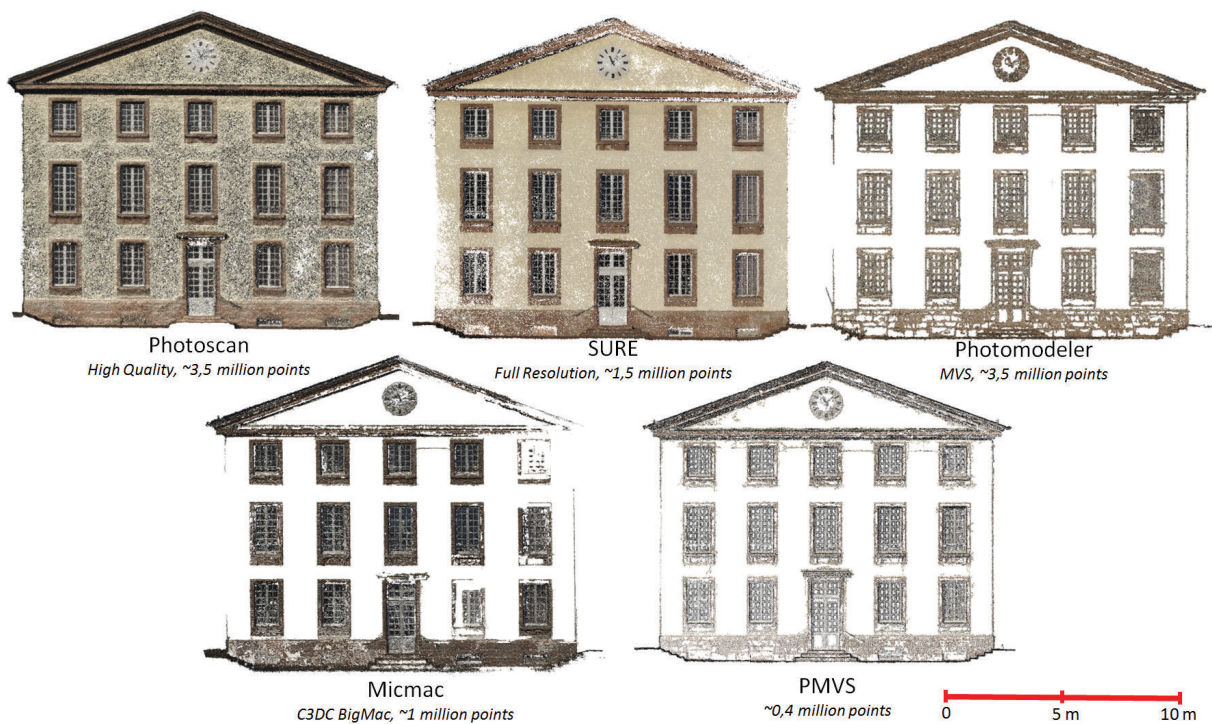
#### 4.2.2 Remarques préliminaires

Quelques remarques préliminaires peuvent être tirées de cette mission d'essai. La première concerne l'importance du taux de recouvrement entre les images. Les images prises dans cette mission ne sont pas planifiées et il manque donc quelques détails. Ce problème peut être résolu en implémentant un taux de recouvrement suffisant entre les images ainsi que des images obliques afin de récupérer les angles morts.

En fonction du matériau de l'objet concerné, une stratégie particulière d'acquisition ou de traitement peut être envisagée. Dans le cas du Pavillon Josephine, l'objet avec peu de texture comme la peinture blanche pose un problème surtout au niveau de la densification ou de l'appariement pixel par pixel. Dans ce cas-là, la résolution de l'image va jouer un rôle important. La résolution la plus haute n'implique pas forcément le meilleur résultat, comme le montre par le nuage issu de SURE. Dans le cas de Micmac, le seuil de tolérance du coefficient de corrélation est un paramètre très important qui détermine si un point est en fait du bruit par rapport au modèle. En effet, en augmentant ce seuil, des points bruités peuvent être générés à partir de ces surfaces lissées.

Enfin, pour l'objectif de modélisation 3D d'un bâtiment plutôt régulier comme le Pavillon Joséphine, des points sur le mur peuvent être inutiles. En effet, pour avoir un modèle maillé propre, seuls les points sur les bordures sont nécessaires. Des points bruités sur la surface peuvent au contraire gêner cette étape de maillage (cf. FIGURE 4.4b).





(a)



(b)

FIGURE 4.4 – Résultat d'appariement dense (a) de la façade avant-centre du Pavillon Joséphine et ses modèles maillés (b) générés par les cinq algorithmes employés.

### 4.3 Cas d'étude I : le Palais Rohan

Le Palais Rohan est un bâtiment historique de la ville de Strasbourg datant du XVIII<sup>e</sup> siècle. Situé à côté de la cathédrale, le palais a été bâti pour le Cardinal Rohan entre les années 1732 et 1742. Il a hébergé quelques souverains et hommes d'état français dont Napoléon pendant leurs visites à la ville. Aujourd'hui le bâtiment est utilisé par 3 musées gérés par l'Eurométropole. Au niveau du matériau, le palais est construit en grès jaune. Dans le cadre de ce projet, seule la façade centrale du côté de l'III a été photographiée. Les dimensions approximatives sont de 14 x 20 mètres. Compte tenu des expériences suite à mission sur le Pavillon Joséphine, un vol perpendiculaire classique a été fait et suivi par quatre vols obliques avec l'appareil photo incliné vers la droite, la gauche, le haut et le bas.

Dans ce projet, le *Sensefly Albris* était utilisé pour acquérir les images. En profitant du paramétrage de son mode de distance caméra-objet, le drone a volé à environ 5 mètres de la façade. De plus, une vingtaine de points d'appui et points de vérifications distribués sur la façade a été mesurée à l'aide d'un tachéomètre (Cf. ANNEXE C). Le calcul de coordonnées est fait par la méthode d'intersection spatiale afin de récupérer la précision des résultats obtenus. Les précisions de ces points topographiques sont de l'ordre de 5 mm en XYZ.

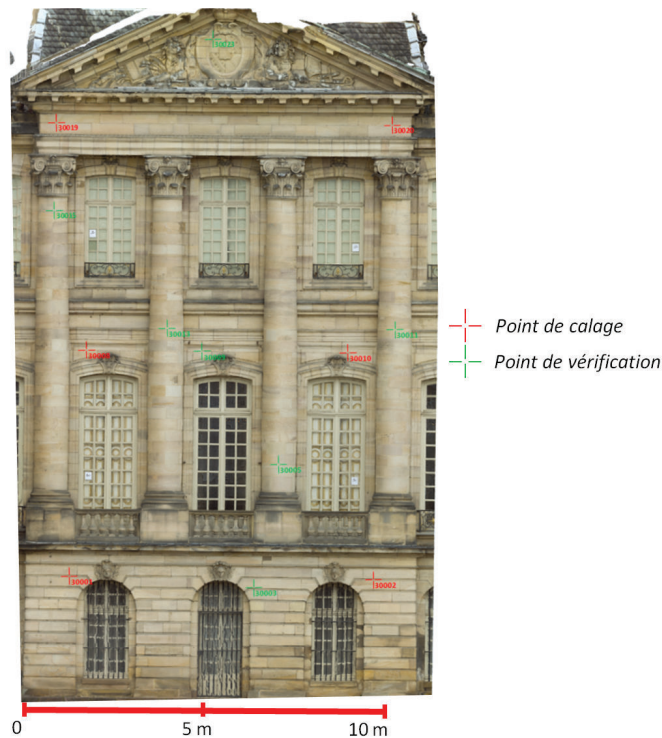


FIGURE 4.5 – Répartition des points d'appui et des points de vérification sur la façade centrale du Palais Rohan.

La première étape dans la reconstruction 3D par la photogrammétrie est le calcul des positions et orientations des stations de caméra. Cette procédure est analogue aux calculs de l'aérotriangulation en photogrammétrie classique. L'identification des points homologues se fait automatiquement et peut permettre d'atteindre jusqu'à un millier de points par image. Ceci est réalisé avec des algorithmes de détection des caractéristiques tels que SIFT ou SURF.

#### 4.3.1 Résultat et analyse de l'aérotriangulation

Sur la vingtaine de points levés sur la façade, treize points sont utilisés pour évaluer l'exactitude du résultat de cette étape d'aérotriangulation, dont six points d'appui et sept points de vérification (cf. FIGURE 4.5). La répartition des points d'appui suit la règle générale dans un

TABLEAU 4.2 – Valeurs de résidus pour le géoréférencement avec les 6 points d'appui.

|                     | Résidu X (m) | Résidu Y(m) | Résidu Z (m) | Résidu 3D (m) |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| <b>Photoscan</b>    | 0,006        | 0,004       | 0,005        | <b>0,009</b>  |
| <b>Apero</b>        | 0,006        | 0,003       | 0,003        | <b>0,008</b>  |
| <b>Pix4D</b>        | 0,005        | 0,004       | 0,002        | <b>0,007</b>  |
| <b>Photomodeler</b> | 0,010        | 0,003       | 0,006        | <b>0,012</b>  |

TABLEAU 4.3 – Valeurs de résidus pour les 7 points de vérifications.

|                     | Résidu X (m) | Résidu Y(m) | Résidu Z (m) | Résidu 3D (m) |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| <b>Photoscan</b>    | 0,005        | 0,003       | 0,004        | <b>0,007</b>  |
| <b>Apero</b>        | 0,004        | 0,003       | 0,002        | <b>0,005</b>  |
| <b>Pix4D</b>        | 0,004        | 0,003       | 0,002        | <b>0,006</b>  |
| <b>Photomodeler</b> | 0,007        | 0,005       | 0,003        | <b>0,009</b>  |

projet de photogrammétrie comme expliqué dans KRAUS et WALDHÄUSL (1998) : les points sont principalement répartis sur les bords de la zone du projet.

Afin d'évaluer la précision et l'exactitude, les résultats de l'étape d'aérottriangulation sont affichés dans les TABLEAUX 4.2 et 4.3 (cf aussi ANNEXE D). Tous les algorithmes ont permis d'orienter les images sauf **VisualSFM**. Ceci peut être lié au seuil de points homologues détectés par défaut.

En utilisant l'Équation 3.3, nous pouvons calculer une valeur de précision théorique de l'aérottriangulation. Avec la taille de pixel-objet de 0,9 mm à cette distance de prise de vue, la précision attendue est de 0,54 mm sans tenir compte de l'erreur de pointé. Malgré cela, la précision de l'aérottriangulation et l'exactitude des points de vérifications sont presque 15 fois plus élevées. Même en tenant compte de la sous-estimation du calcul théorique et de la précision des points d'appui (de 5 mm, soit déjà plus de 5 fois la taille de pixel-objet), cette valeur est toujours trop élevée. Notons que les points d'appui et de vérifications sont des points d'intérêt (bordures des fenêtres, joints des briques, etc.) et ne sont pas des cibles bien définies. La précision et l'exactitude sont alors fonction de la qualité du pointé sur les images. Toutefois, ceci est gêné par le bruit dans les images de l'**Albris**. Ce problème a été reconnu par **Sensefly** et une mise à jour majeure dans le but d'augmenter la qualité du capteur est attendue prochainement.

#### 4.3.2 Résultat et analyse de l'appariement dense

Au niveau des nuages de points denses, les paramètres de densification sont affichés dans le TABLEAU 4.4. Notons qu'en utilisant l'Équation 3.5 nous pouvons estimer la précision attendue du nuage de points. La précision théorique pour **Micmac** et **Pix4D** est 1,4 cm alors que celle de **Photomodeler** est 0,7 cm. Remarquons également que la valeur de  $T_s$  dans **Photoscan** n'est pas connue. Ici, sa valeur de précision théorique est calculée sous l'hypothèse que  $T_s$  est égal à 4 (valeur par défaut dans les modes prédéfinis de **Micmac** et **Pix4D** qui utilisent la même valeur de  $N_p$ ).

Les résultats des quatre algorithmes d'appariement dense employés sont affichés dans la FIGURE 4.6. L'application des images obliques a effectivement couvert quelques parties cachées telles que le balcon ou la partie basse du triglyphe ou bien la métope au-dessus. Cependant, le problème du bruit sur les images est toujours significatif dans cette étape comme démontré par la FIGURE 4.7. Le nuage de points à gauche est issu du module **C3DC BigMac** dans **Micmac**, ce qui veut dire que le logiciel sous-échantillonne les images (facteur 2). Cette option de sous-



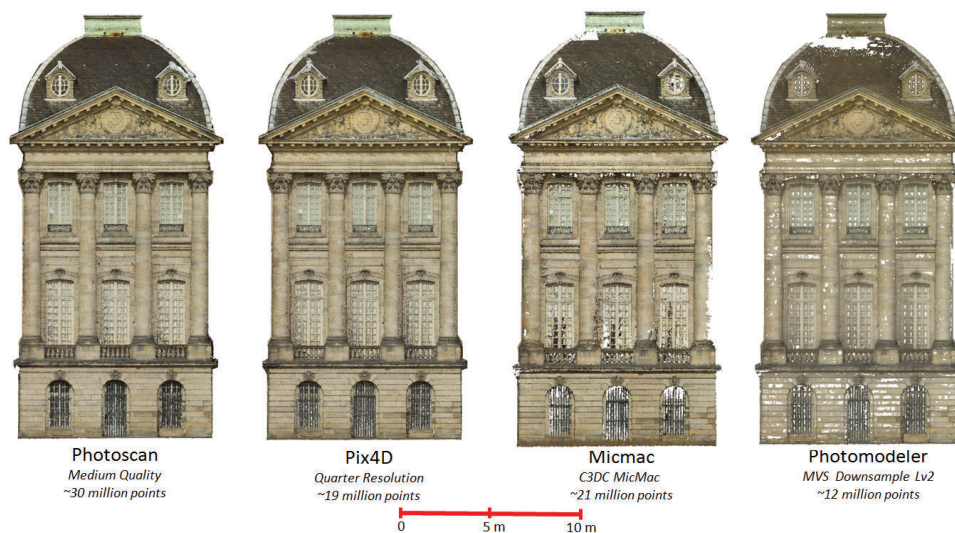


FIGURE 4.6 – Résultats de nuages de points issus de l'étape d'appariement dense des quatre algorithmes utilisés sur la façade centrale du Palais Rohan.

TABEAU 4.4 – Paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés.

|                              | Photoscan                                                       | Pix4D                                                | Micmac                                                                            | Photomodeler                                         |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Mode pré-défini</b>       | Medium                                                          | Quarter Resolution                                   | C3DC MicMac                                                                       | -                                                    |
| <b>N<sub>p</sub></b>         | 25%                                                             | 25%                                                  | 25%                                                                               | 25%                                                  |
| <b>T<sub>s</sub></b>         | Inconnu                                                         | 4 (« Optimal »)                                      | 4                                                                                 | 2                                                    |
| <b>R<sub>théorique</sub></b> | 1,4 cm                                                          | 1,4 cm                                               | 1,4 cm                                                                            | 0,7 cm                                               |
| <b>Filtrage</b>              | Post-appariement, probablement par coplanarité (« Aggressive ») | Post-appariement, par coplanarité, 3 faisceaux/point | Pre-appariement, basé sur les meilleurs couplages des images maîtresses et filles | Post-appariement, par coplanarité, 3 faisceaux/point |

échantillonnage est souvent employée dans les solutions d'appariement dense afin de donner à l'utilisateur le choix de faire le compromis entre la qualité et le temps de calcul. Un nuage plus complet est généré en utilisant C3DC MicMac qui sous-échantillonne les images en quatre comme montré par la figure de droite. Ceci est plus probablement une nouvelle fois dû au seuil du coefficient de corrélation. Dans C3DC BigMac (sous-échantillonnage d'un facteur de 2), l'algorithme calcule des points plus denses à partir des images bruitées qui ne sont pas forcément précis ; il les considère comme des fautes et par conséquent les supprime. Ceci génère alors des trous sur le nuage résultant. Par contre, dans C3DC MicMac le seuil est, a priori, plus bas en prenant en compte la nature sous-échantillonnée des images en entrée, ce qui lui permet de tolérer plus de points imprécis. En résumé, même si un nuage plus complet est généré par des images à résolution plus basse, le nuage résultant n'est pas forcément précis. Pour des objets moins compliqués, cela ne pose pas trop de problèmes, mais il faudra se méfier surtout pour des objets plus compliqués tels que des sculptures ou des inscriptions.

Afin de valider l'exactitude du résultat d'appariement dense, un levé lasergrammétrique a été effectué sur la façade concernée. Ceci a été fait en utilisant le scanner laser Faro Focus 3D du laboratoire. Quatre stations ont été effectuées dont trois stations à courte distance (environ 10 m) et une station à longue distance (environ 45 m). Les trois premières stations à courte distance sont positionnées respectivement à gauche, à droite et devant la façade. Le but de ces stations est de récupérer le plus de détails possible. La dernière station qui se trouve à 45 m de la façade sert à récupérer la globalité de la façade ainsi qu'à scanner la partie haute qui est difficile à numériser à



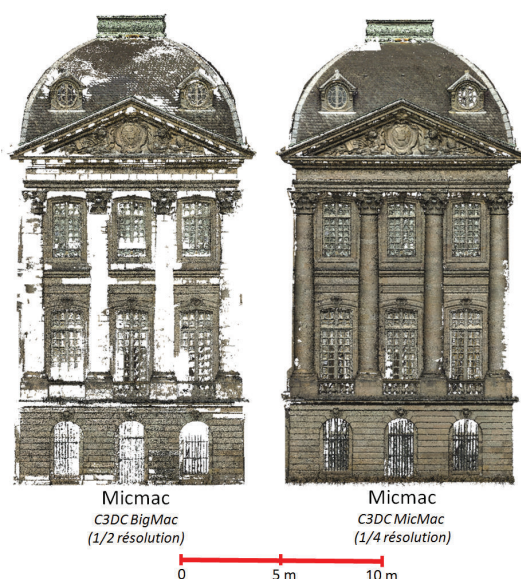


FIGURE 4.7 – Comparaison de deux niveaux de résolution utilisé dans l'étape d'appariement dense sur Micmac. Remarquons que le nuage moins dense à gauche est issu des images à résolution plus élevée.

partir des trois stations à courte distance. La consolidation de ces quatre nuages de points se fait sur le logiciel **Faro Scene** à l'aide des points communs. Dans cette opération, quelques sphères sont utilisées pour automatiser la consolidation, mais des points manuels sont également ajoutés afin d'augmenter la qualité de la transformation. Les points manuels sont également connus en coordonnées, étant les mêmes points d'appui utilisés dans le projet photogrammétrique. Ainsi, le nuage de points consolidé est également directement géoréférencé. À la fin de ce processus le nuage de points a une résolution comprise entre 6 et 8 mm, ce qui est de l'ordre de la précision de l'aérotriangulation et bien plus précis que la résolution de nuage de points dense attendue du projet photogrammétrique ( $R_{théorique}$ ).

L'évaluation de la qualité des nuages de points denses issus du projet photogrammétrique est faite en utilisant le nuage de points mesuré par le scanner laser comme référence. Le nuage de points du scanner laser a été maillé afin de donner une référence surfacique. Cette vectorisation permet une évaluation statistique sur le résultat de la densification, contrairement à la simple comparaison entre les deux nuages de points qui ne donne que des valeurs non-signées ou absolues (représentant la distance entre les voisins les plus proches entre les deux nuages de points). Le logiciel **CloudCompare** a été utilisé pour mailler le nuage de points du scanner laser et effectuer les comparaisons. Le maillage a été fait par l'algorithme de Poisson avec un niveau d'octree de 13. Ce niveau d'octree est choisi afin de bien représenter les détails de l'objet. En effet, la différence entre le résultat de maillage avec un niveau d'octree de 13 et 14 n'est pas importante.

Une comparaison sur l'ensemble de la façade a tout d'abord été effectuée (cf. FIGURE 4.8). Une zone commune entre tous les nuages de points issus de la photogrammétrie et celui du scanner laser a été déterminée afin d'éviter les valeurs aberrantes lors du calcul de statistiques. En général, les nuages de points denses issus de la photogrammétrie donnent tous des valeurs d'écart-type de l'ordre de 1 cm en comparant avec la référence. Celle-ci correspond à peu près aux valeurs calculées précédemment lors du calcul théorique (en utilisant l'Équation 3.5 en tenant compte du niveau pyramidal des images d'entrée et du facteur de sous-échantillonnage), soit 1,4 cm pour **Photoscan**, **Micmac** et **Pix4D** et 0,7 cm pour **Photomodeler**. Remarquons que **Photomodeler** dans ce cas-là donne le mauvais résultat par rapport à la précision attendue ; ceci est aussi apparent visuellement avec la présence de plus de bruit et de trous.

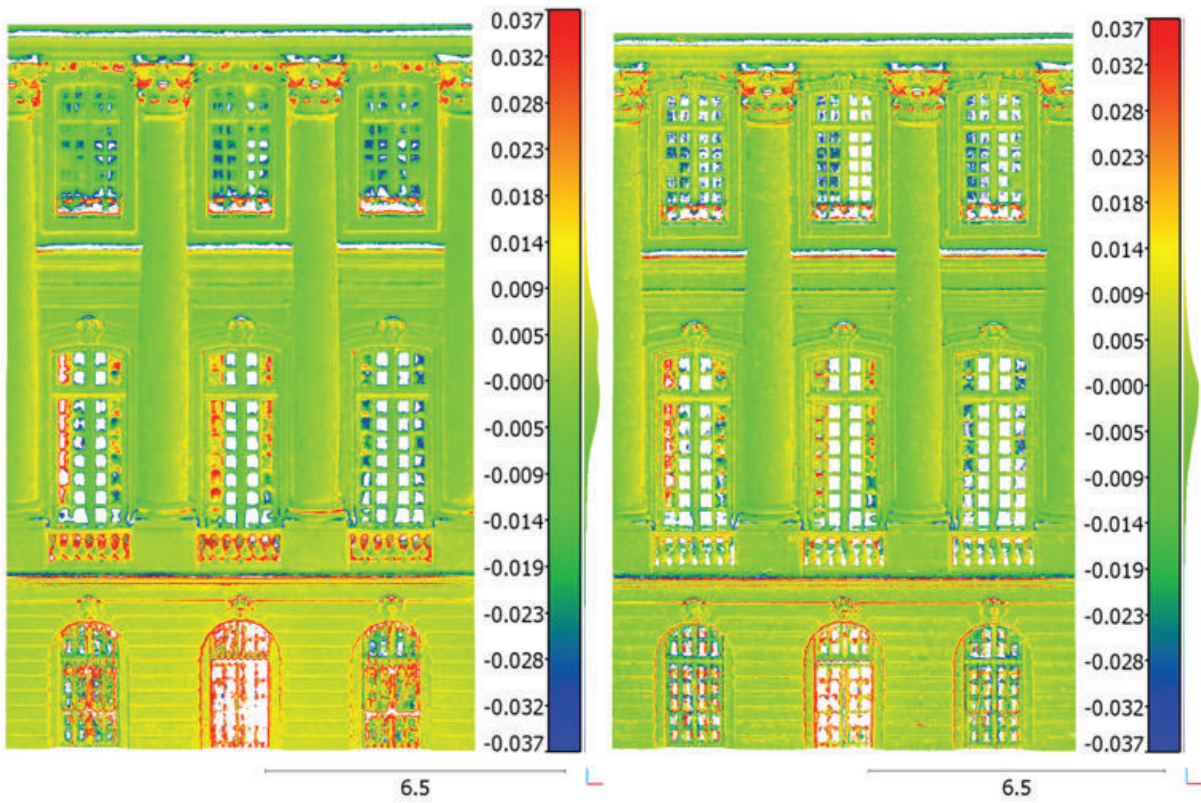
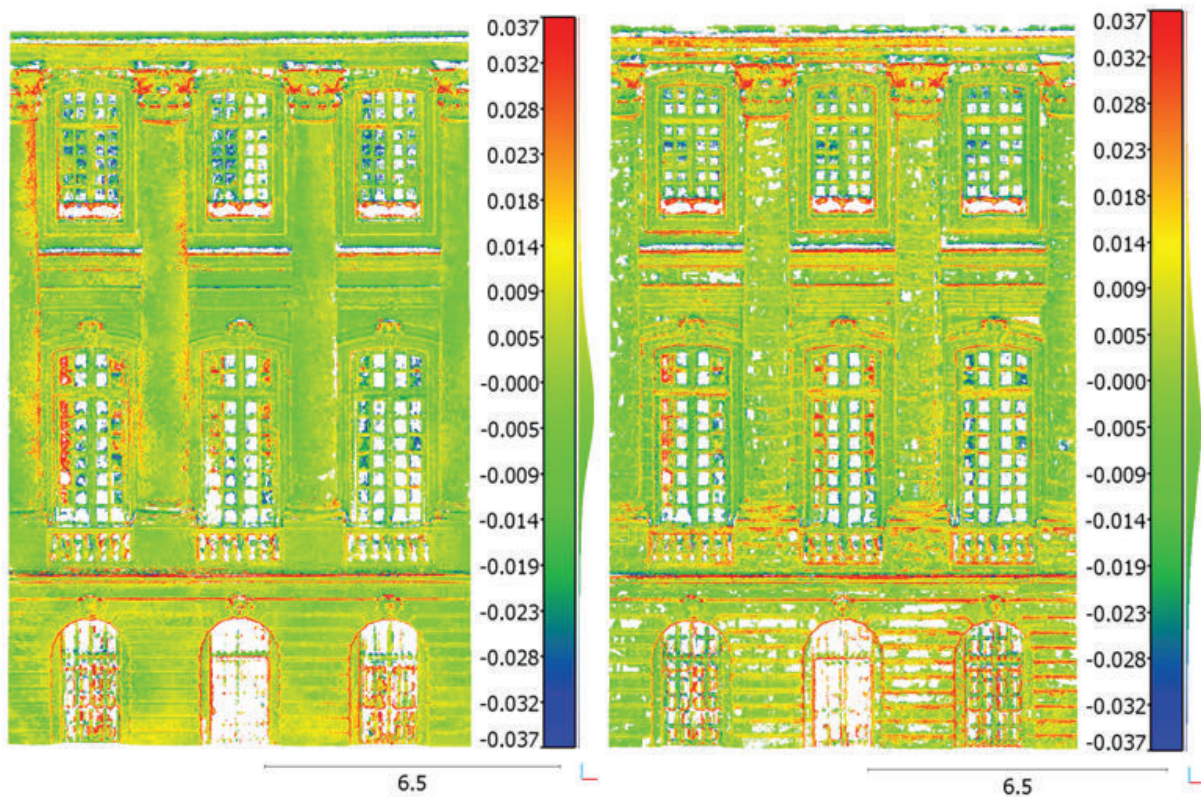
(a) Photoscan,  $\sigma = 0,011 \text{ m}$ (b) Pix4D,  $\sigma = 0,010 \text{ m}$ (c) Micmac,  $\sigma = 0,011 \text{ m}$ (d) Photomodeler,  $\sigma = 0,013 \text{ m}$ 

FIGURE 4.8 – Analyse des résultats d'appariement dense en utilisant les données de scanner laser comme référence pour une partie commune de la façade du Palais Rohan.



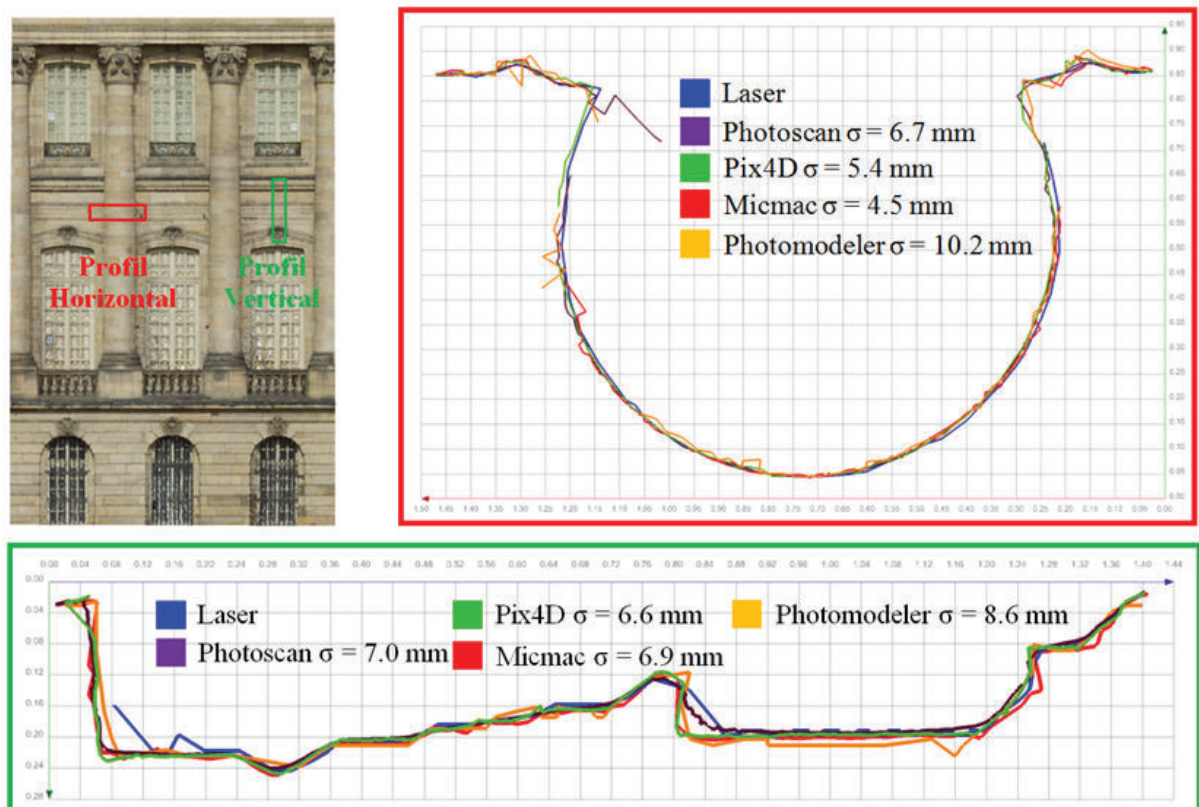


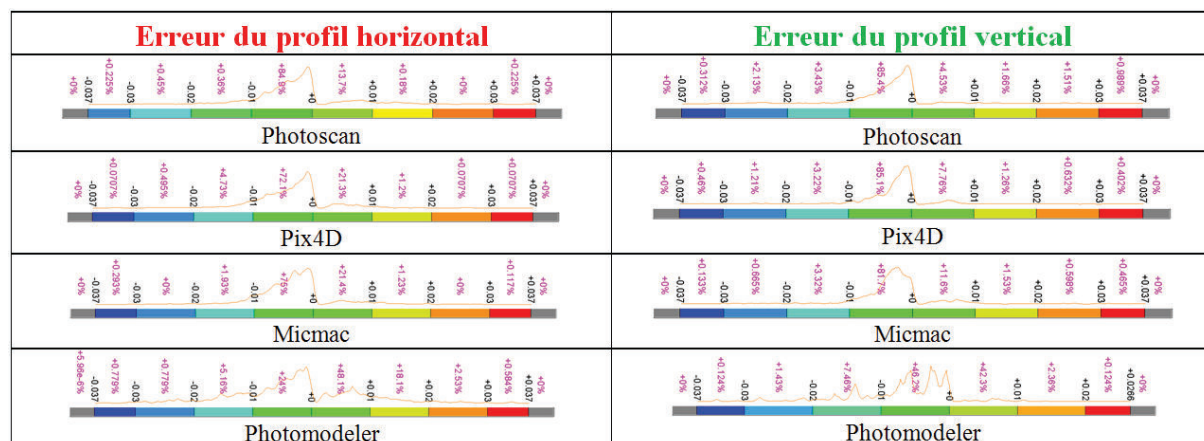
FIGURE 4.9 – Le profil horizontal sur une des colonnes corinthiennes (cadre rouge) et le profil vertical sur une partie du mur (cadre vert). Les vecteurs en bleu représentent les mesures de scanner laser.

Dans le résultat de **Photomodeler**, une dispersion plus importante de l'histogramme des écarts de distance est notamment observée. Ceci indique que le nuage de points est plus bruité. Plus de trous sont également observés dans ce nuage de points. Notons que les trous peuvent provenir de l'échec de l'appariement ou bien de la suppression de bruit hors tolérance pendant le calcul de distance par rapport au modèle maillé de référence.

**Photoscan** et **Pix4D** donnent des nuages de points plus homogènes avec moins de bruit. **Photoscan** fournit une valeur d'écart-type légèrement plus faible que celle de **Pix4D**. **Photoscan** détecte plus d'erreurs sur les bordures des objets particuliers comme les fenêtres ou les balustrades des balcons. Ceci peut éventuellement être lié à l'algorithme d'appariement dense implémenté par **Photoscan** qui a priori s'apparente à la méthode de SGM. La partie basse de la façade du résultat de **Photoscan** donne également un systématisme léger. La stratégie de filtrage de points générés peut influencer le résultat, sachant que dans **Photoscan** ces paramètres ne peuvent pas être réglés par l'utilisateur. Par contre, il est également intéressant de noter que **Photoscan** a réussi à détecter plus de points sur les vitres comparé à **Pix4D** et bien d'autres solutions.

**Micmac** génère un nuage de points qui est plus homogène que celui de **Photomodeler**, mais toujours avec du bruit et des trous évidents. Au niveau des colonnes, **Photoscan** et **Pix4D** donnent des résultats nettement plus homogènes. Ceci correspond bien avec l'hypothèse de l'influence du coefficient de corrélation dans **Micmac** déjà évoquée pendant le test préliminaire sur le Pavillon Joséphine. En effet, pour le calcul d'appariement dense sur **Micmac**, le mode prédéfini de C3DC a été utilisé. La valeur de ce coefficient est donc également prédéterminée. Lorsqu'un point calculé dépasse le seuil de ce coefficient de corrélation, **Micmac** le supprime et laisse à sa place un trou afin de garantir la fiabilité du résultat obtenu. A priori, c'est également le cas dans **Photomodeler**, **Photoscan** et **Pix4D**. Cependant, dans **Photoscan** et **Pix4D** les nuages de points sont plus complets, ce qui nous indique un traitement caché à la fin du processus d'appariement.

TABLEAU 4.5 – Courbes de distribution d'erreur pour les profils horizontaux et verticaux en utilisant les mêmes profils issus de nuage de points laser comme référence.



Dans la FIGURE 4.9, deux profils sont examinés de manière plus détaillée. Dans le profil horizontal, la coupe d'une colonne corinthienne a été réalisée. Visuellement, le nuage de points généré par **Photomodeler** présente le plus de bruit, ce qui correspond à l'analyse d'histogramme sur l'ensemble de la façade déjà évoqué dans le paragraphe précédent. **Micmac** donne un résultat qui suit la tendance circulaire de la colonne avec moins de bruit, mais nous pouvons remarquer que la représentation n'est pas lisse. Par contre, **Photoscan** et dans une certaine mesure aussi **Pix4D** génèrent des profils circulaires quasiment lisses. Cela nous indique une forme d'interpolation et/ou lissage effectué à la fin du processus d'appariement dense. Ce processus implémente plus probablement des contraintes préalablement définies pour certaines primitives géométriques. Ce post-traitement n'était déclaré par les deux logiciels ni dans les fichiers d'aide, ni dans les interfaces graphiques. Il s'agit plus probablement d'un algorithme caché qui sert à « affiner » le résultat final afin d'éviter des nuages de points visuellement indésirables. Cependant, le risque de l'implémentation d'un tel algorithme est la perte de précision lorsque l'objet numérisé ne suit pas exactement la tendance de la contrainte géométrique présumée.

Nous remarquons également que quelques solutions ont eu du mal à détecter des points au niveau de la jonction entre le mur et la colonne. **Micmac**, **Photomodeler** et même le scanner laser (surtout sur le côté droit) n'ont pas réussi à générer de points sur cette zone. Ces solutions laissent ainsi un trou à ce niveau-là. Cependant, il est intéressant de noter que **Photoscan** et **Pix4D** ont réussi à détecter des points et fermer le trou sur ces zones particulièrement difficiles. Le profil de **Photoscan**, de manière erronée, a même prolongé le vecteur du mur à droite vers l'intérieur de la colonne. Cela est encore une indication d'un post-traitement sous forme d'une interpolation de la part de **Photoscan** et **Pix4D**.

Au niveau de la comparaison avec le scanner laser, **Micmac** donne le résultat le plus précis. **Pix4D** et **Photoscan** présentent des exactitudes légèrement plus élevées. **Photomodeler** a une exactitude de l'ordre d'un centimètre, ce qui est normal en présence d'un tel bruit.

Toujours dans la FIGURE 4.9, le profil vertical a été fait sur une partie du mur. Le résultat de **Photoscan** présente une surface continue avec des lissages apparents. Ce phénomène est cependant moins remarqué cette fois-ci sur le profil de **Pix4D** mais peut être toujours observé sur quelques parties du profil. Au niveau de l'exactitude, les valeurs de **Photoscan**, **Pix4D** et **Micmac** sont toutes proches de 7 mm tandis que **Photomodeler** donne une valeur proche de 9 mm.

Comme montré par le TABLEAU 4.5 qui décrit les courbes d'erreur pour chaque logiciel par rapport aux données issues du scanner laser, **Pix4D** affiche plus de bruit que **Photoscan**. De manière similaire au cas précédent du profil horizontal, **Micmac** donne un résultat qui est plutôt précis, mais toujours avec du bruit. **Photomodeler** donne le nuage de points avec le plus de bruit ; l'erreur sur son résultat peut atteindre jusqu'à 1 cm.

### 4.3.3 Résumé

En résumé, ce projet a permis d'aborder quelques problèmes vus en photogrammétrie rapprochée par drone. Quelques analyses ont été également effectuées et plusieurs logiciels ont été testés. Dans le cadre de ce projet, seule la façade centrale du côté de l'Ill a été numérisée. La réduction de la zone du levé nous permet de faire des tests au niveau de l'acquisition et des traitements, avant de lancer le prochain projet sur l'ensemble de l'église St-Pierre-le-Jeune. Le rapport du projet et l'orthophoto de la façade sont consultables dans les ANNEXES D et E.

Au niveau de l'acquisition, les images obliques ont été prises afin d'adapter le principe d'image globale et d'image de détail vu en protocoles existants. En effet, ce dispositif nous permet de numériser des zones qui sont normalement difficiles à modéliser par des techniques terrestres, y compris le scanner laser terrestre. Cinq vols ont été effectués afin de photographier l'objet depuis cinq angles différents. Il s'agit d'un vol perpendiculaire suivi par quatre vols obliques. L'utilisation du même plan de vol nous permet de plus de créer un réseau géométriquement favorable tout en gardant une très grande zone de recouvrement entre les images. Ceci est fait dans le but de faciliter l'étape d'appariement dense.

Sur l'aérotriangulation, nous avons vu l'influence très importante du bruit sur les images. En effet, par rapport à la précision théorique calculée auparavant, ce projet nous donne une valeur de précision effective jusqu'à 15 fois plus élevée. Cela n'implique pas seulement une sous-estimation de la précision théorique, mais aussi un facteur extérieur. Dans ce cas-là, le bruit qui est présent sur les images de l'**Albris** est évident et influence ainsi la précision du pointé manuel des points d'appui. Ce résultat nous montre que malgré la taille de pixel-objet sous-millimétrique de l'**Albris**, la qualité du capteur joue un rôle très important dans la détermination de la précision effective. Cependant, malgré toutes ces imperfections, le projet a réussi à atteindre une précision centimétrique. Ceci est largement suffisant pour beaucoup d'objectifs y compris le besoin de l'Eurométropole pour un modèle 3D de précision inférieure à 5 cm.

Au niveau de l'appariement dense, nous avons vu que le bruit joue encore une fois un rôle important. Finalement, un traitement utilisant un quart de la résolution originale des images d'entrée donne le meilleur résultat. Un traitement avec des images en qualité plus élevée nous donne un nuage de points qui est plus dense, mais avec plus de bruit. La configuration des paramètres optimaux pour chaque projet est ainsi très importante afin de trouver un compromis entre la qualité du résultat et le temps de calcul.

Quelques analyses détaillées à l'aide des mesures de scanner laser comme référence ont également été effectuées. Il est intéressant de noter que le résultat de ces analyses nous permet de distinguer les différents atouts et inconvénients de chaque algorithme d'appariement dense. En effet, les logiciels commerciaux **Photoscan** et **Pix4D** ont tendance à ajouter une étape de post-traitement afin de donner des résultats plus homogènes et ainsi plus agréables pour l'utilisateur. Bien évidemment, dans certains cas ce traitement caché peut être utile, par exemple dans le cas où les images sont bruitées (donc difficulté d'extraire des points) ou bien lorsque l'objet est peu texturé comme c'est le cas pour le Pavillon Joséphine. Cependant, pour des applications à très grande précision, ceci peut générer plus d'erreurs comme nous avons pu le montrer dans la comparaison des profils. **Micmac** et à la rigueur également **Photomodeler** sont a priori plus adaptés pour ce type de travail.

## 4.4 Cas d'étude II : l'église catholique Saint-Pierre-le-Jeune

L'église catholique St-Pierre-le-Jeune (FIGURE 4.10) a été construite pendant l'annexion allemande entre 1889 et 1893. Ses façades sont en grès rose et du style néo-roman. La flèche de cette église a une hauteur de 50 mètres à partir du sol et le diamètre de la coupole est de 19 m. Notons que cette église est différente de l'église protestante St-Pierre-le-Jeune qui se trouve dans la Grande Île de Strasbourg et date du Moyen-Age. Il faudra faire attention également à ne pas confondre cette église avec les deux églises St-Pierre-le-Vieux (catholique et protestante)

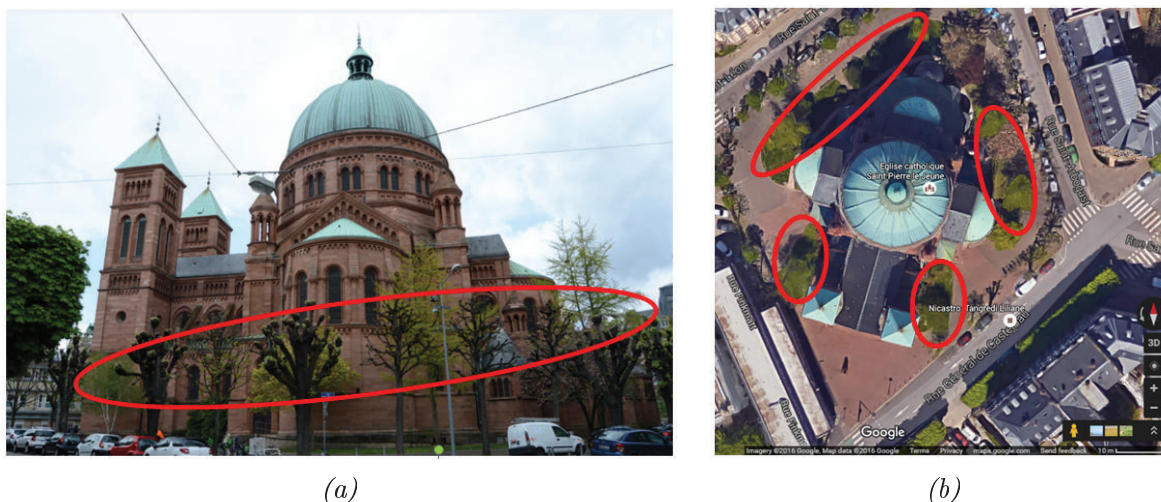


FIGURE 4.10 – L'église catholique St-Pierre-le-Jeune du côté sud-est (a) et la vue nadirale issue de GoogleMaps (b). Les cercles rouges montrent la présence de végétation autour du bâtiment.

qui se trouvent dans le quartier d'Alt Winmarik de Strasbourg. Dans le cadre de ce projet, tout l'ensemble du bâtiment a été numérisé.

Les deux drones ont été utilisés pour ce projet. La façade principale du côté sud-ouest a été photographiée par l'Albris. Le reste du bâtiment a été levé par le Phantom 3. Les images de l'Albris ont été prises depuis une distance approximative de 8 m de la façade soit une taille de pixel-objet de 1,4 mm. En ce qui concerne le Phantom 3, étant donné qu'un dispositif de mesure de distance capteur-objet n'existe pas sur ce type de drone, la distance entre le drone et la façade est plus variable. Nous estimons cette distance entre 10 m et 15 m, soit une taille de pixel-objet théorique de 5 mm en moyenne.

De plus, des images terrestres ont été prises afin de compléter quelques parties du bâtiment qui sont difficiles à lever par le drone (présence d'une végétation importante autour de l'église). L'intégration de différentes sources d'images constitue un enjeu intéressant pour le projet.

Avec plus de 2500 images acquises, une gestion de projet est indispensable. La stratégie de gestion de données et de traitement utilisée dans ce projet est celle déjà évoquée dans la sous-section 3.2.3. Il s'agit de la sous-division du projet en quelques petits blocs afin d'économiser les ressources et le temps de calcul. La fusion des blocs est faite après l'étape de maillage, sachant que dans Photoscan le maillage se fait sur tous les points du nuage de points quelle que soit la qualité de maillage choisie. La notion de « qualité de maillage » dans ce logiciel ne renvoie qu'au taux de décimation des faces post-maillage. Au contraire, la création de texture se fait sur le projet fusionné, ce qui implique une compensation radiométrique sur l'ensemble du modèle 3D.

Au niveau du levé topographique des points d'appui, un réseau de polygonation a été établi autour de l'église. Ce réseau est rattaché au système national (RGF 93 CC48) grâce aux mesures de GNSS cinématique. Le réseau de polygonation a été effectué à la place d'un levé GNSS simple dans l'intérêt d'augmenter la précision des points d'appui. En utilisant une station totale, 43 points ont été levés sur les quatre façades de l'église par point rayonné à partir des stations de polygonation (cf. ANNEXE C). La méthode de point rayonné ne permet pas de calculer la précision de chaque point mesuré à cause du manque de degré de liberté dans le calcul. Notons que la précision du levé par GNSS cinématique est de l'ordre de 2 cm tandis que la fermeture du réseau de polygonation dans notre cas est de 1,2 cm en planimétrie et 2,7 cm en altimétrie.

#### 4.4.1 Résultat et analyse de l'aérotriangulation

Quelques résultats de l'étape de l'aérotriangulation sont montrés dans les TABLEAUX 4.6 et 4.7. Quelques remarques intéressantes peuvent en être tirées. Tout d'abord, sur le bloc de la

façade sud qui a été photographiée par le drone **Albris**, nous avons une précision moyenne de 7 mm entre les deux solutions. **Apero** donne un résultat légèrement plus précis que **Photoscan**, mais dans ce cas-là beaucoup d'erreurs accidentelles peuvent jouer un rôle dans le calcul de précision effective. Étant donné qu'aucune cible n'a été utilisée dans ce projet, le pointé des points d'appui se fait entièrement manuellement. La manière avec laquelle chaque point est mesuré dans chaque logiciel est donc différente. De plus, la méthode de pointé sur les deux logiciels commence avec l'identification d'au moins trois points d'appui dans au moins trois images pour chaque point identifié. Le modèle est ensuite transformé vers le système de coordonnées des points d'appui et les coordonnées-images des autres points d'appui re-projetées. Cela veut dire que la qualité de l'orientation relative effectuée à l'aide des points homologues automatiques est très importante. Tous ces facteurs peuvent être des sources d'erreurs accidentelles.

TABLEAU 4.6 – Résidus du géoréférencement du bloc « *FaçadeSud* » avec les images de l'*Albris* (11 points d'appui).

|                  | Résidu X (m) | Résidu Y(m) | Résidu Z (m) | Résidu 3D (m) |
|------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| <b>Photoscan</b> | 0,005        | 0,004       | 0,004        | <b>0,008</b>  |
| <b>Apero</b>     | 0,003        | 0,003       | 0,003        | <b>0,006</b>  |

TABLEAU 4.7 – Résidus du géoréférencement du bloc « *DJI2* » avec les images du *Phantom 3* (9 points d'appui).

|                  | Résidu X (m) | Résidu Y(m) | Résidu Z (m) | Résidu 3D (m) |
|------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| <b>Photoscan</b> | 0,010        | 0,008       | 0,006        | <b>0,014</b>  |
| <b>Pix4D</b>     | 0,006        | 0,010       | 0,006        | <b>0,013</b>  |

Il est également intéressant de comparer ces résultats de l'aérotriangulation des images de l'**Albris** avec ceux générés par le projet du Palais Rohan. En effet, ils sont comparables dans la mesure où les objets sont des façades dans les deux cas. En comparant avec le TABLEAU 4.2, nous pouvons remarquer que malgré la distance caméra-objet plus grande dans le cas de l'église, la précision de l'aérotriangulation des images de l'**Albris** est similaire à celle obtenue avec le projet du Palais Rohan. La distance caméra-objet dans ce projet est d'environ 8 m, alors que celle du projet du Palais Rohan était de 5 m soit 1,6 fois plus grande. Cela est aussi mis en évidence par la comparaison des tailles de pixel-objet théoriques pour les deux projets. En effet, la valeur de pixel-objet dans ce projet (1,4 mm) est aussi 1,6 fois celle du projet Palais Rohan (0,9 mm), sachant que la longueur focale reste la même. Théoriquement, cela va nous donner une précision plus faible sur le projet de l'église. Cependant, la précision de l'aérotriangulation est du même ordre de grandeur que celle du projet sur le Palais Rohan, voire légèrement meilleure (mais attention à l'influence des erreurs accidentelles). La qualité des images peut être la source de cette anomalie, sachant que les images du Palais Rohan sont plus bruitées a priori à cause de la distance caméra-objet plus courte. En effet, ce phénomène amène la question de l'intérêt de prendre des images à distance très rapprochée avec l'**Albris**. Étant vendu comme un « drone d'inspection à courte distance », il est très important que **Sensefly** aborde ce problème.

Par rapport aux calculs théoriques, la valeur de précision effective du projet de l'**Albris** est très élevée, comme c'était le cas pour le projet sur le Palais Rohan. Plus précisément, le calcul théorique pour le projet de l'**Albris** prévoit une précision de 0,84 mm. La précision effective est donc 9,5 fois plus élevée que la valeur théorique. Par contre, le bloc « *DJI2* » qui utilise les images de **Phantom 3**, donne une précision théorique d'environ 3 mm. La valeur de sa précision effective (14 mm) est en fait seulement 2,8 fois la valeur théorique, sachant que le calcul théorique peut être en réalité légèrement différent à cause de la différence de distances caméra-objet du **Phantom**



3. En prenant une valeur de tolérance de  $2,7 \sigma$ , cette valeur est légèrement sous-estimée. Ceci peut éventuellement valider notre calcul de précision théorique y compris le choix du facteur de sécurité, mais comme toujours en statistiques, la validation doit être faite sur plusieurs jeux de données. En tout cas, les deux drones sont capables d'atteindre une précision centimétrique. **Phantom 3** a largement suivi la prédiction du calcul théorique, alors que la valeur donnée par **l'Albris** était beaucoup plus élevée que prévue.

En ce qui concerne la précision de la fusion des blocs, **Photoscan** donne une valeur d'écart-type de 1,7 cm tandis que **Pix4D** donne la valeur de 1,9 cm (cf. ANNEXE D). Il s'agit de la précision de la transformation de similitude spatiale réalisée sur tous les blocs afin de les rattacher au système commun des points d'appui. Notons qu'afin d'atteindre une telle précision, quelques observations de points d'appui sur les trois types d'images de sources respectives (**Albris**, **Phantom 3** et appareil photo terrestre) doivent être supprimées.

#### 4.4.2 Résultat et analyse de l'appariement dense

L'appariement dense a été effectué dans **Photoscan** et **Pix4D**. **Micmac** a été testé seulement pour la façade principale. Dans le cas de **Photoscan**, la notion de « *chunks* » nous a permis de sous-diviser le projet en plusieurs blocs comme prévu dans la stratégie de traitement. Les blocs ont été orientés, géoréférencés, densifiés et maillés séparément. Puis, le projet complet a été créé en fusionnant les blocs individuels grâce au système de coordonnées commun. Enfin, la texture complète a été générée et compensée radiométriquement sur l'ensemble du modèle 3D maillé en utilisant toutes les images. La fonction de masquage d'image sur **Photoscan** nous permet de plus d'éliminer les parties indésirables comme la végétation, produisant ainsi une texture plus propre. Sans cette fonction de masquage, la végétation serait projetée sur la texture générée et produirait ainsi des taches vertes.

Sur **Pix4D**, une telle stratégie n'est pas possible à implémenter. **Pix4D** supporte une sous-division du projet, mais la fusion doit être faite avant la densification. La densification de 2500 images en même temps est très compliquée au niveau des ressources et du temps de calcul. De plus, la génération et la compensation radiométrique de la texture dans **Pix4D** se font en même temps que la densification et le maillage contrairement à **Photoscan**, où ces étapes sont distinguées. Aussi, **Pix4D** ne peut pas importer un modèle maillé extérieur pour la génération de texture. Tous ces problèmes impliquent que chaque sous-projet dans **Pix4D** doit être traité jusqu'à la fin (c.à.d la création de modèle maillé texturé) séparément. Une fusion peut être éventuellement effectuée sur un logiciel extérieur (**CloudCompare**, **3DReshaper**) mais dans ce cas-là aucune compensation radiométrique n'est calculée sur la texture du modèle final.

Finalement, nous avons dû effectuer la densification du projet de **Pix4D** sur l'ensemble du projet en modifiant les paramètres. Ceci implique la génération d'un nuage qui est beaucoup moins dense que celui de **Photoscan** et ainsi, une perte de détail dans une certaine mesure. De plus, l'inflexibilité de la fonction de masquage dans **Pix4D** rend la texture finale moins propre avec des taches vertes provenant de la végétation.

En ce qui concerne les différents jeux de données, **l'Albris** a généré un nuage avec plus de détails que celui issu de **Phantom 3**. Ceci vient bien entendu du fait que la taille de l'image de **l'Albris** (38 MP) est plus grande que celle de **Phantom 3** (12 MP); ainsi, les logiciels peuvent trouver plus de points candidats sur les images de **l'Albris**. Afin d'essayer d'homogénéiser ce problème de la résolution d'images, le projet de **l'Albris** a été traité avec  $N_p$  égal à 0,25 (« *Medium* » dans **Photoscan** et « *Quarter Resolution* » dans **Pix4D**) tandis que les images du **Phantom 3** ont été traitées avec une valeur de  $N_p$  de 0,5 (« *High* » dans **Photoscan** et « *Half Resolution* » dans **Pix4D**). Le résultat de cette densification (séparément pour chaque bloc) et le nuage de points fusionné avant et après la compensation radiométrique sont affichés dans la FIGURE 4.11.

Afin de valider l'exactitude du résultat d'appariement dense, un levé lasergrammétrique a été également effectué sur certaines parties de l'église. Le scanner laser utilisé est le même que celui



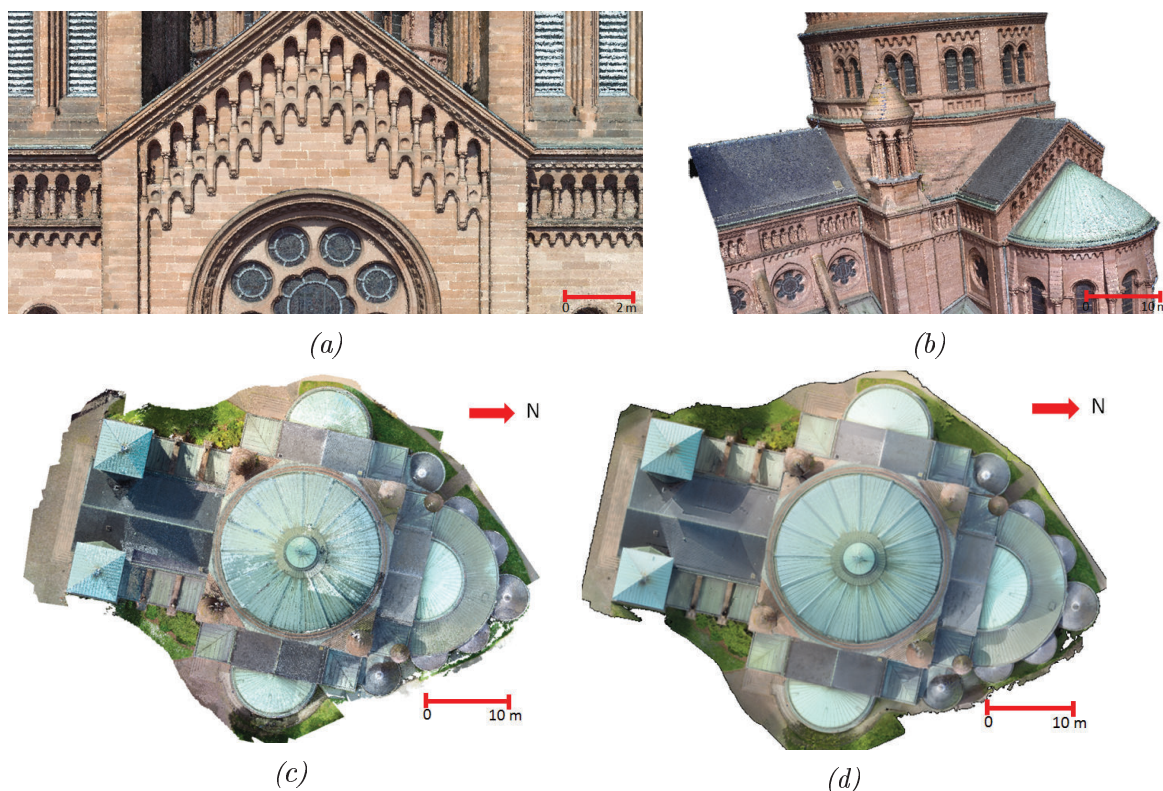


FIGURE 4.11 – Résultats de l'étape de densification pour le projet utilisant les images de l'Albris (a) et Phantom 3 (b). Le nuage de points fusionné est affiché dans (c) tandis que la texture générée avec la compensation radiométrique dans (d).

utilisé pour scanner le Palais Rohan, le Faro Focus 3D X330. Cinq stations ont été effectuées sur l'église dont quatre pour la façade principale du côté sud-ouest et une pour la façade sud-est (cf. FIGURE 4.12). Comme dans le cas du Palais Rohan, la consolidation a été faite à l'aide des points d'appui photogrammétriques sur les façades. De plus quelques sphères ont été également posées autour des deux façades numérisées afin de faciliter l'étape de consolidation. Les deux façades sont géoréférencées séparément, car la consolidation des deux n'était pas possible à cause du manque de zone de recouvrement. La précision de géoréférencement du nuage de points consolidé de la façade principale est de 8 mm tandis que le nuage de points de la façade sud-est donne une valeur de 11 mm. Celles-ci sont largement suffisantes pour valider les résultats de l'Albris et du Phantom 3 respectivement.

À partir du nuage de points de la façade principale, deux analyses sont tirées dont une sur l'ensemble de la façade et l'autre sur le tympan central. De même, sur le nuage de points de la façade sud-est, une analyse sur la porte avec son tympan et une autre sur la gargouille de Saint-Mathieu ont été faites (cf. encore FIGURE 4.12). Le choix de ces quatre cas était basé sur l'objectif d'évaluer une zone globale et aussi d'analyser des objets d'intérêt (tympan, gargouille, etc.). Comme pour l'analyse sur le Palais Rohan, les nuages de points issus du scanner laser sont maillés (méthode de Poisson avec niveau d'octree de 13) afin de donner des surfaces de référence. Les nuages de points générés par la photogrammétrie sont ensuite comparés à ces modèles maillés. Les résultats de ces comparaisons sont affichés dans les FIGURES 4.13, 4.14, 4.15 et 4.16. De plus, les paramètres de densification dans chaque cas pour tous les logiciels utilisés sont affichés dans les TABLEAUX 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11. Ces paramètres sont choisis de sorte à garder la même qualité de densification sur tous les logiciels (surtout au niveau des valeurs de  $N_p$  et  $T_a$ ).

Dans le cas de la façade principale photographiée par l'Albris (FIGURE 4.13 et TABLEAU 4.8), la précision de tous les nuages de points est de l'ordre de 1,5 cm. Les précisions sont respectivement de 1,4 cm pour Photoscan et Pix4D et 1,7 cm pour Micmac, sans doute à cause

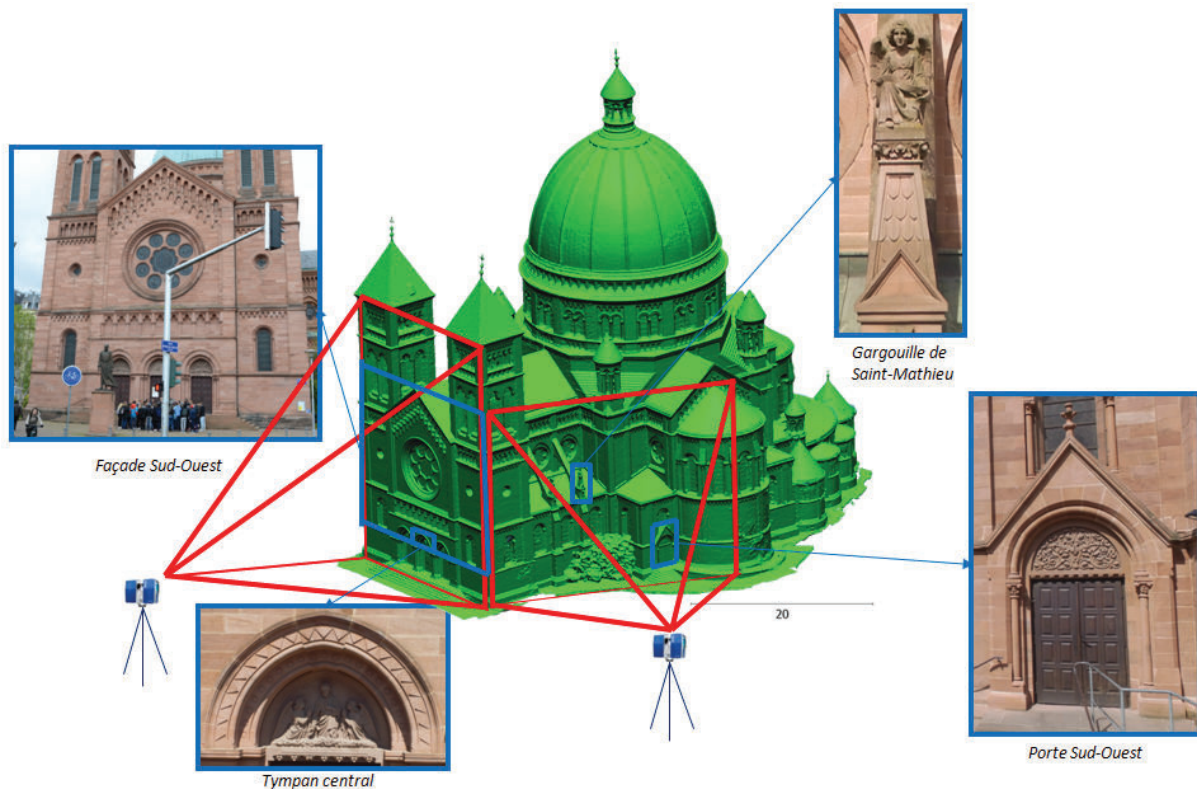


FIGURE 4.12 – Schéma d'acquisition des données scanner laser et les quatre cas analysés sur les façades sud-est et sud-ouest.

des erreurs importantes sur la partie basse de son nuage de points. En effet, dans le résultat de Micmac, des erreurs qui ressemblent à un systématisme sont observables sur cette partie basse au niveau des portes et tympans. Un facteur qui peut influencer cette erreur est la qualité de l'orientation des caméras faite dans ce cas-là par **Apero**. À noter que toutes ces valeurs de précision sont au-dessous de  $R_{théorique}$  qui a une valeur de 2,3 cm pour ce bloc. L'erreur moyenne peut nous donner une idée sur la présence du systématisme global. Dans ce cas-là, tous les algorithmes d'appariement dense donnent une valeur de l'ordre de 0 à 5 mm.

Afin d'évaluer le résultat de manière plus détaillée, les nuages de points ont été coupés au niveau du tympan central, au-dessus de la porte principale de l'église (FIGURE 4.14 et TABLEAU 4.9). Ici, nous pouvons nous concentrer sur un objet d'intérêt. Comme évoqué précédemment, il existe un systématisme au niveau du nuage de points issu de Micmac. Ce systématisme va jusqu'à 2 cm ; l'orientation externe sur **Apero** semble être problématique. **Photoscan** et **Pix4D** sont encore une fois plutôt similaires dans ce cas-là, avec une erreur moyenne autour de 1 cm. Ceci provient probablement du manque de points sur le nuage de points de scanner laser en partie haute du tympan. Au niveau de l'écart-type, toutes les solutions donnent une valeur de l'ordre de 1 cm.

La FIGURE 4.15 et le TABLEAU 4.10 montrent les paramètres de densification et l'analyse du nuage de points généré par les images du **Phantom 3** par rapport aux données de scanner laser. Dans le cas du **Phantom 3**, seuls **Photoscan** et **Pix4D** ont été utilisés pour le traitement. L'analyse montre un systématisme sur le résultat des deux logiciels. **Photoscan** a une erreur moyenne de 1,4 cm alors que celle de **Pix4D** va jusqu'à 1,9 cm. Visuellement, ceci est également observable sur les deux nuages de points, avec une erreur supérieure pour **Pix4D**. Cependant, ces systématismes peuvent être dus à la qualité du nuage de points de référence, sachant qu'une seule station a été effectuée pour cette façade. De plus, la porte se trouve à l'extrémité du nuage de points scannés. Au niveau de la précision, les deux résultats sont identiques avec une valeur d'écart-type de 1,4 cm. Il est intéressant à noter que ces valeurs correspondent à la précision de l'aérotriangulation. De plus, la valeur de  $R_{théorique}$  pour le projet de **Phantom 3** se situe entre 2,5 cm et 3,7 cm. Pour

ces raisons, les résultats tombent bien dans les valeurs attendues par le calcul théorique.

Comme dans le cas de la façade principale, un autre objet d'intérêt sur le nuage de points généré par le **Phantom 3** a été également analysé. Cette fois-ci, une gargouille a été choisie. Il s'agit de la gargouille de Saint-Mathieu qui se trouve sur la façade sud-ouest, en dessous d'un arc-boutant (FIGURE 4.16 et TABLEAU 4.11). Cette gargouille se trouve directement devant la station du scanner laser. L'influence de cette position est observable sur les valeurs d'erreur moyenne. **Photoscan** et **Pix4D** donnent des valeurs autour de 0, ce qui montre que le systématisme au niveau de la gargouille est minimal. Par contre, il existe des valeurs de précision plutôt élevées sur les deux algorithmes. **Pix4D** donne une meilleure précision avec une valeur de 2 cm contre 2,6 cm pour **Photoscan**. Ceci est toujours dans l'intervalle de  $R_{theorique}$  calculé de 2,5 cm à 3,7 cm. Néanmoins, nous pouvons expliquer cette diminution de précision par le manque des points de référence sur la partie située derrière la statue. De plus, la présence d'une forme plus complexe à modéliser a sans doute limité la précision dans ce cas particulier.

#### 4.4.3 Résumé

En résumé, le projet sur l'église St-Pierre-le-Jeune a été effectué sur l'ensemble du bâtiment en combinant plusieurs capteurs. Deux drones ont été utilisés, l'**Albris** et le **Phantom 3**. Des images terrestres ont également été prises. L'acquisition de données a pris une journée pour le levé topographique, suivi par 3 demi-journées pour l'acquisition des images. Le traitement, comme toujours dans les projets de photogrammétrie, a pris plus de temps. Le temps de traitement était environ de deux semaines. À l'avenir, nous estimons pouvoir finir un tel projet avec plus de 2500 images en 10 à 14 jours. Les orthophotos des quatre façades de l'église sont consultables dans l'ANNEXE E.

Au niveau du levé topographique, un soin particulier a été pris de ne pas le faire seulement par le GNSS cinématique. Avec une précision de quelques centimètres, le GNSS cinématique n'est pas suffisant pour un grand bâtiment comme l'église St-Pierre-le-Jeune. Nous avons créé un réseau de polygonation autour de l'église. Les points d'appui photogrammétriques sont levés à partir de ces stations de polygonation.

Le résultat de l'aérottriangulation nous montre que la netteté des images est très importante dans un projet photogrammétrique, notamment pour des objectifs d'inspection. En effet, nous avons trouvé que la précision de l'aérottriangulation pour les images de l'**Albris** dans ce projet était similaire à celle du projet du Palais Rohan. Pourtant, pour l'église, la distance caméra-objet était deux fois supérieure à celle du projet du Palais Rohan. Pour un drone qui est dédié à l'inspection à courte distance, ce problème de netteté d'image est donc primordial, surtout en l'absence de cibles automatiques. Par contre, le résultat de l'aérottriangulation du **Phantom 3** suit mieux les calculs théoriques. Nous pouvons conclure que, à ce moment-là, le **Phantom 3** est un drone plus stable que l'**Albris**, même si l'**Albris** offre plus d'options lors de l'acquisition. Une amélioration au niveau du capteur pour l'**Albris** est souhaitable afin de pouvoir optimiser son utilisation en tant que drone d'inspection.

Le résultat des analyses des nuages de points issus de la photogrammétrie nous donne une idée sur la précision de cette technique. L'exactitude des nuages de points lorsqu'ils sont comparés au nuage de points issu de scanner laser nous donne des valeurs qui sont de l'ordre de la résolution théorique. Le systématisme rencontré dans certains cas vient plus probablement de la qualité de l'orientation relative ou de la qualité de nuage de points de référence. En effet, avec cette technique, nous pouvons avoir une précision centimétrique sur les résultats. Cette précision est réalisable par les deux drones utilisés. Bien évidemment, comme dans tout projet photogrammétrique, la précision est toujours fonction de la taille de pixel-objet. Il est donc impératif d'effectuer le calcul théorique du pixel-objet avant de lancer un projet de photogrammétrie, y compris ceux utilisant le drone.

Au niveau de la gestion du projet, la stratégie implémentée a réussi à décomposer les données en plusieurs blocs dans le cas de l'église St-Pierre-le-Jeune. Cette décomposition nous permet

de traiter les blocs séparément. Ainsi, l'étape de traitement peut être effectuée en parallèle avec l'étape d'acquisition. De plus, le traitement de petits blocs nous permet d'économiser la mémoire de l'ordinateur et réduire le temps de calcul. Cette stratégie de traitement était particulièrement adaptée pour le logiciel **Photoscan**. **Pix4D** est limité à ce niveau, avec l'impossibilité de fusionner les sous-projets après la densification. Par conséquent, la seule stratégie envisageable actuellement pour traiter un projet avec un grand nombre d'images est de traiter toutes les images dans le même temps. Dans ce cas-là, **Photoscan** est mieux adapté pour des grands projets, mais ceci ne veut pas dire qu'au niveau de qualité **Pix4D** soit inférieur, comme montré par le résultat d'analyse.

Enfin, la stratégie de traitement que nous avons implémentée dans **Photoscan** permet la modélisation de certaines parties de l'objet. De plus, **Photoscan** permet aussi de faire un masquage 3D (**Pix4D** a également une fonction de masquage 3D, mais basée seulement sur la planimétrie). Cette fonction, avec la possibilité de définir un masque en 3D et le rotater dans toutes les directions, nous permet de dériver encore des sous-projets depuis nos blocs. Ceci peut être utilisé pour modéliser des objets d'intérêt de manière plus détaillée, en utilisant seulement les images où figure l'objet. Cette possibilité de traiter les images plusieurs fois à différentes qualités en adaptant les paramètres du calcul des nuages de points dense nous mène à la notion de *Level of Detail* (LoD) ou niveau de détail. En effet, il est parfaitement envisageable de faire un projet multi-LoD en utilisant le même jeu de données d'images par l'utilisation de cette méthode. Par exemple, la façade globale peut être traitée avec une qualité de densification plus faible afin de généraliser certains éléments qui ne sont pas importants, tandis que des objets d'intérêt comme des tympans, des gargouilles, des statues, etc. peuvent être modélisés avec une qualité de densification plus élevée afin de garder ses détails.

TABLEAU 4.8 – Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la façade sud-ouest.

|                        | Photoscan                                                             | Pix4D                                                   | Micmac                                                                                  |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Erreur moyenne</b>  | 0,5 cm                                                                | 0,0 cm                                                  | 0,4 cm                                                                                  |
| <b>Ecart-type</b>      | 1,4 cm                                                                | 1,4 cm                                                  | 1,7 cm                                                                                  |
| <b>Mode pré-défini</b> | Medium                                                                | Quarter Resolution                                      | C3DC MicMac                                                                             |
| <b>N<sub>p</sub></b>   | 0,25                                                                  | 0,25                                                    | 0,25                                                                                    |
| <b>T<sub>s</sub></b>   | Inconnu                                                               | 4 (« Optimal »)                                         | 4                                                                                       |
| <b>Filtrage</b>        | Post-appariement,<br>probablement par coplanarité<br>(« Aggressive ») | Post-appariement,<br>par coplanarité, 3 faisceaux/point | Pre-appariement,<br>basé sur les meilleurs couplages des<br>images maîtresses et filles |

TABLEAU 4.9 – Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour le tympan central.

|                        | Photoscan                                                             | Pix4D                                                   | Micmac                                                                                  |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Erreur moyenne</b>  | 1,1 cm                                                                | 0,9 cm                                                  | 2,2 cm                                                                                  |
| <b>Ecart-type</b>      | 1,2 cm                                                                | 1,5 cm                                                  | 1,5 cm                                                                                  |
| <b>Mode pré-défini</b> | Medium                                                                | Quarter Resolution                                      | C3DC MicMac                                                                             |
| <b>N<sub>p</sub></b>   | 0,25                                                                  | 0,25                                                    | 0,25                                                                                    |
| <b>T<sub>s</sub></b>   | Inconnu                                                               | 4 (« Optimal »)                                         | 4                                                                                       |
| <b>Filtrage</b>        | Post-appariement,<br>probablement par coplanarité<br>(« Aggressive ») | Post-appariement,<br>par coplanarité, 3 faisceaux/point | Pre-appariement,<br>basé sur les meilleurs couplages des<br>images maîtresses et filles |

TABLEAU 4.10 – Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la porte sud-est.

|                        | Photoscan                                                             | Pix4D                                                   |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Erreur moyenne</b>  | 1,4 cm                                                                | 1,9 cm                                                  |
| <b>Ecart-type</b>      | 1,4 cm                                                                | 1,4 cm                                                  |
| <b>Mode pré-défini</b> | High                                                                  | Half Resolution                                         |
| <b>N<sub>p</sub></b>   | 0,5                                                                   | 0,5                                                     |
| <b>T<sub>s</sub></b>   | Inconnu                                                               | 4 (« Optimal »)                                         |
| <b>Filtrage</b>        | Post-appariement,<br>probablement par coplanarité<br>(« Aggressive ») | Post-appariement,<br>par coplanarité, 3 faisceaux/point |

TABLEAU 4.11 – Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la gargouille Saint Mathieu.

|                        | Photoscan                                                             | Pix4D                                                   |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>Erreur moyenne</b>  | -0,7 cm                                                               | 0,0 cm                                                  |
| <b>Ecart-type</b>      | 2,6 cm                                                                | 2,0 cm                                                  |
| <b>Mode pré-défini</b> | High                                                                  | Half Resolution                                         |
| <b>N<sub>p</sub></b>   | 0,5                                                                   | 0,5                                                     |
| <b>T<sub>s</sub></b>   | Inconnu                                                               | 4 (« Optimal »)                                         |
| <b>Filtrage</b>        | Post-appariement,<br>probablement par coplanarité<br>(« Aggressive ») | Post-appariement,<br>par coplanarité, 3 faisceaux/point |



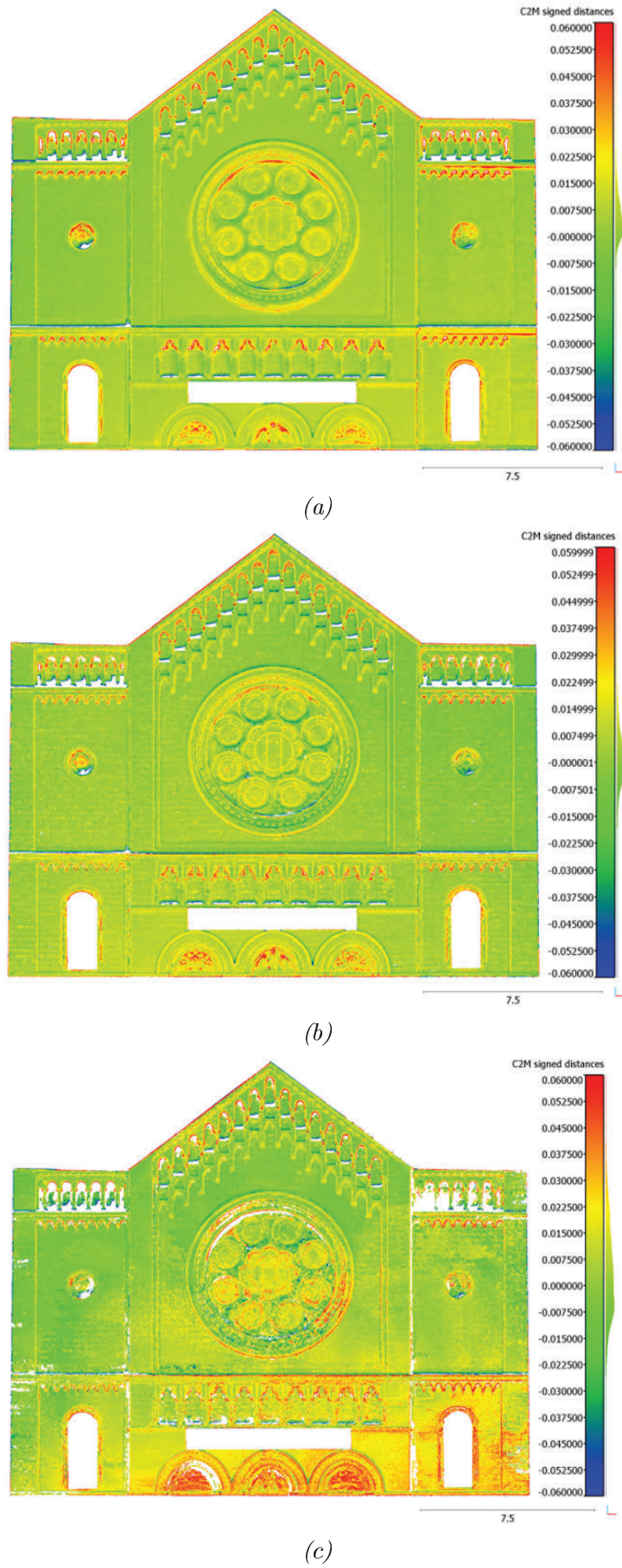


FIGURE 4.13 – Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a), Pix4D (b) et Micmac (c) pour la façade sud-ouest.

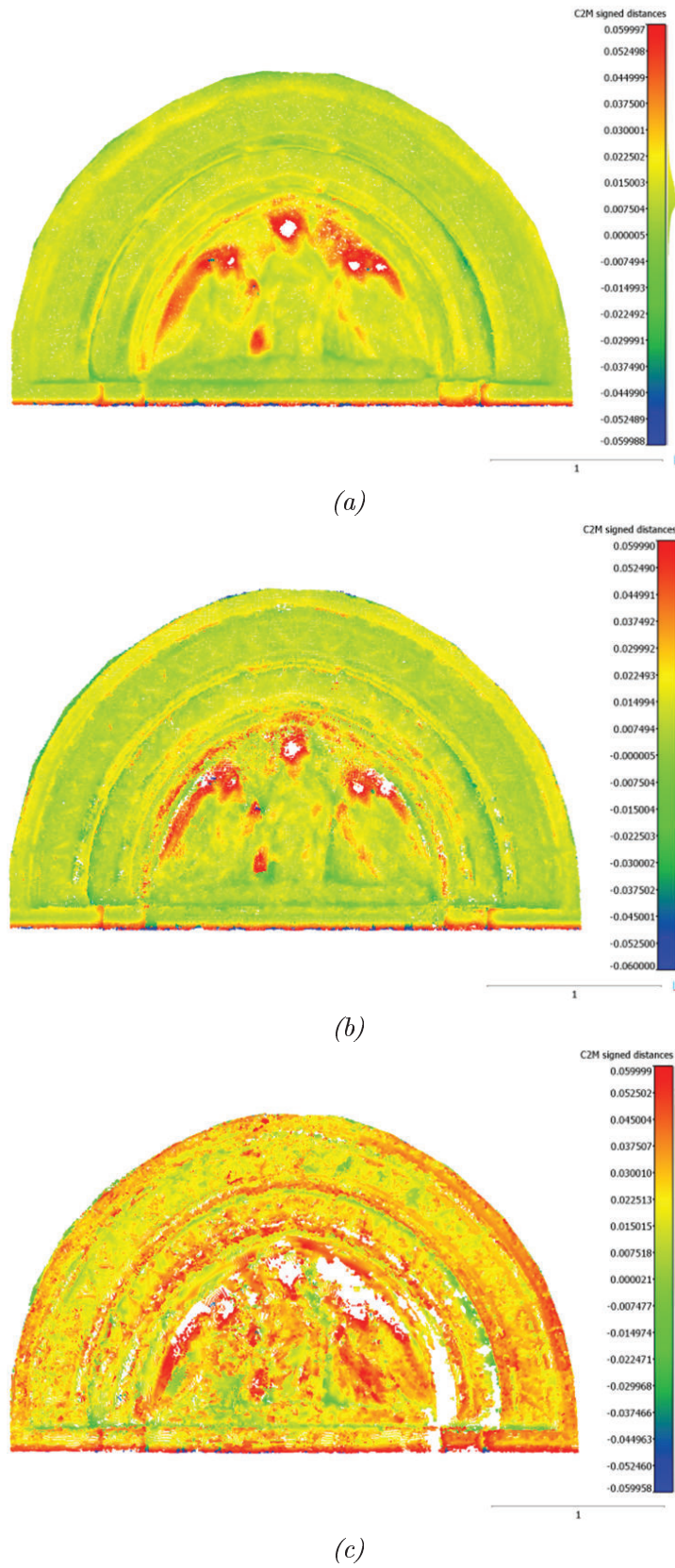


FIGURE 4.14 – Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a), Pix4D (b) et Micmac (c) pour le tympan central de la façade sud-ouest.



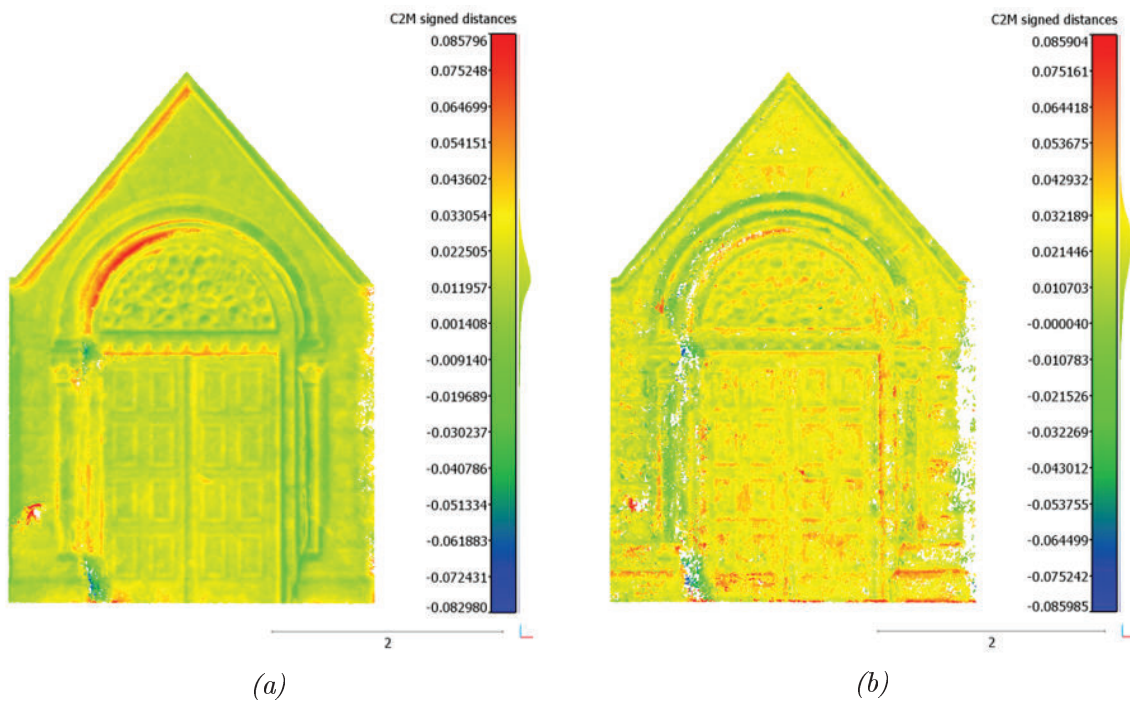


FIGURE 4.15 – Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a) et Pix4D (b) pour la porte sud-est.

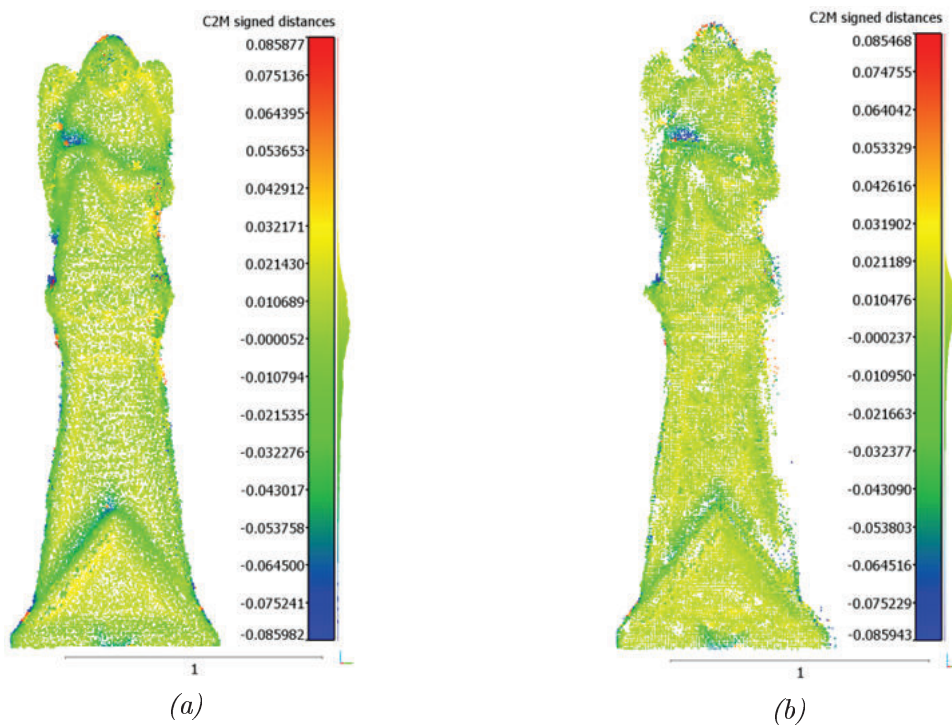


FIGURE 4.16 – Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a) et Pix4D (b) pour la gargouille de Saint Mathieu.

## Chapitre 5

# Conclusions et perspectives

Les quelques expérimentations réalisées sur la calibration montrent que les paramètres de calibration donnés par le fournisseur du drone ne sont pas forcément stables. En effet, la calibration tient compte des variations de la géométrie ainsi que de la stabilité du capteur. Il existe une anomalie sur la courbe de distorsion radiale notamment pour le drone du type DJI Phantom 3. D'après la littérature, cela peut être causé par la qualité du capteur, qui est dans ce cas-là très petit. Avec ces types de capteurs, la valeur de  $K_3$  est souvent fortement corrélée à celle de  $K_2$  ; il faudrait donc supprimer ce paramètre. Pour le Phantom 3, la valeur de  $K_2$  peut être également enlevée pour les mêmes raisons. Quelques expérimentations sur la calibration montrent également que les paramètres de calibration donnés par le fournisseur ne sont pas forcément justes, d'où l'intérêt d'effectuer la calibration avant de lancer une mission.

Au niveau de l'acquisition des images, l'importance du taux de recouvrement et de la géométrie est évidente dans les deux cas rencontrés. Afin de pouvoir générer un nuage de points bien dense, un taux de recouvrement important (jusqu'à 80 %) peut être envisagé. En outre, afin d'assurer une qualité élevée du calcul d'aérotriangulation, une géométrie basée sur une combinaison de vues perpendiculaires et obliques est souhaitée. En effet, ces deux problématiques sont abordées par les protocoles existants par l'implémentation des images globales et des images du détail. Dans le cas de ce projet utilisant le drone, l'utilisation des images obliques a bien permis d'amener cette démarche à des résultats satisfaisants. Sur le terrain, l'expérience montre que dans un milieu urbain, il ne faut pas négliger les signalisations (feuille d'autorisation, gilet jaune, etc.) pour expliquer clairement au public les conditions et les objectifs du vol de drone.

Afin de donner un contexte à la précision obtenue, un calcul théorique sur la précision de l'aérotriangulation et de l'appariement dense a été effectué. Pour l'Albris, la précision de l'aérotriangulation obtenue est beaucoup plus faible que prévu alors que pour le Phantom 3 le calcul théorique est légèrement sous-estimé. En effet, au niveau de l'aérotriangulation nous avons conclu que la qualité de l'image joue un rôle très important dans la détermination de la précision d'un projet photogrammétrique. Comme vu dans le cas de l'Albris, un bruit important sur les images peut diminuer dix à quinze fois la précision.

L'appariement dense des images reste un problème particulier à traiter dans un projet de photogrammétrie rapprochée, d'autant plus en présence de bruit important sur les images. La texture de l'objet joue également un rôle important, notamment pour les façades peintes comme dans le cas du Pavillon Joséphine. Ainsi, une stratégie particulière devrait être envisagée pour aborder ces questions en fonction des cas particuliers. Dans le cas du Palais Rohan, un appariement utilisant des images à résolution plus basse peut parfois générer un nuage plus complet, même si celui-ci n'est pas forcément précis. Pour le projet de l'église St-Pierre-le-Jeune nous avons vu que la qualité de densification réalisable est très liée à la puissance de calcul et à la mémoire interne de la machine à notre disposition. La gestion des données et leur traitement devient très importante surtout en présence d'un grand nombre d'images.

Au niveau des drones utilisés, nous pouvons tirer quelques conclusions de nos expériences :

1. L'**Albris** est intéressant du point de vue de sa conception pour l'inspection à courte distance. Avec tous les capteurs installés sur la plateforme, le drone a le potentiel d'être un outil d'inspection très puissant, particulièrement grâce à la fonction de mesure de distance et à la capacité de fixer une distance par rapport à l'objet à photographier. Dans le domaine de la photogrammétrie rapprochée, cette fonction peut être très utile afin de garder la taille de pixel-objet souhaitée sur les images prises. Cependant, malgré tous ces atouts, le drone n'est clairement pas prêt pour l'utilisation courante. La qualité du capteur doit être augmentée significativement afin de pouvoir enregistrer moins de bruit et ainsi plus d'information. D'après nos observations, une image prise depuis une distance de 5 m et une autre depuis 8 m donnent des précisions similaires sur le résultat de l'aérotriangulation. Le bruit constaté nous empêche de lancer une densification de qualité plus élevée. Au niveau de la navigation de vol, l'**Albris** a toujours des problèmes malgré tous ces capteurs. En effet, plusieurs incidents techniques sont survenus pendant l'acquisition des images.
2. Le **Phantom 3** n'est pas spécialement ciblé pour la modélisation 3D et encore moins pour l'inspection à courte distance. Ceci est évident au niveau de la taille d'image et de la qualité de la calibration. Il n'est pas équipé de capteurs additionnels pour évaluer la configuration de son environnement, mais finalement il a été montré que ce drone est plutôt stable. Un modèle 3D d'une précision centimétrique est également réalisable avec le **Phantom 3**. Les images réalisées sont même plus nettes que celle issues de l'**Albris** et nous ont permis d'effectuer une densification de qualité plus élevée.

En ce qui concerne les logiciels utilisés, chaque logiciel a ses propres points forts et points faibles. En effet, finalement le choix du logiciel doit tenir compte de la nature du projet (nombre d'images, type de photogrammétrie soit aérienne classique soit rapprochée, sous-division de projets, gestion des masques, etc.). Nous en avons déduit quelques appréciations sur les atouts et inconvénients des logiciels testés :

1. *Pix4D* : il a été montré que le logiciel **Pix4D** est capable de générer des nuages de points de grande qualité avec une grande précision. En effet, **Pix4D** figure parmi les algorithmes qui donnent les résultats les plus précis. Ses résultats sont également très homogènes au niveau de la densité. Nous avons discuté d'un possible post-traitement appliqué par **Pix4D** après l'étape de l'appariement dense. Au niveau de l'interface graphique, **Pix4D** est également très facile à comprendre et à utiliser. Cependant, la chaîne de traitements dans ce logiciel est trop simplifiée, ce qui est un grand inconvénient lorsque l'utilisateur veut paramétrer le processus. **Pix4D** est également moins adapté pour des images terrestres qui travaillent normalement dans un système de coordonnées arbitraire. La gestion de projet dans **Pix4D** est aussi limitée, avec la fusion de sous-projets qui se fait obligatoirement avant la densification.
2. *Photoscan* : ce logiciel est plutôt similaire à **Pix4D** au niveau des résultats générés. Comme **Pix4D**, **Photoscan** donne des précisions similaires, des nuages de points aussi homogènes et il y a également la possibilité d'un post-traitement de nuage de points. Cependant, au niveau de la chaîne de traitements, **Photoscan** est plus élaboré que **Pix4D**. Le choix des paramètres est également limité, voire même inférieur à celui de **Pix4D**, mais la distinction de différentes étapes de traitement, finalement, le rend plus flexible. De plus, la notion de « *chunk* » nous permet de diviser le projet sans problème. L'inconvénient principal de **Photoscan** est la gestion de sa mémoire. En effet, nous avons rencontré quelques fois le cas où le logiciel n'arrive pas à finir sa tâche à cause du manque de mémoire après des heures de calcul.
3. *Micmac* : étant un logiciel libre, le plus grand inconvénient de **Micmac** est le manque d'une interface graphique. En effet, l'utilisateur doit apprendre les commandes pour lancer le logiciel. Cependant, **Micmac** est le logiciel avec le plus de paramètres réglables. Ceci nous permet d'affiner nos résultats tout en gardant la précision. De plus, la sous-division du

projet en blocs est naturelle sous **Micmac**, puisqu'il travaille dans des dossiers. Au niveau de la précision, **Micmac** a donné des résultats remarquables au niveau de l'aérottriangulation et de la densification. Cependant, nous avons vu également que le nuage de points issu de **Micmac** est souvent plus bruité comparé à ceux de **Pix4D** et **Photoscan**. Le forum internet constitue une importante source de discussion et d'information sur l'utilisation de ce logiciel libre.

4. *Photomodeler* : ce logiciel est remarqué pour les détails et les paramètres que nous pouvons régler dans chaque étape de traitement bien qu'il s'agisse d'un logiciel commercial. **Photomodeler** est avant tout un logiciel de photogrammétrie. L'implémentation de SfM dans ses fonctions est plutôt limitée. L'appui sur la photogrammétrie nous permet d'affiner les mesures de pointé de manière beaucoup plus facile que **Micmac** et plus précise que **Pix4D** et **Photoscan**. De plus, sa fonction de calibration donne des statistiques importantes que nous avons déjà utilisées pour tirer quelques analyses. Cependant, au niveau de la densification, **Photoscan** donne le résultat avec la précision la plus faible, sachant que ce logiciel a été uniquement testé sur le Palais Rohan. Ceci peut être lié à son algorithme d'appariement dense.
5. *SURE et VisualSFM/PMVS* : à cause de la limitation de temps, nous n'avons pas réussi de tester ces deux logiciels ni pour le projet du Palais Rohan ni pour celui de l'église St-Pierre-le-Jeune. Cependant, nous pouvons déjà tirer quelques remarques du projet du Pavillon Joséphine. **SURE** avec son implémentation de SGM est un logiciel de densification très puissant. Ses résultats sont similaires à ceux de **Photoscan**, voire meilleurs. Plusieurs paramètres de densification peuvent être également réglés, ce qui lui donne un atout important par rapport aux autres logiciels commerciaux. **VisualSFM** et son module d'appariement dense **PMVS** sont des solutions libres. **VisualSFM** est évidemment ciblé pour la communauté de la vision par ordinateur avec une priorité sur la vitesse de reconstruction plutôt que la géométrie. **PMVS** présente une méthode d'appariement différente basée sur l'objet. Il est peut-être intéressant de le comparer avec les autres solutions basées sur le SGM au niveau de la précision géométrique.

Ce projet de fin d'études nous a permis d'expérimenter plusieurs méthodes et solutions pour la modélisation 3D des bâtiments remarquables. L'utilisation de drones confère un aspect très intéressant à ce projet, surtout afin d'évaluer ses résultats. Le drone est une solution tout à fait adaptée pour le levé des bâtiments historiques puisqu'il permet de photographier l'objet depuis des points de vue qui ne sont normalement pas possibles. Cependant, plusieurs facteurs restent importants à retenir dans un projet de photogrammétrie par drone, y compris la planification du projet, le calcul théorique de la taille de pixel-objet souhaitée et des précisions éventuelles, le choix et la calibration du capteur, la manière de voler, la gestion de projet, etc.

Lors de ce projet, nous avons effectué toute une série d'analyses sur les bâtiments historiques de la ville de Strasbourg obtenant ainsi de nombreuses informations sur ces bâtiments. Le CIPA<sup>1</sup> explique qu'une telle documentation est très importante, car un monument peut être restauré et sauvegardé seulement s'il est bien documenté et mesuré de façon répétitive et que ces informations sont traitées à l'aide d'un système organisé et structuré.

---

1. <http://cipa.icomos.org/> consulté le 5 août 2016



# Table des figures

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Les différents aspects et enjeux du projet de fin d'études. . . . .                                                                                                                                                                                            | 10 |
| 2.1 | Techniques pour la géomatique, capteurs et plateformes pour le levé 3D en fonction de la dimension du scène et sa complexité, modifié depuis REMONDINO (2014). . .                                                                                             | 12 |
| 2.2 | Résumé des scénarios pour une mission de drone selon la législation en cours et des changements par rapport aux réglementations de 2012 ( <a href="http://www.federation-drone.org/">http://www.federation-drone.org/</a> consulté le 6 juillet 2016). . . . . | 16 |
| 2.3 | Illustration de la condition de colinéarité. . . . .                                                                                                                                                                                                           | 18 |
| 2.4 | Illustration de la condition de coplanarité. . . . .                                                                                                                                                                                                           | 18 |
| 2.5 | Illustration du relèvement spatial, inspiré de LUHMANN et al. (2014). . . . .                                                                                                                                                                                  | 20 |
| 2.6 | Illustration de l'orientation externe dont l'orientation absolue, inspiré de LUHMANN et al. (2014). . . . .                                                                                                                                                    | 21 |
| 2.7 | Classification des méthodes d'appariement d'images, résumée à partir de SZELISKI (2010) et REMONDINO et al. (2013, 2014). . . . .                                                                                                                              | 22 |
| 2.8 | Les protocoles existants pour la prise des images pour la documentation du patrimoine par la photogrammétrie. . . . .                                                                                                                                          | 23 |
| 3.1 | Caractéristiques principales des drones utilisés dans ce projet. . . . .                                                                                                                                                                                       | 34 |
| 3.2 | Caractéristiques principales des instruments terrestres employés. . . . .                                                                                                                                                                                      | 35 |
| 3.3 | Le site de calibration (a) et la configuration des prises de vue (b). . . . .                                                                                                                                                                                  | 36 |
| 3.4 | Illustration des cinq vols y compris le vol perpendiculaire et les quatre vols obliques. Notons que le plan de vol reste le même pour les cinq vols. . . . .                                                                                                   | 37 |
| 3.5 | Illustration du principe de décomposition du projet (a) et de la chaîne de traitements avec sous-division du projet sur Photoscan et Pix4D (b). Notons que sur Pix4D la fusion se fait avant l'étape de la densification. . . . .                              | 38 |
| 4.1 | Les courbes de distorsions radiales tracées à partir des paramètres calculés pendant la calibration pour (a) DJI Phantom 3 (10 mm x 7,5 mm) et (b) Sensefly Albris (6,5 mm x 5 mm). . . . .                                                                    | 44 |
| 4.2 | Les courbes de distorsions radiales du Phantom 3 : (a) avec le coefficient $K_3$ supprimé et (b) $K_2$ et $K_3$ supprimés. . . . .                                                                                                                             | 45 |
| 4.3 | Les deux façades principales du Pavillon Joséphine et les résultats de l'appariement dense ainsi que du calcul de maillage sur Photoscan. Les dernières images montrent les positions des caméras lors de la prise de vue. . . . .                             | 48 |
| 4.4 | Résultat d'appariement dense (a) de la façade avant-centre du Pavillon Joséphine et ses modèles maillés (b) générés par les cinq algorithmes employés. . . . .                                                                                                 | 49 |
| 4.5 | Répartition des points d'appui et des points de vérification sur la façade centrale du Palais Rohan. . . . .                                                                                                                                                   | 50 |
| 4.6 | Résultats de nuages de points issus de l'étape d'appariement dense des quatre algorithmes utilisés sur la façade centrale du Palais Rohan. . . . .                                                                                                             | 52 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7  | Comparaison de deux niveaux de résolution utilisé dans l'étape d'appariement dense sur Micmac. Remarquons que le nuage moins dense à gauche est issu des images à résolution plus élevée. . . . .                                               | 53 |
| 4.8  | Analyse des résultats d'appariement dense en utilisant les données de scanner laser comme référence pour une partie commune de la façade du Palais Rohan. . . . .                                                                               | 54 |
| 4.9  | Le profil horizontal sur une des colonnes corinthiennes (cadre rouge) et le profil vertical sur une partie du mur (cadre vert). Les vecteurs en bleu représentent les mesures de scanner laser. . . . .                                         | 55 |
| 4.10 | L'église catholique St-Pierre-le-Jeune du côté sud-est (a) et la vue nadirale issue de GoogleMaps (b). Les cercles rouges montrent la présence de végétation autour du bâtiment. . . . .                                                        | 58 |
| 4.11 | Résultats de l'étape de densification pour le projet utilisant les images de l'Albris (a) et Phantom 3 (b). Le nuage de points fusionné est affiché dans (c) tandis que la texture générée avec la compensation radiométrique dans (d). . . . . | 61 |
| 4.12 | Schéma d'acquisition des données scanner laser et les quatre cas analysés sur les façades sud-est et sud-ouest. . . . .                                                                                                                         | 62 |
| 4.13 | Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a), Pix4D (b) et Micmac (c) pour la façade sud-ouest. . . . .                                                                                                                     | 66 |
| 4.14 | Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a), Pix4D (b) et Micmac (c) pour le tympan central de la façade sud-ouest. . . . .                                                                                                | 67 |
| 4.15 | Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a) et Pix4D (b) pour la porte sud-est. . . . .                                                                                                                                    | 68 |
| 4.16 | Analyse des résultats d'appariement dense issus de Photoscan (a) et Pix4D (b) pour la gargouille de Saint Mathieu. . . . .                                                                                                                      | 68 |



# Liste des tableaux

|      |                                                                                                                                                                            |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Catégorisation des drones, adaptée de FRITSCH et al. (2013).                                                                                                               | 13 |
| 2.2  | Comparaison des modèles mathématiques de distorsion entre les logiciels de calibration.                                                                                    | 26 |
| 2.3  | Définition des paramètres de distorsion dans différents logiciels.                                                                                                         | 26 |
| 2.4  | Comparaison des modules pour chaque logiciel testé par rapport à la chaîne de traitements photogrammétriques.                                                              | 27 |
| 4.1  | Résultats de la calibration sur les différents logiciels.                                                                                                                  | 46 |
| 4.2  | Valeurs de résidus pour le géoréférencement avec les 6 points d'appui.                                                                                                     | 51 |
| 4.3  | Valeurs de résidus pour les 7 points de vérifications.                                                                                                                     | 51 |
| 4.4  | Paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés.                                                                                                          | 52 |
| 4.5  | Courbes de distribution d'erreur pour les profils horizontaux et verticaux en utilisant les mêmes profils issus de nuage de points laser comme référence.                  | 56 |
| 4.6  | Résidus du géoréférencement du bloc « FaçadeSud » avec les images de l'Albris (11 points d'appui).                                                                         | 59 |
| 4.7  | Résidus du géoréférencement du bloc « DJI2 » avec les images du Phantom 3 (9 points d'appui).                                                                              | 59 |
| 4.8  | Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la façade sud-ouest.         | 65 |
| 4.9  | Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour le tympan central.           | 65 |
| 4.10 | Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la porte sud-est.            | 65 |
| 4.11 | Statistiques de comparaison par rapport aux données du scanner laser et paramètres de densification utilisés dans les logiciels employés pour la gargouille Saint Mathieu. | 65 |



# Bibliographie

- ACHILLE, C., A. ADAMI, S. CHIARINI, S. CREMONESI, F. FASSI, L. FREGONESE et L. TAFURELLI. 2015, «UAV-based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications - Methodological Strategies for the After-quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy)», *Sensors*, vol. 15, n° 7, doi :10.3390/s150715520, pp. 15 520–15 539, ISSN 14248220.
- AFSHARNIA, H., A. AZIZI et H. AREFI. 2015, «Accuracy Improvement by the Least Squares Image Matching Evaluated on the Cartosat-1», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W5, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-11-2015, pp. 11–14, ISSN 2194-9034.
- AGISOFTLLC. 2016, «Agisoft User Manual Professionnal Edition, Version 1.2», [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf). Consulté le 7 juillet 2016.
- ALIDOOST, F. et H. AREFI. 2015, «An Image-based Technique for 3D Building Reconstruction Using Multi-view UAV Images», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W5, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-W5-43-2015, pp. 43–46.
- BAIOCCHI, V., D. DOMINICI et M. MORMILE. 2013, «UAV Application in Post-seismic Environment», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W2, pp. 21–25.
- BARAZZETTI, L., L. MUSIO, F. REMONDINO et M. SCAIONI. 2011, «Targetless camera calibration», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-5/W16, pp. 335–342.
- BARSANTI, S. G., F. REMONDINO et B. J. FENÁNDEZ-PALACIOS. 2014, «Critical Factors and Guidelines for 3D Surveying and Modelling Critical Factors and Guidelines for 3D Surveying and Modelling in Cultural Heritage», *International Journal of Heritage in the Digital Era*, vol. 3, n° 1, pp. 141–158.
- BAY, H., T. TUYTELAARS et L. VAN GOOL. 2006, «SURF : Speeded up Robust Features», *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3951 LNCS, doi :10.1007/11744023{\\_}32, pp. 404–417, ISSN 03029743.
- BROWN, D. C. 1971, «Close-range Camera Calibration», *Photogrammetric Engineering*, vol. 37, n° 8, doi :10.1.1.14.6358, pp. 855–866, ISSN 03331024.
- CHIABRANDO, F., E. DONADIO et F. RINAUDO. 2015, «SfM for Orthophoto Generation : A Winning Approach for Cultural Heritage Knowledge», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W7, n° September, doi :10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-91-2015, pp. 91–98, ISSN 2194-9034.

- CLARKE, T. et J. FRYER. 1998, «The Development of Camera Calibration Methods and Models», *The Photogrammetric Record*, vol. 16, n° 91, doi :10.1111/0031-868X.00113, pp. 51–66, ISSN 0031-868X.
- COLOMINA, I. et P. MOLINA. 2014, «Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing : A Review», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, doi :10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013, pp. 79–97, ISSN 09242716.
- CRAMER, M. 2013, «The UAV @ LGL BW Project - A NMCA Case Study», *Photogrammetric Week 2013*, pp. 165–179.
- DGAC. 2015a, «Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord , aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent», <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/12/17/DEVA1528542A/jo/texte>. Consulté le 7 juillet 2016.
- DGAC. 2015b, «Arrêté du 17 décembre 2015 relatif à l'utilisation de l'espace aérien par les aéronefs qui circulent sans personne à bord», <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2015/12/17/DEVA1528469A/jo>. Consulté le 7 juillet 2016.
- DRAP, P. et J. LEFÈVRE. 2016, «An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions», *Sensors*, vol. 16, n° 6, doi :10.3390/s16060807, ISSN 1424-8220.
- EOSSYSTEMS. 2016, «Radial lens distortion», Fichier aide de PhotoModeler version 2016.
- FRASER, C. 2013, «Automatic Camera Calibration in Close Range Photogrammetry», *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 79, n° 4, doi :10.14358/PERS.79.4.381, pp. 381–388, ISSN 0099-1112.
- FRITSCH, D., M. CRAMER et N. HAALA. 2013, «UAV im Einsatz für die Datenerfassung beim LGL BW Abschlussbericht», cahier de recherche, Université de Stuttgart, Stuttgart.
- FRYER, J. 1996, «Camera Calibration», dans *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, édité par K. B. Atkinson, Whittles Publishing, Bristol, pp. 156–179.
- FURUKAWA, Y. et J. PONCE. 2009, «Accurate, Dense, and Robust Multi-view Stereopsis», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, n° 8, pp. 1362–1376.
- GRANSHAW, S. I. 2016, «Photogrammetric Terminology : Third Edition», *The Photogrammetric Record*, vol. 31, n° 154, doi :10.1111/phor.12146, pp. 210–252, ISSN 0031868X.
- GRENZDÖRFFER, G. J., M. NAUMANN, F. NIEMEYER et A. FRANK. 2015, «Symbiosis of UAS Photogrammetry and TLS for Surveying and 3D Modeling of Cultural Heritage Monuments - a Case Study About the Cathedral of St. Nicholas in the City of Greifswald», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W4, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-91-2015, pp. 91–96, ISSN 2194-9034.
- GRUSSENMEYER, P. et O. AL KHALIL. 2002, «Solutions for Exterior Orientation in Photogrammetry : A Review», *The Photogrammetric Record*, vol. 17, n° May, doi :10.1111/0031-868X.00210, pp. 615–634, ISSN 1477-9730.
- GRUSSENMEYER, P., K. HANKE et A. STREILIN. 2002, «Architectural Photogrammetry : Basic Theory , Procedures , Tools», dans *Digital Photogrammetry*, édité par M. Kasser et Y. Egels, Taylor & Francis, pp. 300–339.
- GÜLCH, E. 1995, «Automatic Control Point Measurement», *Photogrammetric Week 1995*, pp. 185–196.

- HARRIS, C. et M. STEPHENS. 1988, «A Combined Corner and Edge Detector», *Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988*, doi :10.5244/C.2.23, pp. 147–151, ISSN 09639292.
- HASTEDT, H. et T. LUHMANN. 2015, «Investigations on the Quality of the Interior Orientation and its Impact in Object Space for UAV Photogrammetry», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W4, n° August, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-321-2015, pp. 321–328, ISSN 2194-9034.
- HE, F. et A. HABIB. 2015, «Target-based and Feature-based Calibration of Low-cost Digital Cameras with Large Field-of-view», *Proceedings of the ASPRS 2015 Annual Conference*.
- HIRSCHMÜLLER, H. 2005, «Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information», dans *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 2, San Diego, pp. 807–814.
- HIRSCHMÜLLER, H. 2011, «Semi-Global Matching Motivation, Developments and Applications», *Photogrammetric Week 2011*, pp. 173–184.
- IGN. 2011a, «TAPEnADe Protocole : Elements d'architecture», [http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPEnADe/PR\\_elements.html](http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPEnADe/PR_elements.html). Consulté le 7 juillet 2016.
- IGN. 2011b, «TAPEnADe Protocole : Façades», [http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPEnADe/PR\\_facades.html](http://www.tapenade.gamsau.archi.fr/TAPEnADe/PR_facades.html). Consulté le 7 juillet 2016.
- IGN. 2015, «MicMac, Aperçu, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!», <http://logiciels.ign.fr/IMG/pdf/docmicmac-2.pdf>. Consulté le 7 juillet 2016.
- KEMENHUB. 2015, «Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia no PM 90 Tahun 2015 tentang Pengendalian Pengoperasian Pesawat Udara Tanpa Awak di Ruang Udara yang Dilayani Indonesia», [http://jdih.dephub.go.id/assets/uudocs/permen/2015/PM\\_90\\_Tahun\\_2015.pdf](http://jdih.dephub.go.id/assets/uudocs/permen/2015/PM_90_Tahun_2015.pdf). Consulté le 7 juillet 2016.
- KRAUS, K. et P. WALDHÄUSL. 1998, *Manuel de Photogrammétrie*, Hermes, Paris. Traduit par P. Grussenmeyer et O. Reis.
- KÜNG, O., C. STRECHA, A. BEYELER, J.-C. ZUFFEREY, D. FLOREANO, P. FUA et F. GERVAIX. 2011, «The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII-1/, doi :10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-125-2011, pp. 125–130, ISSN 1682-1777.
- LOWE, D. G. 2004, «Distinctive Image Features from Scale Invariant Keypoints», *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, doi :<http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>, ISSN 0920-5691.
- LUHMANN, T., C. FRASER et H. G. MAAS. 2015, «Sensor Modelling and Camera Calibration for Close-range Photogrammetry», *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, doi :10.1016/j.isprsjprs.2015.10.006, ISSN 09242716.
- LUHMANN, T., S. ROBSON, S. KYLE et J. BOEHM. 2014, *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2<sup>e</sup> éd., De Gruyter.
- MOE, D., A. SAMPATH, J. CHRISTOPHERSON et M. BENSON. 2010, «Self calibration of small and medium format digital cameras», dans *ISPRS TC VII Symposium 100 Years ISPRS*, vol. XXXVIII-7B, édité par W. Wagner et B. Székely, pp. 395–400.

- MORALES, A. C., D. PAEZ et C. ARANGO. 2015, «Multi-Criteria Analysis of UAVs Regulations in 6 Countries Using the Analytical Hierarchical Process and Expert Knowledge», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W4, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-175-2015, pp. 175–181, ISSN 2194-9034.
- MURTIYOSO, A., F. REMONDINO, E. RUPNIK, F. NEX et P. GRUSSENMEYER. 2014, «Oblique Aerial Photography Tool for Building Inspection and Damage Assessment», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1, n° November, doi :10.5194/isprsarchives-XL-1-309-2014, pp. 309–313, ISSN 2194-9034.
- NEX, F. et F. REMONDINO. 2014, «UAV : Platforms, Regulations, Data Acquisition and Processing», dans *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage : Theory and Best Practices*, édité par F. Remondino et S. Campana, chap. Photogrammetry, Archaeopress, Oxford, England, pp. 73–86.
- PÉREZ, M., F. AGÜERA et F. CARVAJAL. 2011, «Digital Camera Calibration using Images taken from an Unmanned Aerial Vehicle», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII, n° C22, pp. 1–5.
- PIERROT-DESEILLIGNY, M. et I. CLERY. 2012, «Apero, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of Set of Images», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII, n° 5, doi :10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-269-2011, pp. 269–276, ISSN 1682-1777.
- PIERROT-DESEILLIGNY, M., L. DE LUCA et F. REMONDINO. 2011, «Automated Image-based Procedures for Accurate Artifacts 3D Modeling and Orthoimage Generation», *Proceedings of the XXIIIrd International CIPA Symposium*.
- PIERROT-DESEILLIGNY, M. et N. PAPARODITIS. 2006, «A Multiresolution and Optimization-based Image Matching Approach : An Application to Surface Reconstruction from SPOT5-HRS Stereo Imagery», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI.
- PIX4D. 2016, «How are the Internal and External Camera Parameters defined?», <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089-How-are-the-Internal-and-External-Camera-Parameters-defined-#gsc.tab=0>. Consulté le 7 juillet 2016.
- REICH, M., M. WIGGENHAGEN et D. MUHLE. 2012, «Filling the Holes - Potential of UAV-based Photogrammetric façade modelling», *Tagungsband des 15. 3D-NordOst Workshops der GFaI*.
- REMONDINO, F. 2011, «Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning», *Remote Sensing*, vol. 3, n° 6, doi :10.3390/rs3061104, pp. 1104–1138, ISSN 20724292.
- REMONDINO, F. 2014, «Photogrammetry - Basic Theory», dans *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage : Theory and Best Practices*, édité par F. Remondino et S. Campana, chap. Photogrammetry, Archaeopress, Oxford, England, pp. 63–72.
- REMONDINO, F., L. BARAZZETTI, F. NEX, M. SCAIONI et D. SARAZZI. 2011, «UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling - Current Status and Future Perspectives», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII, n° September, pp. 14–16.
- REMONDINO, F. et S. DEL PIZZO. 2012, «Low-cost and Open-source Solutions for Automated Image Orientation - A Critical Overview», *Progress in Cultural Heritage Preservation - LNCS*, vol. 7616, doi :10.1007/978-3-642-34234-9, pp. 40–54, ISSN 03029743.

- REMONDINO, F. et C. FRASER. 2006, «Digital Camera Calibration Methods : Considerations and Comparisons», *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, n° 5, pp. 266–272.
- REMONDINO, F., M. G. SPERA, E. NOCERINO, F. MENNA et F. NEX. 2014, «State of the Art in High Density Image Matching», *The Photogrammetric Record*, vol. 29, n° 146, doi : 10.1111/phor.12063, pp. 144–166, ISSN 1477-9730.
- REMONDINO, F., M. G. SPERA, E. NOCERINO, F. MENNA, F. NEX et S. GONIZZI-BARSANTI. 2013, «Dense Image Matching : Comparisons and Analyses», *Proceedings of the Digital Heritage 2013*, vol. 1, n° Octobre, doi :10.1109/DigitalHeritage.2013.6743712, pp. 47–54.
- RUPNIK, E., F. NEX et F. REMONDINO. 2014, «Oblique Multi-camera Systems-orientation and Dense Matching Issues», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 40, n° 3W1, doi :10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-107-2014, pp. 107–114, ISSN 16821750.
- SCHENK, T. 2005, *Introduction to Photogrammetry*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.
- SUWARDHI, D., F. MENNA, F. REMONDINO, K. HANKE et R. AKMALIA. 2015, «Digital 3D Borobudur - Integration of 3D Surveying and Modeling Techniques», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W7, n° August, doi :10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-417-2015, pp. 417–423, ISSN 2194-9034.
- SZELISKI, R. 2010, *Computer Vision : Algorithms and Applications*, vol. 5, Springer, ISBN 1848829345, 832 pp., doi :10.1007/978-1-84882-935-0.
- TANG, R. 2013, *Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision*, thèse de doctorat, Université de Stuttgart.
- WENZEL, K., M. ROTHERMEL, D. FRITSCH et N. HAALA. 2013a, «Image Acquisition and Model Selection for Multi-view stereo», *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL, n° February, doi : 10.5194/isprsarchives-XL-5-W1-251-2013, pp. 251–258, ISSN 1682-1777.
- WENZEL, K., M. ROTHERMEL, N. HAALA et D. FRITSCH. 2013b, «SURE - The IfP Software for Dense Image Matching», *Photogrammetric Week 2013*, pp. 59–70.
- WOLF, P., B. DEWITT et B. WILKINSON. 2014, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, 4<sup>e</sup> éd., McGraw-Hill Education.
- WU, C. 2016, «VisualSFM : A visual structure from motion system», <http://ccwu.me/vsfm/>. Consulté le 26 février 2016.



