



HAL
open science

Acquisition par drone et le récolement en VRD

Florent Authié

► **To cite this version:**

Florent Authié. Acquisition par drone et le récolement en VRD. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03035348

HAL Id: dumas-03035348

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03035348>

Submitted on 2 Dec 2020

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

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

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

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

AUTHIÉ Florent

Acquisition par drone et le récolement en VRD

Soutenu le 09 septembre 2020

JURY

Monsieur Jérôme VERDUN	Président du jury
Monsieur Maxime MOST	Maître de stage
Monsieur Christophe CHARLET	Enseignant référent

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon référent de stage Monsieur Most Maxime ainsi que Monsieur Bottraud François, pour la proposition de ce sujet ainsi que pour leur disponibilité tout au long de son élaboration.

Je tiens à remercier aussi mon professeur référent pour ses remarques avisées et son implication tout au long du projet.

Bien entendu, je tiens à remercier l'ensemble de l'équipe du cabinet Bbass pour m'avoir permis de réaliser ce projet dans un contexte agréable. Je les remercie aussi pour leur aide et le temps qu'ils m'ont accordé.

Je remercie aussi M. Makaya de l'équipe Leica Geosystem et M. Arnaud Ollivier de Ttract pour nous avoir fourni une licence du logiciel Cyclone3DR et d'Orbit 3DM feature extraction.

Enfin, je tiens à remercier ma compagne pour m'avoir accompagné durant tout ce projet grâce à son écoute et son soutien ainsi que son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire de fin d'étude.

Liste des abréviations

AGL : Above Ground Level (Hauteur au-dessus du sol)

APN : Appareil Photo Numérique

DCE : Dossier de Consultation des Entreprises

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile

DT : Déclaration de projet de travaux

DICT : Déclaration d'intention de commencement des travaux

DOE : Dossier des Ouvrages Exécutés

DSAC : Direction de la Sécurité de l'Aviation Civile

FOV : Field of view (champ de vision)

FPV : First Person View (vue à la première personne ou en immersion)

IGN : Institut Géographique National

GCP : Ground Control Point (point de contrôle)

GNSS : Global Navigation Satellite System (Positionnement global par système satellitaire)

GSD : Ground Sample Distance (Taille du pixel au sol)

SIFT : Scale Invariant Feature Transform

Table des matières

I	ETAT DE L'ART	10
I.1	LE RECOLEMENT DE FIN DE CHANTIER	10
I.1.1	Intérêt du récolement	10
I.1.2	Les étapes du processus de création d'un lotissement	10
I.1.2.1	L'étude de faisabilité	10
I.1.2.2	La conception	10
I.1.2.3	La phase administrative.....	11
I.1.2.4	Le Dossier de Consultation des Entreprises	11
I.1.2.5	La préparation et réalisation du chantier	12
I.1.2.6	La réception et fermeture de chantier	12
I.1.3	Le plan de récolement	13
I.1.3.1	Les méthodes de relevés actuelles	13
I.1.3.1.1	La méthode classique.....	13
I.1.3.1.2	La méthode par GNSS	13
I.1.3.1.3	La méthode par smartphone.....	14
I.1.3.1.4	La méthode par photogrammétrie aérienne légère	14
I.2	LA PHOTOGRAMMETRIE	14
I.2.1	Histoire de la photogrammétrie	14
I.2.2	Notions théoriques fondamentales	15
I.2.2.1	La stéréo-restitution.....	15
I.2.2.2	Les différentes orientations	16
I.2.2.2.1	L'orientation interne	16
I.2.2.2.2	L'orientation relative	16
I.2.2.2.3	L'orientation absolue.....	17
I.2.2.2.4	L'orientation externe	17
I.2.3	Quelques notions de photographie.....	18
I.2.3.1	Les recommandations.....	19
I.2.4	Paramètres de prises de vue aérienne.....	20
I.2.4.1	Les facteurs modifiables.....	20
I.2.4.1.1	La taille du pixel au sol (GSD en anglais) et la hauteur de vol	20
I.2.4.1.2	Le taux de recouvrement et le rapport B/H.....	21
I.2.4.1.3	Le réseau de points de contrôle et de vérification	21
I.2.4.2	Les facteurs externes	22
I.2.4.2.1	La topographie du terrain.....	22
I.2.4.2.2	Les conditions météorologiques	23
I.3	PLACE DU DRONE DANS L'ACQUISITION DES DONNEES.....	23

I.3.1	Bref historique de l'évolution des drones	23
I.3.2	Les différents types de drones.....	24
I.3.2.1	Voilures fixes	24
I.3.2.2	Voilures tournantes	25
I.3.2.3	Type de drone et usage respectif	26
I.3.3	Application des drones en géomatique	26
I.3.4	La législation en vigueur.....	27
I.3.4.1	Les différents scénarii	27
I.3.4.2	En matière d'aéronefs.....	28
I.3.4.3	Pour le télépilote.....	29
I.3.4.4	Pour l'exploitant	29
I.3.4.5	Les restrictions d'utilisation	30
I.3.5	La réglementation future	30
I.4	TRAITEMENT DES DONNEES ACQUISES	32
I.4.1	Les logiciels de traitements photogrammétriques	32
I.4.2	Quelques notions d'extraction automatique de contour d'objet dans une image	33
I.4.2.1	La méthode par filtrage	33
I.4.2.2	La transformée de Hough	34
I.4.3	Méthode d'extraction de lignes de rupture dans un nuage de points	34
I.4.3.1	Les travaux de Christian Briese.....	34
II	ELABORATION DE LA CHAINE DE PRODUCTION DE RELEVÉ PAR DRONE POUR LE RECOLEMENT DE FIN DE CHANTIER DE LOTISSEMENT	35
II.1	LE CHANTIER TEST	35
II.1.1	Les éléments caractéristiques d'un récolement de fin de chantier	36
II.1.2	Réglementation aérienne sur la zone	36
II.2	MOYENS A DISPOSITION	37
II.2.1	Le vecteur drone et ses caractéristiques	37
II.2.2	L'appareil photographique embarqué	38
II.3	DETERMINATION DES PARAMETRES DU PLAN DE VOL.....	39
II.3.1	Hauteur de vol et GSD.....	39
II.3.2	Taux de recouvrement	40
II.3.3	Vitesse du vecteur drone	41
II.3.4	Réglage de l'appareil photo numérique	42
II.3.5	Relevé du réseau de points de contrôle et de vérification	42
II.3.5.1	Le relevé par la méthode GNSS	44

II.3.5.2	Le relevé par la méthode de topométrie classique.....	44
II.3.6	Les différents scénarii de prise de vue effectués.....	45
II.3.6.1	Prise de vue Nadirale.....	45
II.3.6.2	Prise de vue Oblique	47
II.4	RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE A L' AIDE DU LOGICIEL METASHAPE	48
II.4.1	Démarche utilisée pour extraire le nuage de points	48
II.4.2	Comparaison des différentes reconstructions.....	52
II.4.2.1	Qualité de l'orientation absolue.....	52
II.4.2.2	Evaluation des modèles avec une vérité terrain.....	54
II.5	EXTRACTION DES INFORMATIONS CARACTERISTIQUES AU RECOLEMENT DE CHANTIER DE LOTISSEMENT	58
II.5.1	Essai d'extraction du fil d'eau de la voirie.....	58
II.5.1.1	Les logiciels utilisés	58
II.5.1.2	Traitement, résultat et analyse	58
II.5.2	Essai d'extraction de lignes de rupture de pente	60
II.5.2.1	Le logiciel utilisé	60
II.5.2.2	Traitement, résultat et analyse	60
III	ETUDE QUALITATIVE DES METHODES DE RELEVÉ PAR DRONE ET PAR TOPOMETRIE CLASSIQUE.	61
III.1	LES TEMPS DE TRAVAIL	61
III.1.1	Le temps sur le terrain.....	61
III.1.2	Le temps de traitement des données.....	62
III.2	QUALITE DES DONNEES OBTENUES	62
III.3	RESSOURCES MATERIELLES ET HUMAINES.....	63
III.3.1	Ressources humaines	63
III.3.2	Ressources matérielles	63
III.4	RECAPITULATIF DE LA COMPARAISON DES DEUX METHODES	64
	Conclusion.....	65
	Bibliographie	67
	Liste des figures.....	72
	Liste des tableaux	74
	Table des Annexes.....	75

Introduction

La photogrammétrie aérienne est depuis longtemps utilisée à des fins cartographiques. L'IGN, précurseur de l'utilisation à grande échelle de cette méthode de restitution en France, a donc entrepris de cartographier notre territoire dans les années 50 à l'aide d'avions et d'appareils photographiques de grande dimension.

Indépendamment des avions et hélicoptères, le développement d'autres plateformes de transport sont apparues. Les drones, au départ exclusivement réservés à des fins militaires, se démocratisent et deviennent accessibles à un plus grand nombre grâce aux constructeurs comme Parrot, ou encore Dji. Ces outils, capables d'emporter des charges réduites tels qu'un appareil photographique, ont suscité alors un intérêt certain pour la photogrammétrie aérienne à petite et moyenne échelle.

De plus, l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs tel que l'avait prédit la loi de Moore permet aujourd'hui de voir la photogrammétrie sous un autre angle. Les avancés en matière de vision par ordinateur, couplées à la photogrammétrie ont permis d'automatiser les processus de calcul chronophages et fastidieux que présentait cette méthode à l'époque.

Toutes ces avancées ont donc participé à la démocratisation à la fois des drones et de la photogrammétrie. Différents secteurs d'activité ont vu le potentiel de cette nouvelle méthode d'acquisition des données et ainsi la photogrammétrie par drone est utilisée dans de nombreux domaines comme l'archéologie, la foresterie, la topographie, l'environnement et le domaine agricole.

Le département de l'Hérault subit depuis plus de 20 ans maintenant une augmentation de la population provoquant une forte pression foncière. Le nombre de lotissements créés annuellement augmente continuellement. La société Bbass, un des acteurs de l'aménagement de la région, met donc tout en œuvre pour répondre à ces demandes de projets.

C'est dans ce contexte que le cabinet Bbass voit alors une opportunité dans la mise en œuvre d'une nouvelle démarche reposant sur les techniques de relevé par drone. L'entreprise, étant toujours à la recherche de nouvelles possibilités d'acquisitions des données, s'est équipée d'un drone avec un capteur photographique. Le cabinet s'est alors demandé s'il était possible de réaliser des plans de récolement de lotissement par le biais de la méthode par photogrammétrie aérienne. Cette méthode semble effectivement représenter d'éventuels

gains de temps mais aussi permettre de se démarquer des concurrents et ainsi obtenir des marchés.

En effet, la méthode de relevé par drone présente a priori de nombreux avantages : rapidité d'acquisition, acquisition de données massives, peu voire aucun relevé terrestre, mais est-elle adaptée pour un plan de récolement de lotissement ?

Ce mémoire propose donc d'expliquer la méthode dite de « photogrammétrie par drone » et d'étudier la faisabilité de celle-ci dans l'élaboration de plan de récolement. Nous étudierons les différentes configurations possibles des plans de vol et réaliserons une première étude comparative des résultats obtenus entre les différentes configurations. Celle-ci nous permettra d'identifier celle paraissant optimale pour étudier ensuite la faisabilité de l'élaboration d'un plan de récolement par le biais de cette méthode.

Ensuite, la mise en application du relevé par drone mettra en évidence une problématique majeure, celle du traitement des données lors de la réalisation du plan qui nécessite, a priori, une certaine automatisation.

Afin de répondre à cette nouvelle problématique, nous étudierons les différents procédés permettant d'extraire des informations issues de relevés par photogrammétrie. Dans cette partie, l'idée sera de savoir s'il est possible d'extraire les lignes de ruptures de pentes et les objets caractéristiques (murs techniques, lampadaires, fils d'eau de voirie etc...).

Enfin, une étude comparative entre la méthode par tachéométrie et celle par photogrammétrie aérienne légère sera réalisée afin de dégager les avantages et inconvénients de chacune des deux méthodes.

Présentation de la structure d'accueil

La société Bbass est un cabinet de Géomètre-Expert créé dans les années 1950 et basé dans l'Hérault. C'est plus précisément en 1953 que M. Dufour crée le cabinet dans la ville de Montpellier. A la suite de plusieurs associations et rachats, l'entreprise devient Bbass, « Bottraud Barbaroux et Associés » en 2003. Avec l'essor du cabinet, de nouveaux associés sont venus le compléter. C'est ainsi que M. Most Maxime, M. Carlier Thomas et M. Durban Laurent ont rejoint l'entreprise en tant qu'associés.

Aujourd'hui, l'entreprise Bbass, gérée par M. Bottraud et M. Most, détient cinq agences dans l'Hérault (siège social à Castries) mais aussi deux autres sites dans le Gard (figure 1).

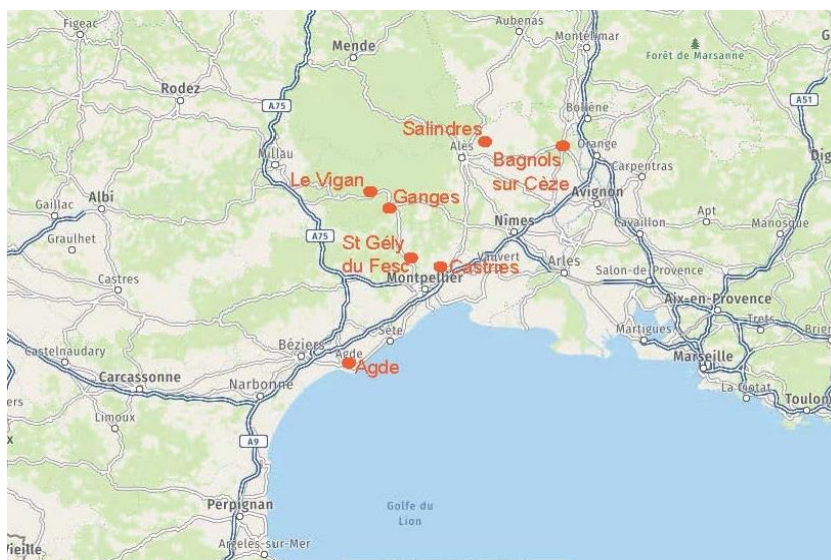


Figure 1 : Position géographique des différentes antennes du cabinet Bbass

Le Cabinet s'articule autour de deux pôles, celui de la VRD, qui traite de la maîtrise d'œuvre, de la conception de projets d'aménagement ainsi que de la détection de réseaux et le second pôle traitant des travaux topographiques et fonciers, relatifs au métier du géomètre. Les moyens matériels du siège social à Castries se veulent en accord avec la technologie actuelle. L'entreprise s'est donc dotée de plusieurs appareils topographiques, de scanners 3D, de récepteurs GNSS, d'un sondeur et d'un drone, ainsi que de toutes les suites logicielles nécessaires aux traitements des données.

Un effectif de 35 personnes réparties sur l'ensemble des agences du cabinet Bbass permet de réaliser la totalité de ces activités afin de répondre aux besoins géographiques et aux différents clients.

I Etat de l'art

I.1 Le récolement de fin de chantier

I.1.1 Intérêt du récolement

Le récolement de chantier est une opération régulièrement effectuée dans le cadre de différents projets tels que des lotissements ou bien des aménagements de voirie. Il présente divers intérêts et est d'ailleurs obligatoire dans le cadre des marchés publics. En effet, ce processus a pour principal objectif de répertorier tous les ouvrages effectués afin de déterminer leur position dans l'espace et ainsi de savoir s'ils ont été réalisés de manière conforme au plan projet.

Le récolement est aujourd'hui une étape clé dans les projets de lotissement du fait de son intérêt.

I.1.2 Les étapes du processus de création d'un lotissement

I.1.2.1 L'étude de faisabilité

Lorsque l'idée d'un lotissement émerge, celui-ci impose la réalisation d'une étude de faisabilité du projet. C'est à partir de cette étude que va se concrétiser le projet. En effet, les données étudiées pour la faisabilité telle que la géomorphologie du terrain, le financement du projet ou encore l'impact de celui-ci sur la zone vont être décisifs pour sa réalisation. Si toutes les conditions sont réunies pour la faisabilité du projet, il peut alors débiter. Le maître d'ouvrage va donc sélectionner le ou les maîtres d'œuvre qui réaliseront la partie technique du projet pour que celui-ci puisse effectivement débiter. Cette recherche se déroule généralement via des appels d'offre.

I.1.2.2 La conception

Lorsque qu'un chantier de lotissement débute, celui-ci commence par une phase de projet. Celle-ci regroupe l'ensemble des étapes de la création du projet de lotissement. À l'issue de cette étape, un plan projet va être réalisé par le maître d'œuvre pour le maître d'ouvrage (client). Si le maître d'ouvrage valide ce plan, le maître d'œuvre peut alors lancer les démarches administratives afin de notifier les différents services permettant le contrôle du projet.

I.1.2.3 La phase administrative

Durant la phase de conception du projet, le maître d'œuvre renseigne différents documents comme le dossier Loi sur l'eau ou encore le Permis d'Aménager.

Le dossier Loi sur l'eau possède deux types de régime, le régime d'autorisation pour des chantiers ayant une grande influence sur le milieu et le régime de déclaration qui impose une réflexion sur l'incidence de l'opération sur le milieu. Plusieurs documents sont à renseigner comme des plans indiquant l'emplacement du projet et l'influence de celui-ci sur la zone. En fonction du régime, il peut y avoir une enquête publique et les modalités d'instruction ne sont pas les mêmes. À l'issue du délai d'instruction, il peut y avoir accord ou désaccord du préfet sur la déclaration.

Le Permis d'Aménager est incontournable dans le projet de lotissement. Il est composé de plusieurs annexes permettant de décrire le projet et son insertion dans le tissu urbain et paysager de la commune. Le délai d'instruction par la commune est de 3 mois en général. Durant ce laps de temps, la mairie étudie le projet et consulte les services extérieurs (gestionnaire réseaux par exemple) afin d'émettre ou non l'autorisation permettant de débiter les travaux.

Une fois l'autorisation obtenue, le maître d'ouvrage rédige la Déclaration d'Ouverture de Chantier (DOC) afin de stipuler à la mairie que les travaux commencent. Enfin, le maître d'œuvre lance un appel d'offre afin de solliciter les entreprises qui réaliseront les travaux.

I.1.2.4 Le Dossier de Consultation des Entreprises

Dans le cadre de son appel d'offre, le maître d'œuvre va établir un Dossier de Consultation des Entreprises (DCE). Ce dossier comporte l'ensemble des informations relatives au projet et utiles aux entreprises candidates pour la réalisation des travaux. Une étape préalable à ce dossier est nécessaire, il s'agit de la définition de l'allotissement des travaux. Celle-ci permet de savoir si une seule entreprise peut réaliser l'entièreté des travaux ou alors si plusieurs entreprises sont nécessaires. Lorsque cette étape est réalisée, le DCE est envoyé aux potentiels prestataires qui vont alors renvoyer un devis. Le maître d'œuvre peut alors faire une sélection en fonction de divers facteurs comme le coût ou encore l'expérience de l'entreprise. C'est le maître d'ouvrage, conseillé par le maître d'œuvre qui valide ensuite les devis émis par les entreprises.

I.1.2.5 La préparation et réalisation du chantier

Cette étape est à l'initiative des entreprises qui ont été sélectionnées. Elle comporte les informations nécessaires à la réalisation des travaux, telles que : la définition des équipes, le choix des matériels, la commande des matériaux, etc...

De plus, les entreprises doivent fournir un planning de réalisation des travaux appelé aussi plan d'exécution. Ce planning et la réalisation des travaux sont sous surveillance directe du maître d'œuvre qui contrôle l'état d'avancement des travaux. Souvent, plusieurs rendez-vous avec le maître d'œuvre et les entreprises sont fixés pour veiller à la réalisation du projet. Au fur et à mesure de l'avancement, les intervenants échangent régulièrement à la suite des éventuelles difficultés rencontrées lors des travaux.

I.1.2.6 La réception et fermeture de chantier

Cette étape est la dernière des étapes du projet de lotissement. Après avoir procédé aux vérifications et aux tests de fonctionnement des différents ouvrages réalisés, le chantier est nettoyé.

C'est à ce moment que la phase de réception des travaux commence. Il s'agit du contrôle du chantier réalisé par le maître d'œuvre. Les entreprises auront préalablement conçu le Dossier des Ouvrages Exécutés (DOE). Celui-ci est constitué d'un certain nombre de documents permettant de prendre connaissance des différentes installations effectuées sur le chantier. C'est dans celui-ci que figure le plan de récolement, objet de notre étude.

À l'issue de cette réception par le maître d'œuvre, 3 cas sont possibles :

- Réception satisfaisante sans réserve nécessaire. Le chantier est déclaré terminé.
- Réception satisfaisante mais des réserves peuvent être émises pour finaliser des anomalies non significatives relevées à l'issue de cette réception.
- Réception insatisfaisante entraînant des modifications lourdes et repoussant la fin du chantier.

Une fois la fin des travaux signée et donc la fermeture du chantier constatée, le maître d'ouvrage remplit la Déclaration Attestant l'Achèvement et la Conformité des Travaux (DAACT) permettant de stipuler à la mairie que le chantier est finalisé. A l'issue de cette déclaration, le maître d'ouvrage a la possibilité de mettre en vente son projet.

I.1.3 Le plan de récolement

L'un des éléments du DOE est le plan de récolement. Celui-ci est un plan indiquant « les implantations précises des réseaux et installations techniques, mis à jour à la fin des travaux pour tenir compte des éventuelles modifications apportées en cours de chantier¹». Il s'agit le plus souvent de la voirie, des murs de clôture, des bassins de rétention et enfin des réseaux. Le relevé de ces éléments permet d'obtenir une vision d'ensemble du projet après sa réalisation. Des récolements spécifiques existent et notamment le récolement de réseaux qui s'intéresse uniquement aux réseaux enterrés. Ce récolement est d'ailleurs régi par une norme spécifique, la norme DT-DICT.

Actuellement plusieurs méthodes de relevé sont possibles. Une étude de ces méthodes est réalisée ci-après.

I.1.3.1 Les méthodes de relevés actuelles

I.1.3.1.1 La méthode classique

La méthode dite « classique » est celle la plus fréquemment utilisée. Pour ce faire, l'ensemble des éléments est relevé à l'aide d'une station totale en faisant un cheminement sur toute la partie du chantier. Le relevé doit être exécuté dans le même système planimétrique et altimétrique que le relevé topographique afin de pouvoir contrôler le travail réalisé. De cette manière, on contrôle les pentes, limites et réseaux réalisés sur le terrain. Actuellement, le cabinet Bbass utilise cette méthode pour réaliser le récolement de ses chantiers de lotissement.

I.1.3.1.2 La méthode par GNSS

Cette méthode est utilisée pour le récolement de réseaux lorsque l'on souhaite obtenir la position des réseaux avec une précision conforme à la norme DT-DICT. Lorsque les travaux d'enfouissement du réseau débutent, une personne équipée d'un récepteur GNSS se charge de relever la génératrice supérieure des réseaux installés. Une fois le relevé effectué, la tranchée est bouchée. Dans la plupart des cas, ce relevé se fait par tronçon. C'est-à-dire que la tranchée est relevée par morceaux afin que celle-ci ne soit jamais ouverte sur tout son

¹ Dictionnaire-BTP, Edition Eyrolles, 2011

linéaire. Elle est davantage utilisée par les concessionnaires de réseaux réalisant des travaux sur leurs propres infrastructures.

1.1.3.1.3 La méthode par smartphone

Cette méthode ne s'applique, pour le moment, qu'au récolement de réseaux. Elle part du constat que les smartphones, de plus en plus évolués, permettent une acquisition des données par photogrammétrie. Lors des travaux et lorsque la tranchée est ouverte, l'opérateur prend donc en photo (ou en vidéo) la canalisation dans la tranchée et envoie toutes les données à une autre personne pour obtenir le positionnement du réseau. Plusieurs structures ont développé leur propre système de relevé par smartphone comme le système « Réso3D » ou encore « TT Red Zone » de TT Géomètres-Experts. Le cabinet Bbass, n'utilise pas ce type de méthode pour le récolement de réseau.

1.1.3.1.4 La méthode par photogrammétrie aérienne légère

Cette méthode est à l'heure actuelle encore peu répandue. Le principe étant de survoler la zone à l'aide d'un drone muni d'un appareil photographique. En prenant une série de clichés se recouvrant partiellement, il est possible d'assembler les photographies pour en extraire un nuage de points 3D ainsi qu'une orthophoto. À l'aide de ces données traitées, on peut alors extraire des plans de récolement.

Du fait des évolutions technologiques en cours et des intérêts que présente cette méthode, l'application au récolement de chantier de lotissement devient un axe de réflexion intéressant.

I.2 La photogrammétrie

I.2.1 Histoire de la photogrammétrie

C'est avec les travaux de Leonardo da Vinci sur la perspective et les projections au XV^{ème} siècle que les prémices de la photogrammétrie apparaissent et permettent de comprendre la création de scènes 3D au sein d'une peinture.

Le point de départ de la photogrammétrie est la photographie. Celle-ci a été inventée au fur et à mesure des découvertes, débutant par l'invention de la chambre obscure (camera obscura) en 1515. Les avancées majeures faites par Nicéphore Niépce et Louis Daguerre, permettront en 1839 de révolutionner le monde de la photographie et de la photogrammétrie.

En parallèle, le stéréoscope de Brewer est inventé, permettant de recréer la profondeur à l'aide de deux images.

La photogrammétrie peut être étudiée en 4 grandes phases [Simonetto, 2018] :

- L'invention de la photogrammétrie est attribuée à Aimé Laussedat en 1849 qui, à l'aide d'une « chambre claire », a produit un plan de façade de l'Hôtel des Invalides de Paris. Dénommé « iconométrie », c'est Albrecht Meydenbauer qui parle pour la première fois du terme « photogrammétrie ». Les travaux d'Edouard Deville clôturent cette période en créant le premier restituteur stéréoscopique.
- La photogrammétrie analogique de 1900 à 1960 permet de restituer les trois dimensions d'un objet grâce à un instrument de précision. Cet instrument mécanique appelé « stéréorestituteur » permet de mettre en relation les deux images argentiques afin de pouvoir les orienter et créer un stéréomodèle, permettant la mesure sur l'image.
- Les travaux de U. V. Helada débouchant sur la conception du premier restituteur analytique met fin à l'analogie. La photogrammétrie analytique de 1960 à 1990, permet, sur les mêmes bases que la méthode précédente mais assistée par ordinateur, la reconstruction tridimensionnelle de l'image.
- Enfin, le développement des ordinateurs, de la puissance de calcul et des algorithmes de traitement d'image permet à la photogrammétrie numérique de se développer dans les années 1990. Les algorithmes de corrélations d'image tel que « SIFT » permettent à l'heure actuelle de parler de photogrammétrie automatisée.

I.2.2 Notions théoriques fondamentales

I.2.2.1 La stéréo-restitution

Repris de l'humain, le principe de stéréoscopie est l'observation d'une même image sous deux points de vue différents. Cette observation du couple stéréoscopique présentant une partie commune, appelée recouvrement, permet de recréer la perception du relief dans une scène.

La qualité de la restitution stéréoscopique est basée sur le rapport B/H correspondant respectivement à la base (distance entre deux prises de vue photographique) et la hauteur de prise de vue. Ce rapport peut être plus ou moins élevé en fonction du type d'acquisition des clichés.

I.2.2.2 Les différentes orientations

I.2.2.2.1 L'orientation interne

Chaque caméra a ses propres paramètres internes qui sont les suivants :

- Le point principal d'autocollimation (PPA) : il s'agit de l'intersection de l'axe optique et du plan image.
- La distance principale (p) : correspondant à la distance entre le point principal et la lentille (appelée focale).
- Le centre de distorsion / point principal de symétrie (PPS) : point dans l'image où la distorsion est supposée nulle.
- Les coefficients de distorsion (a , b et c) : ce sont les coefficients du polynôme modélisant les distorsions optiques telle que l'illustre la figure 2. Il existe plusieurs modèles permettant de modéliser les différentes distorsions. En effet, avec l'évolution des systèmes optiques, (lentilles asphériques par exemple), les modèles de distorsions optiques ont dû être réétudiés [Tournadre, 2015].

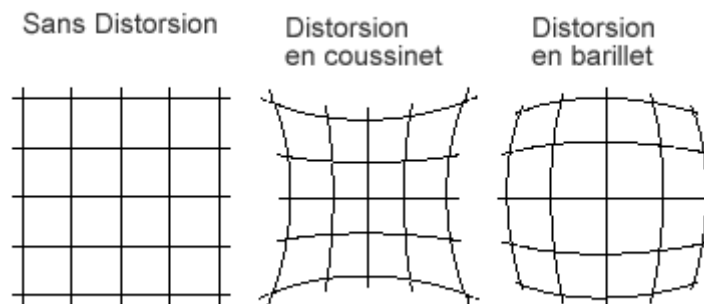


Figure 2 : Illustrations des différentes distorsions possibles lors du passage de la lumière dans l'optique d'un APN [www.thomassinclairlabs.com]

Il existe différents protocoles de calibration interne d'un appareil photographique [Murtiyoso, 2016]. La plus connue est la calibration en laboratoire à l'aide d'un polygone d'étalonnage permettant de calculer les paramètres internes du boîtier. A l'issue de cette étape, il est ensuite nécessaire d'appareiller les images ensemble, ce qui correspond à l'orientation relative.

I.2.2.2.2 L'orientation relative

L'objectif de cette étape est de déterminer l'orientation des images les unes par rapport aux autres afin de reconstruire le stéréomodèle et pouvoir recréer le relief. Les paramètres à

déterminer sont donc les 3 vecteurs translatifs (T_x , T_y , T_z) et rotatifs (ω , ϕ , κ) ainsi que le facteur d'échelle (λ). C'est à l'issue du calcul de similitude 3D et la mise en œuvre de la méthode des moindres carrés que ces paramètres vont être déterminés [Boulianne, 2017]. En photogrammétrie analogique, cette orientation était faite pour chaque couple d'images à l'aide de la méthode des 6 points de Gruber. Les évolutions en traitement d'image couplées à la photogrammétrie ont rendu ce processus automatique.

1.2.2.2.3 L'orientation absolue

Après avoir formé le modèle stéréoscopique, l'orientation absolue va permettre d'orienter et de mettre à l'échelle le modèle afin de pouvoir obtenir les bonnes mesures terrains. Cette orientation va placer le modèle stéréoscopique dans le repère terrain. Pour réaliser ce changement de repère, il faut procéder à une transformation rigide à sept paramètres aussi appelée recalage Helmert. En déterminant les paramètres de transformation, il est possible de transformer le modèle adimensionnel en un modèle géoréférencé. C'est à l'issue de cette dernière étape que le modèle pourra être exploité pour réaliser des mesures de distances ou de volumes par exemple.

1.2.2.2.4 L'orientation externe

Cette orientation est le couplage des deux orientations vues précédemment. Elle se base sur un processus d'orientation appelée l'aérotriangulation. Ce processus permet de réaliser l'orientation externe d'un bloc d'images à l'aide de peu de points d'appui (aussi appelés points terrain) permettant de relier les coordonnées d'un objet dans une image à un objet sur le terrain.

La méthode d'aérotriangulation d'un bloc de clichés peut se faire à l'aide de deux méthodes de calcul différentes.

La première méthode est celle des **modèles indépendants**. Cette méthode est basée sur la transformation de coordonnées, reliant entre eux tous les modèles d'un bloc d'images et sur l'ajustement de celui-ci par rapport à un nombre réduit de points d'appui [Boulianne, 2017]. Dans cette méthode, l'avantage est que chacun des modèles peut être calculé de façon indépendante.

La deuxième méthode est la **méthode des gerbes spatiales** ou « Bundle Bloc Adjustment ». Cette méthode permet de passer directement des coordonnées images aux coordonnées terrain. Elle est actuellement la plus utilisée car elle permet d'obtenir une

meilleure précision en théorie [Boulianne, 2017], surtout pour des acquisitions avec des capteurs « grand public » comme dans notre étude. De plus, elle a l'avantage de pouvoir intégrer d'autres inconnues comme les paramètres internes de la caméra afin de réaliser une détermination et une optimisation de ceux-ci en même temps que l'orientation du bloc d'image [Vandenbroeck, 2018].

Afin de permettre un bon calcul de ces orientations, la qualité des clichés photographiques est importante. Nous allons donc étudier l'appareil photographique.

I.2.3 Quelques notions de photographie

L'appareil photographique est une somme de différents objets qui permettent d'enregistrer une image. Ces objets peuvent être décomposés de la manière suivante :

- Le capteur, il peut être de différentes tailles et de différents types (figure 3). Constitués de photosites, ceux-ci permettent de capter et d'enregistrer la lumière reçue.
- L'optique, appelé aussi objectif, peut être de différentes tailles permettant de prendre une scène avec plus ou moins de recul. Il est constitué de plusieurs groupes de lentilles et est défini par sa longueur focale, son ouverture et son champ de vision.
- L'obturateur, il permet d'exposer le capteur à la lumière pendant un temps donné (de quelques secondes à quelques millisecondes).
- Le diaphragme, il permet de contrôler l'ouverture de l'objectif et par conséquent la quantité de lumière reçue par le capteur. Il est noté souvent « f » sur l'objectif.

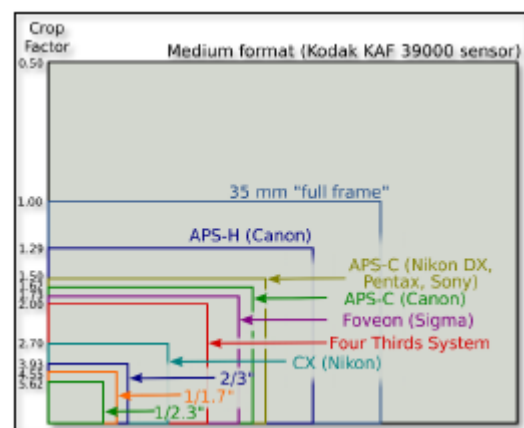


Figure 3 : Illustration des différentes tailles de capteurs issue de « Synthèse des outils et technologie 3D », rédigé par Anthony Pamart

Tous ces paramètres ont donc une influence sur le type de prise de vue que l'on veut réaliser. Il est donc important de choisir le bon capteur photographique. Tous les appareils ne sont pas faits pour la photogrammétrie mais certaines entreprises ou laboratoires se sont mis à créer des produits adaptés comme la « Camlight » de l'IGN utilisée dans différents travaux de recherche [Souchon et al. 2014].

I.2.3.1 Les recommandations

Lors d'une prise de vue, trois paramètres sont déterminants pour avoir un cliché de bonne qualité (netteté et bien exposé). De plus, il est important que les images aient la même exposition car les algorithmes de détection de points d'intérêt se basent principalement sur une reconnaissance de la radiométrie des pixels.

Ce sont ces trois paramètres qui permettent de régler l'appareil photographique :

- La vitesse de l'obturateur permet de contrôler la durée d'exposition du capteur. Une basse vitesse permet de fixer des scènes relativement fixes contrairement à une vitesse élevée qui permet de fixer des objets mobiles. En fonction de cette vitesse, le capteur recevra plus ou moins de lumière.
- L'ouverture notée « f » permet de contrôler la quantité de lumière qui traverse l'objectif. Cette ouverture permet aussi de gérer la profondeur de champs (zone où l'image est nette).
- La sensibilité du capteur est aussi un point important. Nommée ISO, celle-ci permet de contrôler la sensibilité du capteur à la lumière. Ainsi, plus l'ISO est élevée, plus les scènes sont lumineuses mais présentent, en contrepartie, plus de « bruit » et inversement pour une ISO plus faible.

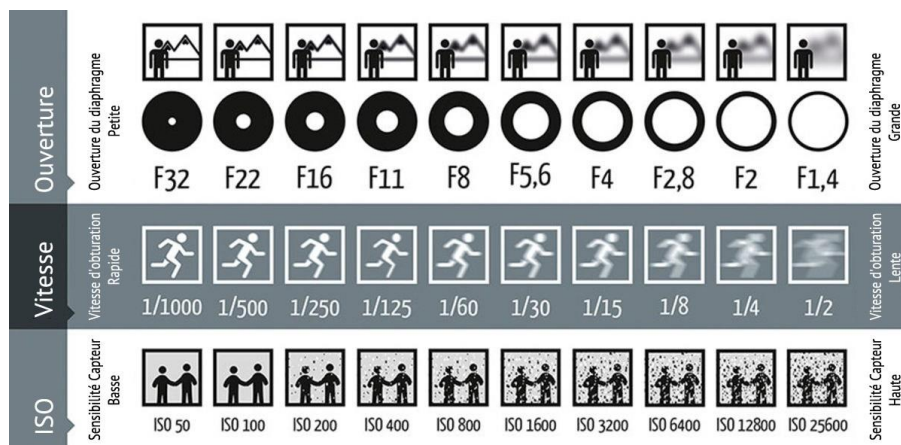


Figure 4 : Illustration de l'influence de chacun des paramètres sur la qualité du cliché photographique [Illustration issue du site Objectif-cooljeff.com]

La figure 4 illustre l'influence des trois paramètres essentiels pour avoir une photographie bien exposée.

Dans le cadre d'une prise de vue par drone, il est important de prendre en compte ces paramètres car le déplacement de celui-ci et donc de la caméra, peut créer un flou sur l'image ce qui compromettrait la reconstruction 3D. Il est donc plus prudent de mettre la

vitesse de l'obturateur sur une vitesse élevée tout en laissant l'ISO au plus bas et une grande ouverture tout en minimisant le flou créé par la profondeur de champs. Enfin, la mise au point doit être en mode manuel pour que la scène soit nette, même si la hauteur de vol, souvent de l'ordre de 20 à 150 mètres, projette la scène à l'infini du point de vue de la mise au point.

I.2.4 Paramètres de prises de vue aérienne

I.2.4.1 Les facteurs modifiables

I.2.4.1.1 La taille du pixel au sol (GSD en anglais) et la hauteur de vol

Cette notion s'intéresse à la résolution que l'on peut obtenir en fonction de la hauteur de vol. Cette hauteur est un facteur important à prendre en compte. En effet, en fonction de la surface à couvrir, de la longueur focale et du GSD, il est essentiel de déterminer une bonne hauteur de vol. Le GSD est la distance entre le centre de deux pixels contigus au sol. Elle est très importante car elle permet de déterminer la résolution et la précision du rendu photogrammétrique. Il est coutume de dire que la précision escomptée d'un relevé par photogrammétrie est de l'ordre d'une à deux fois le GSD en planimétrie et de une à trois fois le GSD en altimétrie [Latitude Drone]. Attention tout de même, le GSD n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour la précision du relevé. La formule permettant de calculer le GSD est la suivante :

$$GSD = t * \frac{H}{f}$$

Les variables correspondent respectivement à la taille du pixel du capteur (t), la hauteur de vol en mètre (H) et la focale en millimètres (f).

Il faut donc faire un compromis entre la résolution au sol et le volume des données possible à traiter. En effet, l'emprise au sol d'une photo dépend de la taille du capteur et de la longueur focale (à hauteur de vol fixe). Plus la hauteur de vol est basse, plus l'emprise du cliché est petite et donc plus le volume des données augmente du fait du grand nombre de photographies à acquérir.

1.2.4.1.2 Le taux de recouvrement et le rapport B/H

A la base de la stéréoscopie, le recouvrement est le point fondamental de la reconstruction tridimensionnelle. En fonction du plan de vol, il peut y avoir jusqu'à deux types de recouvrement, le type longitudinal et le type transversal.

Le recouvrement longitudinal, est celui pris à la suite de deux clichés successifs sur une même ligne de vol. Le recouvrement transversal est quant à lui, celui où deux bandes d'images se chevauchent entre elles. Lorsque que l'on fait des acquisitions aériennes avec un drone, il est recommandé de réaliser un recouvrement élevé de l'ordre de 80% dans un axe et de 60% entre les axes [Pierrot Deseilligny et al., 2011 ; Charlet, 2019].

De plus, le rapport B/H influence la qualité du modèle 3D final. Plus le rapport est proche de 0 et plus l'angle d'intersection des rayons perspectifs homologues est petit, ce qui crée une intersection moins nette des rayons perspectifs et une moins bonne détermination de la composante altimétrique du levé [Tournadre, 2015]. Cependant, les meilleurs résultats en termes de précision on fait remarquer que le rapport B/H était aux alentours de 0,2 [Pierrot Deseilligny et al., 2011].

1.2.4.1.3 Le réseau de points de contrôle et de vérification

Afin de pouvoir réaliser le géoréférencement du modèle de façon précise, il faut placer des points de repères au sol. Il existe trois types de repères (appelés aussi GCP), les points d'appuis planimétriques, altimétriques et les points de vérification (Control Points). Souvent, les deux premiers types ne forment qu'un seul point. Enfin, les points de vérification permettent de contrôler nos données après leur traitement afin d'estimer les erreurs de positionnement.

D'un point de vue mathématique, seulement 3 points d'appuis sont nécessaires pour réaliser la transformation spatiale entre les coordonnées « modèle » et les coordonnées « terrain ». Cependant, le photogrammètre en utilise bien plus, souvent issus de l'aérotriangulation [Boulianne M., 2017]. Il est donc important de déterminer le nombre de points d'appuis et leur répartition sur l'ensemble du terrain à relever pour avoir un bon calcul de l'aérotriangulation.

Une étude menée en 2013 sur le Théâtre Romain à Vintimille (Italie) a montré l'importance des points de contrôle au sol. En effet, ces points ont permis d'atténuer considérablement les

déformations du modèle 3D et réduit de manière importante l'effet « bowl² » [Nocerino & al. ,2013].

Une seconde étude, menée en 2017 sur 3 glaciers Suisses, fait l'expérience de l'influence du nombre et de la disposition des GCP. On constate que 5 à 7 GCP par km² sont nécessaires au minimum pour atteindre une précision convenable en 3D [Gindraux & al. ,2017]. Un grand nombre de GCP ne semble donc pas utile (sauf dans certains cas dégénérés).

Il est donc important de bien répartir les GCP et les points de vérifications sur le pourtour de la zone de levé et au centre de celle-ci, d'une part pour réduire les déformations éventuelles et d'autre part, afin d'avoir un bon géoréférencement des données acquises.

I.2.4.2 Les facteurs externes

I.2.4.2.1 La topographie du terrain

Le relief du terrain a aussi une influence sur la reconstruction 3D du modèle issue des clichés acquis lors de la prise de vue. Le principe même de la hauteur de vol du drone est défini selon son point de décollage. Si la zone est très escarpée, le drone ne sera pas à la même hauteur selon sa position sur la zone de levé, principe illustré sur la figure 5. De plus, nous avons vu précédemment que le GSD est fonction de la hauteur de vol, il se peut donc que celle-ci ne soit pas uniforme sur toute la zone relevée ce qui provoque une hétérogénéité de la précision du modèle.

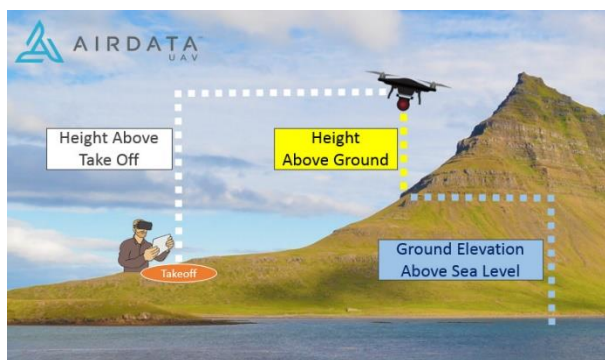


Figure 5 : Schématisation de la hauteur de vol par rapport au point de décollage, [Airdata.com]

² Effet produisant un nuage de point 3D courbé, cet effet est souvent visualisé dans des géométries de prise de vue linéaire.

Le principe même de la photogrammétrie est la prise de vue de ce que l'on voit. Si la couverture végétale est dense, seul le sursol sera pris en compte et non pas la topographie réelle du terrain, ce qui peut être gênant selon le type de rendu souhaité.

Enfin, sur une zone escarpée le recouvrement ne sera pas constant, cela pourrait donc provoquer des zones de faible recouvrement ne permettant pas la restitution 3D.

Il faut donc adapter notre plan de vol en fonction du relief du terrain. Il existe certains planificateurs de vol qui permettent de prendre en compte la topographie du terrain afin d'avoir une hauteur de vol constante suivant la topographie, comme « Tap2Map » ou encore « UgCS ».

1.2.4.2.2 Les conditions météorologiques

Plusieurs contraintes météorologiques existent et peuvent influencer à la fois les paramètres de vol du drone mais aussi la qualité des clichés acquis [Dandois et al, 2015].

- Le vent, paramètre très important car si sa vitesse est trop élevée, le drone peut ne pas pouvoir maintenir sa trajectoire et potentiellement s'écraser. Le vent peut aussi avoir une influence sur la qualité de la reconstruction du modèle tridimensionnel.
- La luminosité de la scène est aussi un paramètre à prendre en compte. En effet, la faiblesse du contraste sur les clichés due à un temps nuageux peut rendre difficile la détection des points homologues dans les clichés, résultant en une augmentation de l'erreur de positionnement des points du modèle tridimensionnel.

I.3 Place du drone dans l'acquisition des données

I.3.1 Bref historique de l'évolution des drones

L'aéronef télépiloté a vu le jour à la fin de la Première Guerre Mondiale. C'est aux USA que le premier projet d'avion sans pilote est né, il a été nommé « Hewitt-Sperry automatic airplane ».

C'est lors de la guerre froide que les premiers drones à vocation essentiellement militaire voient le jour. En effet, les USA développent le drone pour des missions de surveillance dangereuses dans des environnements nommés « 3D » pour « Dull, Dirty and Dangerous » (répétitives, sales et dangereuses) afin d'éviter toutes pertes humaines [Brisset, 2004]. Depuis les années 80, les armées du monde entier profitent de ces outils pour surveiller mais aussi pour se défendre à l'image du drone « Prédator » des USA.

Du fait de l'évolution des technologies de l'aéronautique, de la robotique et de la miniaturisation, d'autres catégories de drones sont apparues. Le premier avion miniaturisé est ainsi développé dans les années 80 par AeroVironement [Brisset, 2004].

Enfin, la démocratisation des drones et l'essor de l'aéromodélisme a mis en avant le drone civil tel qu'on le connaît actuellement. Il existe aujourd'hui une variété impressionnante de drone, allant de quelques grammes à plus d'une tonne.

I.3.2 Les différents types de drones

Les drones peuvent être catégorisés en fonction de leur taille et de leur puissance permettant également de définir leurs usages (capacité de charge, hauteur de vol et leur rayon d'action). On peut donc les classer en 4 catégories distinctes, les drones de grande taille, de moyenne taille, et les catégories micro et nano drones [Anderson et Gaston, 2013]. Nous ne parlerons ici que des drones des catégories micro et nano permettant les vols à des fins de cartographie et de photogrammétrie. Les autres catégories peuvent faire de même mais la législation est différente du fait de leurs poids et de leur dangerosité pour les tiers.

I.3.2.1 Voilures fixes

Classé dans la catégorie des drones micro et nano, ce type d'Unmanned Aerial Vehicle (UAV) est constitué d'un corps en mousse dur de type polystyrène et est propulsé par un moteur. D'une envergure comprise entre 1 à 3 m environ, cet engin volant permet de voler à des vitesses élevées (50 à 120 km/h) et est très peu sensible au vent. La légèreté de ce système lui permet d'avoir un rayon d'action de plusieurs kilomètres et une autonomie importante (une à plusieurs heures). Leur trajet est contrôlé par un logiciel de pilotage automatique permettant un guidage du drone grâce au récepteur GNSS embarqué.

Cependant, ces systèmes ont tout de même des inconvénients :

- Le premier est le système permettant la mise en vol, souvent effectuée à partir d'une rampe de lancement, pour des drones de grande envergure comme « le Boréal » illustré dans la figure 6.
- L'atterrissage est aussi un point critique car il est réalisé par une glisse contrôlée sur le sol. Il faut un espace large pour pouvoir le faire atterrir. Ce type de manœuvre peut endommager les capteurs se trouvant très souvent en dessous du fuselage (Lidar ou appareil photographique).

- Enfin, il faut une envergure importante pour pouvoir emporter des charges conséquentes, à l'image du drone « le Boréal », mesurant 4,20 mètres d'envergure et pouvant soulever jusqu'à 5 kg de charge utile (figure 6).



Figure 6 : Photographie de deux drones de même type mais de dimensions différentes (A gauche, le drone Sensefly ebee mesurant 0.76 m d'envergure [www.sensfly.com], à droite le drone « LeBoreal » mesurant 4.20 m d'envergure [www.boreal-uas.com])

I.3.2.2 Voilures tournantes

Ce type de drone diffère de la forme d'une aile volante. Appelés aussi multi-copter, ils sont constitués de 1 à 8 moteurs appelés « rotor » placés tout autour du corps du drone (figure 7). Cette forme permet au drone de soulever des charges plus lourdes que les ailes volantes (à dimension égale). De plus, leur configuration permet une manœuvrabilité accrue ainsi qu'un vol stationnaire ou seulement vertical. C'est pourquoi, ils peuvent décoller et atterrir à la verticale du point lancement. Ils sont donc plus simple d'utilisation que les ailes volantes même si les plans de vol automatisés réduisent considérablement les contraintes de vol.

Cependant, ces drones ont une autonomie assez restreinte, leur rayon d'action est donc plus limité. De plus, ils sont aussi plus sensibles aux conditions météorologiques comme le vent par exemple [Eissenbess, 2009].



Figure 7 : Photographie de deux drones de marque Dji, à gauche le Dji phantom 4 pro et à droite le Dji Matrice 600. [www.dji.com]

I.3.2.3 Type de drone et usage respectif

Ces deux types de drones sont tous deux complémentaires et permettent de réaliser diverses missions de photogrammétrie aérienne. Reposant, l'un sur le principe de la portance, générée par l'accélération de l'air sur l'aile, tel un avion et l'autre reposant sur le principe de portance mais générée par les hélices en rotation, ils ne permettent pas un vol de même configuration. Il est donc important de récapituler l'ensemble des avantages et inconvénients des deux types de drones, éléments illustrés sur le tableau 1.

Type de drone	Rayon d'action	Autonomie	dépendance au vent	Manoeuvrabilité	capacité de chargement
Aile volante	++++	++++	++	++	+
multi-rotor	++	++	+	++++	++

Tableau 1 : Avantages et inconvénient des deux types de drone inspiré d'[Eissenbess, 2009] (+ : mauvais, ++++ : excellent)

Les drones ailes volantes sont donc mieux adaptés à des missions de grande envergure, avec des capteurs plus légers. Les drones multirotors, eux, sont plus enclin à des missions de dimension plus réduite, dans des milieux plus difficiles d'accès avec des capteurs plus lourds. Ils permettent aussi de réaliser des missions en vol vertical.

I.3.3 Application des drones en géomatique

Les drones sont de plus en plus utilisés de nos jours. Leur usage ne se cantonne pas seulement à la surveillance comme dans le cadre de missions pour l'armée. Ils peuvent être aussi utilisés par d'autres domaines comme l'agriculture, la gestion forestière, l'archéologie, la gestion de situation d'urgence, la modélisation 3D [Nex & Remondino, 2014] ainsi que l'auscultation d'ouvrage linéaire [Tournadre, 2015]:

Les drones sont donc utilisés dans des domaines très variés depuis l'agriculture jusqu'à l'auscultation d'ouvrages. C'est donc un moyen très intéressant pour pouvoir acquérir des données à la fois rapidement mais aussi et surtout de pouvoir les acquérir sans pour autant être physiquement sur le site, certains pouvant être dangereux.

Attention tout de même à son utilisation dans l'espace aérien français. En effet, l'État français a su réagir face au développement du drone et la législation en vigueur ne cesse d'évoluer afin d'encadrer son utilisation.

I.3.4 La législation en vigueur

L'engouement pour le drone a conduit l'État français à encadrer cette pratique afin de la rendre plus sécuritaire, pour les pilotes eux-mêmes mais aussi pour toutes personnes tierces proches de l'UAV. La France a été l'une des pionnières en matière de réglementation avec son arrêté de 2012 régissant l'utilisation du drone dans l'espace aérien. Cependant, cet arrêté a été revu et complètement abrogé avec l'arrêté du 17 décembre 2015. D'autres décrets ont été publiés pour faire évoluer cette législation comme celui du 18 mai 2018 relatif à la formation de télépilote. Enfin, dans le cadre du développement de cette réglementation, les États de l'Union Européenne se sont regroupés pour établir une réglementation commune ayant pour objectif d'harmoniser l'utilisation de ceux-ci dans l'espace Européen.

En France, l'arrêté du 17 décembre 2015 relatif aux règles spécifiques aux aéronefs circulant sans personne à bord classe l'utilisation des drones en 3 catégories (art. 3) :

- L'aéromodélisme
- L'expérimentation
- L'activité particulière

I.3.4.1 Les différents scénarii

L'activité particulière encadre les activités commerciales liées à l'utilisation du drone. Quatre scénarii de vol ont été définis par cette réglementation et décrivent 4 conditions de vols à respecter basées sur les critères suivants :

- La hauteur de vol autorisée
- Distance entre le télépilote et le drone
- Le poids total du drone
- Le survol d'une zone peuplée ou non
- Le vol en vue ou hors vue

Tout vol en dehors de ces scénarii demande une autorisation spécifique auprès de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC).

Voici l'explication des quatre scénarii possibles en France, illustrés par la figure 8.

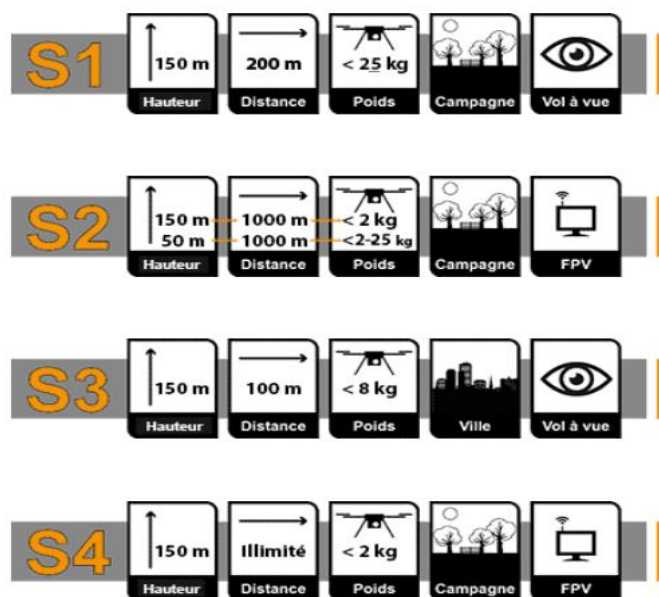


Figure 8 : Schéma des différents scénarii possibles définis par la réglementation Française [https://hexadrone.fr]

Pour le scénario S3 le drone doit être équipé d'un parachute s'il pèse $2 < X < 8$ kg.

De plus, les règles à respecter sont nombreuses et portent sur les domaines suivants :

- L'aéronef lui-même (immatriculation, enregistrement, équipement et homologation),
- Le télépilote (formation et compétences),
- L'exploitant,
- Les restrictions d'utilisation (lieu, hauteur et horaires).

I.3.4.2 En matière d'aéronefs

La Loi « Drone » du 24 octobre 2016 introduit la notion d'enregistrement des aéronefs sans pilote. En effet, pour pouvoir utiliser son drone, il faut l'enregistrer sur une plateforme dédiée nommée « AlphaTango ». Seuls les drones de plus de 800 grammes doivent être enregistrés. L'enregistrement du drone est valable 5 ans.

En fonction du poids de l'aéronef et du type de scénario de vol, une homologation du drone peut être requise. Cela prend la forme d'une attestation de conception délivrée par la Direction de Sécurité de l'Aviation Civile (DSAC). Cette homologation reste valide tant que la DGAC ne l'a pas suspendue.

Les aéronefs de plus de 800 grammes devront aussi comporter un dispositif de signalement électronique. Introduit par la Loi « Drone », ce dispositif sera obligatoire à compter du 29

juin 2020 (ou 29 novembre 2020 pour les aéronefs enregistrés avant cette date). Ce dispositif électronique devra comporter l'identifiant du drone.

I.3.4.3 Pour le télépilote

Pour pouvoir être télépilote de drone, il faut avoir 16 ans minimum (18 ans si l'utilisation du drone est dans le cadre du scénario S4). L'arrêté du 18 mai 2018 relatifs aux formations pour pouvoir exercer fixe de nouvelles règles. À l'exception des pilotes d'aérostats captifs, le télépilote devra détenir un certificat d'aptitude théorique délivré par la DGAC après réussite de l'examen.

De plus, il devra détenir une attestation de suivi de formation délivrée par un organisme stipulant qu'il est apte à réaliser les scénarii de vol choisis (S-1, S-2, S-3 et/ou S-4).

Pour pouvoir réaliser le scénario S-4, le télépilote doit être titulaire d'un brevet de pilote d'avion, d'hélicoptère ou de planeur, et justifier d'une expérience pratique de 50 heures de vol en avion et 10 heures de vol avec l'aéronef.

I.3.4.4 Pour l'exploitant

Pour qu'une personne puisse commencer son activité, il doit l'avoir déclarée auprès de la DSAC. Cette déclaration d'activité comporte les éléments principaux suivants :

- Les différents scénarii opérationnels envisagés,
- Les différents aéronefs utilisés.

De plus, il est nécessaire de tenir à jour un « MAP », un Manuel d'Activité Particulière répertoriant les éléments essentiels suivants :

- Description des activités particulières (scénarii réalisables et aéronefs utilisables),
- La liste des télépilotes autorisés pour chaque type d'aéronef et scénario,
- Procédure générale de mise en œuvre des aéronefs (préparation du vol, etc...),
- Pour chaque type d'aéronef, leurs spécifications et les procédures d'urgence pouvant être mises en œuvre.

Enfin, à chaque début d'année, l'exploitant doit déclarer à la DSAC son Bilan Annuel d'Activité comprenant le nombre d'heures de vol réalisé pour chaque type de scénario et énumérer les problèmes rencontrés ainsi que les mesures prises pour y remédier.

Pour finir, il est important, du point de vue des dégâts que peut engendrer un aéronef sans pilote, d'avoir une assurance couvrant ces dommages.

I.3.4.5 Les restrictions d'utilisation

Afin de limiter les collisions, les risques de chutes et donc les dommages aux biens ou aux tiers, la réglementation a fixé un certain nombre de règles :

- Hauteur de vol maximale de 150 m pour les aéronefs télépilotes,
- Hauteur de vol réduite à proximité des aéroports et aérodromes (figure 9),
- Zones de survol interdites (zone militaire, zone sensible, aérodrome, etc...),
- Impose la mise en place d'un périmètre de sécurité au sol,
- Restreint les vols en agglomération,
- Restriction des vols de nuit (interdiction pour les aéronefs télépilotes, sauf exceptions).

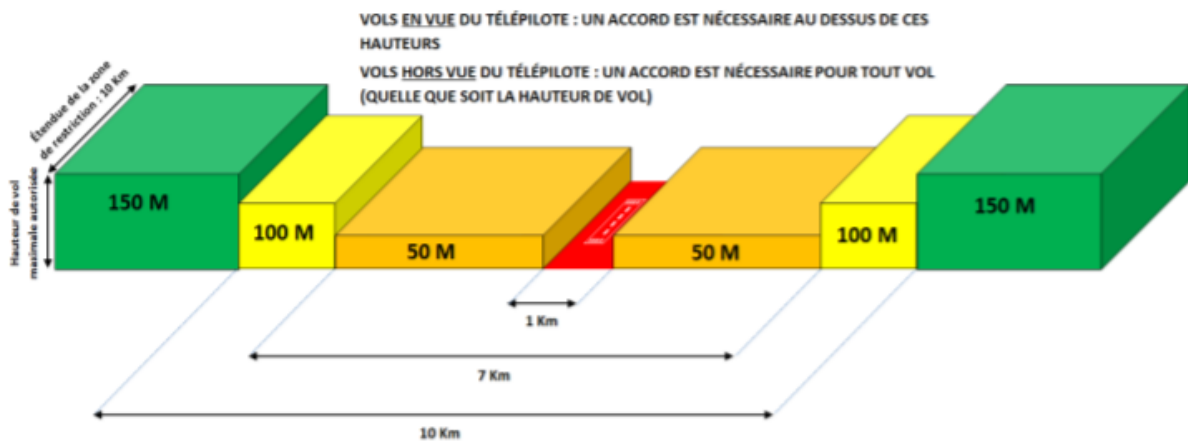


Figure 9 : Illustration des zones de restrictions des hauteurs de vols à proximité d'un aérodrome issue du guide de la DSAC

Toutes ces informations et ces restrictions sont visualisables sur le portail « AIP » ainsi que sur le site de l'aviation civile (www.sia.aviation-civile.gouv.fr) qui recense l'ensemble des informations relatives à l'espace aérien. De plus, le site Géoportail a mis à disposition la carte des restrictions pour les drones de loisir afin d'avoir un visuel plus accessible et permettre de mieux comprendre les restrictions. D'autres supports tels que des applications ou des sites (Mach7Drone) reprennent ces informations et sont spécialement dédiés.

I.3.5 La réglementation future

Afin d'harmoniser et de favoriser l'utilisation des aéronefs sans pilote, la Commission européenne s'est accordée pour instaurer un règlement commun à toute l'Europe. En 2019, deux règlements européens ont donc été publiés, relatifs aux drones et à leur utilisation dans l'espace aérien Européen. A compter du 1^{er} janvier 2021, cette réglementation sera applicable dans toute l'Europe. Il s'agit d'une refonte totale de la réglementation en vigueur.

D'une part, la hauteur de vol passe à 120 m au lieu des 150 m. D'autre part, les 3 distinctions vont disparaître pour laisser place à 3 catégories d'opérations en fonction du risque, qui sont : les catégories « Ouverte », « Spécifique » et « Certifiée ».

	A1	A1	A2	A3	A3
Masse	< 250 g	< 900 g	< 4 kg	< 25 kg	< 25 kg
Vitesse max.	19 m.s ⁻¹	19 m.s ⁻¹			
Déclaration en ligne	✓*	✓	✓	✓	✓
Formation en ligne + examen 40 QCM	✓	✓	✓	✓	✓
Examen théorique compl. 30 QCM			✓		
Examen DGAC			✓		
Distance de sécurité par rapport aux personnes, sauf regroupements	-	Survol toléré si involontaire	30 m (5 m si vitesse < 3m.s ⁻¹)	Aucune personne ne doit être mise en danger	Aucune personne ne doit être mise en danger
Distance sécurité 150m (des habitations, zones commerciales, industrielles ou récréatives)				✓	✓
ID à distance + lumineux		✓	✓	✓	
Geovigilance NFZ		✓	✓	✓	
Modes de contrôle automatique sauf stabilisation					⊘

Pour tous :

- VTOL (vol à vue)
- Hauteur max. : 120 m
- Drone CE*

DBE GEOSPATIAL

Figure 10 : Schéma récapitulatif des catégories dans lesquelles seront classés les drones lorsque la nouvelle législation Européenne sera en vigueur, issu du Webinar de l'entreprise D3E Geopsatial en association avec Sensefly

À l'heure actuelle, toutes les explications concernant ces catégories ne sont pas encore publiées. La figure 10 énonce les principales distinctions et sous catégories de drones correspondant à la catégorie « ouverte » représentant la catégorie où la majorité de drones sera classée. Lorsque certaines exigences de la catégorie « ouverte » ne sont pas respectées, l'utilisation du drone est classée dans la catégorie « spécifique ». Pour réaliser ce type d'utilisation, il faudra soit faire une analyse de risque si le vol est classé hors scénarii ou sinon, s'inscrire dans les scénarii standards européens :

- STS-01 (correspondant au S3 ou S1) :
 - Vol à vue en zone contrôlée, potentiellement peuplée,
 - H < 120 m,
 - Classe du drone C5 (envergure < 3 m, masse < 25 kg),
 - Ne concerne pas les ailes volantes.
- STS-02 (correspondant au S2) :
 - Vol hors vue sur zone contrôlée jusqu'à 1 km (2 km si duo), faiblement peuplée,
 - H < 120 m
 - Classe du drone C6 (envergure < 3 m, masse < 25 kg, vitesse < 50 m/s)

Enfin, la catégorie « certifiée » concernera seulement les drones permettant le transport de personnes ou marchandises.

De plus, les drones devront bénéficier de la certification CE. Cependant, il n'en existe aucun actuellement. En attendant d'avoir des drones CE, il sera possible de voler jusqu'au 1^{er} juillet 2023 dans la catégorie « ouverte limitée ». Cette catégorie permettra une transition pour tous les exploitants de drone n'ayant pas encore acquis de drone CE.

Enfin, les 4 types de scénarii opérationnels seront valables encore quelques années à compter du 1^{er} juillet mais ils disparaîtront pour laisser place aux scénarii européens.

En conclusion, la réglementation actuelle est vouée à changer très prochainement et est en mouvance constante. Courant 2020, de nouveaux textes seront publiés pour venir détailler et expliquer davantage la réglementation Européenne. Il faudra donc rester alerte durant ces prochaines années pour bien comprendre la nouvelle réglementation et l'appliquer convenablement.

I.4 Traitement des données acquises

I.4.1 Les logiciels de traitements photogrammétriques

La photogrammétrie a été remise au goût du jour grâce au développement de méthodes de détection automatique de points caractéristiques. De nombreux logiciels ont effectivement été développés et ces derniers peuvent être classés en deux catégories (tableau 2).

Les logiciels commerciaux ont un avantage certain, ils permettent un traitement des données quasi-automatique pour la plupart et sans connaissance (ou presque) de la photogrammétrie. Cependant, ce sont des solutions dont on ne peut pas ou très faiblement moduler les caractéristiques selon nos besoins. Dans le tableau 2, nous énumérons les plus connus dont le logiciel Metashape qui sera celui utilisé dans notre étude pour le traitement.

Les logiciels open-sources eux, ont l'avantage d'être modulables permettant alors de greffer des plugins de nos choix. De plus, le plus grand avantage est qu'ils sont totalement gratuits. Le logiciel Micmac, développé par l'IGN, est l'un des plus utilisés dans le domaine de la recherche. Son principal inconvénient réside dans la nécessité de disposer de compétences spécifiques.







	Développeur	Type de Logiciel	Type de prise de vue	Généralités
	Agisoft	Commercial payant	Aérienne, Terrestre	Traitement de gros volume de données, nécessite une grande puissance de calcul
	Pix4D SA	Commercial payant	Aérienne, Terrestre,	Possibilité de traiter des vidéos
	DroneDeploy	Commercial payant	Aérienne	Plateforme cloud permettant de se passer d'une grande puissance de calcul
	Laboratoire MATIS de l'IGN	OpenSource Gratuit	Aérienne, terrestre	Logiciel totalement modulable, non intuitif, pour les "chercheurs"
	AliceVision	OpenSource Gratuit	Aérienne, terrestre	Impossibilité de mettre à l'échelle le modèle (pas de GCP)
	J.L. Schönberger	OpenSource Gratuit	Terrestre	Modulable, deux types d'interfaces

Tableau 2 : Tableau des différentes solutions de logiciels de traitements en photogrammétrie

Une fois les données traitées, il est nécessaire d'extraire les informations voulues. Plusieurs méthodes existent pour les extraire de manière semi-automatique ou automatique.

I.4.2 Quelques notions d'extraction automatique de contour d'objet dans une image

I.4.2.1 La méthode par filtrage

Dans une image, les contours définissant un objet (comme la voirie par exemple) peuvent être déterminés par filtrage. En effet, le contour correspond aux hautes fréquences de l'image. En appliquant un filtre de type « passe haut », comme le filtre de Robert, de Prewitt ou de Sobel, il est possible de calculer le gradient de l'image dans toutes les directions et de sélectionner le gradient maximum afin d'en ressortir les contours. Enfin, à l'aide d'un seuillage, il est possible de sélectionner certains contours uniquement [Simonetto, 2019].

I.4.2.2 La transformée de Hough

Développée en 1962 par Paul Hough, cette méthode permet de détecter dans une image, des objets paramétrés comme des droites, des cercles et des ellipses ainsi que des éléments plus complexes. Le principe est de passer de l'image à 2 dimensions à un espace à N dimensions correspondant aux paramètres des objets recherchés (droite, cercle, etc...). Le but est de déterminer le nombre de pixels décrivant cette forme dans une « nappe d'accumulation ». Le pic dans cette nappe d'accumulation va nous permettre de déterminer les paramètres de la forme paramétrée dans l'image.

Cette méthode peut aussi être utilisée pour reconnaître des formes dans un nuage de points 3D (plans, sphères, cylindres...) [Simonetto, 2019].

I.4.3 Méthode d'extraction de lignes de rupture dans un nuage de points

I.4.3.1 Les travaux de Christian Briese

L'extraction de lignes de rupture par la méthode de Christian Briese dans un nuage de points repose sur l'approximation de plans le long de cette ligne [Briese, 2004]. La méthode est semi-automatique. Il faut tout d'abord tracer un premier segment proche de la ligne de rupture dans le nuage de points. De plus, des paires de plans (appelées « left patch » et « right patch »), dans une zone restreinte de part et d'autre de ce segment, vont être déterminées. A l'issue de cette détermination, l'intersection de ces plans va donner une droite qui sera la ligne de rupture (figure 11). Cette génération va se faire tout le long de la ligne jusqu'à que celle-ci ne puisse plus être calculée.

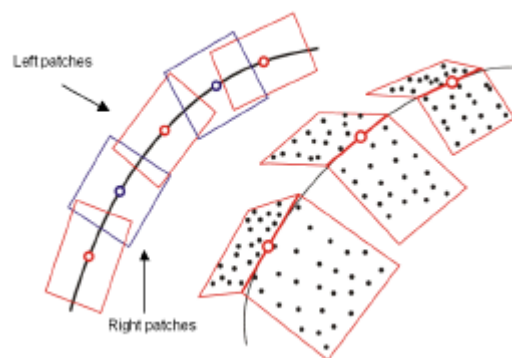


Figure 11 : Représentation des patches, des plans moyennés et de la ligne de rupture à l'aide de la méthode de Briese

Cette méthode a la particularité de pouvoir générer des lignes de rupture dans un nuage de points non encore classifié. En effet, elle repose aussi sur des tests permettant de limiter les erreurs dues à ces points. Chaque point du nuage (dans la zone proche de la ligne de rupture) se verra attribuer un poids inversement proportionnel à sa distance à la ligne de rupture. Cela permet donc de ne pas prendre en compte les points trop éloignés de celle-ci.

Cette méthode est donc très intéressante pour déterminer les caractéristiques morphologiques du terrain relevé.

Nous avons donc vu dans l'état de l'art l'ensemble des informations permettant de mettre en pratique le relevé par drone pour le récolement de lotissement, à la fois en termes de technique mais aussi en nous intéressant à la législation en vigueur et à venir.

II Elaboration de la chaîne de production de relevé par drone pour le récolement de fin de chantier de lotissement

II.1 Le chantier test

Durant cette étude, un relevé de fin de chantier a été effectué afin de réaliser un vol par drone. La zone relevée est située sur la commune de Saint-Martin-de-Londres à une trentaine de kilomètres au nord de Montpellier, dans le département de l'Hérault (figure 12). Ce chantier fait suite à l'extension d'une zone artisanale. La zone relevée fait approximativement une surface de 3,6 hectares, avec une emprise de 200 m par 180 m environ. Elle est relativement plane avec une légère pente Sud-Nord. Enfin, elle a la particularité d'être traversée par une ligne haute tension située à une vingtaine de mètres de hauteur.



Figure 12 : Plans de situation de la zone de levé, échelle non définie (Source Géoportail)

II.1.1 Les éléments caractéristiques d'un récolement de fin de chantier

Le chantier, tout juste terminé, présente des éléments caractéristiques. En effet, sur ce terrain, on retrouve la voirie neuve ainsi que tous ses éléments annexes comme les trottoirs, les caniveaux, les lampadaires. De plus, tous les réseaux sont enterrés, les seules marques visibles des réseaux sont les plaques d'égout et les bouches à clefs qui permettent de déterminer leur emplacement le long de la voirie. Enfin, les derniers éléments remarquables sont les bassins de rétentions et les éventuels talus et fossés créés.

Le chantier présente un avantage, tous les ouvrages viennent d'être finalisés et l'ensemble de la zone est donc exempt de végétation. En effet, seuls quelques arbres ont été sauvegardés. Comme nous l'avons vu précédemment, la végétation est un frein pour le relevé par drone car cette méthode ne permet que de relever le sursol. Ce chantier ne présentant que peu de végétation est un bon support à la réalisation d'un relevé par la méthode de restitution par photogrammétrie. Malgré cela, avant de débiter le vol, il est impératif de connaître la législation applicable à la zone.

II.1.2 Réglementation aérienne sur la zone

Afin de savoir quelles restrictions de vol présentait la zone de test, une étude a été faite. Nous avons utilisé le site Géoportail pour prendre connaissance de ces éventuelles restrictions. Il s'avère que la zone est située dans un espace de restrictions car un aérodrome est à proximité comme l'illustre la carte sur la figure 13.

En zone rouge, le vol est interdit (hors protocole avec l'aérodrome et la DGAC). En zone orange, la hauteur de vol est limitée à 50 m et à 100 m pour la zone jaune (figure 13).

Afin de notifier le vol de notre drone sur la commune de Saint-Martin de Londres, nous avons dû déclarer celui-ci. À l'aide de la plateforme « Alpha-Tango », nous avons décrit le type de vol que nous allions réaliser. Ici, nous nous situons dans une zone qui n'est pas classée comme « agglomération » bien que très proche. C'est donc le scénario de vol S-1 qui s'applique. Ce scénario nous impose, hors restrictions supplémentaires, de réaliser des vols à vue à 150 m de hauteur maximum, à une distance de 200 m du télépilote avec un drone de moins de 25 kg.

Cependant, la zone traitée se trouve près d'un aérodrome et des restrictions supplémentaires s'appliquent. Ainsi, pour voler, la hauteur maximum n'est plus que de 100 m à laquelle s'ajoute les autres restrictions du scénario S1.

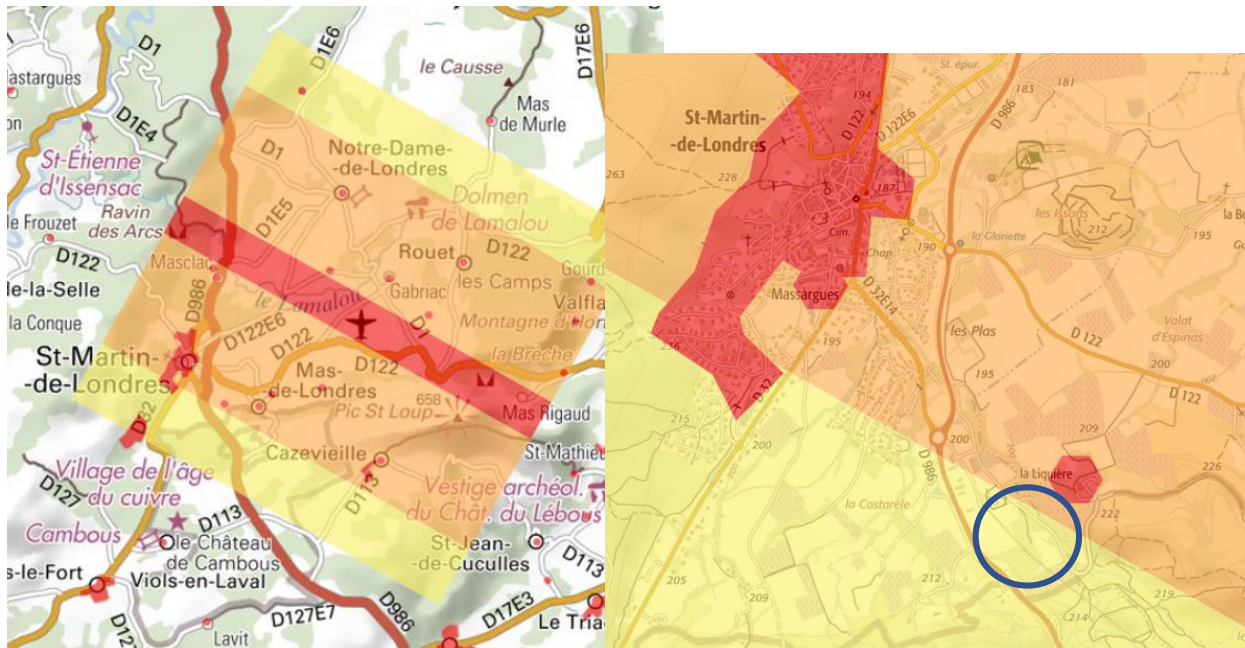


Figure 13 : Carte des restrictions de vol sur notre zone d'essai, échelle non définie, issue du site Géoportail

II.2 Moyens à disposition

II.2.1 Le vecteur drone et ses caractéristiques

Le cabinet Bbass est doté d'un drone Dji Phantom 4 pro. Ce drone est un quadricoptère d'une masse de 1,4 kg et d'une dimension de 35 cm de diagonale (sans hélice). De plus, il peut résister à une vitesse de vent jusqu'à 36 km/h de manière générale. Dans le cabinet Bbass, nous ne volons que lorsque le vent est à une vitesse inférieure à 30 km/h afin d'avoir une marge de sécurité.



Figure 14 : Photographie du drone Dji phantom 4 pro outil de notre étude, issu du site de Dji

Il est également équipé d'une centrale inertielle et d'un capteur GNSS recevant uniquement les données issues des constellations de satellites GLONASS et GPS. Ce capteur permet au drone de se positionner en 3 dimensions avec une précision d'environ 1,5 m.

Enfin, il est équipé d'une nacelle stabilisée (appelée aussi « Gimbal » en anglais) permettant d'amortir les mouvements éventuels de la caméra du drone. En effet, cette nacelle supprime les effets de vibrations et de mouvements du drone permettant alors de limiter considérablement le flou sur les images.

II.2.2 L'appareil photographique embarqué

La caméra embarquée est une caméra solidaire du drone et de la nacelle stabilisatrice. Il n'y a donc aucune possibilité de changer l'appareil photo. Cette caméra est constituée d'un capteur CMOS 1" de 20 millions de pixels effectifs. Cela correspond donc à une taille d'image en pixels effectifs de 5472 x 3648 pixels. Sur cet appareil, un objectif de 8,8 mm est intégré. Celui-ci est solidaire du boîtier, il n'est donc pas interchangeable. Cet objectif correspond à une focale de 24 mm en focale équivalente. Cette focale équivalente nous permet de déterminer quel est le type d'objectif monté sur cet appareil. Ici, la focale étant de 24 mm, elle correspond à un objectif grand angle doté d'un champ de vision élevé.

Sur la figure 15, le champs de vision de l'appareil photo est de 84°. Nous avons voulu voir si ces données étaient exactes et avons donc calculé le champs de vision sur la largeur et la hauteur du capteur. Ces données sont importantes pour connaître l'emprise de l'image sur le sol à une hauteur déterminée.

Pour déterminer ces données, il nous a fallu utiliser la formule du champ de vision (FoV) qui est la suivante :

$$Fov = 2 * \text{atan}\left(\frac{l_{\text{capteur}}}{2f}\right)$$

Cette formule s'applique dans les deux dimensions du capteur. Après calcul, on obtient chacun des champs de vision suivants : 53,13° pour la hauteur du capteur, 73,74° pour la largeur du capteur et 84,06° sur la diagonale. Nous obtenons les mêmes résultats que ce qui a été défini par le constructeur, mais celui-ci exprime ce FoV sur la diagonale et non sur la largeur du capteur.

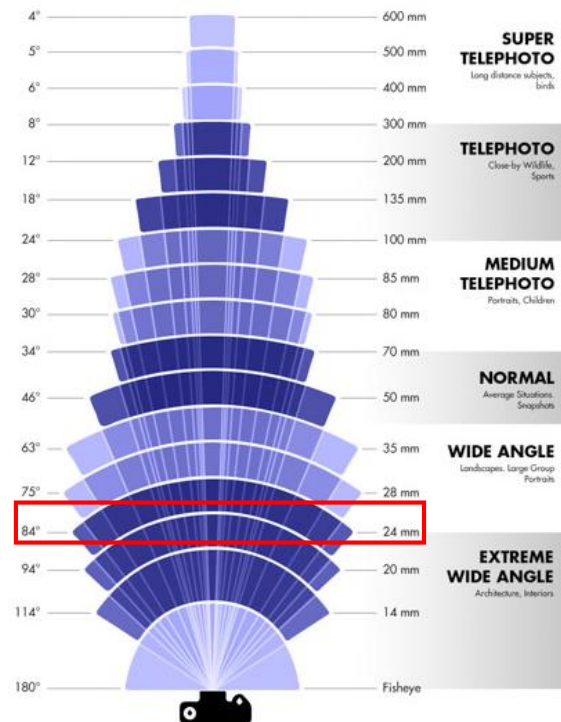


Figure 15 : Illustration des différents champs de vision en fonction de la focale de l'objectif. Le rectangle rouge montre l'angle de champs de vision de notre drone, [expertphotography.com]

Enfin, ce boîtier dispose de paramètres de réglage communs à tous les appareils photo du marché c'est-à-dire un réglage de l'ouverture (f/2.8 à f/11), une vitesse d'obturateur (8 sec à 1/2000 sec) et un réglage de la sensibilité du capteur ISO (100 à 12800)

II.3 Détermination des paramètres du plan de vol

II.3.1 Hauteur de vol et GSD

Comme précisé précédemment, la hauteur de vol maximale sur l'emprise de notre zone est de 100 m. Afin d'obtenir une précision des données se rapprochant le plus d'un levé par station totale, nous avons déterminé le GSD moyen. Nous avons vu dans la littérature que la précision d'un relevé photogrammétrique dépendait entre autres de la résolution de l'image obtenue et donc du GSD au sol. Nous nous sommes fixé un GSD d'environ 1 cm afin d'obtenir une précision en planimétrie équivalente à 1 à 2 fois le GSD et une précision altimétrique de 1 à 3 fois la valeur du GSD [Latitude drone].

Afin d'obtenir la hauteur de vol, nous avons utilisé la formule suivante permettant de relier le GSD et la hauteur de vol :

$$GSD = t * \frac{H}{f}$$

- Où ici la taille du pixel sol (GSD) est de 1 cm
- Où t est la taille du photosite qui est de 2,41 µm
- Et la focale est de 8,8 mm

Hauteur de vol	Largeur d'une photo [m]	Longueur d'une photo [m]	Surface d'une photo [m ²]	GSD [cm/px]
5	5	7.5	37.5	0.137
10	10	15	150	0.274
15	15	22.5	337.5	0.411
20	20	30	600	0.548
25	25	37.5	937.5	0.685
30	30	45	1350	0.822
35	35	52.5	1837.5	0.959
40	40	60	2400	1.096
45	45	67.5	3037.5	1.234
50	50	75	3750	1.371
55	55	82.5	4537.5	1.508
60	60	90	5400	1.645

Tableau 3 : Tableau du GSD et la couverture surfacique d'un cliché en fonction de la hauteur de vol

La hauteur de vol déterminée à l'issue du calcul est donc de 35,8 m. Cette hauteur de vol théorique respecte ainsi la réglementation. Nous avons pour autant choisi une hauteur de vol

de 40 m pour plusieurs raisons. D'une part, nous ne savions pas exactement la hauteur de la ligne haute tension qui se trouvait sur la zone et nous ne souhaitons pas risquer une éventuelle collision. D'autre part, l'augmentation de 5 m de la hauteur de vol nous a permis de réduire considérablement le nombre de photographies et donc le poids des données tout en augmentant que très faiblement la taille du GSD illustré dans le tableau 3. Nous avons donc décidé d'un compromis entre GSD et volume des données acquises.

II.3.2 Taux de recouvrement

Nous avons vu précédemment que le taux de recouvrement est important pour la restitution 3D par photogrammétrie. Différents développeurs de logiciel comme Pix4D ou encore Metashape recommandent un fort taux de recouvrement pour une bonne reconstruction par photogrammétrie. Nous avons donc opté pour un recouvrement de 80% pour le recouvrement longitudinal et de 60% pour le recouvrement interbande (figure 16). Ce taux de recouvrement nous permet de voir un objet sur 8 images différentes.

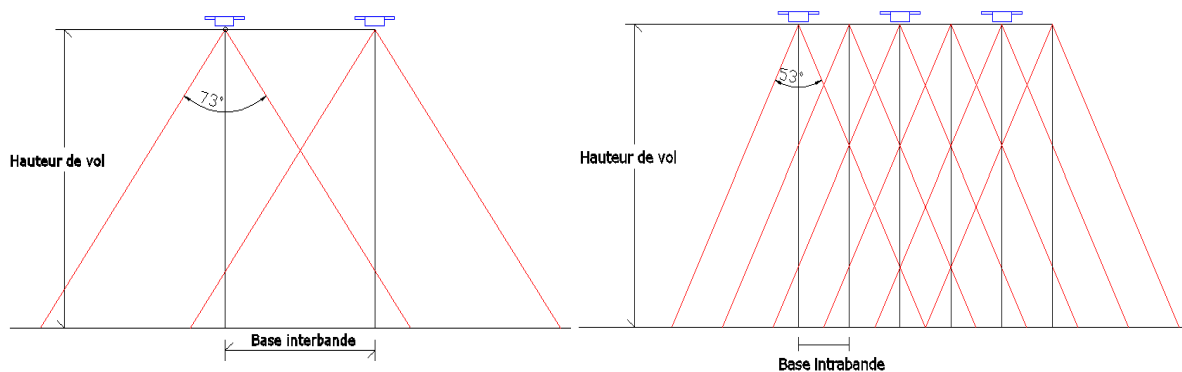


Figure 16 : Géométrie d'acquisition des clichés entrebandes (à gauche) et interbandes (à droite)

À partir de ce taux de recouvrement, il est possible de calculer le nombre de clichés à acquérir ainsi que le nombre de bandes à réaliser pour couvrir l'ensemble du chantier.

Nous avons donc calculé la base entre chaque photo, le nombre de photographies ainsi que le nombre de bandes permettant de couvrir la zone (tableau 4).

Hauteur de vol [m]	GSD [cm]	Base [m]	Interbande [m]	Recouvrement longitudinal [m]	Recouvrement latéral [m]	Nombre de bande	Nombre de cliché par bande	Nombre de cliché total
35	0.96	7	21	28	32	11	31	322
40	1.10	8	24	32	36	9	27	252
45	1.23	9	27	36	41	8	24	204

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des bases, du recouvrement et du nombre de clichés en fonction de la hauteur de vol

De plus, il est important de tenir compte d'une zone tampon autour de la zone de chantier celle-ci permettant d'avoir le recouvrement suffisant sur les bords de la zone du levé.

II.3.3 Vitesse du vecteur drone

La vitesse du vecteur drone est un paramètre important à prendre en compte car il influence grandement la qualité du nuage de points généré par photogrammétrie aérienne. En effet, en fonction de la vitesse de vol, de la hauteur de vol et du réglage de l'appareil photo, un flou sur l'image peut être généré. Lors de la reconstruction du modèle 3D, l'étape d'alignement des clichés utilise les pixels issus des photos. Si l'image présente un flou, il se peut que l'alignement des clichés ne soit pas de bonne qualité ou échoue. Il est donc important d'éviter de générer ce flou dans les images. Il existe 3 types de flous :

- Le flou artistique, généré par une faible profondeur de champ dans l'image,
- Le flou de mise au point, essentiellement dû à une mauvaise mise au point, qui engendre une intersection des rayons lumineux hors du capteur,
- Le flou de bougé, provoqué par le mouvement du boîtier ou du sujet photographié et un mauvais réglage de la vitesse de l'obturateur.

		Vitesse du drone [km/h]									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Vitesse obturateur [sec]	1/20	0.069	0.139	0.208	0.278	0.347	0.417	0.486	0.556	0.625	0.694
	1/40	0.035	0.069	0.104	0.139	0.174	0.208	0.243	0.278	0.313	0.347
	1/100	0.014	0.028	0.042	0.056	0.069	0.083	0.097	0.111	0.125	0.139
	1/200	0.007	0.014	0.021	0.028	0.035	0.042	0.049	0.056	0.063	0.069
	1/400	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.021	0.024	0.028	0.031	0.035
	1/800	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010	0.012	0.014	0.016	0.017
	1/1000	0.001	0.003	0.004	0.006	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014
	1/2000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.006	0.007
		Erreur de filé [m]									

Tableau 5 : Détermination l'effet de filé acceptable (en vert) pour un GSD au sol de 1.1cm

Dans notre cas d'étude, le GSD défini est de 1.1 cm/px. Par définition, le flou est perceptible lorsque que l'effet de « filé » est visible sur plus d'un pixel. Nous avons donc calculé cet effet de « filé » en fonction des paramètres de vitesse du drone et de l'obturateur. Plusieurs configurations de vol sont donc possibles et répertoriées dans le tableau 6 ci-dessus, afin de pouvoir réduire l'effet de filé en dessous de la taille du pixel sol (zone en vert).

A l'aide de l'application Dji Ground Station développée par Dji, (application planificatrice de plan de vol sur Ipad), il est possible d'ajouter une option au plan de vol automatique. Cette option appelée « Hover&capture at Point » permet de stopper le drone à chaque prise de vue afin d'éviter le flou sur les images. Cette option a donc été utilisée lors de notre relevé. Cependant, son impact est de considérablement augmenter le temps de vol qui peut ainsi passer du simple au double si le drone s'arrête à chaque prise de vue.

Il est donc important maintenant de bien paramétrer les réglages du boîtier photographique afin d'avoir la meilleure qualité d'image possible.

II.3.4 Réglage de l'appareil photo numérique

Sur le terrain, nous avons réalisé l'ensemble des photographies en mode manuel. L'objectif était de pouvoir contrôler en temps réel les valeurs prises par l'APN lors des prises de vue. En effet, l'APN en mode automatique, détermine les meilleurs paramètres (vitesse, ouverture, ISO) afin de réagir aux conditions d'exposition de l'appareil photo. Nous avons vu précédemment que la montée en ISO du capteur peut être néfaste pour la reconstruction photogrammétrique. Le choix du mode manuel a donc été privilégié pour cette prise de vue. Nous avons donc pris soin de régler les paramètres de l'appareil photo sur l'ISO 100 (limite le grain dans l'image), une vitesse d'obturateur comprise entre 1/400 et 1/1000 et une ouverture comprise entre f/2.8 à f/10.

Ces paramètres nous ont permis de garder la même exposition tout au long de la prise de vue afin que la radiométrie des objets vus dans chaque image soit sensiblement la même.

Pour pouvoir régler les paramètres de prises de vue sachant que nous étions à distance, l'application Dji Ground Station a été utilisée. Celle-ci permet d'avoir en temps réel la visualisation des clichés acquis durant le vol, ainsi que les paramètres de l'appareil photographique. C'est aussi avec ce logiciel que nous avons pu réaliser le plan de vol automatisé (§II.3.6).

Une fois tous les paramètres prédéfinis, il est important de penser à installer un réseau de points au sol afin de pouvoir à la fois contrôler et géoréférencer nos données.

II.3.5 Relevé du réseau de points de contrôle et de vérification

Nous avons donc déterminé les différents paramètres de prises de vue afin de mener à bien notre relevé par photogrammétrie aérienne par drone. Afin de contrôler notre levé et le géoréférencer, il a été important de mettre en place un réseau de points connus au sol avant de lancer l'acquisition des données sur le terrain. En effet, notre drone ne dispose pas d'une antenne GNSS permettant le géoréférencement direct des clichés avec une précision centimétrique.

Sur notre zone test, nous avons donc disposé au préalable 14 GCP. En suivant les conseils des études réalisées sur les GCP, nous avons donc installé les cibles sur le pourtour de notre zone de levé ainsi qu'au centre afin de contraindre notre relevé sur l'ensemble de la zone. Deux types de cibles ont été mises en place. Les cibles utilisées ont été réalisées en interne à l'aide de grands panneaux de plastique alvéolé. Les premières cibles ont une dimension d'1 m² et sont de couleur rouge et blanche. Les secondes cibles réalisées pendant ce TFE ont une dimension de 50 cm² et sont de couleur noir et blanche. En effet, nous nous sommes aperçus que le contraste entre les deux couleurs des cibles rouge et blanche était faible (figure 17). Ce mauvais contraste ne permettait donc pas un pointage optimal des cibles dans le logiciel Metashape (vue en partie II.3.7).

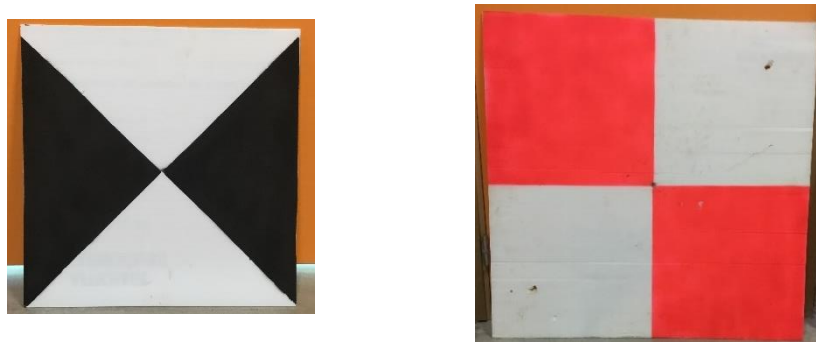


Figure 17 : Photos des cibles utilisées, à droite cible de 50 cm² et à gauche celle d'1 m²

Nous avons donc réalisé l'implantation des cibles au sol, illustré par la figure 18, et nous les avons relevés à l'aide de deux méthodes, la méthode par relevé GNSS et par tachéométrie.



Figure 18 : Emplacement des GCP et CPs (drapeaux bleus)

II.3.5.1 Le relevé par la méthode GNSS

Afin de relever les cibles préalablement implantées, nous avons utilisé la méthode NRTK. Cette méthode nécessite un récepteur GNSS avec une connexion GSM afin de pouvoir capter le réseau internet. Un seul récepteur est nécessaire. La deuxième antenne, appelée communément « pivot », est souvent rattachée à un réseau GNSS permanent. Grâce à la connexion internet, cette méthode permet d'avoir un positionnement en temps réel avec une précision absolue de 2 à 5 cm en fonction de différents paramètres. En effet, cette connexion internet permet de transmettre au mobile (notre récepteur GNSS sur site) toutes les corrections calculées par les antennes RGP proches de notre site d'étude. Une fois ces corrections reçues, notre pivot peut alors calculer ses propres coordonnées. Il suffit donc d'initialiser le récepteur GNSS puis de le connecter au réseau internet pour avoir les coordonnées instantanément. Pour mesurer les points, nous avons stationné nos points pendant 15 secondes. Nous avons ainsi obtenu, à l'issue de cette campagne de mesures, nos 14 points d'appui et de contrôle.

II.3.5.2 Le relevé par la méthode de topométrie classique

Afin de comparer nos modèles issus du relevé par drone, nous avons choisi de réaliser un deuxième relevé des cibles avec la méthode de topométrie classique. Etant donné que le relevé avait déjà été réalisé, nous n'avons pas eu à implanter les stations de notre polygonale. Lors de notre levé, nous avons stationné sur un seul point et relevé les autres stations déjà implantées pour pouvoir s'orienter et nous géoréférencer. Grâce à la méthode de relevé par rayonnement, nous avons pu relever toutes les cibles unes à unes à l'aide d'un prisme.

Nous avons donc obtenu les coordonnées des cibles 100 à 113.

En comparant les mesures effectuées par cette méthode et celles par la méthode NRTK, nous pouvons nous apercevoir d'écarts que nous avons récapitulés dans le tableau 6. Ces écarts proviennent essentiellement de la méthode de détermination des cibles. Ils permettent entre autres de contrôler les coordonnées déterminées par GNSS. Nous pouvons remarquer que la composante altimétrique de la cible 104 est mal déterminée, sans doute à cause de

Écarts	Est [m]	Nord [m]	Altitude [m]
100	-0.009	-0.001	-0.168
101	-0.021	-0.008	0.048
102	-0.016	-0.021	0.038
103	-0.02	-0.007	0.027
104	-0.017	-0.022	0.07
105	-0.02	-0.031	0.006
106	-0.012	-0.009	0.035
107	-0.014	0.013	0.042
108	-0.02	-0.01	0.041
109	-0.015	-0.016	0.021
110	-0.017	-0.019	0.024
111	-0.021	-0.007	0.03
112	-0.01	-0.012	0.031
113	-0.024	-0.005	0.036

Tableau 6 : Différences de coordonnées entre les deux méthodes de relevé.

la végétation environnante provoquant un masque important. La composante altimétrique du point 100 est elle aussi mal déterminée. L'implantation au fond du bassin de rétention peut en être la cause. Nous avons donc déterminé 14 GCP dont 2 sont erronés. Ces deux points ne seront donc pas pris en compte pour le calcul de reconstruction tridimensionnel car ils pourraient le dégrader.

II.3.6 Les différents scénarii de prise de vue effectués

À l'issue des recherches sur les prises de vues en photogrammétrie aérienne, nous avons pu voir qu'il existait plusieurs protocoles permettant une bonne reconstruction photogrammétrique [Nocerino et al., 2013 ; James & Robson, 2014]. Dans ces recherches, il est notamment fait mention de prises de vue obliques.

Ces prises de vues montrent que lorsque que celles-ci sont obliques (45°), l'orientation des photographies et la précision de positionnement des points du modèle 3D sont meilleures que la précision des modèles issus de plans de vol nadiraux. Cette amélioration semble être issue de l'intersection plus franche des rayons perspectifs [Tournadre, 2015].

Nous avons donc voulu mettre en pratique ces deux types de vols afin d'étudier leurs influences sur les orientations des photographies et le modèle 3D.

Les paramètres de recouvrement choisis ont été les mêmes sur les deux prises de vue. Nous avons cependant changé la hauteur de vol dans le deuxième cas de figure. De plus, facile de prise en mains, c'est le logiciel « Dji Ground Station pro » (logiciel gratuit Dji) qui a été utilisé pour réaliser les prises de vue de chaque vol.

II.3.6.1 Prise de vue Nadirale

Nous avons précédemment déterminé les paramètres permettant d'avoir une bonne reconstruction 3D par méthode photogrammétrique. Nous avons aussi voulu déterminer les angles d'intersections des rayons perspectifs issus de chaque image. En s'appuyant sur les taux de recouvrement ainsi que l'angle de champs de vision de la caméra, nous pouvons calculer l'angle maximum où deux rayons perspectifs homologues se croisent. Avec un recouvrement de 60% entre bandes, le recouvrement s'effectue sur 3 photographies. La figure 19 nous permet de mieux visualiser cet angle maximum. Nous remarquons que l'angle d'incidence maximale est de 33° pour un couple issu de deux bandes parallèles et de 62° pour un couple issu de la première et 3^{ème} bande.

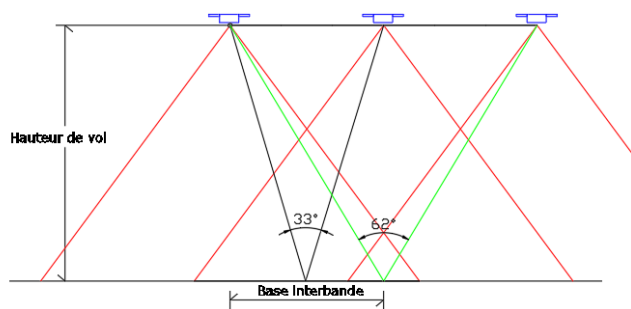


Figure 19 : Illustration de l'angle d'incidence des rayons perspectifs au maximum de leurs valeurs entre des couples de clichés pris sur chaque bande (en rouge l'emprise des clichés et en noir et vert les angles d'incidence)

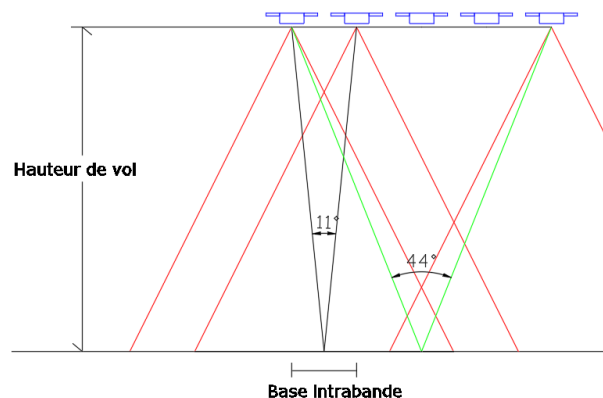


Figure 20 : Illustration des angles d'incidence entre deux couples de clichés sur une même bande (en rouge, l'emprise des clichés et en noir et vert, les angles d'incidence)

En ce qui concerne les couples interbandes (figure 20), l'angle est de 11° pour un couple de deux photographies ce qui est assez faible. Il peut y avoir une valeur de 44° pour le recouvrement entre le premier et le 5^{ème} cliché.

Durant ce vol, nous avons fait évoluer le drone à une hauteur de 40 mètres par rapport au sol en ayant un taux de recouvrement nous permettant d'avoir un point vu sur 8 images. En incorporant ces données sur l'application *Dji Ground Station pro* et en optimisant l'angle de parcours du drone par rapport à notre zone de test, nous obtenons un ensemble de 232 clichés pour un temps de 18 minutes environ. Rappelons que le drone s'arrête à chaque prise de vue ce qui rallonge d'environ 8 minutes le temps de vol. Sur la figure 21, nous pouvons voir ce plan de vol. Il est à noter les quelques irrégularités entre clichés, la présence de certains clichés pris 2 fois et d'autres absents dans une bande.

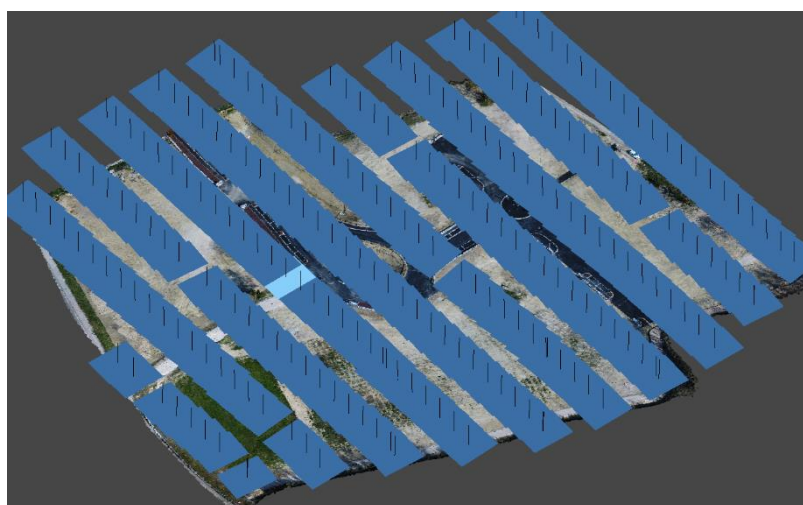


Figure 21 : Illustration du plan de vol avec les clichés (rectangles bleus) et les axes de prise de vue de chaque cliché (ligne noire au-dessus des clichés) issue du logiciel *Metashape*

II.3.6.2 Prise de vue Oblique

Nous avons effectué, à la suite du précédent vol, une seconde acquisition avec une prise de vue orientée de -70° par rapport à l'horizontale du drone. La figure 22 nous permet d'illustrer ce plan de vol ainsi que l'angle des clichés. Afin d'avoir un GSD proche du centimètre, nous avons volé à une hauteur de 35 m nous permettant d'obtenir un GSD moyen de 1.15 cm. Une baisse de 5m de hauteur a fait augmenter le nombre de clichés de 232 à 326. De plus, le temps de vol est rallongé passant de 18 à 24 minutes environ.

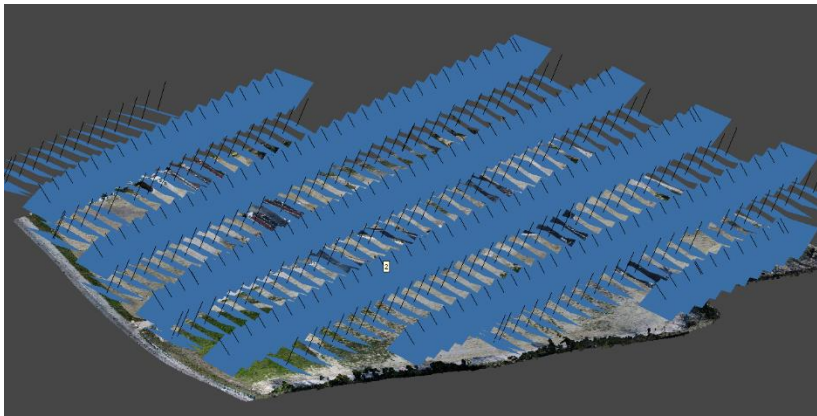


Figure 22 : Illustration du plan de vol avec les clichés (rectangles bleu) et les axes de prise de vue de chaque cliché (ligne noire au-dessus des clichés) issue du logiciel Metashape

Comme expliqué précédemment, nous avons voulu déterminer les angles d'incidence maximum des rayons perspectifs. Ici, nous avons déterminé empiriquement ces valeurs. D'une part, l'emprise des clichés au sol n'est plus la même, passant de rectangle pour une vue nadirale à trapézoïdale pour une vue oblique.

D'autre part, le recouvrement interbande est plus grand. En effet, les prises de vues se croisent davantage étant donné l'orientation des photographies qui sont dirigées vers l'avant comme schématisé en figure 23. Dans une même bande, nous avons donc des intersections avec des angles variant entre 11° et 49° . De plus, entre deux bandes (où le drone vole en sens inverse), il est possible d'avoir des angles d'incidences de 89° entre deux rayons perspectifs. On s'aperçoit donc que les rayons perspectifs se croisent plus nettement entre deux clichés issus de deux bandes différentes. Nous avons fait la simplification, ici, que les deux clichés ne sont pas décalés de la distance interbande. Nous ne savons pas si cela pourrait avoir une influence sur ces angles d'incidence, le principe étant de savoir si les angles sont plus obtus que ceux dans le cadre d'une prise de vue nadirale.

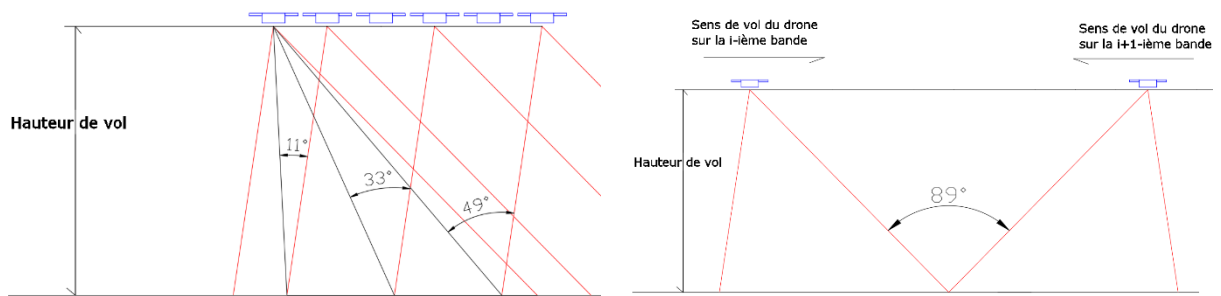


Figure 23 : A gauche : angles d'intersection des rayons perspectifs entre couple de photographies d'une même bande. A droite : angle d'intersection entre deux clichés issu de bandes adjacentes où le recouvrement des clichés est à l'extrême.

Les angles sont donc sensiblement plus grands, nous verrons par la suite si cette prise de vue oblique permet une meilleure restitution 3D.

II.4 Reconstruction tridimensionnelle à l'aide du logiciel Metashape

Dans cette partie, nous expliquerons les manipulations à effectuer sur le logiciel Metashape afin d'extraire de ces différents clichés acquis pendant ces deux plans de vol, un nuage de points 3D et une orthophoto. Enfin, nous comparerons nos nuages de points obtenus afin de comprendre l'influence des différents types de prises de vue ainsi que le nuage ayant la meilleure précision.

II.4.1 Démarche utilisée pour extraire le nuage de point

Les clichés obtenus ainsi que les cibles déterminées sont les seules données à entrer dans le logiciel et grâce à celles-ci, il nous est possible de reconstruire le modèle 3D de notre lotissement. Cette étape de reconstruction a été réalisée à l'aide du seul logiciel Metashape. Le logiciel étant un logiciel constructeur, il n'a pas été possible de connaître l'algorithme utilisé pour la reconstruction photogrammétrique. Cependant, certaines étapes sont communes à tous les logiciels.

1. Importation des clichés et paramètres d'orientation interne :

Cette étape est la première à réaliser sur le logiciel. En effet, les clichés sont les données les plus importantes car elles permettent de réaliser le modèle 3D

De plus, l'appareil photographique utilisé possède ses propres paramètres internes qu'il convient d'identifier. À la suite d'une précédente étude menée en interne au cabinet sur le même drone, la calibration interne a déjà été étudiée [M. ROCHAT, 2018]. Il s'agit d'un petit fichier .XML à intégrer dans le logiciel. Celui-ci va permettre de corriger les déformations liées à l'optique de l'APN.

2. Orientation relative des caméras :

La deuxième étape correspond à l'appariement des photos les unes avec les autres.

Cette procédure s'effectue en plusieurs sous étapes.

Voici les étapes :

- Détection des points caractéristiques de chaque image : Metashape va faire une analyse des pixels de chaque image afin d'en extraire des points caractéristiques qui seront visibles sur plusieurs clichés.
- Appariement des points d'intérêts : Les points préalablement détectés vont être associés un à un afin de détecter des paires de points (figure 24). Ces paires de points vont permettre de déterminer les paramètres d'orientation des photographies.

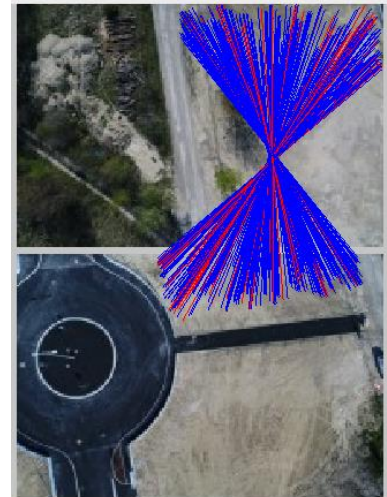


Figure 24 : Paires de points homologues sélectionnées sur une paire de clichés (lignes bleues) et paires de points non valides (lignes rouges)

Le logiciel nous permet de sélectionner la « précision » de l'alignement des photographies en choisissant parmi quatre types de résolution qui font référence à la taille des pixels étudiés dans chaque image.

Le paramètre de précision « Ultra haute » permet de traiter les clichés dans leur pleine résolution alors que le paramètre « Haute » traite les clichés avec un facteur 2 de sous-échantillonnage.

Lors du traitement, c'est la résolution « Haute » qui a été choisie. Nous nous sommes aperçus après différents tests que le temps de traitement était sensiblement plus long en choisissant le paramètre « Ultra Haute » pour une qualité d'alignement similaire.

À l'issue de cette étape, nous obtenons un nuage de points clairsemé constitué uniquement des points de liaisons reconstruits



Figure 25 : Nuage de points de liaison dérivant du processus d'ajustement des faisceaux utilisé pour l'orientation relative du bloc d'images.

en 3D. On s'aperçoit, grâce à ce nuage, que les points homologues ne sont pas répartis uniformément dans les images (figure 25). La voirie, par exemple, est beaucoup moins dense que la zone de végétation. Ces différences sont dues à un contraste entre chaque pixel moins important.

3. Orientation absolue des caméras :

Afin de géoréférencer notre modèle, nous avons intégré les 14 GCP dans le logiciel afin d'avoir des points connus en coordonnées terrain. Le travail consiste ensuite à pointer les cibles sur chacun des clichés. Sur le logiciel, il est possible de réaliser une détection automatique des cibles codées ce qui permet éventuellement de se passer de cette étape. Nous n'avons pas pu réaliser ce type de manipulation car nous n'avions pas de cibles codées.

Il est important de bien pointer les cibles dans chaque image car la qualité du modèle 3D en dépend. En effet, il est préconisé de réaliser un pointé ayant des valeurs de reprojection les plus basses possibles, entre 0 et $\frac{1}{2}$ pixel. Si la qualité du pointé est « mauvaise », les rayons perspectifs homologues ne se croisent pas au même endroit ce qui provoque une approximation du point en 3D.

Lors de cette étape, il est possible d'optimiser les paramètres internes de la caméra avec l'option « Optimiser les caméras » de Metashape. Cette étape permet de réaliser un réajustement des paramètres du modèle caméra afin de mieux supprimer les distorsions dues à l'optique.

4. La densification du modèle photogrammétrique :

Après avoir obtenu les paramètres de calibration (optimisés) de la caméra, les paramètres d'orientation du bloc d'image et son géoréférencement, nous pouvons réaliser la dernière étape de la reconstruction 3D.

Metashape, avec la fonction « construire nuage dense », permet de reconstruire le nuage de points 3D. Plusieurs paramètres sont ajustables en entrée de cette fonction. La résolution est maximale quand le paramètre est mis sur « Qualité Ultra High » permettant d'obtenir un point tous les centimètres (notre taille de pixel sol étant de 1 cm environ). La qualité « High » permet quant à elle d'avoir un facteur de sous-échantillonnage des images de 2 ce qui conduit à avoir un point tous les deux centimètres. Nous avons choisi de réaliser la densification avec une qualité « Haute »

étant donné le nombre de points que nous obtenions et le temps de traitement optimisé.

Effectivement, obtenir un point tous les centimètres s'est avéré peu nécessaire dans le cadre de notre étude. La figure 26 nous illustre le nuage de points colorisé obtenu.



Figure 26 : Nuage de points obtenu à l'issue des traitements énoncés ci-dessus

L'annexe n°1 nous explique le workflow récapitulatif des différentes étapes réalisées sur le logiciel Metashape afin de reconstruire le modèle 3D de notre zone test.

Nous avons réalisé plusieurs reconstructions en fonction des paramètres de prises de vue des clichés et en fonction de la détermination des GCP. Il est à noter que tous les paramètres de reconstruction sont les mêmes pour les 6 jeux de données.

Nous avons adopté la notation ci-dessous pour les 6 jeux de données traitées et qui seront évalués dans la partie suivante :

- Nadir_GNSS : prise de vue nadirale et GCP déterminé par GNSS
- Oblique_GNSS : prise de vue oblique et GCP déterminé par GNSS
- Nadir_Oblique_GNSS : somme des deux prises de vue et GCP déterminé par GNSS
- Nadir_Tachéo : prise de vue nadirale et GCP déterminé par topométrie
- Oblique_Tachéo : prise de vue oblique et GCP déterminé par topométrie
- Nadir_Oblique_Tachéo : somme des deux prises de vue et GCP déterminé par topométrie

II.4.2 Comparaison des différentes reconstructions

II.4.2.1 Qualité de l'orientation absolue

A présent, nous allons juger la qualité de l'orientation absolue des nuages de points générés.

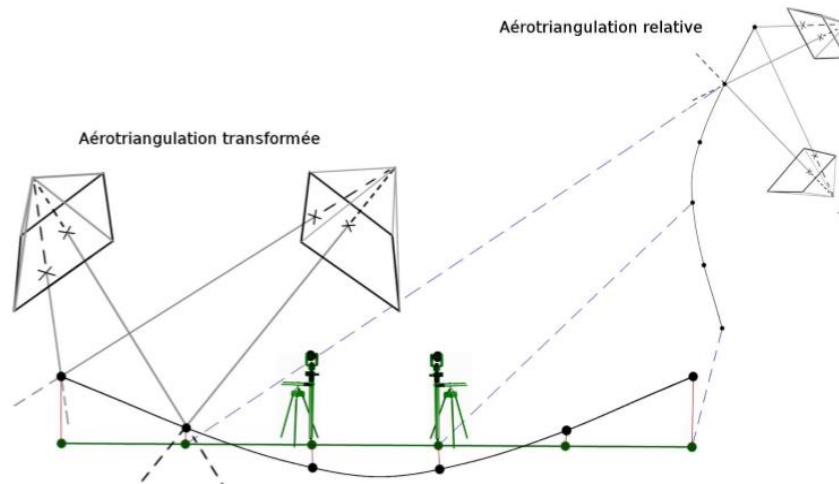


Figure 27 : Schéma de la transformation à 7 paramètres, aussi appelée recalage Helmert, en vert le modèle terrain et en noir le modèle photogrammétrique, issu de la Thèse de V. Tournadre, 2015

L'orientation absolue nous permet de réaliser la liaison entre le repère relatif des photographies alignées et le repère terrain (nos cibles). Cette liaison se fait à l'aide d'une transformation rigide à sept paramètres, schématisée par la figure 27, permettant alors de déplacer et de mettre à l'échelle notre modèle relatif. C'est à l'issue de ce processus que nous pouvons calculer les résidus sur les points de calages et de vérification.

Nous avons donc déterminé, à l'aide du logiciel Metashape, les résidus issus du calcul de la transformation d'Helmert. Rappelons-le, nous avons 14 GCP au sol répartis comme sur la figure ci-dessous. Nous avons donc opté pour neuf points de calage (ceux utilisés pour le géoréférencement) et cinq points de vérification (permettant le contrôle de



Figure 28 : Illustration de la disposition des points de calage et de vérification

notre modèle et du géoréférencement), illustré par la figure 28.

Le point 100 n'a pas été utilisé pour évaluer la qualité des modèles avec les cibles déterminées par GNSS étant donné la mauvaise détermination de celui-ci.

Les résultats obtenus ont été récapitulés dans le tableau 7.

	Résidu X [cm]	Résidu Y [cm]	Résidu Z [cm]	Résidu 3D [cm]
Nadir_GNSS	1.79	1.99	0.35	2.71
Oblique_GNSS	0.39	0.3	1.88	1.95
Nadir+Oblique_GNSS	2.11	2.13	5.97	6.69
Nadir_Tacheo	1.25	1.66	0.46	2.13
Oblique_Tacheo	0.44	0.62	0.76	0.93
Nadir_Oblique_Tacheo	1.47	1.93	5.6	6.11

	Résidu X [cm]	Résidu Y [cm]	Résidu Z [cm]	Résidu 3D [cm]
Nadir_GNSS	1.99	1.19	0.41	2.36
Oblique_GNSS	0.73	0.71	3.53	3.68
Nadir+Oblique_GNSS	1.6	1.71	5.9	6.33
Nadir_Tacheo	0.92	1.53	1.41	2.27
Oblique_Tacheo	0.46	0.4	0.7	0.94
Nadir_Oblique_Tacheo	1.6	1.8	5.57	6.1

Tableau 7 : Valeurs des résidus (EMQ) sur les points de calage choisis pour le recalage Helmert et valeurs des résidus sur les points de vérification

On peut voir sur les résultats de l'orientation absolue que tous les résidus en planimétrie sont compris entre 0,4 et 2,13 cm. En ce qui concerne les résidus en altimétrie, ils sont bien plus élevés avec des valeurs pouvant atteindre 6 cm (Nadir_Oblique_GNSS).

Il s'avère que les résidus les plus faibles sont ceux issus des jeux de données Oblique_Tacheo comme le montre le tableau 7. Toutes les valeurs des résidus des points de calage et des points de vérification sont en dessous du centimètre. Cela peut être dû à plusieurs paramètres.

D'une part, les prises de vues obliques sembleraient meilleures pour pouvoir aligner les clichés. De plus, il semblerait que l'inclinaison des prises de vue améliore l'auto-calibration de la caméra comme l'explique l'article de JAMES & ROBSON (2014). En effet, l'auto-calibration semble plus précise lorsque des visées obliques sont présentes dans le relevé.

Les points de calage et de vérification, obtenus par topométrie classique, semblent augmenter la précision car les résidus sont plus faibles dans ces jeux de données.

Enfin, l'ajout de clichés obliques dans les données nadirales ne semble pas améliorer la précision du nuage de points 3D dans notre situation comme l'avait préconisé JAMES & ROBSON (2014). En effet, les données Nadir_Oblique_GNSS/Tachéo présentent des résidus bien plus importants que les autres données, de l'ordre de 2 à 6 fois supérieur aux

données Oblique_Tacheo. Il semble que le logiciel Metashape et son algorithme ne permettent pas d'aligner convenablement ces données.

Nous pouvons aussi discuter de ces résidus en fonction de la précision des GCP. Ceux obtenus par relevé GNSS sont de moins bonne précision que les GCP déterminés par topométrie ce qui peut engendrer une baisse de précision absolue. En effet, on s'aperçoit que les résidus sur les points de vérification sont plus faibles sur les jeux de données où les cibles sont plus précisément déterminées. Cependant, les résidus entre les deux jeux de données Nadir_Oblique_GNSS/Tacheo sont sensiblement les mêmes ce qui montre que la précision des GCP n'est pas le seul facteur déterminant pour le bon géoréférencement des données. À l'issue de ce contrôle des résidus, nous avons voulu contrôler notre nuage de points à l'aide d'une vérité terrain.

II.4.2.2 Evaluation des modèles avec une vérité terrain

Il existe plusieurs possibilités pour pouvoir contrôler un nuage de points 3D. L'élément le plus important est qu'il est nécessaire de posséder des données plus précises que celles à contrôler. Voici donc un récapitulatif non exhaustif des méthodes de contrôle possibles [Tournadre, 2015] :

- La méthode nuage à nuage ;
- La méthode nuage à maillage,
- La méthode du contrôle ponctuel.

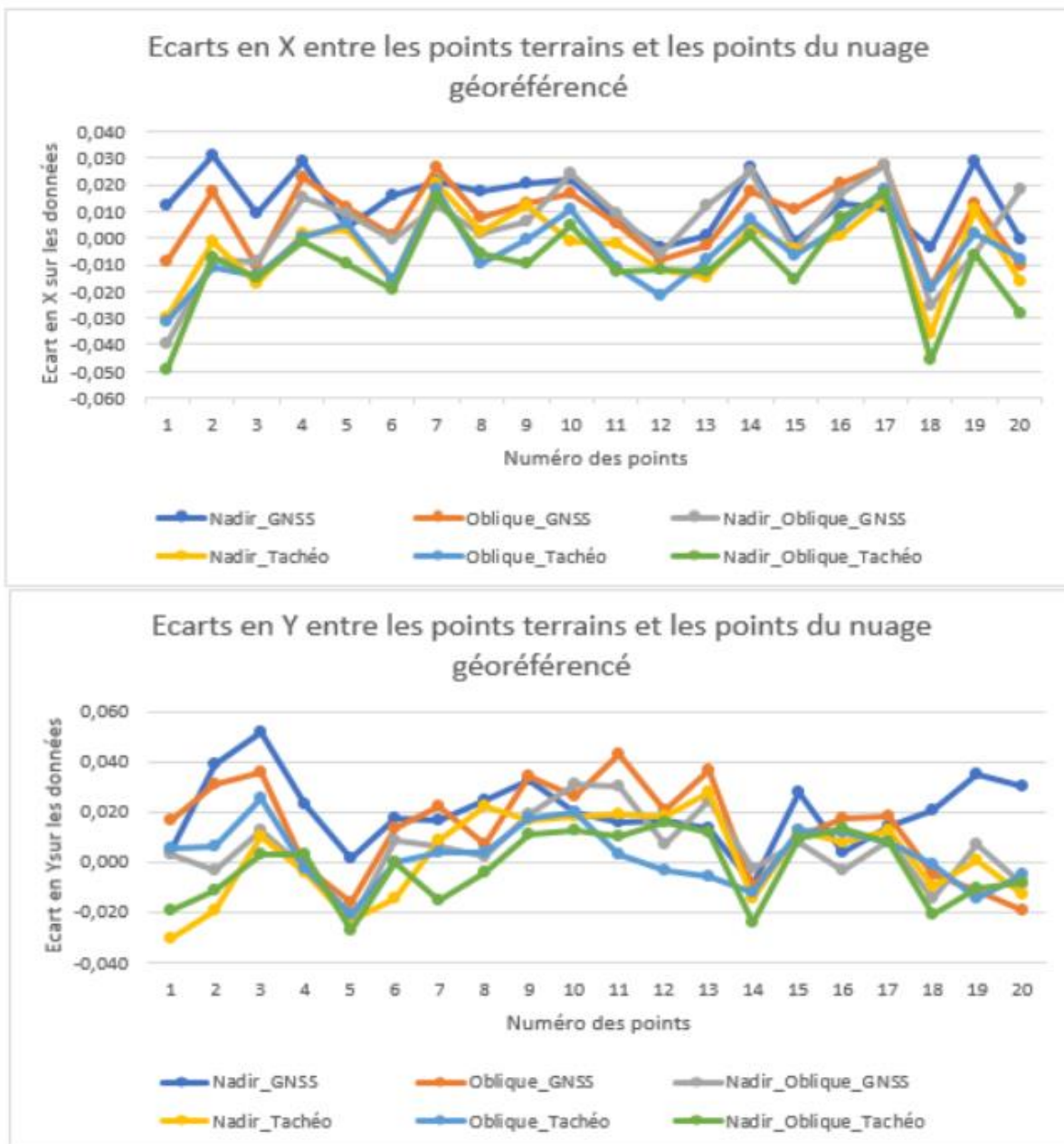
Ici, nous n'avons pas de nuage de points 3D avec une précision plus élevée que notre relevé. Seul un relevé par topométrie classique a été réalisé au préalable. Pour comparer notre nuage à ce relevé, nous avons choisi de prendre des points relevés par topométrie classique et de les comparer au nuage de points obtenu par drone. Nous avons



Figure 29 : Illustration des points de contrôle issus du récolement de travaux fait par topométrie classique. Les points sont répartis sur des regards le long de la voirie.

choisi de prendre le centre de plusieurs plaques d'égout afin de pouvoir pointer facilement ces derniers dans le nuage. De plus, cela nous renseigne sur la précision de positionnement des réseaux apparents. La figure 29 nous illustre la répartition de ces points.

Nous pouvons dorénavant déterminer les écarts entre ces 20 points. Sur la figure 30 ci-après, il est possible de visualiser les écarts entre ces points. Les écarts sur les coordonnées X sont compris entre ± 2 cm avec quelques valeurs plus élevées (point 1 par exemple). Les écarts sur les coordonnées Y sont compris entre ± 3 cm avec aussi quelques valeurs plus élevées (point 3 par exemple). La précision des points en planimétrie est impactée à la fois



par la reconstruction du modèle mais aussi par la qualité du pointé qui consiste à viser le centre des plaques d'égouts. La comparaison est donc impactée de cette erreur qui est à prendre en compte.

Concernant la comparaison des coordonnées altimétriques, en analysant la figure 31, on s'aperçoit que seule la composante altimétrique des données Nadir_Oblique_GNSS et Nadir_Oblique_Tacheo est mal déterminée avec des écarts de 10 cm par rapport à la vérité terrain.

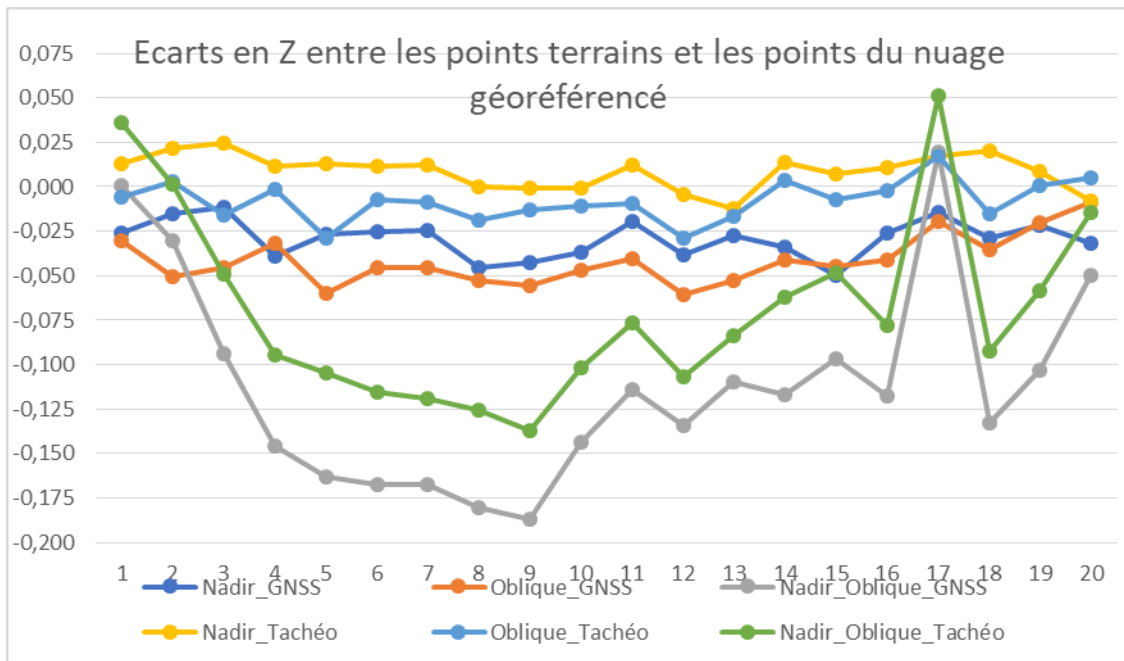


Figure 31 : Ecarts en Z entre les points du nuage et ceux de la vérité terrain

Les autres données ne présentent aucun écart aussi élevé. Les valeurs des données Nadir_GNSS et Oblique_GNSS sont aux alentours de 3 à 4 cm d'écart.

Ce sont les données issues de Nadir_Tachéo et Oblique_Tachéo qui obtiennent les plus bas écarts. Ces résultats montrent bien que l'association de cibles déterminées par tachéométrie et une prise de vue oblique améliore le modèle 3D. Cependant, la précision 3D des points sur les données Nadir_Tachéo est de 0.026 cm ce qui montre que la gamme de précision est la même entre ces deux jeux de données.

Enfin, afin de connaître la précision des points du nuage, nous avons déterminé les erreurs moyennes quadratiques de ceux-ci. L'analyse du tableau 8 montre que la précision

altimétrique est toujours la plus faible hormis pour les données Nadir_Tachéo et Oblique_Tachéo. C'est celle-ci qui dégrade la précision des points du nuage 3D.

En conclusion, les valeurs de résidus obtenues à l'issue du recalage Helmert sur les 5 points de vérification sont du même ordre de grandeur que les écarts avec les 20 points issus du relevé par topométrie classique.

	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]	RMSE _{3D} [m]
Nadir_GNSS	0.017	0.024	0.031	0.043
Oblique_GNSS	0.015	0.023	0.044	0.051
Nadir_Oblique_GNSS	0.017	0.015	0.125	0.127
Nadir_Tachéo	0.015	0.017	0.013	0.026
Oblique_Tachéo	0.013	0.012	0.014	0.022
Nadir_Oblique_Tachéo	0.019	0.014	0.086	0.089

Tableau 8 : Tableau des erreurs moyennes quadratiques sur les 20 points de vérité terrain

De plus, les erreurs en planimétrie dans tous les nuages sont de l'ordre de la précision d'un levé par topométrie classique réalisé dans le cadre d'un récolement de chantier.

En ce qui concerne la précision en altimétrie, les valeurs issues des données Nadir_Tachéo et Oblique_Tachéo montrent des résidus plus faibles que pour tous les autres jeux de données. Seules les données Nadir_Oblique_Tachéo et Nadir_Oblique_GNSS montrent des résidus bien plus élevés traduisant une mauvaise reconstruction 3D. Les précisions obtenues à l'issue des relevés Nadir_Tachéo et Oblique_Tachéo nous permettent de dire que la méthode par photogrammétrie aérienne couplée au relevé des cibles par topométrie classique permet d'avoir une précision correspondant au moins à celle de la méthode de topométrie classique dans le cadre du récolement de chantier de lotissement.

Nous avons donc deux jeux de données de qualité acceptable pour le récolement. Il a fallu choisir entre ces deux jeux de données pour l'extraction d'informations. Etant donné le nombre de photographies pour la méthode avec clichés Nadirale et la précision obtenue, il nous a semblé plus intéressant de travailler avec ce jeu de données car le temps de traitement des données est moins important pour une précision similaire.

II.5 Extraction des informations caractéristiques au récolement de chantier de lotissement

II.5.1 Essai d'extraction du fil d'eau de la voirie

II.5.1.1 Les logiciels utilisés

La recherche de logiciel permettant d'extraire les fils d'eau de voirie nous a fait découvrir la suite Logiciel d'OrbitGT développée par une société belge. Le logiciel Orbit 3DM feature extraction développé spécialement pour l'extraction automatique de données permet en effet, d'extraire les fils d'eau de voirie dans les nuages de points 3D souvent issus de données lidar mobile (mobile mapping). Cependant, il permet le traitement des données acquises par tout type de capteur, passant de l'imagerie aérienne jusqu'au drone et du scanner dynamique au scanner terrestre classique.

Nous avons donc voulu voir si les données acquises pouvaient être traitées dans ces logiciels.

II.5.1.2 Traitement, résultat et analyse

Afin d'extraire ces données, il est possible d'insérer les clichés, les centres de prise de vue et enfin le nuage de points. Sur ce logiciel, nous avons utilisé l'outil « Ridge with 1 point » permettant d'extraire les fils d'eau de voirie semi-automatiquement. Il suffit de cliquer sur un point correspondant au bas de la bordure de la voirie et à partir de ce pointage, le logiciel parvient à déterminer la ligne correspondant au fil d'eau de la voirie. Nous avons donc utilisé cette méthode sur l'ensemble du projet afin de déterminer si cette extraction de données pouvait être automatisée.

Cependant, il est à prendre en compte un paramètre important. Les bordures des voiries forment une « marche » entre le bas de la voirie et le trottoir. Cette « marche » est importante car sans elle, l'extraction avec cet outil n'est pas possible. Cette condition n'exclut pas d'autres problématiques du même type qui pourraient ainsi être mises en évidence sur des chantiers présentant des caractéristiques différentes.

Sur la figure 32, représentant une coupe de la voirie extraite de nos jeux de données, les bordures ne sont pas représentatives de la réalité. En effet, celles-ci sont courbées. En réalité, ces bordures forment un angle proche de 90° sur notre chantier test. Cette modélisation gêne l'extraction des fils d'eau de voirie comme le montre la figure 33.



Figure 32 : Extrait de la coupe d'une portion de voirie nous permettant de voir la mauvaise modélisation de la bordure

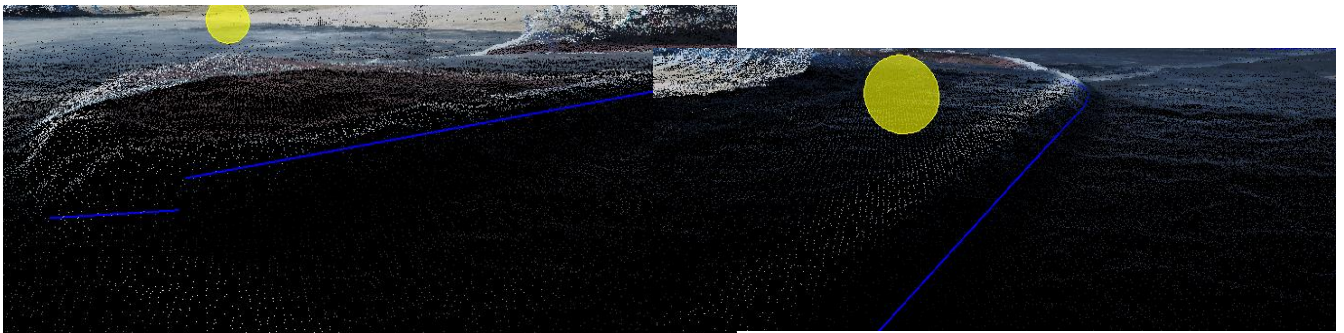


Figure 33 : Illustration de l'extraction du fil d'eau de la voirie. A gauche, mauvaise extraction du bas de la bordure et à droite extraction correcte du bas de la bordure

Nous avons tout de même réussi à extraire semi automatiquement une partie du fil d'eau de la voirie malgré cette mauvaise modélisation. Celle-ci semble peut-être venir de l'ombre générée par la bordure qui cause un problème lors des étapes de reconstruction de profondeur sur Metashape. Cependant, se pose le problème du positionnement dans l'espace de cette ligne représentant le bas de la bordure de la voirie. En effet, cette « courbure » entre la bordure et la voirie gêne l'interprétation du positionnement du fil d'eau (figure 33).

En conclusion, cette notion d'automatisation d'extraction du fil d'eau de la voirie nous a permis de mettre en évidence l'existence de logiciels permettant l'extraction semi-automatique de ce type de données. Cependant, il faut d'une part que les bordures soient bien modélisées sur le nuage de points et que celles-ci soient plus hautes que la voirie (forme de « marche » comme énoncé plus haut) afin que le logiciel puisse fournir une extraction correcte du fil d'eau.

II.5.2 Essai d'extraction de lignes de rupture de pente

II.5.2.1 Le logiciel utilisé

Le logiciel Orbit ne permet pas l'extraction de lignes de rupture de pente ce qui nous a conduit à choisir le logiciel Cyclone 3DR (ex 3D reshaper). Ce dernier permet d'extraire automatiquement d'autres types de données comme les lignes de rupture de pente modélisant le plus souvent les fossés, les talus et les bassins de rétention. Il existe d'autres logiciels permettant d'extraire ce type de données comme le logiciel Terrascan de la suite Terrasolid ou encore Rimining de Riegl. Le cabinet Bbass étant client chez Leica Geosystems, nous avons fait le choix de leur logiciel.

II.5.2.2 Traitement, résultat et analyse

Afin d'extraire les lignes de rupture de pentes, il faut au préalable importer le nuage de points issu du traitement des clichés photographiques. Dans un second temps, il faut créer le maillage du nuage de points pour en sortir une surface 3D. Une fois cette étape faite, il ne reste plus qu'à utiliser l'outil « Ligne de rupture multiple » afin d'extraire ces lignes.

Nous n'avons pas la possibilité d'avoir l'algorithme derrière cet outil mais nous pouvons en expliquer le principe général. C'est à partir du maillage que celui-ci va fonctionner. L'outil va calculer la courbure des surfaces du maillage et va déterminer le maximum et le minimum de celles-ci. En fonction de ces valeurs, une ligne de rupture de pente va être dessinée. Cet outil est paramétrable en fonction de la qualité du maillage, de la pertinence des lignes et de la longueur de celles-ci.

Nous avons donc extrait du maillage les lignes de rupture (concaves et convexes) permettant de déterminer l'emprise des talus et bassins de rétention. Il est possible à l'issue de cette

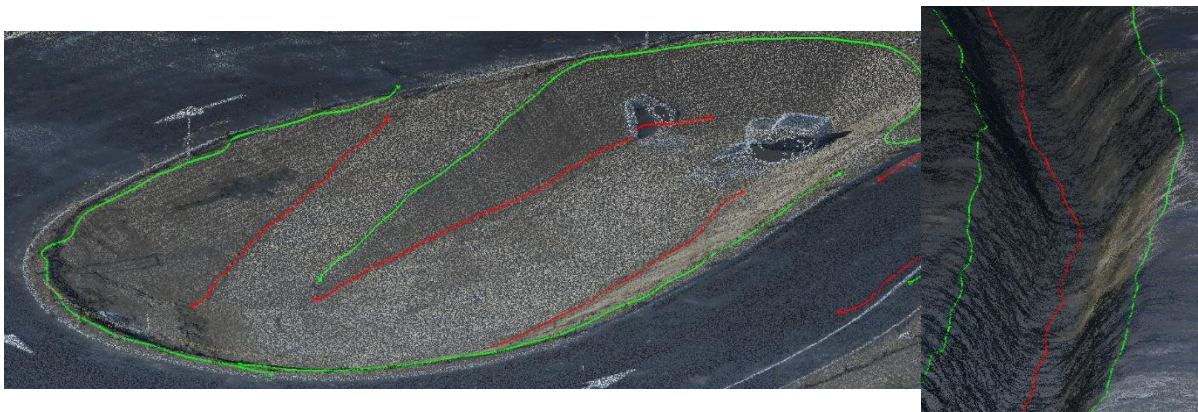


Figure 34 : Illustration d'un bassin de rétention et d'un fossé avec leurs lignes caractéristiques extraites automatiquement à l'aide de Cyclone3DR

extraction de lisser les lignes de rupture afin d'éviter qu'elles soient trop sinueuses. La figure 34 illustre les lignes de rupture extraites (lissées) et superposées sur le nuage de points 3D. Le résultat de cette extraction nous semble correct vis-à-vis du positionnement de ces lignes caractéristiques. Cependant, quelques portions de contour ne sont pas déterminées. Il faudra donc soit relier les lignes de rupture une à une soit faire des compléments manuels.

III Etude qualitative des méthodes de relevé par drone et par topométrie classique

L'étude qui est réalisée ici traite de la comparaison des deux méthodes d'acquisition de données dans le contexte du plan de récolement de lotissement. Nous aborderons les temps de travail nécessaires afin d'acquérir et de traiter les données. Nous étudierons aussi la précision des données obtenues à l'issue de ces traitements. Enfin, nous comparerons les ressources à la fois humaines et matérielles (y compris logiciel) afin d'en tirer une conclusion sur les éventuels avantages et inconvénients de chacune.

III.1 Les temps de travail

III.1.1 Le temps sur le terrain

Il est intéressant de comparer les temps de présence sur le terrain (trajet non compris). La zone de test a été relevée en premier par la méthode classique. Pendant le relevé, les regards des canalisations ont été soulevés pour connaître le fil d'eau des canalisations enterrées en plus du relevé de la zone ce qui a conduit à allonger le temps de terrain. De manière globale, le temps de relevé a été de 12 h via la méthode classique. Afin de rendre cette analyse comparable, il est nécessaire d'éliminer le temps correspondant au relevé des fils d'eau soit environ 2 h amenant ainsi à une durée de 10 h.

La méthode par drone a nécessité deux étapes sur le terrain, une première qui a consisté à positionner les cibles (GCP). Celle-ci a représenté environ 35 minutes. La seconde partie a été constituée du vol du drone pour l'acquisition des clichés photographiques et a duré 30 minutes environ. Il est à noter que les fils d'eau de canalisations enterrées n'ont pas été relevés contrairement au premier relevé.

Globalement, nous avons passé 1 h 05 pour faire le relevé par drone de la zone. Il est à noter que la polygonale était déjà implantée sur la zone ce qui nous a permis de réduire le temps de relevé des cibles.

L'avantage de la méthode par drone est qu'elle permet de relever l'ensemble des éléments du terrain sans sélection comme le fait la méthode par topométrie classique.

III.1.2 Le temps de traitement des données

Une fois le relevé effectué sur le terrain, il est nécessaire de traiter les données acquises.

Pour la méthode de relevé par topométrie classique, il faut considérer le temps de calcul de la polygonale qui a représenté 30 minutes et le temps de dessin 7h.

Pour la méthode drone, nous n'avons pas la possibilité de comparer les temps de dessins étant donné que les données acquises ne permettent pas une restitution fidèle des bordures de voirie comme expliqué dans la partie II.4.1.2. En conséquence, nous n'aurons ici que le temps de traitement de calcul des données. Ce temps est relatif en fonction de la puissance de calcul de l'ordinateur³. Le traitement des données, afin de restituer un nuage de points et une orthophoto, a été de 2 h 30 minutes environ.

Les différences sont notables entre les deux traitements et pour cause, la méthode par topométrie classique présente l'avantage de n'avoir à traiter que les points nécessaires au dessin tandis que la méthode par drone implique un traitement complet des photos et un lourd processus de restitution du nuage de points. Pour autant, la méthode par drone permet d'économiser un temps non négligeable de présence sur le terrain.

III.2 Qualité des données obtenues

Nous avons vu dans la partie II.3.7.2.2 que la méthode par photogrammétrie par drone permettait d'obtenir une précision de l'ordre de 2,5 cm en 3D lorsque les GCP sont relevés à l'aide d'une station totale. Cette précision, moins élevée que celle qu'il est possible d'obtenir par la méthode classique, est tout de même jugée satisfaisante pour un tel relevé.

Cependant, nous pouvons également juger de la qualité des données obtenues en dépit de la précision des points. En effet, dans la partie II.4.1.2, mettant en évidence les limites de la

³Ordinateur utilisé : Processeur IntelCore I7 (3.60 GHz) avec 64 Gb de mémoire vive et une carte graphique Nvidia GeForce RTX 2060 SUPER

technique par drone, nous avons vu que les bordures de voirie sont mal modélisées. De plus, les murs présents sur la zone sont aussi mal déterminés, à la fois dans les données extraites des photos nadirales mais aussi des photos inclinées. Enfin, les luminaires présents sur la voirie n'ont pas pu être extraits du fait de leurs caractéristiques géométriques particulières.

La méthode par topométrie classique dispose quant à elle d'une gamme de précision plus étendue allant du centimètre au millimètre. Cependant, lors d'un relevé par récolement, les points sont déterminés avec une précision centimétrique en 3D. Cette méthode peut être plus précise mais le type de relevé dont il est question ne nécessite pas une précision millimétrique. Nous pouvons ainsi considérer que les méthodes sont satisfaisantes de manière égale à ce niveau mais que la méthode par drone présente encore des limites quant à la modélisation de certains éléments.

III.3 Ressources matérielles et humaines

III.3.1 Ressources humaines

Les deux méthodes de relevé font état d'une seule personne sur le terrain. En effet, l'implantation des cibles et leur relevé ainsi que le pilotage du drone ne nécessitent qu'une seule personne. Le cabinet étant équipé d'appareil robotisé, il n'y a eu besoin aussi que d'une seule personne pour réaliser le relevé selon la méthode classique.

III.3.2 Ressources matérielles

Les ressources matérielles sont celles permettant de réaliser le plan de récolement de la zone.

Le relevé par topométrie classique a nécessité :

- Une station totale (avec prisme et porte prisme)
- Un ordinateur /Logiciel Autocad/Covadis pour le calcul et le dessin

Le relevé par drone avec détermination des cibles par topométrie classique a nécessité :

- Une station totale (avec prisme et porte prisme)
- Diplôme de télépilote de drone
- Drone DJI P4P / tablette tactile pour le plan de vol / cibles
- Un ordinateur acceptant le traitement par photogrammétrie / Logiciel Metashape / Cyclone 3DR / Covadis
- Plan de formation aux logiciels spécifiques

L'analyse matérielle met clairement en évidence un investissement supplémentaire lorsque l'on souhaite utiliser la méthode par drone. La méthode classique ne nécessite que du matériel déjà à disposition de l'entreprise de manière générale.

III.4 Récapitulatif de la comparaison des deux méthodes

L'analyse des méthodes nous a conduits à nous questionner sur les indicateurs dont il faut tenir compte dans le choix d'une méthode par rapport à une autre. Ainsi, il nous a paru important de mettre en évidence cinq aspects :

- L'investissement supplémentaire occasionné par l'utilisation d'une des deux méthodes ;
- Le budget temps (temps de terrain et de traitement des données uniquement) ;
- La précision des données ;
- Développement de marchés (géographiquement mais aussi du fait de la technologie utilisée) ;
- Sécurité (délégation du risque au drone).

Notre analyse repose sur une appréciation personnelle de ces critères selon la méthode choisie. L'échelle s'établit de 1 à 5 avec par exemple 2 pour la méthode classique traduisant un temps de terrain long et 4 pour la méthode par drone exprimant la rapidité de la méthode sur le terrain.

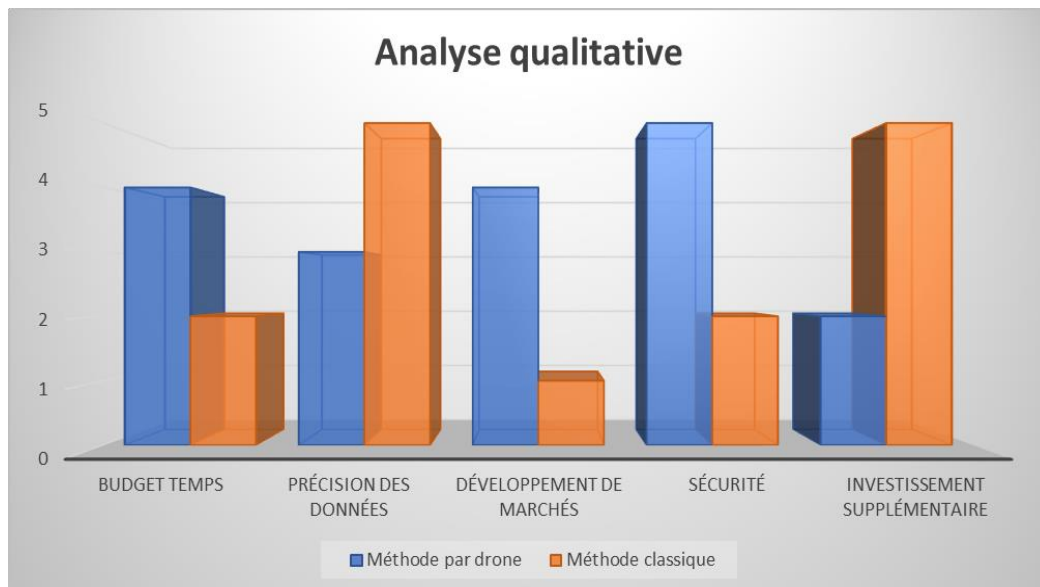


Figure 35 : Graphique permettant d'établir une analyse qualitative de la méthode par drone

Conclusion

Le monde de la topographie est rythmé par les évolutions technologiques du secteur comme par exemple, le développement d'appareils topographiques plus précis. Malgré cela, les méthodes de relevé n'ont que peu évolué depuis plusieurs années.

Pour autant, les découvertes dans d'autres secteurs offrent elles aussi de nouvelles opportunités dans le cadre de nos missions.

Le drone fait indéniablement partie des outils technologiques concourant au renouvellement du métier. Son champ d'application, de plus en plus vaste, laisse envisager de grandes évolutions dans un futur proche. Le cabinet, par sa veille technologique, a su détecter son potentiel et notamment son intérêt dans le cadre des relevés de récolement de lotissement. Ces missions, classiques, représentent une part importante des missions du cabinet et l'amélioration des techniques existantes pourraient permettre différents gains.

Notre mémoire a donc consisté à poser les acquis en termes de récolement mais aussi de photogrammétrie. L'état actuel des connaissances, le niveau de développement des drones mais aussi des logiciels de traitement ont laissé entrevoir la possibilité d'une application du drone aux chantiers de récolement.

Nous nous sommes donc appliqués à tester, par le biais d'une expérience terrain, la possibilité de réaliser un récolement de lotissement grâce à la photogrammétrie aérienne par drone. Notre étude nous a permis de mettre en évidence les avantages d'une telle méthode mais aussi ses limites.

Le drone permet effectivement de gagner du temps sur le terrain et, avec les outils nécessaires, il ne représente pas un temps de traitement de données plus important que le relevé classique malgré le nombre de données plus important. Les investissements initiaux sont importants et sont bien évidemment à prendre en compte. En revanche, l'acquisition d'un drone, des logiciels et des formations ne représentent pas d'investissements plus conséquents que ceux d'appareils topographiques classiques.

De plus, la précision nécessaire à ces missions est suffisamment acceptable en utilisant le drone ce qui permet de gagner en termes de temps et de budget sans pour autant perdre en précision, point essentiel.

L'acquisition du drone nous a également permis de prendre conscience des opportunités qu'il offrait. Le gain de temps généré par cet outil permet ainsi de se déplacer moins de jours sur le terrain, d'aller plus loin mais aussi de relever de plus vastes surfaces pour un temps

moindre. Ces caractéristiques élargissent le marché des chantiers des cabinets. Il permet également d'accéder à des lieux difficiles d'accès par exemple, ce qui contribue encore une fois à prétendre à de nouveaux marchés et où il nous est possible de nous démarquer des concurrents. Le drone offre également une sécurité aux géomètres. Le risque est effectivement transféré au drone et permet à son utilisateur d'éviter de se trouver près d'une route ou au bord d'un cours d'eau. Ces avantages doivent cependant être nuancés du fait des limites que nous avons pu rencontrer.

Le traitement des données a représenté la limite la plus importante de notre étude. En effet, la photogrammétrie aérienne repose sur un nombre bien plus important de données mais aussi sur des techniques de traitement différentes. Il a été mis en évidence des difficultés de modélisation des bordures de voirie et qui n'ont donc pas pu être bien extraites avec les logiciels que nous avons à disposition. En l'état actuel, il ne nous a ainsi pas été possible de réaliser le dessin du plan de récolement. Il est néanmoins possible de ressortir de ces données les réseaux apparents comme les plaques d'égouts ou bouches à clefs. Pour autant, nous n'avons pas testé toutes les possibilités en termes de plan de vol. En effet, un relevé avec une hauteur de vol plus basse au-dessus de la voirie ou alors avec une prise de vue plus oblique (45° par exemple) sont des pistes de solutions qu'il est possible d'envisager pour pouvoir mieux modéliser ces données. Selon nous, ces données pourraient être mieux déterminées avec ce type de plan de vol plus bas permettant de mieux visualiser le « relief » entre la voirie et les bordures. Si tel est le cas, la photogrammétrie par drone pourrait être une solution possible pour le récolement de fin de chantier de lotissement.

La méthode de photogrammétrie par drone représente ainsi une véritable opportunité pour les cabinets de géomètre. S'intéresser aux divers projets dans lequel il pourrait jouer un rôle peut représenter un véritable investissement dans l'avenir pour les cabinets capables et désireux de faire progresser les techniques actuelles.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

BOULIANNE Michel. 2017, GMT-2015 Levés aéroportés et terrestres. Université Laval, Québec, 59 p.

CHARLET Christophe. 2019, Du bon usage des drones. École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 52 p.

SIMONNETTO Elisabeth. 2018, Cours de photogrammétrie, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 148 p.

SIMONNETTO Elisabeth. 2019, Cours de traitement numérique des images, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 83 p.

Chapitre dans un ouvrage imprimé

PIERROT DESEILLIGNY Marc, CLERY Isabelle. Evolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par milieux naturels. In : Collection EDYTEM. Cahiers de géographie, numéro 12, 2011. Images et modèles 3D en milieux naturels. 51-61 pp. Disponible sur < https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2011_num_12_1_1177 > consulté en juin 2020

Travaux universitaires

BRISSET Pascal. 2004, Drones civils : Perspectives et réalités. Recherche ENAC, 44p. Disponible sur : < http://recherche.enac.fr/~brisset/enac/brisset_sapin.pdf > consulté en avril 2020

EISSENBEISS Henri. 2009, UAV Photogrammetry. Thèse de Doctorat (Sciences), ETH Zurich (Suisse), 203 p. consulté en avril 2020

MURTIYOSO Arnadi. 2016, Protocole d'acquisition d'images et de traitement des données par drone, modélisation 3D de bâtiments remarquables par photogrammétrie, Mémoire de d'Ingénieur Spécialité « Topographie », INSA de Strasbourg, 81 p. consulté en mai 2020

ROCHAT Matthias. 2018, Étude de la faisabilité de l'acquisition de données par drone dans l'application d'une délimitation foncière, Mémoire de Master, Spécialité « Identification, Aménagement et gestion du Foncier », ESGT Le Mans, 63 p. consulté en février 2020

TOURNADRE Vincent. 2015, Métrologie par photogrammétrie aéroportée légère : application au suivi d'évolution de digues, Thèse de Doctorat, Spécialité « Traitement des images [eess.IV], Université Paris-Est, 249p. Disponible sur < <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01373128> > Consulté en avril 2020

VANDENBROECK Martin. 2018, Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne – Mise au point et application d'un protocole assurant la reproductibilité de levés répétés à intervalles saisonniers et interannuels, Mémoire de Master, Spécialité « Science géographique, orientation géomatique et géomorphologie, Université de Liège (Belgique), 92 p. Disponible sur < <http://hdl.handle.net/2268.2/5586> > Consulté en mars 2020

Articles de périodiques électroniques

ANDERSON K., GASTON J. G. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front Ecol Environ* [www.esa.org], Disponible sur : < https://www.researchgate.net/publication/259502892_Lightweight_unmanned_aerial_vehicles_will_revolutionize_spatial_ecology/link/0c96052d7e2be5a712000000/download > consulté en mai 2020

BRIESE C. (2004). Three-dimensional modelling of breaklines from airborne laser scanner data. *ISPRS* [www.ISPRS.org] n°XXXV. Disponible sur : < <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/430.pdf> >, consulté en mars 2020

DANDOIS & AL. (2015). Optimal Altitude, Overlap and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing* [www.mdpi.com/journal/remotesensing]. n°7(10) : 13895-13920. Disponible sur : < https://www.researchgate.net/publication/283267301_Optimal_Altitude_Overlap_and_Weather_Conditions_for_Computer_Vision_UAV_Estimates_of_Forest_Structure >, consulté en mars 2020

GINDRAUX & AL. (2017). Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles Imagery on Glaciers. *Remote Sensing* [www.mdpi.com/journal/remotesensing]. n°9(3) : 186. Disponible sur : < https://www.researchgate.net/publication/314249505_Accuracy_Assessment_of_Digital_Surface_Models_from_Unmanned_Aerial_Vehicles'_Imagery_on_Glaciers >, consulté en mai 2020

JAMES M., ROBSON S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *ESPL* [Wileyonlinelibrary.com]. n°39. Disponible sur : < www.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/esp.3609 >, consulté en mai 2020

NEX & REMONDINO (2014). UAV for 3D mapping applications : A review, *Applied Geomatics* [https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-013-0120-x]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/publication/260529522_UAV_for_3D_mapping_applications_A_review> consulté en juin 2020

NOCERINO & AL. (2013). Accuracy and block deformation analysis in automatic UAV and terrestrial photogrammetry -Lesson learnt -, *ISPRS* [www.ISPRS.org] n°XXIV. Disponible sur : < https://www.researchgate.net/publication/257486039_Accuracy_and_block_deformation_analysis_in_automatic_UAV_and_terrestrial_photogrammetry_-_Lesson_learnt > consulté en mars 2020

Textes Législatifs

Règlement délégué (UE) 2019/945 de la commission du 12 mars 2019 relatif aux systèmes d'aéronefs sans équipage à bord et aux exploitants, issus de pays tiers, de systèmes d'aéronefs sans équipage à bord, disponible sur < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?from=EN&uri=CELEX%3A32019R0945> > Consulté en mai 2020

Règlement d'exécution (UE) 2019/947 de la Commission du 24 mai 2019 concernant les règles et procédures applicables à l'exploitation d'aéronefs sans équipage à bord, Disponible sur < <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?from=EN&uri=CELEX%3A32019R0947> > Consulté en mai 2020

Sites web

Dji disponible sur : < www.Dji.com > (consulté en avril 2020)

Fédération Professionnelle du Drone Civil, Disponible sur < www.federation-drone.org >. (Consulté en avril 2020)

Planète TP, la vie d'une opération, Disponible sur : < <http://www.planete-tp.com/la-vie-d-une-operation-r269.html> >. (Consulté en mai 2020)

Autres

CCLMHD, 2018, Guide d'urbanisme : Comment procéder au montage d'un dossier de Permis d'Aménager, disponible sur : < <http://www.cclmhd.fr> > Consulté en juin 2020.

DDTM34, 2014, Guide méthodologique pour la gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagement, TOME 1 : Aspects réglementaires et Administratifs. Consulté en juin 2020.

DSAC, 2020, Aéronefs circulant sans personne à bord : activités particulières « GUIDE », disponible sur : < <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/drones-usages-professionnels> >, consulté en avril 2020

D3E GEOSPATIAL & SENSEFLY, (2020). Réglementation drone Européenne, Webinar.

Latitude Drone, (2015), La modélisation 3D par drone par la méthode photogrammétrique, Disponible sur : < <https://latitude-drone.com> >, consulté en avril 2020

PAMART A. (2019), Recommandations du consortium 3D SHS, Synthèse des outils et technologies 3D : apport critique sur les matériels et logiciels 3D, Disponible sur : < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02159453/document> > consulté en juin 2020

SOUCHON & AL. (2014), Réalisation d'une caméra photogrammétrique ultra-légère et de haute résolution, IGN/DRE/SRIG/LOEMI. Disponible sur < https://drone.teledetection.fr/articles/Souchon_CAMLIGHT_IGN_rev.pdf >, consulté en mai 2020

Liste des figures

Figure 1 : Position géographique des différentes antennes du cabinet Bbass	9
Figure 2 : Illustrations des différentes distorsions possibles lors du passage de la lumière dans l'optique d'un APN [www.thomassinclairlabs.com].....	16
Figure 3 : Illustration des différentes tailles de capteurs issue de « Synthèse des outils et technologie 3D », rédigé par Anthony Pamart	18
Figure 4 : Illustration de l'influence de chacun des paramètres sur la qualité du cliché photographique [Illustration issue du site Objectif-cooljeff.com].....	19
Figure 5 : Schématisation de la hauteur de vol par rapport au point de décollage, [Airdata.com] ..	22
Figure 6 : Photographie de deux drones de même type mais de dimensions différentes (A gauche, le drone Sensefly ebee mesurant 0.76 m d'envergure [www.sensfly.com], à droite le drone « LeBoreal » mesurant 4.20 m d'envergure [www.boreal-uas.com])	25
Figure 7 : Photographie de deux drones de marque Dji, à gauche le Dji phantom 4 pro et à droite le Dji Matrice 600. [www.dji.com]	25
Figure 8 : Schéma des différents scénarii possibles définis par la réglementation Française [https://hexadrone.fr]	28
Figure 9 : Illustration des zones de restrictions des hauteurs de vols à proximité d'un aéroport issue du guide de la DSAC	30
Figure 10 : Schéma récapitulatif des catégories dans lesquelles seront classés les drones lorsque la nouvelle législation Européenne sera en vigueur, issu du Webinar de l'entreprise D3E Geopsat en association avec Sensefly	31
Figure 11 : Représentation des patchs, des plans moyennés et de la ligne de rupture à l'aide de la méthode de Briese	34
Figure 12 : Plans de situation de la zone de levé, échelle non définie (Source Géoportail)	35
Figure 13 : Carte des restrictions de vol sur notre zone d'essai, échelle non définie, issue du site Géoportail.....	37
Figure 14 : Photographie du drone Dji phantom 4 pro outil de notre étude, issu du site de Dji	37
Figure 15 : Illustration des différents champs de vision en fonction de la focale de l'objectif. Le rectangle rouge montre l'angle de champs de vision de notre drone, [expertphotography.com]	38
Figure 16 : Géométrie d'acquisition des clichés entrebandes (à gauche) et interbandes (à droite) ..	40
Figure 17 : Photos des cibles utilisées, à droite cible de 50 cm ² et à gauche celle d'1 m ²	43
Figure 18 : Emplacement des GCP et CPs (drapeaux bleus)	43
Figure 19 : Illustration de l'angle d'incidence des rayons perspectifs au maximum de leurs valeurs entre des couples de clichés pris sur chaque bande (En rouge l'emprise des clichés et en noir et vert les angles d'incidence)	46

Figure 20 : Illustration des angles d'incidence entre deux couples de clichés sur une même bande (en rouge, l'emprise des clichés et en noir et vert, les angles d'incidence)	46
Figure 21 : Illustration du plan de vol avec les clichés (rectangles bleus) et les axes de prise de vue de chaque cliché (ligne noire au-dessus des clichés) issue du logiciel Metashape.....	46
Figure 22 : Illustration du plan de vol avec les clichés (rectangles bleu) et les axes de prise de vue de chaque cliché (ligne noire au-dessus des clichés) issue du logiciel Metashape.....	47
Figure 23 : A gauche : angles d'intersection des rayons perspectifs entre couple de photographies d'une même bande. A droite : angle d'intersection entre deux clichés issu de bandes adjacentes où le recouvrement des clichés est à l'extrême.	48
Figure 24 : Paires de points homologues sélectionnées sur une paire de clichés (lignes bleu) et paires de points non valides (lignes rouge)	49
Figure 25 : Nuage de points de liaison dérivant du processus d'ajustement des faisceaux utilisé pour l'orientation relative du bloc d'images.....	49
Figure 26 : Nuage de points obtenu à l'issue des traitements énoncés ci-dessus	51
Figure 27 : Schéma de la transformation à 7 paramètres, aussi appelée recalage Helmert, en vert le modèle terrain et en noir le modèle photogrammétrique, issue de la Thèse de V. Tournadre, 2015	52
Figure 28 : Illustration de la disposition des points de calage et de vérification.....	52
Figure 29 : Illustration des points de contrôle issus du récolement de travaux fait par topométrie classique. Les points sont répartis sur des regards le long de la voirie.....	54
Figure 30 : Graphiques représentant les écarts en X et Y entre les points du nuage issus du traitement par photogrammétrie et les points issus du relevé par topométrie classique.	55
Figure 31 : Ecart en Z entre les points du nuage et ceux de la vérité terrain	56
Figure 32 : Extrait de la coupe d'une portion de voirie nous permettant de voir la mauvaise modélisation de la bordure	59
Figure 33 : Illustration de l'extraction du fil d'eau de la voirie. A gauche, mauvaise extraction du bas de la bordure et à droite extraction correcte du bas de la bordure.....	59
Figure 34 : Illustration d'un bassin de rétention et d'un fossé avec leurs lignes caractéristiques extraites automatiquement à l'aide de Cyclone3DR	60
Figure 35 : Graphique permettant d'établir une analyse qualitative de la méthode par drone	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Avantages et inconvénient des deux types de drone inspiré d'[Eissenbess, 2009] (+ : mauvais, ++++ : excellent).....	26
Tableau 2 : Tableau des différentes solutions de logiciels de traitements en photogrammétrie	33
Tableau 3 : Tableau du GSD et la couverture surfacique d'un cliché en fonction de la hauteur de vol	39
Tableau 4 : Tableau récapitulatif des bases, du recouvrement et du nombre de clichés en fonction de la hauteur de vol.....	40
Tableau 5 : Détermination l'effet de filé acceptable (en vert) pour un GSD au sol de 1.1cm.....	41
Tableau 6 : Différences de coordonnées entre les deux méthodes de relevé.	44
Tableau 7 : Valeurs des résidus (EMQ) sur les points de calage choisis pour le recalage Helmert et valeurs des résidus sur les points de vérification.....	53
Tableau 8 : Tableau des erreurs moyennes quadratiques sur les 20 points de vérité terrain.....	57

Table des Annexes

Annexe 1: Schéma récapitulatif des différentes étapes de reconstruction du nuage de points 3D à l'aide du logiciel Métashape

RESUME

L'acquisition photogrammétrique par drone a constitué une opportunité dans les relevés de récolement de fin de chantier. Après s'être assuré de la possibilité de mise en oeuvre de cette méthode, nous nous sommes intéressés aux paramètres à maîtriser pour une application efficace. En comparant cette acquisition à celle par topométrie classique, nous avons déterminé les avantages et inconvénients que représentait cette méthode par rapport à celle couramment utilisée.

La méthode de relevé par drone est ainsi possible et présente un niveau de précision satisfaisant. Elle permet des gains en termes de temps mais présente d'autres avantages intéressants. Elle est cependant limitée par la reconstruction fidèle de certains objets.

Mots clés : Photogrammétrie, Drone, Récolement, Géomètre, Metashape.

SUMMARY

The drone photogrammetric acquisition was an opportunity for site retraining. After ensuring the possibility of this method, we focused on significant parameters to control in order to get an efficient application. Comparing this method with the classic one, we determined advantages and drawbacks represented by this method compared to the classic one.

The drone photogrammetric method is possible and represent a similar level of precision. It allow us to reduce work time on site but also represent others interesting advantages. However, it is limited by the faithful reconstruction of certain elements.

Key words : Photogrammetry, Drone, Retraining, Surveyor, Metashape.

ANNEXE N°1

Étapes dans le logiciel Metashape

