



HAL
open science

Mise en place d'une chaîne de production de relevé topographique par photogrammétrie terrestre

Emma Genevoix

► **To cite this version:**

Emma Genevoix. Mise en place d'une chaîne de production de relevé topographique par photogrammétrie terrestre. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04785127

HAL Id: dumas-04785127

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04785127v1>

Submitted on 15 Nov 2024

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
ÉCOLE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe

par

Emma GENEVOIX

Mise en place d'une chaîne de production de relevé topographique par
photogrammétrie terrestre

Soutenu le 3 septembre 2024

JURY

Monsieur Ghyslain FERRÉ Président du jury
Monsieur Paul SAINT-RAMOND Maître de stage
Monsieur Christophe CHARLET Enseignant référent

Remerciements

Pour introduire ce mémoire, je tenais tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble des collaborateurs du cabinet AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES pour leur accueil et leur bienveillance qui m'ont permis d'apprécier pleinement la réalisation de mon travail de fin d'études.

Je remercie tout particulièrement mon maître de stage M. Paul SAINT-RAMOND pour m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet de travail de fin d'études et avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à mes recherches pour travailler en autonomie. Je le remercie également pour tous ces précieux conseils liés à son expérience tout comme ceux de l'ensemble des salariés de l'entreprise.

J'ai également eu le plaisir de collaborer avec M. Yoann COURTOIS, responsable produit de l'application Geosnap chez Sogelink que je remercie pour sa bonne humeur, son écoute et sa disponibilité pour répondre à toutes mes questions.

Je tiens à ne pas oublier de remercier tous les professeurs de l'École supérieure d'ingénieurs géomètres et topographes pour m'avoir transmis toutes les compétences et les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ce travail de fin d'études lors de mes trois années en cycle ingénieur. J'aimerais remercier tout spécialement M. Christophe CHARLET pour sa gentillesse, son accompagnement sans faille et tous ses conseils qui m'ont permis de travailler sereinement et de produire ce présent mémoire.

Enfin, un grand merci à tout mon entourage, famille et amis, de m'avoir soutenu tout au long de ma scolarité.

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
3D	Trois dimensions
AEP	Réseau d'Adduction d'Eau Potable
CCD	Charge Couple Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EMQ	Erreur Moyenne Quadratique
EP	Réseau d'Eau Pluviale
EU	Réseau d'Eau Usée
GNSS	Global Navigation Satellite System
HT	Hors Taxe
ISO	International Organization for Standardization (organisme qui a publié la norme qui définit la sensibilité d'un capteur à la lumière)
LZW	Lempel-Ziv-Welch
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MVS	Multi-View Stereo
NAS	Network Attached Storage
SaaS	Software as a Service
Sfm	Structure from motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
SIG	Système d'Information Géographique
SURF	Speeded Up Robust Features

Glossaire

Erreur de reprojection : distance (en pixels) entre le point observé sur l'image et le point image calculé par le modèle à partir du point connu dans l'espace terrain¹.

Erreur de triangulation : distance (en mètres) entre un point d'appui relevé sur le terrain et ce même point reconstruit par triangulation après avoir été pointé sur les images¹.

Étalonnage d'une caméra : opération permettant de calculer les paramètres internes d'une caméra¹.

Géoréférencement : attribution d'un système de coordonnées à un modèle.

Orthomosaïque : représentation photographique 2D d'une zone corrigée géométriquement pour être superposable à un plan².

Parallaxe : Incidence du changement de position de l'observateur sur l'observation d'un objet³.

Point d'appui : point vu sur plusieurs images, dont les coordonnées terrain sont connues et qui permet d'orienter les images entre elles et de géoréférencer le nuage de points¹.

Point de liaison : point vu sur plusieurs images, dont les coordonnées terrain sont inconnues et qui permet d'orienter les images entre elles. Il peut aussi être appelé point homologue¹.

Recouvrement : Proportion dans laquelle une photographie recouvre la zone visible sur une photographie voisine. Le recouvrement se chiffre en pourcentage⁴.

Structure from Motion : En français : « Structure acquise à partir d'un mouvement ». Méthode de traitement utilisée par de nombreux logiciels de photogrammétrie. Elle permet « l'estimation des poses des caméras, calibrées ou non calibrées, et la reconstruction d'une scène en 3D à partir des images acquises dans un ordre quelconque »¹.

¹ D'après la définition donnée dans le support numérique du cours de photogrammétrie par Mme SIMONETTO, ESGT, 2021 [2].

² D'après la définition de la ressource de géographie pour les enseignants de Géo confluences, geoconfluences.ens-lyon.fr.

³ D'après la définition du CNRTL (Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales), cnrtl.fr.

⁴ D'après la définition du lexique de photogrammétrie de l'AFT (Association Francophone de Topographie), aftopo.org.

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire.....	4
Table des matières	5
Introduction	6
I ÉTAT DE L'ART	8
I.1 LA PHOTOGRAMMETRIE RAPPROCHEE POUR SUBSTITUER A LA TACHEOMETRIE	8
I.1.1 De la photogrammétrie traditionnelle à rapprochée.....	8
I.1.2 L'acquisition des données par divers outils	9
I.1.3 Un traitement automatisé dans le but d'une application topographique	10
I.2 UNE REGLEMENTATION DE PLUS EN PLUS EXIGEANTE POUR LES TRAVAUX DE RECOLEMENT.....	12
I.2.1 Des classes de précision obligatoires	12
I.2.2 Un devoir de géoréférencement de tous les nouveaux réseaux.....	13
II ANALYSE DES DIVERS OUTILS TECHNIQUES POUR L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DES PHOTOGRAPHIES	14
II.1 CHOIX DE LA CAMERA.....	14
II.1.1 Type de caméra choisie.....	14
II.1.1.1 Comparatif entre une caméra d'action, un appareil reflex photographique et un smartphone	14
II.1.1.2 Comparatif entre diverses caméras d'action.....	17
II.1.2 Paramétrage de la caméra	18
II.1.2.1 Paramètres propres à la GoPro HERO10	18
II.1.2.2 Tests de paramétrages	19
II.2 CHOIX DU LOGICIEL	21
II.2.1 Examen des logiciels de photogrammétrie disponibles sur le marché	21
II.2.2 Étude des résultats obtenus selon divers logiciels.....	22
II.2.2.1 Temps de traitement et coût des logiciels.....	22
II.2.2.2 Qualités des résultats	23
III LA MISE EN PLACE D'UN PROTOCOLE AU SEIN DE L'ENTREPRISE ET LE PARALLELE AVEC LES METHODES TRADITIONNELLES	26
III.1 LE MODE OPERATOIRE A ADOPTER	26
III.1.1 Acquisition des données sur le terrain	26
III.1.1.1 Positionnement de la caméra	26
III.1.1.2 Cheminement	27
III.1.1.3 Géoréférencement	30
III.1.2 Traitement des données sous Geosnap.....	31
III.1.3 Procédure de contrôle et de stockage des données.....	31
III.2 QUALITE DES RESULTATS PAR RAPPORT AUX METHODES TRADITIONNELLES ET VALIDATION DES PRECISIONS ATTENDUES.....	33
III.2.1 Comparaison des précisions.....	33
III.2.2 Étude de la rentabilité	35
Conclusion.....	37
Bibliographie.....	38
Table des annexes.....	42
Liste des figures et des tableaux	57

Introduction

Au 3^{ème} siècle avant J. C., le géomètre grec Euclide est le premier à théoriser le principe de la vision en 3 dimensions : « *Voir le relief, c'est recevoir au moyen de chaque œil l'impression simultanée de deux images dissemblables du même sujet* » [1]. Puis, il faudra patienter jusqu'en 1484 pour qu'un certain Leonard de Vinci précise le concept de la vision binoculaire. S'ensuivent les premières expérimentations d'observation de scènes en relief avec l'invention du stéréoscope dans les années 1800. Conjointement, le concept de photogrammétrie voit le jour en partie grâce à A. LAUSSEDAT qui parvient à identifier les positions de points sur un objet à partir de couples de photographies. Toutefois, ce n'est qu'au début des années 2000 que la photogrammétrie numérique, que nous utilisons aujourd'hui, se démocratise et remplace la vision stéréoscopique.

Lors des vingt dernières années, nous sommes alors tenus de constater le perpétuel essor des méthodes d'acquisition de données en trois dimensions dans le milieu du bâtiment et des travaux publics. En effet, ces procédés permettent de représenter une vision complète et réaliste d'une scène à travers un nuage de points, contrairement à ceux dits « traditionnels » comme la tachéométrie, où chaque point est acquis individuellement. La photogrammétrie, qui avait disparu au profit de la lasergrammétrie, connaît aujourd'hui un regain d'intérêt grâce au développement de capteurs avec un très bon rapport qualité/prix et de logiciels de plus en plus accessibles avec de nouvelles méthodes de calcul et de traitement des images efficaces.

N'échappant pas à cette forte demande, le cabinet de géomètres-experts AXIS CONSEILS RHÔNE-ALPES situé à Saint-Trivier-sur-Moignans (Ain) a souhaité acquérir une solution de photogrammétrie terrestre pour réaliser des levés topographiques et de récolement et potentiellement développer cela pour d'autres types de relevés tels que d'architecture, d'intérieur ou même foncier.

L'entreprise ne disposait auparavant d'aucun autre procédé d'acquisition de données en trois dimensions, il sera donc essentiel de comparer les mesures photogrammétriques avec celles réalisées par méthodes traditionnelles (tachéométrie, positionnement en temps réel...) afin de valider les précisions attendues. Un protocole d'acquisition, de traitement et de contrôle des données sera essentiel pour conclure quant aux bénéfices de la mise en place de cette technique. Le cas échéant, la mise en place de formations destinées aux

autres collaborateurs sera nécessaire afin d'appliquer définitivement cette méthode au sein du cabinet.

Le mémoire que nous proposerons, comportera trois parties. Dans un premier temps, nous ferons l'état de l'art de la photogrammétrie rapprochée qui est la méthode choisie pour substituer en partie à la tachéométrie. Ainsi, nous aborderons ces méthodes d'acquisition, la mise en œuvre du processus de traitement et ferons également un point sur la réglementation imposée pour les travaux de récolement et les conséquences que cela implique.

Dans un second temps, nous analyserons les divers outils techniques concernant l'acquisition de photographies, en déterminant la caméra et le paramétrage adéquats pour l'utilisation souhaitée. Puis, nous examinerons différents logiciels de traitement photogrammétrique et réaliserons une comparaison des résultats selon un même levé.

Dans un dernier temps, nous proposerons un protocole d'acquisition, de traitement, de contrôle et de stockage des données pour l'application de cette méthode au sein de l'entreprise. Puis nous conclurons sur la qualité des résultats par rapport aux méthodes dites « traditionnelles » en comparant les précisions et la rentabilité de chaque méthode.

I État de l'art

I.1 La photogrammétrie rapprochée pour substituer à la tachéométrie

Comme présenté en introduction, la photogrammétrie attire de nouveau l'attention des contributeurs qui y voient une façon rapide d'obtenir des données fiables et facilement exploitables. Il est alors nécessaire de définir la photogrammétrie et plus particulièrement la photogrammétrie rapprochée ainsi que les différentes méthodes d'acquisition et le fonctionnement des algorithmes de traitement qui lui sont associés pour mieux appréhender les résultats obtenus.

I.1.1 De la photogrammétrie traditionnelle à rapprochée

La photogrammétrie a pour but de représenter en trois dimensions une scène ou un objet à partir d'images. Elle est initialement créée grâce au principe de stéréoscopie qui permet d'observer une scène en relief à partir de deux photographies prises de deux points de vue différents en orientant les images entre elles pour éliminer la parallaxe verticale. Cette méthode est similaire à la vision humaine (voir figure 1).

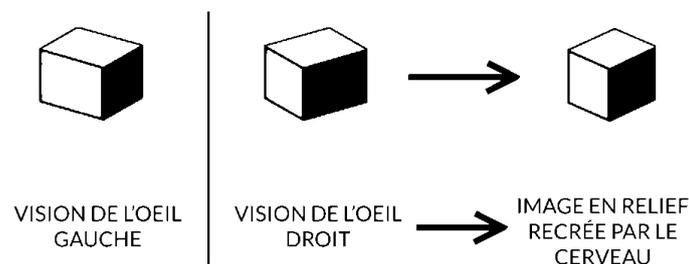


Figure 1 - Schéma du principe de la vision binoculaire. Selon be-perrin.fr.

Nous parlons alors de photogrammétrie traditionnelle où les axes de visée des caméras par rapport à l'objet se doivent d'être parallèles et peu convergents et où il est indispensable d'étalonner les caméras et de disposer de points d'appui.

Aujourd'hui, suite au développement de l'informatique, de nouveaux algorithmes de détection et d'appariements d'éléments communs entre des images ont été développés. De cette manière, la vision stéréoscopique a laissé place à la vision multi-images où les images sont automatiquement orientées entre elles et les points homologues automatiquement trouvés. Nous parlons alors de photogrammétrie rapprochée qui nécessite de courtes visées (à moins de 150 ou 300 m de l'objet), convergentes vers l'objet.

Ainsi, des logiciels ont été créés pour appliquer ces algorithmes, allant même jusqu'à reconstruire une scène en trois dimensions à partir d'un jeu d'images [2]. Conjointement, les systèmes d'acquisition se sont développés, ce qui a nettement encouragé l'utilisation de la photogrammétrie rapprochée.

I.1.2 L'acquisition des données par divers outils

Ainsi, il existe plusieurs méthodes pour acquérir des images en fonction du niveau de détails souhaité, de l'étendue de la scène et du coût. Nous retrouvons trois grandes catégories de systèmes d'acquisition comme la photogrammétrie spatiale avec les satellites, aérienne avec les aéronefs tels que les avions ou drones et terrestre en voiture ou par simple déplacement de l'opérateur [3].

À l'échelle d'un cabinet de géomètres-experts, les systèmes d'acquisition les plus utilisés sont terrestres ou aériens avec l'usage de drones. Les objets étant alors situés à une courte distance de la caméra, nous employons la méthode de photogrammétrie rapprochée, qui implique de recueillir des images sur toute la scène suivant un déplacement longitudinal. Les photographies doivent avoir des axes de visée parallèles et convergents pour ainsi contenir assez de points homologues entre les images et pouvoir reconstruire toute la scène en les recalant les unes par rapport aux autres (voir figure 2). Il est également nécessaire de définir un canevas de points d'appui (cibles, détails naturels...) connus en coordonnées et bien visibles sur les images pour géoréférencer le nuage de points.

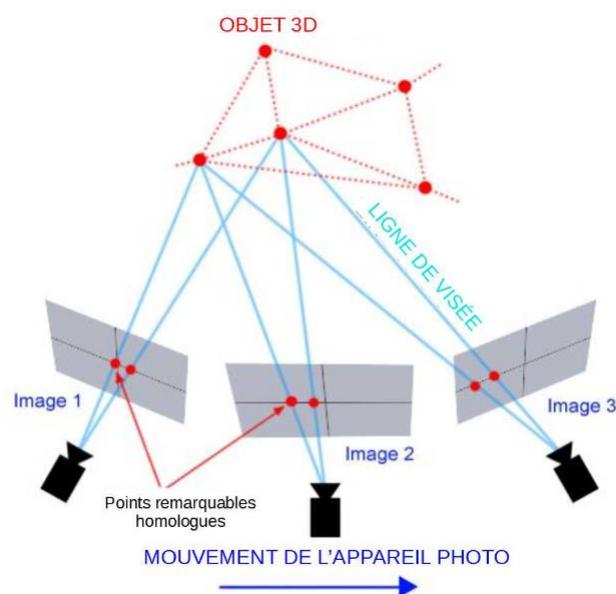


Figure 2 - Schéma du principe de prise de vues de la photogrammétrie rapprochée. Selon seascape.fr.

Ces nouvelles approches sont donc très compétitives en termes de temps d'acquisition de données sur le terrain par rapport à la tachéométrie où il était nécessaire d'enregistrer un point par élément représentatif de la scène. Cependant, cette avancée n'aurait pas vu le jour sans le progrès technologique des logiciels de traitement.

I.1.3 Un traitement automatisé dans le but d'une application topographique

La vision par ordinateur qui permet l'analyse des images par un outil informatique a rapidement été développée pour émerger vers une automatisation presque totale et ainsi contribuer à la vision multi-images en photogrammétrie.

En effet, la majorité des logiciels de traitement photogrammétrique utilisent l'approche Sfm basée sur « l'estimation des poses des caméras, étalonnées ou non étalonnées, et la reconstruction d'une scène en 3D à partir des images acquises dans un ordre quelconque, avec ou sans points d'appui » [2], pour obtenir un nuage de points d'une scène. Ce procédé se base sur l'algorithme SIFT ou sa version plus rapide SURF dont l'étude complète n'a pas été réalisée mais qu'il est tout de même nécessaire de comprendre pour optimiser les résultats obtenus [4].

Plus spécifiquement, après l'importation d'images acquises avec des axes parallèles et convergents, cet algorithme va détecter automatiquement les points homologues, c'est-à-dire les points correspondant au même élément et visibles sur plusieurs images, en évaluant chaque pixel. Il va ensuite associer les images ayant des points de liaison communs et les positionner les unes par rapport aux autres, c'est la phase d'alignement. Cette étape implique d'estimer au préalable les poses des caméras, c'est-à-dire les trois coordonnées de la position (X, Y, Z), ainsi que l'orientation selon trois angles (roulis, tangage, lacet) de chaque caméra dans un repère 3D, aussi appelés paramètres externes. Ces derniers seront déterminés lors de la phase d'aérotriangulation par compensation des coordonnées des sommets des faisceaux issus des points homologues et de leur orientation dans l'espace [5]. Ainsi, les points de liaison seront reconstruits en 3D pour obtenir un nuage de points peu dense.

Pour affiner le calcul, il est ensuite nécessaire d'ajuster les paramètres internes de la caméra. Ils sont définis par la taille du pixel sur l'image, la distance focale de la caméra, les coordonnées du point principal (intersection entre l'axe optique et le plan image) et les coefficients de distorsion linéaire, radiale et affine, résultant de la symétrie sphérique des

lentilles des caméras qui déforment légèrement l'image réelle. Cette étape d'ajustement peut être réalisée en utilisant des points d'appui, c'est-à-dire des points connus en coordonnées dans le repère terrain ou simplement dans un repère local. Ils vont ainsi permettre de minimiser l'erreur à l'interception des faisceaux, pour un même point, en affinant l'estimation des paramètres internes jusqu'à qu'ils soient au bon facteur d'échelle par rapport à la réalité. On parle ici d'auto-calibration contrairement à la photogrammétrie traditionnelle où les paramètres internes doivent être définis en amont. Cette étape peut également permettre le géoréférencement de la scène si la position des points d'appui est connue dans le système de coordonnées terrain. Après avoir connaissance des paramètres internes et externes des caméras, la position de chaque pixel sera recalculée pour créer un nuage de points dense, produit par des algorithmes de densification MVS. Il pourra être ensuite interpolé sur une grille régulière pour générer un MNT ou permettre la création d'une orthomosaique.

Ce processus est largement utilisé, car il permet une corrélation dense et robuste entre les images due à la détection d'un grand nombre de points de liaison, si les photographies sont de qualités suffisantes. Il est réputé pour être fiable face au changement d'orientation, d'échelle et d'illumination entre les images, qui sont des facteurs prédominants en photogrammétrie. De plus, des valeurs de contrôle des résultats sont calculées. En effet, la qualité des poses sur les points de liaison est vérifiée par des résidus image (en pixels), appelé erreurs de reprojection qui correspondent à la distance entre le point observé sur l'image et le point image calculé par le modèle à partir du point connu dans l'espace terrain. De même, la qualité du géoréférencement avec des points d'appui est vérifiée par des résidus terrain (en mètres), appelé erreurs de triangulation qui correspondent à la distance géométrique entre un point de contrôle relevé sur le terrain et ce même point reconstruit par triangulation après avoir été pointé sur les images [2].

Ce processus offre alors de nouvelles perspectives dans plusieurs domaines de compétences dont celui de la topographie qui nécessite des produits précis. Le cabinet **AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES**, titulaire d'une partie du marché topographique de la Ville de Bourg-en-Bresse, préfecture du département de l'Ain, est régulièrement mandaté pour suivre des chantiers de récolement de réseaux. La tachéométrie étant une méthode fiable mais longue et rigoureuse pour ces travaux qui nécessitent une rapide exécution, c'est logiquement que la photogrammétrie rapprochée a été initiée pour réaliser ce type de

levés. Seulement, pour procéder à l'utilisation de cette méthode, celle-ci doit produire des livrables assez précis pour être compatibles avec la récente réglementation qui impose un géoréférencement obligatoire de tous les nouveaux réseaux.

I.2 Une réglementation de plus en plus exigeante pour les travaux de récolement

Le récolement de réseaux a pour but d'identifier et de localiser précisément les équipements de réseaux aériens, souterrains ou subaquatiques à travers un plan qui permettra de repositionner ces réseaux lors de travaux ultérieurs. Ainsi, il est aujourd'hui obligatoire de géoréférencer ces réseaux lors de leur mise en place en suivant certaines classes de précision.

I.2.1 Des classes de précision obligatoires

Depuis l'arrêté du 15 février 2012 [6], ces ouvrages sont rangés en trois classes de précision relatives à l'incertitude maximale de localisation de ces ouvrages. En d'autres termes, cette incertitude correspond à la différence entre la localisation du réseau en coordonnées X, Y, Z ou E, N, H et sa position réelle. Les trois classes de précision sont illustrées sur la figure 3 ci-dessous.

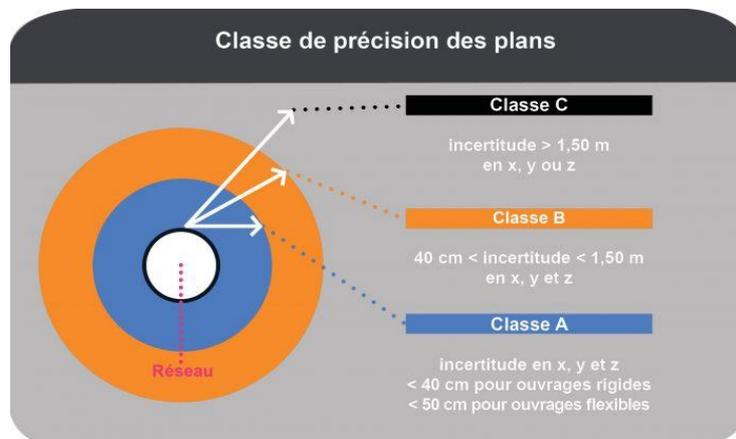


Figure 3 - Schéma des trois classes de précision d'un réseau. Selon sigerly.fr, 2017.

Ainsi, ce précédent schéma définit chaque catégorie :

- Classe A : l'incertitude maximale est inférieure ou égale à 40 cm s'il s'agit d'un réseau rigide, inférieure ou égale à 50 cm s'il s'agit d'un réseau flexible et inférieure ou égale à 80 cm s'il s'agit d'ouvrages souterrains de génie civil liés aux

installations destinées à la circulation des véhicules ferroviaires ou guidés, construites avant le 1^{er} janvier 2011.

- Classe B : l'incertitude maximale est supérieure à celle relative à la classe A et inférieure ou égale à 1,50 m ou à 1 m pour les branchements d'ouvrages souterrains.
- Classe C : l'incertitude maximale est supérieure à 1,5 m ou à 1 m pour les branchements d'ouvrages souterrains, ou simplement, si la localisation de l'ouvrage n'est pas possible.

De plus, suite à la réforme anti-endommagement appliquée depuis le 1^{er} juillet 2012, le récolement des réseaux et branchements neufs doit obligatoirement être réalisé en classe de précision A [7].

I.2.2 Un devoir de géoréférencement de tous les nouveaux réseaux

En effet, cette nouvelle réglementation impose le géoréférencement de tous les réseaux avec des appareils apportant une précision centimétrique tels que des récepteurs GNSS ou des tachéomètres pour ainsi fournir des coordonnées dans le système de référence en vigueur en France métropolitaine, soit Lambert 93 ou Conique Conforme en planimétrie et NGF-IGN69 en altimétrie. Ces méthodes nécessitent donc l'intervention d'un géomètre à chaque ouverture de tranchées, pouvant parfois être assez contraignant et retarder les travaux de remblaiement.

Il était alors nécessaire de réfléchir à une autre méthode pour réduire le temps d'acquisition sur le terrain, voire pour ne pas nécessiter le déplacement de géomètres aussi régulièrement. C'est pourquoi des méthodes de photogrammétrie terrestre ont vu le jour pour ce type de levé. Elles pourraient permettre de fournir un rendu plus « réaliste », qui peut faciliter la compréhension pour des personnes non-professionnelles, réduire le temps d'acquisition sur le terrain en fonction des approches utilisées, mais aussi être accessible à un plus grand nombre de professionnels qu'uniquement les spécialistes de la mesure. Cependant, un travail de vérification des précisions et de qualification des données produites selon la réglementation est indispensable pour utiliser cette méthode. Cela passe tout d'abord par un choix d'outils techniques efficaces suivi d'un mode opératoire strict de l'acquisition des données jusqu'au rendu des livrables.

II Analyse des divers outils techniques pour l'acquisition et le traitement des photographies

II.1 Choix de la caméra

La mise en place d'une méthode de photogrammétrie terrestre nécessite en premier lieu de choisir une caméra restituant des images de qualité suffisante pour produire un nuage de points de précision centimétrique. Elle se doit également d'être robuste dans des conditions d'acquisition qui ne sont pas toujours optimales (poussières, pluie, vent...), pratique à l'emploi et posséder une batterie et un stockage de données suffisants. Puis, il sera nécessaire de définir les paramétrages les plus appropriés aux acquisitions photogrammétriques.

II.1.1 Type de caméra choisie

Ainsi pour réaliser ce type de relevé terrestre, plusieurs choix de caméras nous sont proposés. Tout d'abord, nous retrouvons les caméras d'action installées sur un trépied amovible. Compactes et résistantes, elles permettent de fournir des images grand angle. Puis nous pouvons utiliser les smartphones, qui sont abordables et facilement accessibles et enfin les appareils photographiques, qui produisent une image de haute qualité mais qui sont souvent incompatibles aux conditions extrêmes.

Il peut alors être intéressant de comparer les caractéristiques techniques de chaque type de caméra en nous appuyant sur des produits existants pour conclure sur la plus adaptée à notre utilisation.

II.1.1.1 Comparatif entre une caméra d'action, un appareil reflex photographique et un smartphone

Dans notre étude, la caméra d'action utilisée est la HERO10 Black de la marque GoPro, entreprise américaine spécialisée dans les caméras embarquées, depuis 2002. Cette caméra n'est pas spécialement conçue pour l'utilisation professionnelle mais elle arbore des caractéristiques techniques intéressantes pour la réalisation d'acquisitions photogrammétriques (voir tableau 1).

Caractéristiques techniques GoPro HERO10 [8]	
Poids	154 g
Taille	71,8 x 50,8 mm
Batterie	1720 mAh
	50 à 120 min selon utilisation [9]
Robustesse	+++
Étanchéité	10 m sous l'eau et totalement à la poussière
Prix	300 €
Capteur	CMOS
	1/2,3'' (4,62 x 6,16 mm) [10]
Résolution maximale (en photographie)	23,6 MP
Taille de l'image	5568 x 4176 pixels
Distance focale réelle	2,767 mm

Tableau 1 - Caractéristiques techniques de la GoPro HERO10. Selon gopro.com, mars 2024.

Ainsi, nous allons la comparer avec le smartphone CORE-X5 de la marque CROSSCALL qui est conçu pour être performant dans des conditions hostiles, puis avec l'appareil reflex photographique CANON EOS 850D déjà testé lors de travaux pratiques de photogrammétrie terrestre durant ma formation (voir tableau 2).

Caractéristiques techniques	Smartphone CROSSCALL CORE-X5 [11]	Appareil reflex photographique CANON EOS 850D [12]
Poids	256 g	515 g
Taille	163 x 78 x 14.5 mm	131 x 102,6 x 76,2 mm
Batterie	4940 mAh	1040 mAh
	14h55 avec GPS activé	800 prises de vue
Robustesse	+++	+
Étanchéité	2 m et 30 min sous l'eau et totalement à la poussière	85 % d'humidité
Prix	530 €	1050 €
Capteur	CMOS	CMOS
	1/2'' (4,8 x 6,4 mm) [10]	(22,3 x 14,9 mm)
Résolution maximale (en photographie)	48 MP	24,1 MP
Taille de l'image	Inconnue	6000 x 4000 pixels
Distance focale réelle	26 mm	18 à 135 mm [13]

Tableau 2 - Caractéristiques techniques du smartphone CROSSCALL CORE-X5 et de l'appareil reflex photographique CANON EOS 850D. Selon crosscall.com et canon.fr, avril 2024.

Tout d'abord, d'un point de vue technique, la GoPro HERO10 est la caméra la plus légère et la plus compacte, ce qui est essentiel lors de longues acquisitions où l'opérateur doit être stable en tenant la caméra sur une perche télescopique. De plus, elle est tout aussi robuste et étanche à la poussière que le smartphone proposé par CROSSCALL.

Au contraire, l'appareil reflex photographique n'est lui pas adapté à un environnement poussiéreux et très humide, pouvant causer des dommages irréversibles à l'appareil, il est donc à proscrire pour les levés de récolement qui se déroulent pendant des phases de chantier. En termes d'autonomie, c'est le smartphone qui dépasse largement ces concurrents, bien qu'il soit très rare de dépasser une heure d'acquisition sans interruption dans une journée. Techniquement, nous conseillons donc d'opter pour l'utilisation d'une caméra d'action ou d'un smartphone qui ont des qualités techniques similaires. Financièrement, le smartphone est 230 € plus chère que la caméra d'action mais cela reste une somme rapidement amortie pour un usage professionnel.

Puis, intéressons-nous à la qualité de leur capteur numérique, qui est un point essentiel pour produire de bons rendus. Les outils étudiés sont tous les trois dotés de capteurs CMOS. Une analyse plus poussée de ce type de capteur est disponible en annexe⁵. Pour les départager, nous allons donc analyser les caractéristiques spécifiques de ces capteurs.

Tout d'abord, la résolution photographique maximale, c'est-à-dire le nombre de pixels sur une photo, est un élément souvent déterminant dans un choix de capteur car les utilisateurs cherchent continuellement à se rapprocher au plus près de la réalité et donc à acquérir la plus grande résolution photographique. La caméra GoPro HERO10 est équipée d'un capteur avec une résolution maximale de 23,6 Mégapixels, légèrement inférieure à la résolution offerte par l'appareil photographique alors que le smartphone peut produire des images de 48 Mégapixels. Cependant ce qui nous importe lors d'un traitement photogrammétrique, c'est la précision du modèle final. Or, pour produire un plan topographique il n'est pas nécessaire de disposer d'informations millimétriques, c'est pourquoi bon nombre de logiciels de traitement réalise un sous-échantillonnage du modèle pour réduire le nombre de points fournis et ainsi la taille du fichier. Le capteur n'a alors pas besoin d'être sur-résolu, étant donné qu'un capteur de 20 Mégapixels apporte déjà suffisamment de données pour fournir un livrable avec une précision centimétrique. D'autant plus que davantage de résolution fournirait un surplus de données aux logiciels, ce qui nécessiterait un traitement beaucoup plus long.

Toutefois, nous pourrions également nous intéresser à la distance focale de l'appareil, c'est-à-dire la distance entre le capteur et le centre de l'objectif qui influe sur l'angle de

⁵ Annexe 1

vision de la scène. Ainsi, plus la focale est courte et plus le champ de vision est grand. Pour réaliser des acquisitions photogrammétriques, il est donc très intéressant d'utiliser des appareils avec une très courte focale pouvant photographier une plus grande scène et ainsi augmenter le nombre de points communs entre les images, indispensables à la reconstruction d'un modèle 3D [14]. Ainsi, ce sont les caméras d'action qui sont dotées de la plus courte focale.

Pour conclure, nous remarquons que les caméras d'action nous permettent d'obtenir un bon compromis entre résistance et qualité photographique. Nous continuerons donc notre étude avec ce type de caméra, même si l'utilisation du smartphone pour des travaux de récolement n'est pas à proscrire car il a déjà été mis auparavant en application [15]. Maintenant il peut être intéressant de comparer les différentes caméras d'action entre elles.

II.1.1.2 Comparatif entre diverses caméras d'action

Sur le marché, il existe différents types de caméras d'actions, les plus répandues étant celles de la marque américaine GoPro et chinoise DJI. Ainsi, il peut être intéressant de comparer le dernier modèle de la marque DJI avec celui de la marque GoPro préalablement étudié, étant le plus ancien modèle mis en vente par la marque (voir tableau 3).

Caractéristiques techniques	DJI Osmo Action 4 [16]	GoPro HERO10 [8]
Poids	145 g	154 g
Taille	70,5 x 44,2 mm	71,8 x 50,8 mm
Batterie	1770 mAh	1720 mAh
	160 min	50 à 120 min selon utilisation [9]
Robustesse	+++	+++
Étanchéité	18 m sous l'eau et totalement à la poussière	10 m sous l'eau et totalement à la poussière
Prix	329 €	300 €
Capteur	CMOS	CMOS
	1/3''	1/2.3''
Résolution maximale (en photographie)	10 MP	23,6 MP
Taille de l'image	4000 x 2256 pixels	5568 x 4176 pixels
Distance focale réelle	Inconnue	2,767 mm
Plage de mise au point	0,4 m à l'infini	Inconnue

Tableau 3 – Comparatif des caractéristiques techniques de la DJI Osmo Action 4 et de la GoPro HERO10. Selon dji.com et gopro.com, mai 2024.

La caméra produite par DJI possède des qualités techniques remarquables la plaçant au niveau de la GoPro HERO10. Seulement sa résolution maximale est insuffisante pour un

traitement photogrammétrique. Ainsi, après avoir choisi précisément la caméra d'action à privilégier, il serait intéressant de faire varier ces paramètres afin d'optimiser la qualité des images produites en fonction des conditions d'acquisition.

II.1.2 Paramétrage de la caméra

La caméra GoPro HERO10, n'étant pas principalement conçue pour réaliser des levés photogrammétriques, offre plusieurs types d'acquisitions. Cependant, nous n'utiliserons que le mode « accéléré » qui permet de capturer des images à un intervalle de temps donné. Ainsi, nous allons étudier les paramètres modifiables de ce mode pour ensuite faire varier certains d'entre eux.

II.1.2.1 Paramètres propres à la GoPro HERO10

En effet, avec la GoPro HERO10 et plus spécifiquement le mode « accéléré », tous les paramètres ne sont pas modifiables, comme la distance focale, l'ouverture du diaphragme ou encore la durée d'ouverture de l'obturateur. Malgré cela, il est tout de même concevable de contrôler certains paramètres avancés sur l'interface de la caméra avec le mode « Protune ». Nous pouvons ainsi faire varier la sensibilité ISO qui permet au capteur d'être plus ou moins sensible à la luminosité. Par défaut, il est recommandé de paramétrer la caméra dans un intervalle de 100 à 800. Puis, il est préconisé d'augmenter ce paramètre jusqu'à 1600 en cas de faible luminosité. Cependant, cela engendre un bruit sur les images qui pourrait mettre en échec le traitement photogrammétrique, c'est pourquoi nous conseillons d'utiliser la plus faible sensibilité ISO possible [17]. La caméra est aussi équipée d'un compensateur d'exposition qui a aussi un impact sur la luminosité des photographies en améliorant la qualité des images lorsque la luminosité est fortement contrastée. Mais nous le paramétrons par défaut à 0, car il vaut mieux au préalable augmenter la valeur ISO [17]. La balance des blancs qui permet d'ajuster la température de couleur à une dominante plus chaude ou froide est configurée en mode automatique, ce qui permettra à la GoPro de définir au mieux ce réglage en fonction de la scène.

Il est également possible de paramétrer la netteté des images selon trois options qui sont faible, moyenne ou élevée, comme la couleur selon le mode plat, naturel et éclatante. Ainsi, il peut être intéressant de procéder à des tests sur ces deux derniers indicateurs pour étudier le paramétrage favorable à des acquisitions photogrammétriques.

II.1.2.2 Tests de paramétrages

Pour analyser la netteté et la couleur optimale à paramétrer sur la GoPro HERO10, nous allons photographier la même scène à l'aide d'un support fixe et dans les mêmes conditions, en faisant varier un seul paramètre à chaque prise. Puis nous allons comparer plusieurs indicateurs sur le logiciel Agisoft Metashape pour conclure quant au paramétrage le plus adapté. Nous avons choisi de photographier deux façades d'entrepôt se trouvant en extérieur, car la caméra est majoritairement utilisée dans ces conditions. L'une des façades est orientée plein nord et est à l'ombre au moment de la prise de vue (test n°1) et l'autre orientée plein sud et au soleil au moment de la prise de vue (test n°2), ce qui va nous permettre de déterminer les paramètres selon des conditions d'ensoleillement différentes.

Premièrement, l'élément essentiel pour traiter une série d'acquisitions en photogrammétrie est la reconnaissance de points de liaison permettant d'associer les images entre elles. Sur le logiciel, nous avons alors comparé le nombre de points de liaison obtenus après une première phase d'alignement. On remarque ainsi dans le tableau rédigé en annexe⁶, que lors du test n°1, les images paramétrées avec la netteté la plus élevée recueillent le plus de points de liaisons, tandis que lors du test n°2, ce sont celles paramétrées avec une netteté moyenne (voir figure 4). Ce paramètre a donc un rôle prédominant quant à la perception des détails.



Figure 4 - Images du test n°1 paramétrée avec une netteté élevée (à gauche) et du test n°2 paramétrée avec une netteté moyenne (à droite), représentant les cibles et points de liaison détectés sur le logiciel Metashape.

De plus, lors de ces tests, nous avons ajouté des cibles au sol dans le but de vérifier leur bonne reconnaissance par le logiciel Metashape. En effet, lors d'un alignement des images

⁶ Annexe 2

celles-ci sont reconnues automatiquement si la qualité des images est suffisante. Ces cibles permettent d'orienter le modèle dans le système de coordonnées souhaité, ainsi, plus elles sont nombreuses, plus le modèle sera géoréférencé précisément. Nous remarquons alors avec le premier test que les images dont la netteté est la plus élevée, permettent une reconnaissance d'un plus grand nombre de cibles et notamment celles les plus éloignées, comme représenté sur la figure 4. En parallèle, Metashape indique l'erreur totale de projection des références sur les images (en pixels) qui correspond à la précision de l'alignement des caméras. Nous constatons alors sur les deux tests, que les images paramétrées avec une netteté moyenne ont des erreurs de projection presque inférieurs de moitié à celles prises avec une netteté élevée, pour un nombre de cibles détectées presque similaire. Il est aussi possible de lancer une pré-analyse de la qualité de chaque image qui permet de déterminer leur niveau de netteté avant tout traitement [18]. Dans les deux cas, celles prises avec la netteté moyenne sont nettement meilleures, étant donné qu'on estime que les images ayant une qualité inférieure à 0,5 doivent être rejetées du traitement, car de trop mauvaise qualité. D'après ces premiers tests, nous conseillons de paramétrer la caméra avec une netteté moyenne.

Concernant le paramétrage des couleurs, nous remarquons sur les deux tests, que les images paramétrées avec des couleurs éclatantes (profil de saturation colorimétrique) et des couleurs naturelles (profil colorimétrique fidèle à la réalité) sont celles qui reconnaissent le moins de points de liaison. Nous conseillons donc de paramétrer les couleurs sur « plat », c'est-à-dire avec un profil colorimétrique neutre car les traitements photogrammétriques nécessitent les images les moins retravaillées possibles. Nous avons également réalisé une étude de l'exposition des images selon les différents paramétrages sur le logiciel GIMP en annexe⁷. Suite à cette étude, nous avons également conclu que le paramétrage idéal de la GoPro est avec une netteté moyenne et une couleur définie sur « plat ». Nous pouvons remarquer que l'entreprise Sogelink, qui fournit des modes opératoires pour utiliser la GoPro pour des acquisitions photogrammétriques, conseillait de la paramétrer avec une netteté faible et une couleur sur « plat ».

Maintenant que le système d'acquisition et les paramétrages privilégiés ont été définis pour procéder à des relevés photogrammétriques, il serait intéressant d'étudier le processus de traitement idéal à notre besoin.

⁷ Annexe 3

II.2 Choix du logiciel

Un facteur important pour utiliser la photogrammétrie est le traitement des données acquises sur le terrain et leur qualité de restitution. Cependant, il n'existe pas un seul logiciel avec une unique façon de traiter les données et il est important de les différencier pour trouver le logiciel adéquat à notre utilisation.

II.2.1 Examen des logiciels de photogrammétrie disponibles sur le marché

Nous pouvons classer les logiciels de traitement photogrammétrique disponibles sur le marché suivant cinq catégories :

- Des solutions gratuites pour un usage non professionnel, souvent limitées en termes de quantité d'images et de paramétrages comme Autodesk Recap.
- Des solutions gratuites plus abouties, telles que Reality Capture qui qualifient les données produites.
- Des solutions gratuites en open-source, comme VisualSFM qui est inutilisable à but lucratif ou Pastis-Apéro-Micmac, un logiciel complexe à prendre en main [3].
- Des solutions payantes en ligne, pour automatiser le traitement photogrammétrique et gagner en productivité. Nous pouvons citer la solution Geosnap de Sogelink.
- Des solutions payantes à des fins professionnelles et nécessitant plus d'opérations de la part des utilisateurs. Parmi les plus répandues, nous retrouvons le logiciel russe Agisoft Metashape, anciennement Photoscan, le logiciel Pix4D avec ces solutions Pix4Dmapper et Pix4Dmatic, mais aussi Photosurvey de Geopixel, aujourd'hui racheté par Sogelink.

Comme évoqué précédemment, AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES ne disposait d'aucun programme de traitement photogrammétrique, il leur a donc fallu choisir celui le plus adapté à leurs besoins. Disposant déjà de la solution GeoGexFR CAD de Sogelink pour la production de plans topographiques, c'est tout naturellement qu'ils se sont alors orientés vers la solution Geosnap, produite également par Sogelink. Seulement, pour les conforter dans leur choix, il est intéressant de comparer les résultats de cette solution avec un logiciel ayant une utilisation plus indépendante et offrant plus de paramétrages comme Metashape dont le processus de calcul est identique à celui de Geosnap mais non optimisé par des algorithmes. Mais également un logiciel gratuit permettant de fournir des livrables exploitables pour des travaux topographiques tels que Reality Capture.

II.2.2 Étude des résultats obtenus selon divers logiciels

Pour comparer ces logiciels, nous avons utilisé les mêmes données en entrée afin d'étudier leurs résultats en sortie. Nous avons alors traité un levé de récolement réalisé avec la caméra GoPro HERO10 sur la rue Antony Viot à Bourg-en-Bresse (01), contenant 63 images et géoréférencées avec 4 points connus dans le système de coordonnées RGF93 CC46. Premièrement, nous comparerons le temps de traitement et le coût des trois logiciels puis la qualité des résultats, pour conclure en conseillant l'entreprise sur son choix.

II.2.2.1 Temps de traitement et coût des logiciels

Tout d'abord, Geosnap a la particularité d'être un logiciel SaaS contrairement à ses deux opposants, c'est-à-dire que l'opérateur dépose les images et les coordonnées des points de géoréférencement et ce sont les algorithmes qui réalisent chaque étape de la construction du nuage de points (alignement des images, pointage des points de géoréférencement sur chaque image, construction du nuage de points avec ajustement, production d'une orthomosaïque...). L'opérateur devra uniquement pointer les références dans un nuage de points préalablement construit, si le géoréférencement a été réalisé avec des points de détails.

Au contraire, sur le logiciel Reality Capture, avant la phase d'alignement, il est nécessaire d'importer les coordonnées des points géoréférencés puis de positionner chaque référence sur chaque image, ce qui peut être une tâche longue et redondante selon la quantité de données. Sur Metashape, il faut d'abord réaliser un premier alignement et ensuite positionner chaque repère sur chaque image. Seulement, dès que le repère est positionné sur trois images, il est prépositionné sur les autres, ce qui réduit tout de même la durée des manipulations. De plus, Geosnap permet de recalculer plusieurs levés de récolement acquis lors de jours différents dans le même traitement, contrairement aux autres logiciels où il est nécessaire de traiter chaque levé indépendamment. Ainsi, nous observons nettement sur le tableau 4, que le logiciel Geosnap permet le traitement le plus rapide et surtout nécessite le moins de temps d'actions à l'opérateur pour un unique levé de récolement, là où la différence de temps sur un chantier global serait encore plus marquante.

Sur ce même tableau, nous avons aussi comparé le coût de chaque logiciel pour évaluer le plus adapté à un budget de cabinet de géomètres-experts. Ainsi, nous constatons que Reality Capture est le logiciel le plus compétitif financièrement pour une société comme

AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES qui n'aura pas besoin de souscrire à un abonnement. Metashape peut aussi être intéressant pour les entreprises qui souhaitent mettre en place cette méthode sur du long terme car il ne nécessitera qu'un seul déboursement, qui équivaut à un abonnement de 3 ans à Geosnap. Cependant, le gain de temps de travail d'un technicien qui utilise Geosnap permet à l'entreprise de gagner en productivité. De plus, si son utilisation reste occasionnelle, il est intéressant de savoir que Sogelink ne facture l'abonnement mensuel que les mois qui font office d'un traitement.

	GEOSNAP	REALITY CAPTURE	METASHAPE
Temps de traitement de l'opérateur	5 min	30 min	15 min
Temps de traitement du logiciel	1h	1h	2h10
Temps de traitement total	1h05	1h30	2h25
Coût	Abonnement mensuel de 90 € qui comprends 10000 m ² de surface traitée. Facturation de 4,5 € les 1000 m ² supplémentaires.	Gratuit sauf si la société engendre un chiffre d'affaires annuel brut de plus d'un million de dollars (922 500 € en juillet 2024). Sinon abonnement annuel à 1250 \$ (1153 € en juillet 2024)	Licence perpétuelle à 3499 \$ (3228 € en juillet 2024)

Tableau 4 - Comparatif des temps de traitement et du coût des logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape

Même si ces logiciels paraissent couteux, nous pouvons rappeler que le prix d'un système d'acquisition photogrammétrique reste abordable, a contrario de l'acquisition d'un scanner par exemple. Ainsi, suite à cette première analyse, nous pouvons indiquer que Geosnap est le logiciel qui dispose d'un meilleur rapport temps/prix. Maintenant, nous nous demandons quel logiciel est le plus pertinent en termes de qualification de données.

II.2.2.2 Qualités des résultats

Tout comme lors de la réalisation de calculs topographiques, en photogrammétrie il est primordial de qualifier la donnée produite pour ensuite produire des livrables validant les précisions attendues. Ainsi, ces trois logiciels fournissent chacun des données caractérisant la précision de l'alignement des images et du géoréférencement du nuage de points, qui

sont étudiées en annexe⁸. Si nous ne nous basons que sur ces facteurs techniques, Reality Capture se placerait alors comme l'outil le plus précis. Nous pouvons aussi soulever que Geosnap qui dispose du même processus de calcul que Metashape fournit des données de meilleure qualité dû à des algorithmes puissants qui ajustent et optimisent au maximum les données.

Ces trois logiciels permettent également la création d'une orthomosaïque de la scène au format tif, directement géoréférencée et qui facilitera alors la visualisation des éléments topographiques sur un plan. Sogelink ne propose aucun paramétrage sur Geosnap mais optimise le rendu tout en compressant le fichier au maximum. Alors que sur Metashape et Reality Capture, il est possible de paramétrer la taille du pixel au sol, mais les fichiers sont encore très volumineux même après une compression en LZW et sont donc compliqué à visionner et à stocker, comme on peut le constater sur le tableau 11 situé en annexe⁹. Nous remarquons également un décalage d'environ 6 cm par rapport au nuage de points sur Reality Capture, ce qui rend l'orthomosaïque presque inutilisable.

Concernant le nuage de points exporté après le traitement et qui servira au dessin des éléments topographiques, Geosnap a fait le choix de le rééchantillonner à un point tous les 10 mm pour les levés topographiques et 5 mm pour les levés de récolement, pour ainsi limiter la taille de fichier et fournir les données strictement nécessaires à l'utilisation prévue. Au contraire, Metashape et Reality Capture propose un nombre de points bien plus conséquent, fournissant ainsi des nuages plus compacts et plus détaillés. Visuellement les rendus sont donc plus fidèles à la réalité même si ces informations supplémentaires ne sont pas vraiment nécessaires pour la production d'un plan topographique.

Nous avons ensuite analysé ces nuages de points en comparant les EMQ entre les points relevés avec un tachéomètre et ceux obtenues par méthode photogrammétrique avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape pour étudier les précisions empiriques de chaque logiciel, que nous pouvons retrouver en annexe¹⁰. Ainsi, nous remarquons que ces écarts sont négligeables suivant la réglementation des levés de récolement et qui sont dus majoritairement à la différence de positionnement entre le point placé sur le nuage de points et celui pris avec le prisme qui ne peuvent pas être précisément identiques.

⁸ Annexe 4

⁹ Annexe 4

¹⁰ Annexe 5

Les données les plus fidèles au levé tachéométrique sont celles produites par Geosnap. Reality Capture fournit également de bons résultats mais le pointage sur le nuage de points est bien plus complexe sans l'utilisation d'orthomosaïque. Nous remarquons que les données se trouvant à une distance caméra / fond de la tranchée supérieure à 3,50 m n'ont pas été fournies par Geosnap. Cependant, dans sa dernière mise à jour, Sogelink a repoussé cette limite, en fournissant des données fiables à une distance caméra / fond de la tranchée de 7,50 m. Sur les autres logiciels, les données sont fournies mais font l'objet d'importants écarts, ce qui peut induire en erreur les utilisateurs.

Pour conclure, nous avons dressé l'état des avantages et des inconvénients de chaque logiciel sur le tableau ci-dessous.

	GEOSNAP	REALITY CAPTURE	METASHAPE
Avantages	Robustesse des algorithmes de traitement, automatisation du traitement, données fiables et contrôlées, rapidité, taille des fichiers.	Coût, données fiables et contrôlées, détails des résultats.	Données fiables et contrôlées, détails des résultats.
Inconvénients	Peu paramétrable, peu de données de précision du calcul, coût.	Taille des fichiers, temps de traitement, orthomosaïque erronée.	Taille des fichiers, temps de traitement, coût.

Tableau 5 - Bilan des avantages et des inconvénients entre les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.

Ainsi, pour choisir un logiciel de traitement, il est important de bien définir les besoins et les attentes de l'entreprise. En effet, le cabinet de géomètres-experts AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES souhaite utiliser la photogrammétrie terrestre en premier lieu pour des levés de récolement et des levés topographiques. Il souhaite donc un logiciel facile à manipuler pour des techniciens peu formés en photogrammétrie et qui leur fournit rapidement des données de qualité tout en optimisant leur stockage. L'application Geosnap proposée par Sogelink correspond donc parfaitement à leurs besoins.

Enfin, après avoir déterminé la caméra nécessaire à une acquisition photogrammétrique ainsi que le logiciel de traitement des données, il est essentiel de mettre en place un protocole d'acquisition, de traitement et de contrôle rigoureux et adaptable à chaque chantier. De plus, pour adopter définitivement cette méthode, une comparaison de ces résultats avec ceux produit par des procédés dits « traditionnels » est primordiale.

III La mise en place d'un protocole au sein de l'entreprise et le parallèle avec les méthodes traditionnelles

III.1 Le mode opératoire à adopter

Nous avons choisi de mettre en place un protocole pour les relevés de récolement et les relevés topographiques, qui sont les plus appropriés à l'utilisation de la photogrammétrie terrestre et dont l'entreprise a le plus de demandes. Nous l'avons réalisé en nous appuyant sur des « modes opératoires types » fournis par la société Sogelink [19] puis optimisé suite à la réalisation de trois levés topographiques et le suivi de trois chantiers de récolement, chacun avec leurs particularités. Il est donc adapté à l'utilisation du logiciel Geosnap mais la méthode d'acquisition terrain peut cependant être applicable à d'autres logiciels. Nous avons décidé de le résumer ci-dessous tout en fournissant une version plus détaillée à l'entreprise.

III.1.1 Acquisition des données sur le terrain

Que ce soit pour un levé topographique ou un levé de récolement, l'acquisition des données sur le terrain nécessite tout d'abord un bon positionnement de la caméra, puis la réalisation d'un cheminement précis pour finir avec un géoréférencement adéquat.

III.1.1.1 Positionnement de la caméra

Tout d'abord, la caméra GoPro HERO10 doit être fixée au sommet d'une perche télescopique de manière à se situer à 3,50 m du sol (voir figure 5). À cette hauteur et à la verticale, selon les caractéristiques de cette caméra, nous estimons une zone visible au sol de 7,8 x 5,8 m avec une résolution de 1 mm/px dont les calculs sont détaillés en annexe¹¹. Ainsi, cela permet de couvrir une grande emprise au sol à chaque image et obtenir un haut taux de recouvrement entre les images tout en gardant un degré de détails suffisamment élevé pour un levé topographique. Pour les levés de récolement, cette hauteur s'applique de la caméra jusqu'au fond de la tranchée, ainsi si la tranchée est à 1 m de profondeur il faudra disposer la caméra à 2,50 m du sol. Il est primordial de respecter cette hauteur au risque de ne disposer d'aucune donnée au fond de la tranchée.

¹¹ Annexe 6

De plus, la caméra devra être inclinée à 45° vers le bas par rapport à la perche afin qu'elle offre d'une part un plus fort recouvrement et d'autre part que l'opérateur et la perche ne soient pas visibles sur chaque image. En effet, comme évoqué dans les caractéristiques techniques de la GoPro HERO10, cette dernière a un objectif dit « grand angle » qu'on appelle aussi « fisheye » avec une très courte distance focale ce qui nous permet d'observer le sol juste devant l'opérateur jusqu'à l'horizon sur chaque photographie. Seulement, il est recommandé d'avoir le moins d'horizon possible sur les images car cela pourrait fausser le traitement voire l'alourdir à cause d'une même zone de recouvrement sur toutes les images. Nous conseillons alors à l'opérateur d'incliner légèrement la perche en avant comme sur la figure 5.

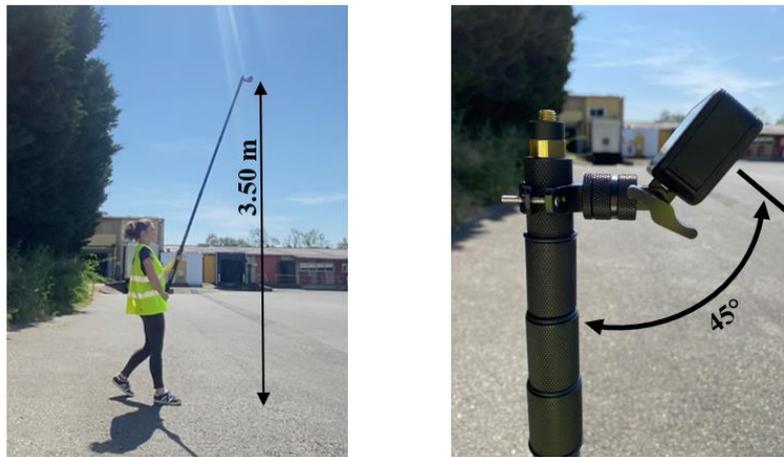


Figure 5 - Images de la position de la caméra nécessaire à un relevé de photogrammétrie terrestre.

III.1.1.2 Cheminement

Ensuite, nous pouvons réaliser les acquisitions d'images en nous déplaçant sur l'ensemble de la zone. Cette acquisition est dite « automatique » car la caméra dispose d'un mode « Accéléré » qui permet de capturer une image à un intervalle de temps précis. Dans notre cas, nous choisissons de le paramétrer sur 2 secondes. En effet, en prenant en compte cet intervalle ainsi que la distance parcourue entre chaque prise de vue préalablement calculé en définissant un pourcentage de recouvrement (voir annexe¹²), nous estimons une vitesse de déplacement comprise entre 4 et 5 km/h, ce qui correspond à une marche classique.

Concernant les levés topographiques, nous préconisons de parcourir l'intégralité de l'espace en réalisant des allers-retours, parallèles espacés de 3 m maximum. Il est important de bien dépasser les limites de la zone de chantier et de réaliser au moins trois

¹² Annexe 6

passages avec des changements de direction fluides même dans les zones les plus étroites. Pour les éléments en élévation tels que les bâtiments et les murs, il est nécessaire de réaliser une autre acquisition en pratiquant un aller-retour parallèle à la façade à une distance d'environ 3 m et toujours avec la caméra orientée à 45° vers le pied de l'ouvrage pour ne pas manquer d'informations (voir figure 6).

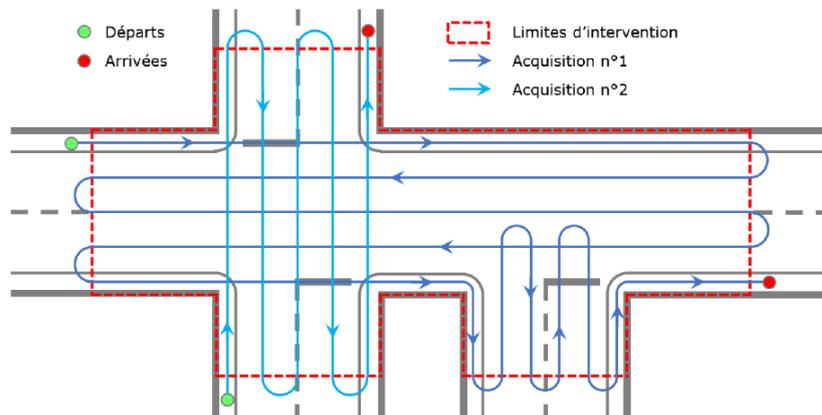


Figure 6 - Schéma du cheminement pour procéder à un relevé topographique d'une zone avec une méthode de photogrammétrie terrestre. Selon apps.sogelink.fr, 2024.

Concernant les levés en tranchées ouvertes pour des travaux de récolement, avant chaque acquisition d'images, nous recommandons à l'opérateur de placer un repère temporaire (clou entouré d'une marque de peinture) de part et d'autre de la tranchée, tous les 15 mètres et jusqu'à l'extrémité du tronçon concerné, comme indiqué sur la figure 7. Ces repères devront être conservés jusqu'au rattachement global de la zone (durant plusieurs semaines de travaux parfois) et permettront de sécuriser le rattachement du récolement si celui-ci est amené à être traité séparément. Il faut donc veiller à les positionner de manière à ce qu'ils ne soient pas éjectés par le passage des engins ou retirés par un futur récolement.

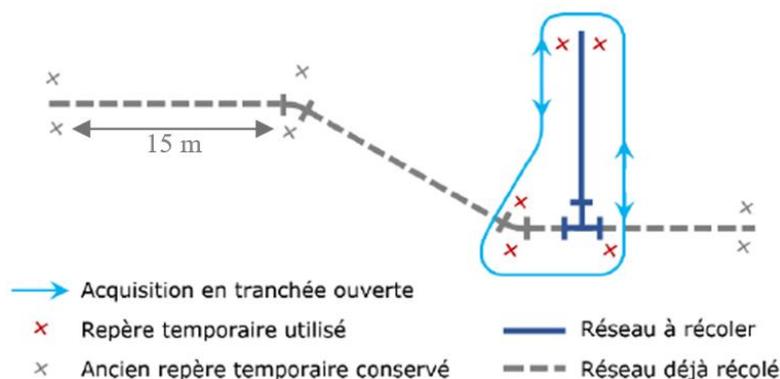


Figure 7 - Schéma du cheminement pour procéder à un relevé de récolement d'une zone avec une méthode de photogrammétrie terrestre. Selon apps.sogelink.fr, 2024.

Puis, nous conseillons à l'opérateur de se placer face à l'ouvrage à une distance de 2 à 3 m de celui-ci en s'assurant que soit clairement visible sur l'image, l'ouvrage sur la moitié inférieure et la voirie sur la moitié supérieure comme représenté sur la figure 8. Il est nécessaire que la voirie soit visible, car elle permettra de recalibrer les images entre elles en identifiant des éléments topographiques ponctuels.



Figure 8 - Exemple d'image acceptable pour un levé de récolement avec une méthode de photogrammétrie terrestre.

Une acquisition complète nécessite de réaliser deux tours minimums autour du tronçon à récoiler, en changeant de sens entre les deux tours. Il faudra que les repères apposés soient visibles et nous conseillons d'élargir le périmètre d'acquisition de chaque tranchée pour faciliter le rattachement entre les différents levés. Nécessitant plus de détails que pour un levé topographique classique, il est conseillé de se déplacer à une vitesse entre 2 et 3 km/h et de ralentir lors de branchements spécifiques, comme des pièces d'AEP. De plus, le principal avantage de l'utilisation de la photogrammétrie terrestre pour ce type de relevé est qu'il ne nécessite pas de géoréférencement systématique à chaque tranchée ouverte. Pour rattacher les différentes acquisitions réalisées en tranchée ouverte, il faudra réaliser un ou plusieurs rattachements globaux de la zone, en suivant la méthodologie des levés topographiques et dans un délai maximum d'un mois après l'ouverture de la première tranchée, dans le cadre d'un récolement phasé.

Cependant, il n'est encore pas possible d'acquérir toutes les données avec une méthode de photogrammétrie terrestre. Par exemple, il est nécessaire d'indiquer l'altitude des fils d'eau, c'est-à-dire la limite de la canalisation où coule l'eau, de chaque tampon, grille ou boîte de branchement pour réaliser un plan de réseaux. La GoPro n'étant pas optimale pour représenter des éléments se trouvant dans des zones sombres, nous conseillons de relever tous les fils d'eau ultérieurement avec un matériel de mesure adapté (récepteurs GNSS,

tachéomètre...) en fonction de votre environnement (masque existant, végétation, couverture satellitaire...). Cette étape peut être réalisée en même temps que le rattachement global et le géoréférencement.

III.1.1.3 Géoréférencement

Pour finir les acquisitions terrain, il convient à l'opérateur de géoréférencer ces levés dans le système de coordonnées requis suivant deux méthodes qui sont cumulables sur le logiciel Geosnap mais également applicables sur d'autres logiciels. Ainsi, il est possible de réaliser un géoréférencement manuel, en pointant des éléments ponctuels permanents sur le nuage de points préalablement construit par le logiciel et en indiquant leurs coordonnées ou de réaliser un géoréférencement automatique le jour du rattachement global à l'aide de cibles spécifiques reconnues par le logiciel et qui sont acquises indépendamment avec la caméra puis géoréférencées.

Concernant la configuration des points de géoréférencement, il est nécessaire de placer une cible ou d'avoir un point d'appui à chaque extrémité de la zone de levé et de chaque côté de la voirie ou de la tranchée, ainsi qu'un point à chaque embranchement (voir figure 9). De plus, il faudra compléter cela avec un point tous les 30 à 35 m maximum pour les levés topographiques voire 20 à 25 m pour les levés de récolement, en alternant le côté de la voirie ou du réseau. Il est important d'avoir au moins quatre points de géoréférencement même sur les toutes petites zones d'intervention et ils doivent obligatoirement être dans le périmètre d'acquisition des images.

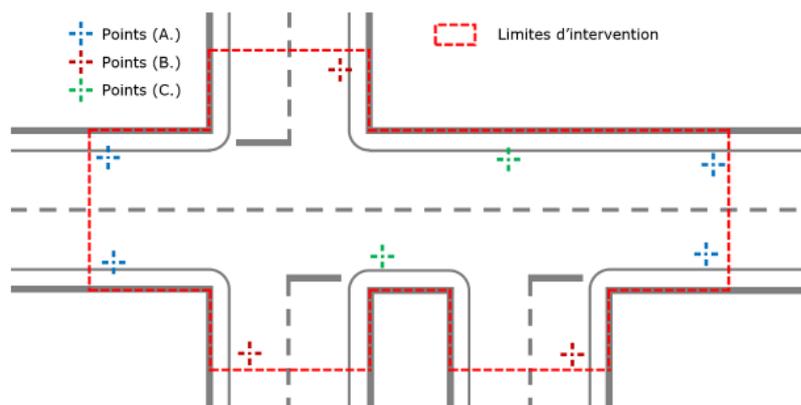


Figure 9 - Schéma de la configuration des points de géoréférencement. Selon apps.sogelink.fr, 2024.

Sur le terrain, il est primordial de visionner brièvement les séquences d'acquisition pour s'assurer qu'elles ont bien été enregistrées, qu'elles sont de qualité et qu'elles couvrent

toute la zone d'intervention, surtout pour les levés de récolement où l'ouvrage sera directement remblayé après notre passage. Les données peuvent ensuite être traitées pour produire les livrables souhaités.

III.1.2 Traitement des données sous Geosnap

Geosnap est une solution SaaS qui nécessite donc obligatoirement une connexion internet pour produire un modèle 3D à partir d'images et données de géoréférencement. Avant tout traitement, il est nécessaire de créer une mission indépendante pour chaque projet et d'indiquer sa localisation, son type et la méthodologie d'acquisition et de géoréférencement choisie. Puis, nous pouvons ajouter les images du levé topographique ou de chaque tranchée ouverte, du ou des rattachement(s) global(aux) et des cibles s'il y en a.

Pour les données de géoréférencement, l'ajout des coordonnées des cibles doit être réalisé dès l'importation des images et ne nécessite aucune action au cours du traitement. Tandis que si nous optons pour un géoréférencement manuel, nous ajouterons les coordonnées des éléments topographiques choisis et pointerons ces références sur un nuage de points fourni après un premier traitement des images.

Enfin, à la réception des résultats, nous obtenons un nuage de points sous format .laz et une orthomosaïque sous format .tif de chaque acquisition, ainsi qu'un MNT pour les levés topographiques ainsi qu'un rapport de traitement que nous devons d'abord contrôler avant de pouvoir exploiter les données et produire les livrables.

III.1.3 Procédure de contrôle et de stockage des données

Avant de procéder à la réalisation des livrables, les données fournies par l'application doivent être contrôlées. Pour cela, il faut tout d'abord vérifier que toutes les acquisitions d'images ont bien été traitées. En effet, certaines acquisitions peuvent avoir été exclues du calcul car impossible d'être rattachées avec les autres acquisitions pour plusieurs raisons. Premièrement, de forts changements météorologiques (surtout de luminosité) entre les diverses acquisitions peuvent dégrader la reconstruction. En effet, la météo idéale en photogrammétrie est un ciel dégagé et sans soleil, ce qui nous permet d'obtenir une lumière homogène alors que les acquisitions en plein soleil augmentent fortement le contraste sur les images et ceux sous la pluie peuvent dégrader leur netteté. Deuxièmement, une forte dégradation du sol autour de certaines tranchées peut empêcher

leur rattachement, il faut donc élargir le périmètre de chaque acquisition. Dernièrement, une mauvaise inclinaison de la caméra peut altérer la reconstruction, c'est-à-dire si 15 à 20 % de l'image est constituée de l'horizon ou au contraire de l'opérateur et de la perche. Les acquisitions non traitées devront donc être rattachées séparément et manuellement avec un minimum de quatre points bien visibles répartis sur la zone d'acquisition.

Ensuite, si toutes les acquisitions ont bien été prises en compte, nous pouvons analyser plusieurs indicateurs sur le rapport de traitement fourni (voir figure 10).



Figure 10 - Rapport de traitement d'un chantier de récolement dans la rue Antony Viot à Bourg-en-Bresse. Selon apps.sogelink.fr, 2024.

Ces informations sont fournies à titre indicatif car si le traitement a été finalisé, cela signifie que les produits sont exploitables. Ainsi, le rapport nous indique une note moyenne de la netteté des images fournies, le nombre de liaisons moyennes entre les images, la précision des liaisons et l'erreur moyenne quadratique du géoréférencement (EMQ). Le seul paramètre ajustable lors de la phase de traitement est l'exactitude du géoréférencement que nous conseillons être inférieure à 5 cm pour assurer une précision convenable à la réalisation des livrables. Si sur le rapport, la valeur de l'EMQ n'est pas spécifiée mais seulement indiquée en Classe A, cela signifie que le géoréférencement moyen reste inférieur à 10 cm, ce qui peut être tout de même exploitable pour un levé de récolement. Or, nous conseillons de relancer le traitement en ajoutant de nouveaux points de géoréférencement pour affiner les résultats ou de remplacer les points créant un écart 3D trop important. Ainsi, après avoir contrôlé les résultats, nous pouvons procéder au dessin des plans selon une méthodologie adaptée.

Assurément, nous pourrions penser que les nuages de points et les orthomosaïques fournies par Geosnap pourraient être suffisants pour la représentation d'une zone ou d'un nouveau réseau, mais ce type de produit n'est pas convenable pour être transféré aux demandeurs car bien trop volumineux par rapport à son homologue vecteur. En effet, par exemple pour une acquisition de 462 images, le nuage de points en format .laz pèse 233 527 Ko et l'orthomosaïque associée 26 624 Ko. Il faut donc procéder à une digitalisation, les données

brutes étant toutefois toujours conservées par l'entreprise sur un serveur NAS spécifique puis supprimées dans un délai de 5 ans et toujours disponibles sur l'application Geosnap, hébergés sur un serveur sécurisé sur Internet. Par conséquent, pour la digitalisation de plans topographiques, nous dessinons directement les symboles, polylignes ou points topographiques en les accrochant sur le nuage de points qui est fidèle aux coordonnées du système préalablement choisi, tout en ajustant sa position avec l'aide visuelle de l'orthomosaïque. Concernant la réalisation de plans de récolement, nous faisons le choix d'insérer des points topographiques 3D sur chaque élément représentatif des réseaux (génératrice supérieure, coude...) puis de dessiner les réseaux à partir de ces points.

Ces méthodes d'acquisition, de traitement et de contrôle des données ont été validées par l'entreprise AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES et font ensuite l'objet d'une comparaison avec les méthodes traditionnelles pour confirmer leurs utilisations lors de levés de récolement et certains levés topographiques.

III.2 Qualité des résultats par rapport aux méthodes traditionnelles et validation des précisions attendues

Le facteur crucial pour acter l'utilisation de la photogrammétrie terrestre au sein de l'entreprise est que les produits répondent aux mêmes critères de précision que ceux issus des méthodes traditionnelles c'est-à-dire de la tachéométrie et du positionnement en temps réel, soit entre 1 à 5 cm. Pour cela, comme évoqué précédemment nous avons réalisé trois levés topographiques ainsi que suivi trois chantiers de récolement en effectuant simultanément à chaque intervention une acquisition photogrammétrique et tachéométrique. Ainsi notre base de données s'élève à presque 78 acquisitions avec chaque méthode et nous permet d'étudier les précisions de la méthode pour différents types de levés et ainsi proposer une étude fiable et robuste. Nous pourrons ensuite comparer la rentabilité des deux méthodes.

III.2.1 Comparaison des précisions

Il n'est pas forcément évident d'estimer directement si la méthode de photogrammétrie terrestre est plus précise que les méthodes traditionnelles. Nous avons donc tout d'abord choisi d'étudier la précision absolue des données produites par la GoPro en vérifiant que leurs coordonnées soient les plus proches des points relevés avec un tachéomètre. Pour confronter strictement les coordonnées obtenues avec la GoPro et le tachéomètre, pour

chaque méthode, tous les levés ont été recalés avec des points provenant de mêmes planches topographiques, produites par la ville de Bourg-en-Bresse. Par conséquent, nos comparaisons ne seront pas biaisées par les possibles imprécisions d'un système GNSS.

Tout d'abord, nous remarquons pour les levés topographiques de la rue Antony Viot¹³ ainsi que pour les trois zones de la rue du Grand Challes¹⁴, l'EMQ en trois dimensions entre les deux méthodes diffère de 1 à 5 cm pour la majorité des points. En effet, sur une comparaison de 35 points pour la rue du Grand Challes, nous obtenons une EMQ de 3,6 cm, ce qui est semblable à la précision d'un récepteur GNSS comprise entre 2 et 5 cm et donc tout à fait suffisante pour le dessin d'un plan topographique. Nous notons toutefois quelques écarts plus importants lorsqu'il s'agit de comparer des points d'angles de mur ou de pilier car sur le nuage de points nous pouvons positionner le point au plus près du pied de l'angle du mur ou du pilier, alors qu'avec l'utilisation d'une canne et d'un prisme, il est compliqué de relever exactement ce point, même en effectuant un décalage de distance dû à l'épaisseur du prisme. De plus, la présence de végétation peut fausser légèrement les coordonnées de certains points. À l'inverse, il peut y avoir des écarts lors du pointage sur le nuage, car celui-ci est sous-échantillonné à un point tous les centimètres, il n'est donc pas possible d'être précis au millimètre.

Ensuite, concernant les levés de récolement, nous pouvons rappeler que depuis 2012, la précision de positionnement des réseaux rigides doit être inférieure à 40 cm pour être définie en Classe A. Nous avons donc tout d'abord étudié les écarts sur des réseaux d'EP et d'EU dont la représentation est plus grossière mais l'acquisition plus délicate car située plus en profondeur. Pour le chantier situé dans la rue Antony Viot¹⁵, nous constatons que les EMQ ne dépassent pas 10 cm, le levé est donc largement compris en classe A. Nous remarquons que des écarts plus importants se trouvent sur les fils d'eau au fond des regards, étant trop sombres pour être représentés, sur les coudes où il peut être compliqué de bien positionner le prisme à la verticale mais surtout sur un point de piquage situé trop en profondeur par rapport à la hauteur de la caméra.

Puis, nous nous sommes intéressés aux écarts sur les réseaux d'AEP, constitués de pièces bien spécifiques tels que des manchons ou des coudes permettant d'assurer un

¹³ Annexe 7

¹⁴ Annexe 8

¹⁵ Annexe 9

raccordement étanche entre les tuyaux, ainsi que de robinets vannes permettant de contrôler ou stopper le débit de l'eau. Leur position doit donc être particulièrement précise en cas de fuite car impliquant une intervention urgente. Pour le chantier de la rue du Quatre Septembre, nous obtenons une EMQ entre mesures tachéométriques et photogrammétriques de 4,6 cm en comparant 36 pièces, dont certains points sont indiqués en annexe¹⁶. Pour le chantier de la rue Jean Jacques Rousseau, nous obtenons une EMQ de 8,0 cm en comparant 34 pièces, également représentés partiellement en annexe¹⁷. Nous constatons que sur ce chantier, les écarts sont plus importants car la surface du levé est beaucoup plus imposante et les acquisitions ont été géoréférencées avec un plus grand jeu de données. Pour faire diminuer ces écarts, nous conseillons de diviser cette grande zone en plusieurs petites parties et de sélectionner des points de géoréférencement plus visibles. Ainsi, que ce soit pour des levés topographiques ou des levés de récolement, la précision absolue du système photogrammétrique est vérifiée et convient à la réglementation et aux attentes de précision de l'entreprise.

Nous nous demandons ensuite si les faibles écarts observés ne pourraient tout de même pas engendrer une mauvaise représentation du sens d'écoulement des réseaux. Pour cela, nous avons étudié en annexe¹⁸ la précision relative des données de la GoPro, c'est-à-dire la cohérence entre les différents points relevés sur un même réseau. Ainsi nous constatons qu'aucune inversion de pente n'est observée.

Par conséquent, nous pouvons conclure que cette méthode de photogrammétrie terrestre répond aux attentes de précision formulées par l'entreprise et que les écarts observés n'engendrent pas une mauvaise représentation des réseaux. En termes de résultats, ce procédé pourra donc être mis en application, il reste toutefois à étudier la rentabilité, c'est-à-dire le rapport entre le revenu du chantier et les ressources déboursées pour valider intégralement l'utilisation de cette méthode.

III.2.2 Étude de la rentabilité

Nous avons choisi d'étudier le temps passé sur le chantier de récolement de réseaux AEP et EP qui se situe dans la rue Jean-Jacques Rousseau à Bourg-en-Bresse et qui comprend 27 interventions sur le terrain, soit 3555 images, ainsi que pour le levé topographique du

¹⁶ Annexe 10

¹⁷ Annexe 11

¹⁸ Annexe 12

cimetière et son extension sur la commune de Buellas, d'une surface de 6238 m², correspondant à un levé de 1513 images, ces travaux étant les plus conséquents réalisés.

Type de travaux	Levé de récolement de la rue Jean- Jacques Rousseau à Bourg-en-Bresse		Levé topographique du cimetière de Buellas	
	Tachéométrie	Photogrammétrie terrestre	Positionnement en temps réel	Photogrammétrie terrestre
Temps de travail sur le terrain	18h (40 min par intervention)	9h45 (15 min par intervention + 2h de rattachement)	7h	2h
Temps de traitement manuel	6h45 (15 min par intervention)	3h15 (5 min par intervention + 1h de traitement sur le logiciel)	15 min	30 min
TOTAL	24h45	13h	7h15	2h30

Tableau 6 - Comparatif des temps passés sur un chantier de récolement de réseaux et un levé topographique entre les méthodes traditionnelles et la méthode de photogrammétrie terrestre.

D'après le tableau 6, nous remarquons que la méthode de photogrammétrie terrestre permet de gagner 16h30 de travail sur ces deux chantiers. Ce gain de temps offre alors au technicien plus de disponibilité pour réaliser d'autres missions ce qui implique un gain financier. En effet, le coût d'un technicien pour l'entreprise est de 60 € HT de l'heure. Selon le temps passé sur ces deux chantiers, le gain financier est donc d'environ 990 € HT. À ce montant, nous pouvons déduire l'achat du pack de la caméra GoPro (590 € HT), l'abonnement à Geosnap (1080 € HT par an), ainsi que l'achat d'un serveur NAS avec deux disques durs de 2 To, pour stocker les données brutes pendant une durée de 5 ans maximum (environ 1000 € HT). La méthode de photogrammétrie terrestre deviendra alors totalement bénéfique à partir de la réalisation de deux levés de récolement et d'un levé topographique comme ceux-ci dans la même année. Ainsi, elle est sans aucun doute beaucoup plus rentable que les méthodes traditionnelles.

Enfin, nous pouvons dire que les résultats des levés réalisés avec une méthode de photogrammétrie terrestre répondent aux critères de précision de l'entreprise en suivant un protocole d'acquisition, de traitement et de contrôle des données optimal. De plus, elle permet une meilleure rentabilité pour des chantiers topographiques et de récolement.

Conclusion

Pour conclure, ce travail de fin d'études a permis, après un état de l'art sur la photogrammétrie rapprochée ainsi qu'un rappel de la réglementation des travaux de récolement, l'analyse détaillée de plusieurs systèmes d'acquisitions et logiciels de traitement photogrammétrique. Les différents tests réalisés ont ainsi validé l'utilisation des caméras d'action et du logiciel Geosnap, qui sont les outils les plus adaptés aux besoins de l'entreprise. Un protocole d'acquisition, de traitement et de contrôle des données a ensuite été établi, suite à la réalisation de trois levés topographiques et au suivi de quatre chantiers de récolement. Puis, les résultats obtenus ont été comparés à ceux des méthodes dites « traditionnelles » jusqu'à mener à la validation des précisions par l'entreprise et surtout au gain de rentabilité qu'offre ce dispositif. Ce premier système de photogrammétrie terrestre peut donc être définitivement mis en place dans l'entreprise en substitution des procédés tachéométriques et de positionnement en temps réel pour les levés de récolement et certains levés topographiques.

Cette évolution va permettre de limiter l'utilisation des systèmes GNSS en temps réel pour certains relevés topographiques car nous subissons de fortes altérations ionosphériques au cours d'une journée, ce qui influe sur la précision des données de plusieurs centimètres. D'autant plus que ces effets sont en constante évolution et devraient atteindre un pic en 2025 [20].

De plus, les constantes évolutions des systèmes d'acquisition et des logiciels de traitement pourraient faciliter la réalisation de levés d'architecture et de levés d'intérieur avec une méthode photogrammétrique. Actuellement le logiciel Geosnap ne permet pas une correcte représentation d'une vue de face pouvant permettre la modélisation d'une façade. D'autres logiciels comme Metashape sont plus adaptés, mais le traitement n'est pas totalement automatisé et nécessite beaucoup de points d'appuis. Quant à la caméra d'action, elle n'est pas optimale pour visualiser des zones intérieures, souvent trop sombres et dont il nécessiterait un important jeu de données pour espérer avoir le recouvrement escompté.

Ainsi, plusieurs perspectives d'utilisation de la photogrammétrie terrestre ont été initiées par ce travail de fin d'études qui offre une nette simplification de la mesure mais reste toutefois au monopole des géomètres-experts de garantir sa fiabilité.

Bibliographie

Ouvrages imprimés

[2] SIMONETTO E., 2021. Support numérique du cours de photogrammétrie. École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes, 261 p.

[13] SIMONETTO E, CHARLET C, 2023. TP Photogrammétrie IG4 2023. École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes, 16 p.

[22] PINTE A, VERROUIL F, 2021. Les systèmes d'acquisition d'images numériques haute-résolution. École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes, 76 p.

Travaux universitaires

[4] COURTOIS Yoann, 2017. Développement et mise en œuvre de procédures d'acquisitions par photogrammétrie au sein de l'entreprise ALTEA – Applications à l'acquisition de données en milieu urbain. [en ligne]. Mémoire d'Ingénieur Spécialité Topographie, Institut National des sciences Appliquées de Strasbourg, 118 p. Disponible sur : <<http://eprints2.insa-strasbourg.fr/3152/>>. (consulté en mars 2024).

[15] SEELEN Amandine, 2018. La photogrammétrie par smartphone au service du récolement de réseau en fouille ouverte. [en ligne]. Mémoire d'Ingénieur Spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes (Le Mans), 66 p. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02094261>>. (consulté en mars 2024).

AHKIM Yassine, 2023. Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique terrestre à l'aide d'un capteur photogrammétrique 360° permettant d'avoir une capture de réalité qui sera interopérable avec des données tridimensionnelles. [en ligne]. Mémoire d'Ingénieur Spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes (Le Mans), 68 p. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04359889v1>>. (consulté en mars 2024).

AUTHIE Florent, 2020. Acquisition par drone et le récolement en VRD. [en ligne]. Mémoire d'Ingénieur Spécialité Géomètre et Topographe, École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes (Le Mans), 78 p. Disponible sur : <<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03035348>>. (consulté en mars 2024).

BARLAUD Valentin, 2022. Mise en place d'une chaîne de production photogrammétrique optimisée pour l'acquisition et le traitement d'images issues de capteur type « Gopro » au sein d'un bureau pluridisciplinaire. [résumé en ligne]. Mémoire d'Ingénieur Spécialité Topographie, Institut National des sciences Appliquées de Strasbourg, 4 p. (p. 129-132) Disponible sur : https://www.insa-strasbourg.fr/wp-content/uploads/Insa_Journees_Topo_cahier_PFE_22_web_2.pdf. (consulté en mars 2024).

ROCHAT Matthias, 2018. Etude de 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, École Supérieure d'Ingénieurs des Géomètres et Topographes (Le Mans), 98 p.

Rapports institutionnels

[7] Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Observatoire National DT DICT. Guide d'application de la réglementation relative aux travaux à proximité des réseaux, Guide technique, Fascicule 2, Version 3, [en ligne], 2018, applicable à partir du 1er juillet 2024. Disponible sur : <https://www.reseaux-et-canalisation.ineris.fr/gu-presentation/construire-sans-detruire/guide-dapplication-de-la-reglementation.html>. (consulté en mars 2024).

Articles de périodiques imprimés

LEROUX J, CHAUVIN M, POITEVIN V. *La photogrammétrique appliquée au récolement des réseaux enterrés : retour d'expérience d'une méthode industrialisée*. Revue XYZ, 2021, 169, p. 16-24.

Articles de périodiques électroniques

[21] ESTRUCH Thomas. *Comment fonctionnent les capteurs CCD et CMOS ?* Photoniques, [en ligne], 2015, 79. Disponible sur : <https://www.photoniques.com/articles/photon/abs/2015/06/photon201579p39/photon201579p39.html>. (consulté en mars 2024).

Textes législatifs et réglementaires

[6] Arrêté du 15 février 2012 pris en application du chapitre IV du titre V du livre V du code de l'environnement relatif à l'exécution de travaux à proximité de certains ouvrages souterrains, aériens ou subaquatiques de transport ou de distribution.

Sites web

[1] Histoire de la Stéréoscopie, [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.stereoscopie.eu/hist/histoire.htm>>. (consulté en mai 2024).

[3] CHANDELIER Laure. Bibliothèque de ressources pédagogiques de l'ENSG. La prise de vues photogrammétriques, [en ligne]. Disponible sur : <<https://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=90>>. (consulté en mars 2024).

[5] Small Private Open course - PhotoLitto. Cours – Principe de la Photogrammétrie Structure-from-Motion (SfM), [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.youtube.com/watch?v=bjr57WI-QKs>>. (consulté en avril 2024).

[8] GoPro. HERO10 Black, [en ligne]. Disponible sur : <<https://gopro.com/fr/fr/shop/cameras/hero10-black/CHDHX-101-master.html>>. (consulté en mars 2024).

[9] TUTO CAMERA. Combien de temps une batterie GoPro tient-elle sa charge ? [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.tutocamera.com/combien-de-temps-dure-une-batterie-gopro-donnees-dautonomie-rapide-de-la-batterie/>>. (consulté en mars 2024).

[10] La taille des capteurs des APN : comparatif. In : DROUET Hervé. LUZPHOTOS, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.luzphotos.com/materiel/apn/taille-capteur-apn-comparatif>>. (consulté en mars 2024).

[11] CROSSCALL. CORE-X5, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.crosscall.com/fr_FR/core-x5-COX5.MASTER.html>. (consulté en avril 2024).

[12] CANON. CANON EOS 850D, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.canon.fr/cameras/eos-850d/>>. (consulté en avril 2024).

[14] NUMERISATION 3D & CONSTRUCTION. Photogrammétrie : Comment bien prendre les photos ? [en ligne]. Disponible sur : <<https://numerisation3d.construction/photogrammetrie-comment-prendre-photos/?v=11aedd0e4327>>. (consulté en mars 2024).

[16] DJI. Comparaison gamme Osmo Action, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.dji.com/fr/products/comparison-action>>. (consulté en mai 2024).

[17] MODESDEMPLOI.FR. Manuel utilisateur Gopro Hero 10, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.modesdemploi.fr/gopro/hero-10-black/mode-d-emploi>>. (consulté en mars 2024).

[18] Agisoft Metashape. User Manual Professional Edition Version 2.1, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.agisoft.com/downloads/user-manuals/>>. (consulté en juin 2024).

[20] HEXAGON Leica Geosystems. Impact de la forte activité ionosphérique actuelle sur le positionnement GNSS. [en ligne]. Disponible sur : <<https://leica-geosystems.com/fr-fr/industries/pure-surveying/expert-insights/activites-ionospheriques>>. (consulté en juillet 2024).

[23] GIMP 2.10. Online Manuals, [en ligne]. Disponible sur : <<https://docs.gimp.org/fr/gimp-histogram-dialog.html>>. (consulté en mai 2024).

[24] L'histogramme : définition, le comprendre, le lire, l'utiliser. IN : Laurent BREILLAT. Apprendre la photo, [en ligne]. Disponible sur : <<https://apprendre-la-photo.fr/histogramme-photo/>>. (consulté en mai 2024).

Documents techniques

[19] SOGELINK, 2024. *Mode opératoire caméra Gopro Hero*. p. 16.

Table des annexes

Annexe 1 Évaluation des types de capteurs numériques	43
Annexe 2 Étude de la reconnaissance de points de liaison et de cibles géoréférencées entre les images selon différents paramétrages sur le logiciel Agisoft Metashape	44
Annexe 3 Étude de l'exposition des images selon différents paramétrages sur le logiciel GIMP	45
Annexe 4 Comparaison des données de précision d'un levé de photogrammétrie terrestre traité avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape	47
Annexe 5 Comparaison des précisions empiriques des données obtenues avec une méthode tachéométrique et photogramétrique traitées avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.....	48
Annexe 6 Calcul de la taille des pixels des images et de l'emprise de la zone visible suivant le positionnement de la caméra, ainsi que de la vitesse de déplacement nécessaire à l'opérateur	49
Annexe 7 Comparaison des coordonnées du levé topographique réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse.....	51
Annexe 8 Comparaison des coordonnées du levé topographique réalisé dans la rue du Grand Challes, à Bourg-en-Bresse.....	52
Annexe 9 Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse.....	53
Annexe 10 Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue du Quatre Septembre, à Bourg-en-Bresse.....	54
Annexe 11 Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue Jean-Jacques Rousseau, à Bourg-en-Bresse.....	55
Annexe 12 Comparaison des pentes des réseaux principaux d'EP et d'EU du levé de récolement réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse	56

Annexe 1

Évaluation des types de capteurs numériques

Tout d'abord, un capteur numérique est un composant électronique qui permet de convertir le rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire la lumière en signal électrique.

Ils en existent deux principales catégories :

- CCD ou Charge Couple Device : le capteur recueille des photons, les transfère vers un registre puis les charges sont converties en tension dans un condensateur et transférées vers un convertisseur analogique/numérique.
- CMOS ou Complementary Metal Oxyde Semiconductor : le capteur recueille des photons dont la charge est directement convertie en une tension puis transférée vers un convertisseur analogique/numérique [21].

Les capteurs CMOS sont moins onéreux, nécessitent moins d'énergie et ont une meilleure résistance à l'éblouissement [22]. Ainsi, le temps d'exposition de la scène et la cadence étant deux éléments déterminants pour notre utilisation, il est donc préférable de s'orienter vers des capteurs CMOS qui faciliteront l'acquisition de données photogrammétriques dans des conditions climatiques parfois extrêmes [21].

Annexe 2

Étude de la reconnaissance de points de liaison et de cibles géoréférencées entre les images selon différents paramétrages sur le logiciel Agisoft Metashape

Ces deux tableaux relatent le nombre de points de liaison et de cibles détectés ainsi que la précision de l'alignement des caméras et la qualité des images, de plusieurs acquisitions prises en modifiant à chaque série un seul paramétrage de la caméra. Ces tests ont été réalisés sur deux façades différentes pour étudier les paramètres optimaux selon diverses conditions d'ensoleillement et les résultats ont été obtenus suite à un alignement des images sur le logiciel Agisoft Metashape.

	Netteté faible	Netteté moyenne	Netteté élevée	Couleur éclatante	Couleur naturelle	Couleur plat
Nombre de points de liaison	2071	2855	5086	1237	1046	2071
Nombre de cibles détectées	2	4	5	3	3	2
Précision de l'alignement des caméras (en pixels)	0,30	0,32	0,68	0,30	0,44	0,30
Qualité minimale des images	0,76	1,11	0,88	0,75	0,76	0,76

Tableau 7 - Données du test 1 obtenues sur le logiciel Agisoft Metashape.

	Netteté faible	Netteté moyenne	Netteté élevée	Couleur éclatante	Couleur naturelle	Couleur plat
Nombre de points de liaison	1616	2520	1213	902	117	1616
Nombre de cibles détectées	8	9	9	9	9	8
Précision de l'alignement des caméras (en pixels)	0,53	0,69	1,23	1,17	0,39	0,53
Qualité minimale des images	0,63	0,99	0,98	0,69	0,70	0,63

Tableau 8 - Données du test 2 obtenues sur le logiciel Agisoft Metashape.

Annexe 3

Étude de l'exposition des images selon différents paramétrages sur le logiciel GIMP

Pour approfondir notre analyse, nous avons étudié une image de chaque paramétrage sur le logiciel GIMP. En effet, ce dernier possède une fonction permettant de produire un histogramme (voir figure 11) pour chaque image permettant d'analyser son exposition. Il représente le nombre de pixels en fonction de la luminosité des couleurs. Les pixels les plus sombres seront définis sur la gauche du graphique et les plus clairs sur la droite. GIMP nous fournit ensuite la moyenne des intensités de couleurs allant de 0 à 0,999, la déviation standard qui permet d'avoir une idée de l'homogénéité de la distribution des valeurs de l'intervalle et la médiane qui est la valeur du 50^{ème} pic sur un intervalle de 100 pics [23].

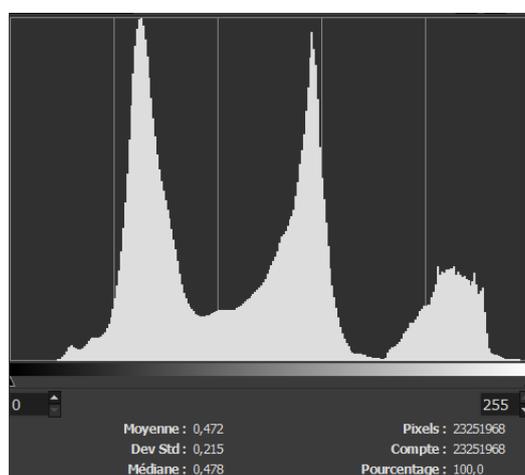


Figure 11 - Histogramme d'une image paramétrée avec une netteté moyenne et une couleur sur « plat » obtenu sur le logiciel GIMP.

Pour un traitement photogrammétrique, il est nécessaire d'avoir des images qui ne sont ni sous-exposées, ni sur-exposées car cela pourrait nuire à la reconstruction de la scène. Il faut donc préférer des images où le plus grand nombre de pixels se trouvent au centre du graphique, c'est-à-dire où la moyenne se rapproche de 0,5 [24].

Nous avons récapitulé dans les deux tableaux suivants, les valeurs des indicateurs de l'histogramme pour les deux tests réalisés sur les façades d'exposition différente en modifiant pour chaque acquisition d'image un seul paramétrage de la caméra.

	Netteté faible	Netteté moyenne	Netteté élevée	Couleur éclatante	Couleur naturelle	Couleur plat
Moyenne	0,472	0,472	0,472	0,404	0,391	0,472
Dev Std	0,214	0,215	0,214	0,249	0,235	0,214
Médiane	0,486	0,478	0,475	0,388	0,384	0,486

Tableau 9 - Données du test 1 obtenues sur le logiciel GIMP.

	Netteté faible	Netteté moyenne	Netteté élevée	Couleur éclatante	Couleur naturelle	Couleur plat
Moyenne	0,408	0,409	0,408	0,377	0,398	0,408
Dev Std	0,227	0,231	0,236	0,245	0,248	0,227
Médiane	0,325	0,329	0,329	0,298	0,329	0,325

Tableau 10 - Données du test 2 obtenues sur le logiciel GIMP.

Ainsi, nous constatons que sur les deux tests, la moyenne la plus proche de 0,5 correspond aux images paramétrées avec une netteté moyenne et une couleur définie sur plat. Celles paramétrées avec une couleur éclatante ou naturelle sont les plus éloignées. Après cette étude sur le logiciel GIMP, nous conseillons donc de paramétrer la GoPro avec une netteté moyenne et une couleur définie sur « plat ».

Annexe 4

Comparaison des données de précision d'un levé de photogrammétrie terrestre traité avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape

Nous avons extrait dans le tableau suivant les données caractéristiques de la précision de l'alignement des images pour produire un nuage de points, ainsi que la précision du géoréférencement de ce nuage pour un même relevé de photogrammétrie terrestre qui a été traité avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.

	GEOSNAP	REALITY CAPTURE	METASHAPE
Nombre de points dans le nuage	696 200*	6 793 427	8 556 419
Taille du nuage de points (en Ko)	17 061	171 972	89 170
Nombre total de points de liaison	124 173*	131 924	33 356
Précision des liaisons entre les images (en pixels)	1,60	0,83	5,78
Erreur maximale de projection des points de géoréférencement (en pixels)	Inconnue	1,31	6,66
EMQ des points de géoréférencement (en mm)	6,0	2,4	10,8
Taille du fichier de l'orthophotographie (en Ko)	926	328 320	389 721

Tableau 11 - Données de précision des traitements d'un levé de photogrammétrie terrestre sur les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.

* : ces valeurs ont été calculées.

Nous pouvons alors constater que Reality Capture trouve un plus grand nombre de points de liaison et que les liaisons faites entre les images sont bien plus précises que ses concurrents. Le nombre de points de liaison est un facteur primordial lors de l'utilisation d'une caméra avec un objectif grand angle qui crée beaucoup de déformations géométriques. Ces aberrations sont ainsi corrigées grâce à un nombre conséquent de points de liaison lors de l'auto-calibration.

De plus, Reality Capture est aussi précis en matière de précision de géoréférencement car l'EMQ, c'est-à-dire la moyenne des distances entre les coordonnées des points définies et ceux calculées par le logiciel qu'il propose, est la plus basse, tout comme l'erreur maximale de projection moyennée entre les quatre points de géoréférencement, hormis que Geosnap ne fournit pas cette donnée. Reality Capture paraît donc être l'outil le plus précis selon ces facteurs techniques.

Annexe 5

Comparaison des précisions empiriques des données obtenues avec une méthode tachéométrique et photogrammétrique traitées avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape

Nous avons présenté dans le tableau ci-dessous les erreurs moyennes quadratiques entre les données obtenues avec une méthode tachéométrique et celles relevées avec une méthode de photogrammétrie terrestre, traitées avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape pour étudier les précisions empiriques de chaque logiciel.

Nature des points	EMQ - GEOSNAP (m)	EMQ - REALITY CAPTURE (m)	EMQ - METASHAPE (m)
Boîte de branchement EP	0,068	0,091	0,084
Boîte de branchement EU	0,061	0,057	0,072
Piquage EU	0,062	0,045	0,083
Piquage EP (point à plus de 3,50 m de profondeur)	Aucune donnée	0,301	0,203

Tableau 12 - Précisions empiriques des données tachéométriques et photogrammétriques traitées avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.

Selon la réglementation des levés de récolement, ces écarts sont négligeables, mais nous pouvons souligner que Geosnap produit les données qui se rapprochent le plus de celles du levé tachéométrique.

Annexe 6

Calcul de la taille des pixels des images et de l'emprise de la zone visible suivant le positionnement de la caméra, ainsi que de la vitesse de déplacement nécessaire à l'opérateur

Nous avons tout d'abord réuni dans le tableau suivant les caractéristiques techniques du capteur de la caméra GoPro HERO10, qui nous permettront de calculer la taille du pixel au sol ainsi que l'emprise des images au sol puis la vitesse de déplacement optimale de l'opérateur.

Largeur de l'image (en pixels) : ImL	5568
Hauteur de l'image (en pixels) : ImH	4176
Largeur du capteur (en mm) : CaL	6,16
Hauteur du capteur (en mm) : CaH	4,62
Distance sol / caméra (en m) : D	3,50
Taille réelle de la focale (en mm) : f	2,767

Tableau 13 - Caractéristiques de la caméra GoPro HERO10.

Calcul de la taille du pixel et de l'emprise des images au sol

Pour calculer la taille du pixel au sol, nous devons tout d'abord déterminer la taille d'un photosite qui correspond aux cellules constituant le capteur et permettant de transformer l'intensité lumineuse en signal électrique.

$$T_{pi} = \frac{CaL}{ImL} = 1,11 \text{ micron}$$

Ainsi, nous calculons la taille du pixel au sol des images selon la distance de la caméra par rapport au sol.

$$T_{ps} = \frac{D}{f} * T_{pi} = 0,001 \text{ m}$$

Ce qui nous permet ensuite d'estimer l'emprise au sol de chaque image.

$$L = ImL * T_{ps} = 7,8 \text{ m}$$

$$H = ImH * T_{ps} = 5,8 \text{ m}$$

Donc, en positionnant la caméra à 3,50 m du sol, nous obtenons des images d'une surface au sol de 7,8 x 5,8 m avec une résolution de 1 mm/px.

Calcul de la vitesse de déplacement de l'opérateur

Puis, nous cherchons à obtenir la vitesse de déplacement optimale de l'opérateur. Nous allons tout d'abord calculer la base longitudinale, c'est-à-dire la distance parcourue entre chaque prise de vue, en utilisant la longueur de l'emprise au sol d'une image, ainsi que le pourcentage de recouvrement nécessaire à un traitement photogrammétrique.

$$B = L * (1 - 0.70) = 2,34 \text{ m}$$

Pour ce calcul, nous avons pris en compte un taux de recouvrement de 70 % car en photogrammétrie terrestre il est recommandé d'appliquer un recouvrement longitudinal entre 60 et 80 % pour associer une image à une autre [2]. Cependant, la caméra étant équipée d'un objectif « grand angle », nous obtenons un taux de recouvrement encore plus élevé, d'une valeur se rapprochant de 100 % lorsque l'on avance dans la même direction, comme nous a évoqué Yoann COURTOIS, responsable produit chez Sogelink dans un entretien qu'il nous a accordé. Donc, en prenant en compte un taux de recouvrement inférieur à la réalité, nous sommes assurés de calculer une vitesse de marche suffisante.

Sachant que la fréquence d'acquisition d'une image (t) est de 2 s, nous pouvons estimer la vitesse de déplacement de l'opérateur pour parcourir la base.

$$V = \frac{B}{t} * 3,6 = 4,2 \text{ km/h}$$

Ainsi, l'opérateur devra marcher entre 4 et 5 km/h lors des acquisitions photogrammétriques, étant une vitesse de marche classique.

Concernant les annexes 7 à 11, notre étude porte sur un grand nombre de comparaisons de coordonnées de points mais nous avons choisi de n'illustrer ici que les écarts sur certains points provenant de divers éléments et représentatifs de l'ensemble des résultats obtenus.

Annexe 7

Comparaison des coordonnées du levé topographique réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse

Nous avons extrait quelques coordonnées de points provenant de la planche topographique fournie et mise à jour par la ville de Bourg-en-Bresse et les coordonnées de ces mêmes points obtenus après le traitement photogrammétrique, pour étudier les écarts absolus entre les deux méthodes.

Nature des points	Relevé topographique			Relevé photogrammétrique			Écarts absolus			EMQ
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
Plaque	1870578,439	5224171,212	241,252	1870578,457	5224171,208	241,242	-0,018	0,004	0,010	0,021
Avaloire	1870573,860	5224179,127	241,231	1870573,864	5224179,121	241,217	-0,003	0,005	0,014	0,015
Plaque	1870461,385	5224201,603	240,982	1870461,379	5224201,619	240,953	0,006	-0,016	0,029	0,034
Plaque	1870521,817	5224185,646	241,163	1870521,810	5224185,640	241,158	0,008	0,006	0,005	0,011
Centre d'une grille	1870482,510	5224199,402	240,885	1870482,505	5224199,392	240,894	0,005	0,010	-0,009	0,014
Angle d'un mur	1870571,350	5224162,952	241,342	1870571,047	5224163,023	241,476	0,303	-0,072	-0,134	0,339
Pilier d'entrée d'une maison	1870514,931	5224182,211	241,263	1870514,895	5224182,258	241,253	0,036	-0,048	0,010	0,061
Pilier d'entrée d'une maison	1870573,858	5224188,777	241,421	1870573,906	5224188,761	241,326	-0,047	0,016	0,095	0,107

Tableau 14 - Écarts absolus du levé topographique, rue Antony Viot.

Annexe 8

Comparaison des coordonnées du levé topographique réalisé dans la rue du Grand Challes, à Bourg-en-Bresse

Dans le tableau suivant sont représentés les coordonnées de certains points relevées par la méthode tachéométrique et les coordonnées de ces mêmes points obtenus après le traitement photogrammétrique pour étudier les écarts absolus entre les deux méthodes.

Zone	Nature des points	Relevé topographique			Relevé photogrammétrique			Écarts absolus			EMQ
1	Grille	1872365,327	5227023,754	231,220	1872365,343	5227023,747	231,236	-0,015	0,007	-0,016	0,023
	Marquage	1872369,372	5227020,836	231,431	1872369,395	5227020,822	231,433	-0,023	0,014	-0,002	0,027
	Bouche à clé	1872367,572	5227013,592	231,444	1872367,592	5227013,576	231,474	-0,019	0,016	-0,030	0,039
	Angle de mur	1872373,676	5227027,086	231,523	1872373,703	5227027,035	231,531	-0,026	0,051	-0,008	0,058
2	Bas de trottoir	1872334,883	5226919,303	231,994	1872334,899	5226919,309	232,000	-0,015	-0,005	-0,006	0,017
	Haut de trottoir	1872334,770	5226919,374	232,034	1872334,773	5226919,354	232,035	-0,003	0,020	-0,001	0,020
	Bas de bordure	1872340,224	5226911,522	232,174	1872340,210	5226911,507	232,186	0,015	0,015	-0,012	0,024
	Haut de bordure	1872340,288	5226911,491	232,202	1872340,280	5226911,464	232,196	0,008	0,027	0,006	0,029
3	Bord de caniveau	1872333,062	5226616,672	234,064	1872333,097	5226616,692	234,072	-0,035	-0,020	-0,008	0,041
	Centre de caniveau	1872333,260	5226616,672	234,060	1872333,297	5226616,692	234,065	-0,037	-0,020	-0,005	0,043
	Bord de caniveau	1872333,459	5226616,657	234,081	1872333,479	5226616,678	234,083	-0,020	-0,021	-0,002	0,029
	Plaque EU	1872325,970	5226615,562	234,181	1872325,995	5226615,579	234,169	-0,025	-0,017	0,012	0,033

Tableau 15 - Écarts absolus du levé topographique, rue du Grand Challes.

Annexe 9

Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse

Le tableau ci-dessous présente les coordonnées de points caractéristiques des réseaux d'EP et d'EU relevées par la méthode tachéométrique et les coordonnées de ces mêmes points obtenus après le traitement photogrammétrique pour étudier les écarts absolus entre les deux méthodes.

Nature des points	Relevé topographique			Relevé photogrammétrique			Écarts absolus			EMQ
Tampon EP	1870565,271	5224173,067	241,260	1870565,240	5224173,079	241,257	0,031	-0,012	0,003	0,033
Grille	1870553,564	5224181,503	241,134	1870553,578	5224181,494	241,142	-0,014	0,009	-0,008	0,018
Coude réseau EP	1870550,099	5224175,985	240,281	1870550,118	5224176,003	240,281	-0,019	-0,018	-0,000	0,026
Tampon EP	1870517,487	5224184,462	241,110	1870517,475	5224184,510	241,096	0,012	-0,048	0,014	0,051
Fe Tampon EP	1870517,505	5224184,842	238,677	1870517,582	5224184,873	238,696	-0,077	-0,031	-0,019	0,085
Piquage sur canalisation existante EP	1870489,330	5224194,631	239,856	1870489,344	5224194,621	239,865	-0,014	0,010	-0,009	0,020
Coude réseau EP	1870480,287	5224193,694	240,230	1870480,297	5224193,669	240,158	-0,010	0,025	0,072	0,077
Boîte de branchement EU	1870525,833	5224188,869	241,111	1870525,876	5224188,892	241,074	-0,043	-0,023	0,037	0,061
Tampon EU	1870512,326	5224192,825	241,162	1870512,379	5224192,869	241,162	-0,053	-0,044	-0,000	0,069
Piquage sur canalisation existante EP	1870509,639	5224186,827	238,592	1870509,641	5224186,888	239,157	-0,002	-0,061	-0,565	0,568

Tableau 16 - Écarts absolus du levé de récolement, rue Antony Viot.

Annexe 10

Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue du Quatre Septembre, à Bourg-en-Bresse

Nous avons extrait ci-dessous quelques coordonnées de points caractéristiques des réseaux d'AEP relevées par la méthode tachéométrique et les coordonnées de ces mêmes points obtenus après le traitement photogrammétrique pour étudier les écarts absolus entre les deux méthodes.

Nature des points	Relevé topographique			Relevé photogrammétrique			Écarts absolus			EMQ
Robinet vanne	1871980,582	5225418,126	224,371	1871980,590	5225418,103	224,359	-0,009	0,023	0,012	0,028
Té	1871980,277	5225418,080	224,122	1871980,266	5225418,083	224,115	0,010	-0,002	0,007	0,013
Bride à emboitement	1871980,841	5225418,146	224,133	1871980,850	5225418,121	224,128	-0,010	0,025	0,005	0,027
Coude réseau AEP	1871983,008	5225381,002	224,760	1871983,016	5225380,983	224,750	-0,007	0,019	0,010	0,023
Bride à emboitement	1871982,755	5225380,972	224,751	1871982,772	5225380,942	224,739	-0,017	0,030	0,012	0,036
Purge	1871982,485	5225380,906	224,892	1871982,501	5225380,901	224,884	-0,016	0,005	0,008	0,018
Coude réseau AEP	1871979,630	5225424,583	223,995	1871979,625	5225424,592	223,972	0,005	-0,009	0,024	0,026
Manchon	1871979,896	5225426,088	223,971	1871979,884	5225426,067	223,927	0,012	0,021	0,044	0,051
Manchon électro-soudable	1871982,209	5225271,102	225,113	1871982,232	5225271,102	225,101	-0,023	0,000	0,012	0,026
Robinet vanne	1871988,271	5225318,296	224,988	1871988,300	5225318,238	225,002	-0,029	0,058	-0,013	0,066
Coude réseau AEP	1871990,432	5225266,833	225,210	1871990,475	5225266,746	225,262	-0,044	0,086	-0,052	0,110
Manchon	1871990,576	5225265,445	225,270	1871990,583	5225265,474	225,265	-0,007	-0,029	0,005	0,031
Robinet vanne	1871989,776	5225273,606	225,491	1871989,774	5225273,592	225,476	0,002	0,014	0,015	0,021

Tableau 17 - Écarts absolus du levé de récolement, rue du Quatre Septembre.

Annexe 11

Comparaison des coordonnées du levé de récolement réalisé dans la rue Jean-Jacques Rousseau, à Bourg-en-Bresse

Dans le tableau suivant sont représentés les coordonnées de points caractéristiques des réseaux d'AEP relevées par la méthode tachéométrique et les coordonnées de ces mêmes points obtenus après le traitement photogrammétrique pour étudier les écarts absolus entre les deux méthodes.

Nature des points	Relevé topographique			Relevé photogrammétrique			Écarts absolus			EMQ
Té	1871743,525	5223377,444	238,846	1871743,463	5223377,453	238,830	0,062	-0,009	0,016	0,065
Manchon	1871743,950	5223377,847	238,843	1871743,874	5223377,849	238,804	0,076	-0,002	0,039	0,086
Robinet vanne	1871743,293	5223377,680	239,102	1871743,213	5223377,690	239,039	0,081	-0,010	0,064	0,103
Coude réseau AEP	1871826,670	5223287,107	239,529	1871826,691	5223287,102	239,485	-0,021	0,005	0,044	0,049
Coude réseau AEP	1871825,184	5223285,257	239,740	1871825,108	5223285,192	239,725	0,076	0,066	0,015	0,101
Robinet vanne	1871776,710	5223342,200	238,912	1871776,683	5223342,167	238,846	0,027	0,033	0,066	0,078
Manchon	1871752,371	5223359,420	238,700	1871752,418	5223359,434	238,654	-0,047	-0,014	0,046	0,068
Té	1871896,192	5223245,279	239,537	1871896,185	5223245,248	239,550	0,007	0,031	-0,012	0,034
Robinet vanne	1871896,430	5223245,042	239,720	1871896,412	5223245,022	239,705	0,018	0,020	0,016	0,031
Robinet vanne	1871890,410	5223240,043	239,598	1871890,384	5223240,016	239,608	0,025	0,026	-0,009	0,038
Té	1871890,600	5223239,842	239,456	1871890,569	5223239,814	239,477	0,031	0,028	-0,020	0,046
Robinet vanne	1871852,792	5223172,921	239,211	1871852,735	5223172,979	239,137	0,057	-0,058	0,075	0,110
Té	1871853,042	5223173,097	238,950	1871853,009	5223173,136	238,905	0,034	-0,039	0,045	0,068
Bride à emboîtement	1871853,927	5223171,784	238,987	1871853,886	5223171,823	238,929	0,040	-0,039	0,058	0,081
Coude réseau AEP	1871853,638	5223169,199	239,091	1871853,599	5223169,212	238,993	0,039	-0,013	0,098	0,106
Manchon	1871854,465	5223167,737	239,201	1871854,381	5223167,728	239,123	0,084	0,009	0,078	0,115

Tableau 18 - Écarts absolus du levé de récolement, rue Jean-Jacques Rousseau.

Annexe 12

Comparaison des pentes des réseaux principaux d'EP et d'EU du levé de récolement réalisé dans la rue Antony Viot, à Bourg-en-Bresse

Nous avons extrait les altitudes des points de la génératrice supérieure des canalisations principales des réseaux d'EP et d'EU relevés par la méthode tachéométrique et photogrammétrique pour vérifier que les écarts de la méthode photogrammétrique ne créent pas une inversion du sens d'écoulement de l'eau par rapport à celui obtenu avec la méthode tachéométrique. En effet, même si des écarts de 10 cm sont acceptables selon la réglementation, une inversion de pente des réseaux pourrait entraîner des erreurs importantes quant à l'interprétation des réseaux sur le plan. Dans les tableaux suivants, nous n'avons comparé que les points bien visibles avec la méthode photogrammétrique pour que la comparaison soit la plus correcte possible.

Altitude de la génératrice supérieure du réseau d'EP mesurée avec la méthode photogrammétrique	239,526	239,312	238,996	239,087	238,953
Altitude de la génératrice supérieure du réseau d'EP mesurée avec la méthode tachéométrique	239,167	239,148	238,975	238,942	238,885

Tableau 19 - Étude des altitudes de la génératrice supérieure du réseau d'EP du levé de récolement, rue Antony Viot.

Altitude de la génératrice supérieure du réseau d'EU mesurée avec la méthode photogrammétrique	239,843	239,802	239,766	239,752	239,523
Altitude de la génératrice supérieure du réseau d'EU mesurée avec la méthode tachéométrique	239,828	239,811	239,749	239,751	239,505

Tableau 20 - Étude des altitudes de la génératrice supérieure du réseau d'EU du levé de récolement, rue Antony Viot.

Nous remarquons que pour ces deux réseaux, les altitudes relevées avec une méthode photogrammétrique sont bien décroissantes sans aucune inversion de pente, c'est-à-dire que l'altitude de chaque point est supérieure à celle du point suivant, évitant alors l'eau stagnante au milieu des conduites. En revanche, avec la méthode tachéométrique, nous observons une inversion de pente de 2 mm pour le réseau d'EU qui est due à la verticalité de la canne avec le prisme, les deux points étant à moins d'un mètre de distance.

Liste des figures

Figure 1 - Schéma du principe de la vision binoculaire. Selon be-perrin.fr.....	8
Figure 2 - Schéma du principe de prise de vues de la photogrammétrie rapprochée. Selon seaescape.fr.	9
Figure 3 - Schéma des trois classes de précision d'un réseau. Selon sigerly.fr, 2017.....	12
Figure 4 - Images du test n°1 paramétrée avec une netteté élevée (à gauche) et du test n°2 paramétrée avec une netteté moyenne (à droite), représentant les cibles et points de liaison détectés sur le logiciel Metashape.	19
Figure 5 - Images de la position de la caméra nécessaire à un relevé de photogrammétrie terrestre	27
Figure 6 - Schéma du cheminement pour procéder à un relevé topographique d'une zone avec une méthode de photogrammétrie terrestre. Selon apps.sogelink.fr, 2024.....	28
Figure 7 - Schéma du cheminement pour procéder à un relevé de récolement d'une zone avec une méthode de photogrammétrie terrestre. Selon apps.sogelink.fr, 2024.....	28
Figure 8 - Exemple d'image acceptable pour un levé de récolement avec une méthode de photogrammétrie terrestre	29
Figure 9 - Schéma de la configuration des points de géoréférencement. Selon apps.sogelink.fr, 2024.....	30
Figure 10 - Rapport de traitement d'un chantier de récolement dans la rue Antony Viot à Bourg-en-Bresse. Selon apps.sogelink.fr, 2024.....	32
Figure 11 - Histogramme d'une image paramétrée avec une netteté moyenne et une couleur sur « plat » obtenu sur le logiciel GIMP.	45

Liste des tableaux

Tableau 1 - Caractéristiques techniques de la GoPro HERO10. Selon gopro.com, mars 2024.....	15
Tableau 2 - Caractéristiques techniques du smartphone CROSSCALL CORE-X5 et de l'appareil reflex photographique CANON EOS 850D. Selon crosscall.com et canon.fr, avril 2024.	15
Tableau 3 – Comparatif des caractéristiques techniques de la DJI Osmo Action 4 et de la GoPro HERO10. Selon dji.com et gopro.com, mai 2024.	17
Tableau 4 - Comparatif des temps de traitement et du coût des logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.....	23
Tableau 5 - Bilan des avantages et des inconvénients entre les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.....	25
Tableau 6 - Comparatif des temps passés sur un chantier de récolement de réseaux et un levé topographique entre les méthodes traditionnelles et la méthode de photogrammétrie terrestre.	36
Tableau 7 - Données du test 1 obtenues sur le logiciel Agisoft Metashape.....	44
Tableau 8 - Données du test 2 obtenues sur le logiciel Agisoft Metashape.....	44
Tableau 9 - Données du test 1 obtenues sur le logiciel GIMP.....	46
Tableau 10 - Données du test 2 obtenues sur le logiciel GIMP.....	46
Tableau 11 - Données de précision des traitements d'un levé de photogrammétrie terrestre sur les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.....	47
Tableau 12 - Précisions empiriques des données tachéométriques et photogrammétriques traitées avec les logiciels Geosnap, Reality Capture et Metashape.....	48
Tableau 13 - Caractéristiques de la caméra GoPro HERO10.	49
Tableau 14 - Écarts absolus du levé topographique, rue Antony Viot.	51
Tableau 15 - Écarts absolus du levé topographique, rue du Grand Challes.....	52
Tableau 16 - Écarts absolus du levé de récolement, rue Antony Viot.....	53
Tableau 17 - Écarts absolus du levé de récolement, rue du Quatre Septembre.....	54
Tableau 18 - Écarts absolus du levé de récolement, rue Jean-Jacques Rousseau.....	55
Tableau 19 - Étude des altitudes de la génératrice supérieure du réseau d'EP du levé de récolement, rue Antony Viot.....	56
Tableau 20 - Étude des altitudes de la génératrice supérieure du réseau d'EU du levé de récolement, rue Antony Viot.....	56

Mise en place d'une chaine de production de relevé topographique par photogrammétrie terrestre.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

Le développement de capteurs d'images avec un très bon rapport qualité/prix et l'accessibilité à des logiciels de traitement automatisés encouragent les cabinets de géomètres-experts à mettre en place des méthodes de photogrammétrie terrestre pour réaliser des relevés topographiques. L'entreprise AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES, régulièrement mandatée pour effectuer des levés de récolement, a alors acquis un système d'acquisition avec une caméra GoPro HERO10 ainsi que la solution de traitement Geosnap pour répondre aux besoins urgents de géoréférencement des réseaux et accomplir certains levés topographiques. Ainsi, l'analyse de diverses caméras et logiciels a permis de conforter l'entreprise dans ses choix tout en répondant au mieux à ses besoins de rapidité d'exécution et de facilité de prise en main. Un protocole d'acquisition, de traitement et de contrôle des données robuste a ensuite été mis en place pour assurer la continuité de ce travail et les nombreuses comparaisons avec les méthodes traditionnelles ont mené à la validation des précisions et du gain en rentabilité de ce procédé.

Mots clés : Photogrammétrie terrestre, levés de récolement, GoPro HERO10, Geosnap, géoréférencement des réseaux, levés topographiques.

SUMMARY

The development of image sensors with a very good quality/price ratio and the accessibility of automated processing software encourage surveying firms to implement terrestrial photogrammetry methods to carry out topographic surveys. The company AXIS-CONSEILS RHÔNE-ALPES regularly commissioned to perform surveying of sewerage systems, then acquired an acquisition system with a GoPro HERO10 camera as well as the Geosnap processing solution to meet urgent pipe network georeferencing needs and to carry out some topographic surveys. Thus, the analysis of various cameras and software allowed the company to be confident in its choices while best meeting its needs for speed execution and ease of use. A robust protocol for data acquisition, processing and control was then put in place to ensure the continuity of this method, and the many comparisons with traditional methods led to the validation of the accuracy and profitability gains of this process.

Key words : Terrestrial photogrammetry, surveying of sewerage systems, GoPro HERO10, Geosnap, pipe network georeferencing, topographic surveys.