

## **Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne - Mise au point et application d'un protocole assurant la reproductibilité de levés répétés à intervalles saisonniers et interannuels**

**Auteur :** Vandenbroeck, Martin

**Promoteur(s) :** Cornet, Yves; Fettweis, Xavier

**Faculté :** Faculté des Sciences

**Diplôme :** Master en sciences géographiques, orientation géomatique et géométrologie, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2017-2018

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/5586>

---

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

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

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

---



UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
Faculté des sciences  
Sciences géographiques

# Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne

---

Mise au point et application d'un protocole assurant la  
reproductibilité de levés répétés à intervalles  
saisonniers et interannuels

---

*Mémoire présenté par*  
**Martin VANDENBROECK**

*pour l'obtention du titre de*  
**Master en sciences géographiques  
orientation géomatique et  
géométrologie à finalité spécialisée**

*Année académique*  
**2017-2018**

Date de défense : Septembre 2018  
Promoteur : Prof. Y. CORNET  
Co-promoteur : Prof. X. FETTWEIS  
Lecteurs  
Prof. A. HUBERT-FERRARI  
& Prof. L. FRANÇOIS



UNIVERSITÉ DE LIÈGE  
Faculté des sciences  
Sciences géographiques

# Photogrammétrie par drone d'un petit glacier de montagne

---

Mise au point et application d'un protocole assurant la  
reproductibilité de levés répétés à intervalles  
saisonniers et interannuels

---

*Mémoire présenté par*  
**Martin VANDENBROECK**

*pour l'obtention du titre de*  
**Master en sciences géographiques**  
**orientation géomatique et**  
**géométrologie à finalité spécialisée**

*Année académique*  
**2017-2018**

Date de défense : Septembre 2018  
Promoteur : Prof. Y. CORNET  
Co-promoteur : Prof. X. FETTWEIS  
Lecteurs  
Prof. A. HUBERT-FERRARI  
& Prof. L. FRANÇOIS

## **Remerciements**

*Je voudrais tout d'abord remercier mon promoteur, Monsieur Cornet, pour sa proposition concernant le sujet de ce travail ainsi que sa disponibilité tout au long de son élaboration.*

*Je tiens aussi à remercier les deux lecteurs de ce mémoire, MM. Fettweis, François et Madame Hubert-Ferrari, pour leur intérêt vis-à-vis de cette étude.*

*Bien entendu, je tiens à remercier le groupement de guides Guide Alpine Dolomiti Guides et plus particulièrement Monsieur Evaristo Rizzotto, ainsi que Emilio Zonta sans qui cette mission n'aurait pas été possible.*

*Mes remerciements vont encore à l'ensemble de l'Unité de Géomatique au sein de laquelle j'aimerais remercier particulièrement MM. Jonlet, Nys et Poux pour leurs remarques avisées.*

*Un grand merci à Christoph Kittel pour son investissement (physique) et sa présence lors de la mission ainsi que ses conseils.*

*Enfin, je tiens à remercier ma famille, Mlle Géraldine Hendrix ainsi que toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail par leur écoute et leur soutien.*

# Résumé

---

Les changements climatiques sont au centre de nombreuses préoccupations. Les glaciers continentaux et plus spécifiquement les glaciers alpins sont des indicateurs de l'évolution de ces changements. Un des moyens permettant de les analyser est de réaliser leur bilan de masse conventionnel, c'est-à-dire de connaître l'évolution de leur volume au cours du temps en répétant des modélisations hypsométriques.

La photogrammétrie permet de réaliser cette modélisation grâce à l'utilisation d'images aériennes. Ces images peuvent être enregistrées par des capteurs satellitaires ou aéroportés. Elles dépendent de l'ensoleillement, de la couverture nuageuse au moment de la prise de vue, de la trajectoire de vol et d'autres facteurs pouvant empêcher la réalisation de cette modélisation au moment voulu.

L'arrivée sur le marché de drones bons marchés a permis de faciliter les prises de vue et de réaliser plus aisément par la même occasion une modélisation de surface des glaciers. Les drones permettent une acquisition des données pour un moindre coût dans un contexte physiographique aussi complexe que les glaciers de montagne.

Notre travail nous a permis de mettre au point un protocole d'acquisition de données par drone dans le contexte des petits glaciers, plus précisément le Glacier du *Travignolo* situé dans les Dolomites, ceci en vue d'étudier si le drone est un moyen efficient d'acquisition de données en milieu montagneux pour la réalisation de levés photogrammétriques permettant le suivi de l'évolution d'un glacier de montagne au cours du temps.

La mise en application sur le terrain du protocole développé nous a permis de confirmer et de valider l'efficacité du drone en tant que moyen d'acquisition de données de qualité suffisante pour la reconstruction photogrammétrique d'un petit glacier de montagne. Nous avons également pu confirmer et valider la reproductibilité du protocole d'acquisition de données nécessaire au levé photogrammétrique.

Dans notre expérimentation, nous avons obtenu un GSD médian de la reconstruction de 3.1 cm/pixel et une erreur de reprojection inférieure au pixel. Cette information est de qualité supérieure aux valeurs rapportées par la littérature pour les petits glaciers, qui sont de l'ordre de 14 cm/pixel.

Les conclusions et recommandations contenues dans ce travail pourraient servir d'orientation pour de futures recherches dans ce domaine visant à obtenir une reconstruction tridimensionnelle à très haute résolution de petits glaciers.

# Abstract

---

Climate change is a central focus of our short - and long - term concerns. Continental glaciers, alpine glacier in particular, represent indicators of the progress of these changes. One of the means to analyse them is to compute their conventional mass balance and to obtain knowledge about their volume evolution by repeated hypsometric modelisations.

Photogrammetry allows to perform this modelisation by using aerial imagery. These images can be registered by satellite or by airborne sensors. During registration, they depend on sunlight, cloud cover, flight trajectory and other factors preventing the adequate performance of the modelisation.

The arrival on the market of cheap drones made shootings easier and, therefore improved modelisation of glacier's surface. Drones allow to get cheaper data in complex physiographic context such as mountain glacier.

Our study has allowed to develop a data capture's protocol by drone in small glacier, more specifically in the *Travignolo* Glacier located in the Dolomites, aiming to address if the drone is an efficient way to capture data in mountainous area, in particular for photogrammetric surveys allowing to follow the evolution in time of the glacier.

The practical implementation of the developed protocole allows us to confirm and validate the efficiency of the drone as a mean to get data with sufficient quality to realise the photogrammetric reconstruction of a small glacier. We also confirmed and validated the repeatability of the data capture's protocol.

In our experimentation, we have obtained a median GSD of 3.1 cm/pixel and a reprojection error being less than one pixel. This information is of higher quality than general values about small glacier from the literature, which are around 14 cm/pixel.

Conclusions and recommendations from this study may provide a rough guide for future research in the field, aiming to obtain a very high resolution 3D reconstruction of small glaciers.

# Table des matières

---

<b>Résumé.....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des Figures .....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>11</b>
<b>Liste des acronymes .....</b>	<b>12</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>13</b>
<b>Etat de l'art.....</b>	<b>15</b>
1 Notions glaciaires .....	16
1.1 Formation d'un glacier .....	16
1.2 Etude des glaciers .....	17
1.2.1 Influence des variations climatiques.....	17
1.2.2 Méthode d'étude des glaciers.....	17
1.2.3 Projection .....	18
1.2.4 Cas spécifiques des petits glaciers.....	18
1.3 Glacier du <i>Travignolo</i> .....	19
1.3.1 Localisation géographique.....	19
1.3.2 Environnement climatique et glaciaire .....	21
1.3.3 Principales observations récentes du glacier .....	21
2 Photogrammétrie .....	23
2.1 Bref historique de la photogrammétrie .....	23
2.2 Principes théoriques .....	24
2.2.1 Stéréoscopie.....	24
2.2.2 Reconstruction tridimensionnelle.....	25
3 Acquisition des images en télédétection et photogrammétrie.....	29
3.1 Méthodes classiques .....	29
3.2 Place du drone dans l'acquisition des données .....	30
3.3 Types de drone et usage respectif .....	30
3.3.1 Drones larges et moyens.....	30
3.3.2 Drones de petites tailles.....	31
3.4 Législation .....	32
3.5 Conclusion.....	33
4 Présentation du projet.....	34
<b>Hypothèses .....</b>	<b>35</b>

<b>Développements théoriques.....</b>	<b>36</b>
1 Paramètres d'acquisition d'images.....	37
1.1 Elaboration du plan d'acquisition d'images .....	37
1.1.1 Type de plan de vol.....	37
1.1.2 Détermination de la hauteur de vol .....	38
1.1.3 Taux de recouvrement entre les prises de vue .....	38
1.2 Paramètres de prise de vue .....	38
1.2.1 Boîtier et objectif.....	39
1.2.2 Ground Sampling Distance .....	40
1.3 Paramètres de vol.....	41
1.3.1 Hauteur de vol .....	41
1.3.2 Hauteur minimale de vol.....	41
1.3.3 Distance à parcourir .....	41
1.3.4 Vitesse de vol.....	42
1.3.5 Synthèse et paramètres de vol.....	43
2 Lever topographique.....	45
2.1 Détermination des coordonnées des stations de référence.....	45
2.1.1 Stations de référence .....	45
2.1.2 Cheminement.....	45
2.2 Détermination des coordonnées des cibles.....	46
2.2.1 Installation des cibles .....	46
2.2.2 Lever des cibles.....	46
2.3 Sources d'erreurs .....	46
2.4 Précision.....	48
2.4.1 Cheminement.....	48
2.4.2 Cibles .....	48
2.5 Positionnement au GNSS et géo-référencement .....	49
2.5.1 Mesure GNSS.....	49
2.5.2 Géo-référencement.....	52
3 Reconstruction photogrammétrique tridimensionnelle.....	53
3.1 Recommandation relatives aux prises de vue .....	53
3.2 Reconstruction photogrammétrique par utilisation du logiciel ContextCapture ....	53
3.2.1 Calibration de l'appareil de prise de vue.....	53
3.2.2 Aérotriangulation .....	54
3.2.3 Identification des points homologues.....	55
3.2.4 Qualité de la reconstruction.....	55



<b>Application .....</b>	<b>56</b>
1 Mises en place sur le terrain .....	56
1.1 Réglages du drone .....	56
1.1.1 Acquisition d'images.....	56
1.2 Cibles .....	59
1.2.1 Cibles rigides.....	59
1.2.2 Cibles de validation .....	61
2 Acquisition de données.....	62
2.1 Détermination des coordonnées terrain .....	62
2.1.1 Instruments .....	62
2.1.2 Lever topographique .....	62
2.1.3 Géo-référencement.....	64
2.2 Prise des clichés.....	66
2.2.1 Instrument.....	66
2.2.2 Prise des clichés.....	66
3 Reconstruction du modèle 3D.....	68
4 Analyse de la reconstruction .....	72
5 Résultats.....	73
5.1 « Le drone fournit des données de qualité suffisante dans le cadre d'une reconstruction photogrammétrique de glacier de montagne » .....	73
5.1.1 Maitrise du drone.....	73
5.1.2 Qualité des images .....	77
5.1.3 Caractéristiques de la reconstruction .....	77
5.2 « Le protocole de lever photogrammétrique d'un glacier de montagne utilisant le drone en tant que moyen d'acquisition de données est reproductible en vue d'établir un suivi du glacier au cours du temps ».....	83
5.2.1 Position des cibles .....	83
5.2.2 Reproduction des sessions de vol .....	84
<b>Discussion .....</b>	<b>85</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>90</b>

# Liste des Figures

---

Figure 1 : Zones d'accumulation et d'ablation d'un glacier (Source : GéoIVal, 2007) .....	17
Figure 2 : Localisation du Glacier du Travignolo .....	19
Figure 3 : Massif des Pale di San Martino .....	20
Figure 4 : Variation de la superficie du glacier entre 1915 et 2006 (Source : Valcanover, 2013) .....	22
Figure 5 : Evolution de la limite du glacier entre 1915 et 2006 (Source : Valcanover, 2013) .....	22
Figure 6 : Influence du relief sur le rapport B/h (Source : Jacome Pereira, 2010) .....	24
Figure 7 : Déformation en coussinet (gauche) et en barillet (droite) (Source : Wikipédia) .....	25
Figure 8 : Principe de l'orientation relative (Source : Colignon, 2010) .....	26
Figure 9 : Ikhana - Drone de type large utilisé pour la surveillance des feux de forêt (Source : NASA, 2009) .....	31
Figure 10 : Sierra - Drone de type moyen (Source : NASA, 2010) .....	31
Figure 11 : eBee - Drone à voilure fixe (Source : senseFly, 2017) .....	32
Figure 12 : DJI Phantom : Drone à rotor (Source : DJI, 2016) .....	32
Figure 13 : SmartBird (Source : www.festo.com) .....	32
Figure 14 : Nano-Hummingbird (Source : www.airforce-technology.com) .....	32
Figure 15 : Plan d'acquisition idéal - cas général (Source : Pix4D.com) .....	37
Figure 16 : Recouvrement suffisant entre deux vols (Source : Pix4D.com) .....	38
Figure 17 : Recouvrement insuffisant entre deux vols (Source : Pix4D.com) .....	38
Figure 18 : Altitude de vol (Source : Pix4D.com) .....	38
Figure 19 : Recouvrement longitudinal (Source : Pix4D.com) .....	38
Figure 20 : Axes d'un théodolite (Source : Leica) .....	47
Figure 21 : Principe de la détermination de position par GNSS (Source : Warnant, 2016) .....	49
Figure 22 : Séquence de "ships" composant le code (Source : Warnant, 2016) .....	49
Figure 23 : Modulation de l'onde par code (Source : Warnant, 2016) .....	49
Figure 24 : Principe de la mesure de battement (Source : Hofmann – Wellenhof et al., 2008) .....	50
Figure 25 : PDOP et influence de la géométrie des satellites (Source : Warnant, 2016) .....	52
Figure 26 : Transformation de Helmert à 2 dimensions (Source : Billen, 2014) .....	52
Figure 27 : Erreur de reprojection .....	55
Figure 28 : Distances aux rayons (Source : Pix4D.com) .....	55
Figure 29 : Zones couvertes par les sessions d'acquisition de données .....	57
Figure 30 : Dessin de la cible (et des trous percés pour les cibles rigides) .....	59
Figure 31 : Cibles rigides cassées retrouvées sur le terrain en fin de mission .....	59
Figure 32 : Totalité des cibles retrouvées sur le terrain en fin de mission .....	59
Figure 33 : Equerres permettant l'attache des cibles .....	60
Figure 34 : Cible rigide forée à la roche à l'aide d'une équerre de 30 - 60° .....	61
Figure 35 : Cible de validation ancrée dans la neige par des piquets de tente .....	61
Figure 36 : Matériel topographique utilisé (Source : Leica, Trimble) .....	62
Figure 37 : Stations de référence et cibles .....	63
Figure 38 : Position des clichés .....	67
Figure 39 : Importation des images sous ContextCapture .....	68
Figure 40 : Pointage des points de contrôle sous ContextCapture .....	68
Figure 41 : Reconstruction tridimensionnelle du glacier .....	69
Figure 42 : Orthophoto du Glacier du Travignolo .....	70
Figure 43 : MNS du Glacier du Travignolo .....	71
Figure 44 : Trajectoire du drone en fonction de la session d'acquisition de données .....	74
Figure 45 : Incertitude de positionnement des points homologues identifiés lors de la reconstruction .....	79

Figure 46 : Nombre de photos identifiant un point homologue identifié lors de la reconstruction .....	79
Figure 47 : Ellipses d'erreur sur les cibles .....	81
Figure 48 : Erreurs de reprojection de chacun des points homologues identifié lors de la reconstruction photogrammétrique .....	82

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Paramètres de vol et de prises de vue.....	44
Tableau 2 : Ordre de grandeur des différentes sources d'erreur dans la détermination de la position en SPP (Source : Warnant, 2016) .....	51
Tableau 3 : Durée d'acquisition des données .....	56
Tableau 4 : Paramètres du plan d'acquisition .....	58
Tableau 5 : Coordonnées locales des stations de référence .....	62
Tableau 6 : Précision des coordonnées des stations de référence .....	64
Tableau 7 : Paramètres de correction atmosphérique .....	64
Tableau 8 : Durée et nombre d'observation(s) des signaux GNSS aux stations de référence .....	65
Tableau 9 : Coordonnées WGS 84 des stations de références déterminées par observation des ondes porteuses .....	65
Tableau 10 : Paramètres de géo-référencement .....	66
Tableau 11 : Hauteur de vol lors des différentes sessions.....	75
Tableau 12 : Paramètres liés au positionnement des clichés après aérotriangulation .....	76
Tableau 13 : Paramètres de calibration de la caméra.....	76
Tableau 14 : GSD moyen et maximum pour chaque session de vol effectuée .....	77
Tableau 15 : Précision du modèle reconstruit.....	78
Tableau 16 : Ecart de la reconstruction.....	78
Tableau 17 : Imprécision de la position des points homologues .....	78
Tableau 18 : Nombre de photos observant un même point homologue .....	79
Tableau 19 : Erreur de fermeture angulaire .....	80
Tableau 20 : Ecart de fermeture planimétrique .....	81
Tableau 21 : Précision des coordonnées.....	81
Tableau 22 : Précision des coordonnées obtenues par observation des ondes porteuses ...	82
Tableau 23 : Erreur de reprojection des points homologues .....	82
Tableau 24 : Fixation des cibles rigides.....	83

# Liste des acronymes

---

AGL : *Above Ground Level*  
BM : Bilan de Masse  
BMS : Bilan de Masse en Surface  
DGPS : *Differential Global Positioning System*  
DOP : *Dilution Of Precision*  
ENAC : *Ente Nazionale per l'Aviazione Civile*  
EPSG : *European Petroleum Survey Group*  
ha : Hectare  
GNSS : *Global Navigation Satellite System*  
Go : Giga-octet  
GPS : *Global Positioning System*  
GSD : *Ground Sampling Distance*  
MNS : Modèle Numérique de Surface  
MP : Mégapixel  
MNT : Modèle Numérique de Terrain  
 $P_{\text{atm}}$  : Pression atmosphérique  
PDOP : *Position Dilution Of Precision*  
SIFT : *Scale-Invariant Feature Transform*  
SPP : *Single Point Positioning*  
RMSE : *Root Mean Square Error*  
RTK : *Real Time Kinematic*  
URL : *Uniform Resource Locator*

# Introduction

---

En 2015, s'est tenue la conférence de Paris sur les changements climatiques (COP21). Lors de cette conférence, tous les pays participants, à l'exception des Etats-Unis, ont signé un accord sur le climat visant à limiter le réchauffement mondial entre 1,5 °C et 2 °C d'ici 2100.

Pour arriver aux objectifs convenus dans cet accord, les pays s'engagent à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre et à désinvestir dans les sources d'énergie fossiles considérées comme les principaux facteurs à l'origine des différents phénomènes de dérèglement climatique observés à l'heure actuelle, à savoir l'augmentation du niveau de la mer, de la température en surface des eaux et des terres, du taux d'humidité ou encore la diminution de la surface de la glace de mer, de la couverture neigeuse en montagne ou de l'étendue des glaciers (NOAA, 2010).

Pour chaque indicateur de ces changements climatiques, une analyse spécifique permet de suivre son évolution au cours du temps. En ce qui concerne les glaciers continentaux, et plus spécifiquement les glaciers alpins, un des moyens permettant de les analyser est de réaliser leur bilan de masse conventionnel, c'est-à-dire de connaître l'évolution de leur volume au cours du temps en répétant des modélisations hypsométriques.

La photogrammétrie permet de réaliser ce type de modélisation grâce à l'utilisation d'images aériennes. Ces images peuvent être enregistrées par des capteurs satellitaires ou aéroportés. L'enregistrement de ces images dépend de l'ensoleillement, de la couverture nuageuse au moment de la prise de vue, de la trajectoire du vecteur utilisé lors de l'acquisition de données et d'autres facteurs pouvant compromettre une bonne réalisation de cette modélisation au moment voulu, généralement, le moment de l'année où la couverture neigeuse est minimale, correspondant à la fin de l'été dans les Alpes.

Indépendamment des moyens classiques d'enregistrement d'images, représentés par les avions, les hélicoptères et les satellites, la photogrammétrie a également recours, depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle voire depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle, à l'utilisation de drones pour la récolte des données nécessaires au lever photogramétrique.

La récolte de ces données sur une grande zone peut s'avérer très onéreuse. Les drones permettent une acquisition de données pour un moindre coût. Ils se sont également révélés particulièrement utiles pour l'acquisition de données dans des contextes physiographiques complexes, tels que les glaciers de montagne. Leur rayon d'action est cependant limité pour des raisons légales et de ressources d'énergie. En effet, en Belgique, le vol à vue est imposé avec deux observateurs au maximum en plus du pilote.

L'arrivée sur le marché de drones bon marché a permis de faciliter les prises de vue et, par exemple, de réaliser plus aisément une modélisation de surface des glaciers permettant notamment de suivre leur évolution dans le temps.

À titre d'exemples récents d'utilisation de drones en milieu montagneux, on peut citer la modélisation de la surface du glacier *Morteratsch* localisé dans les Alpes suisses (Rossini *et al.*, 2018) ou encore l'évaluation de la couverture neigeuse dans les Alpes italiennes (De Michele *et al.*, 2016).

Ce projet de fin d'étude portant sur le lever photogrammétrique d'un glacier de montagne s'articule autour de la question de recherche suivante :

**« Le drone est-il un moyen d'acquisition de données efficient en milieu montagneux, plus précisément pour l'élaboration d'un protocole de lever photogrammétrique, reproductible à des fins de comparaison, d'un glacier de montagne? »**

Il est important de noter que le protocole développé pour tenter de fournir une réponse à cette question a été appliqué à un petit glacier situé dans les Dolomites.

# Etat de l'art

---

La cryosphère désigne l'ensemble des composantes du système terrestre comprenant de l'eau à l'état solide, c'est-à-dire la glace du sol, la couverture neigeuse, la glace de mer, de lac et de rivière composée des inlandsis de l'Antarctique et du Groenland, des calottes telles que celle de l'Islande ainsi que des glaciers (Vaughan *et al.*, 2013 ). Elle est un indicateur de l'évolution des changements climatiques (Houghton *et al.*, 2001) et, dans ce contexte, les glaciers Alpins, par exemple, peuvent être considérés comme le « thermomètre naturel » de l'Europe (Vaughan *et al.*, 2013).

Le réchauffement climatique, influencé par l'augmentation des gaz à effet de serre (principalement le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub>, et le méthane, CH<sub>4</sub>), pourrait créer un important recul des glaciers et une augmentation du niveau des mers. A titre d'exemple, la fonte totale des inlandsis de l'Antarctique et du Groenland et des glaciers contribuerait à une élévation respective de 58.3 m, 7.36 m et 0.41 m soit une augmentation totale d'environ 66.07 mètres, alors que les glaciers européens (alpins et pyrénéens) y contribueraient pour 0.03 mm (Vaughan *et al.*, 2013).

Il est important de noter que ces données ne prennent pas en compte l'évolution spécifique des petits glaciers qui, de par leur petite taille, ne sont pas pris en compte dans ces estimations globales.

Un enjeu important dans l'étude de l'évolution des glaciers est le temps de réponse à chacun des changements induits par le réchauffement. Ce temps de réponse est un facteur particulièrement décisif pour la dynamique des glaciers et pour l'évolution de leur volume au cours du temps, constituant leur bilan de masse.

L'étude de la corrélation entre les techniques de modélisation d'écoulement glaciaire et leur dynamique proprement dite est alors très importante. Pour être validées, ces modélisations doivent être régulièrement confrontées à des données terrain (Jóhannesson, 1997).

Ce chapitre est divisé en 3 sections. Premièrement, l'état de l'art concernant les glaciers et leur représentation. Ensuite, nous détaillerons les principes théoriques de la photogrammétrie et plus particulièrement l'aérotiangulation. Enfin, nous étudierons les différentes possibilités qu'offrent les drones et plus spécifiquement leur utilisation comme moyen d'acquisition de données en photogrammétrie.



# 1 Notions glaciaires

Dans cette section, nous détaillerons d'abord les différents concepts généraux liés à la description des glaciers (1.1). Ensuite, nous nous focaliserons sur l'étude de l'évolution des glaciers et leur observation (1.2). Enfin, nous analyserons la situation du Glacier du *Travignolo* (1.3), glacier sur lequel le protocole décrit dans ce travail a été mis en place.

## 1.1 Formation d'un glacier

Un glacier se forme dans un bassin versant lorsque le volume des précipitations neigeuses est supérieur au volume évacué sous forme d'eau.

Le bilan de masse (BM) d'un glacier correspond à la différence entre son gain de masse et sa perte de masse, soit entre **l'accumulation** et **l'ablation** du glacier.

En ce qui concerne l'accumulation, on distingue :

- les précipitations neigeuses ;
- l'accumulation de la neige sous l'effet du vent ;
- le regel des précipitations pluvieuses et ;
- la condensation.

En ce qui concerne l'ablation, on peut citer :

- le ruissellement de l'eau de fonte en surface ;
- l'évaporation et la sublimation ;
- l'érosion de la neige par le vent ;
- la fonte basale (c'est-à-dire au contact du glacier avec son socle rocheux) et ;
- le vêlage d'iceberg pour les glaciers dont la langue terminale atteint un plan d'eau.

A l'exception de la fonte basale et du vêlage, ces phénomènes concernent la surface du glacier. Le bilan de masse en surface d'un glacier ne prend en compte que ces phénomènes.

Les glaciers alpins perdent principalement de la masse par ces phénomènes de surface (Braithwaite *et al.*, 2013 ; Gerbeaux *et al.*, 2005 ; Vincent, 2010). Nous n'expliquerons dès lors par la suite que le bilan de masse en surface (BMS).

La mesure du BMS dépend:

- du volume de précipitations neigeuses et pluviales ;
- des flux d'eau composés de la condensation (accumulation), de l'évaporation (ablation), de la fonte (ablation) et de la sublimation (ablation) ;
- des processus de ruissellement et ;
- des processus éoliens correspondant à l'érosion et au déplacement neigeux créés par le vent (Mayo *et al.*, 2004).

Cette mesure peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$BMS = \text{précipitations} - \text{ruissellement} + \text{flux d'eau} + \text{processus éolien}$$

Un glacier est composé d'une partie appelée **zone d'accumulation**, située dans la partie haute, où le bilan de masse est positif. En aval de cette zone, on trouve la **zone d'ablation** dans laquelle le bilan de masse est négatif. Ces deux zones sont séparées par une **ligne d'équilibre** (Figure 1).

En fin d'été (soit en fin de saison de fonte), la zone d'ablation est constituée de glace grise. Le transport de la masse accumulée à l'amont jusqu'à l'aval se fait par mouvement gravitaire. Ce mouvement se fait grâce à la pente du glacier. Cette pente est telle que les contraintes créées par le poids de la glace provoquent une déformation de cette glace et son déplacement. Le

glacier est à l'équilibre lorsque son bilan de masse annuel est nul. Dans ce cas, la pente du glacier forme un angle appelé **angle d'équilibre** (Alley *et al.*, 2003).

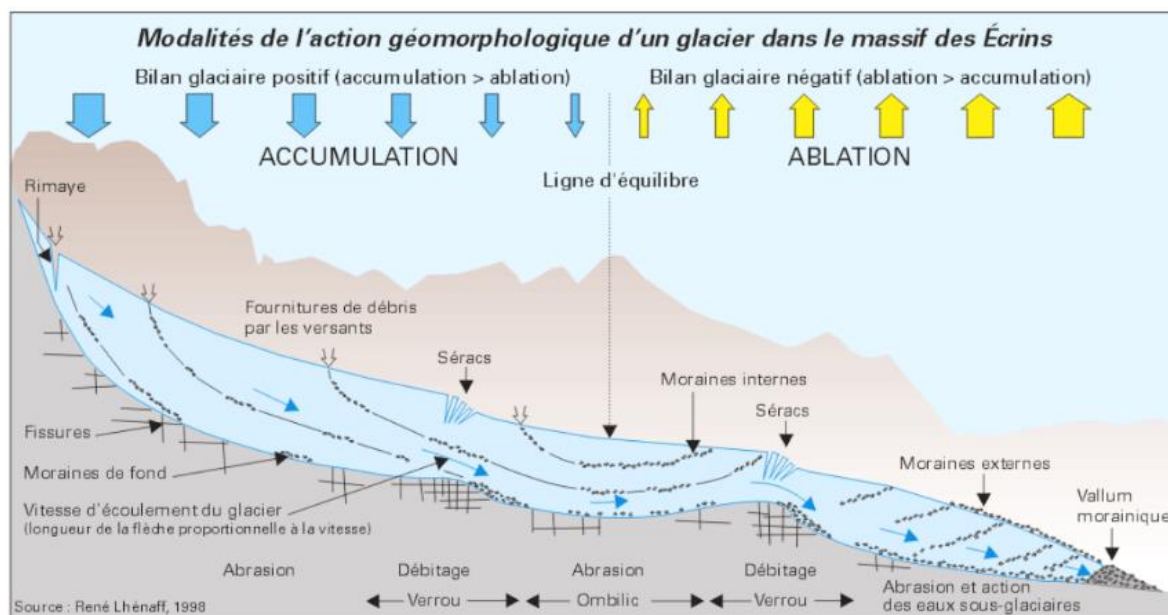


Figure 1 : Zones d'accumulation et d'ablation d'un glacier (Source : GéoVal, 2007)

## 1.2 Etude des glaciers

### 1.2.1 Influence des variations climatiques

Les glaciers sont de très bons indicateurs climatiques (Houghton *et al.*, 2001). La zone d'accumulation est influencée par des variations de précipitation, et ainsi implicitement des vents qui déterminent les régimes des précipitations). La zone d'ablation est influencée par les changements de température (Zemp *et al.*, 2008). Ces changements modifient l'équilibre entre les deux zones et par conséquent la géométrie du glacier (Kuhn *et al.*, 1895). Cette réponse du bilan de masse aux variations climatiques lui confère un statut de signal direct quant aux changements, alors que la modification de la géométrie est un signal indirect et retardé de ces changements (Haeberli, 1998).

### 1.2.2 Méthode d'étude des glaciers

L'étude des glaciers et la description de leurs variations peuvent se faire par plusieurs techniques.

La première méthode correspond à des **observations in-situ** par stations météorologiques ou stations de visites annuelles placées sur le glacier. Ces données de terrain permettent d'obtenir le bilan de masse au départ de mesures ponctuelles, essentiellement des carottages, ou capteurs de hauteur de neige. Si ces observations ponctuelles sont suffisamment denses et représentatives, des interpolations peuvent être réalisées, à une dimension, le long de l'axe du glacier ou, en deux dimensions, couvrant ainsi la surface du glacier. Cependant ces données, permettant d'estimer le climat et l'évolution au cours du temps des glaciers et du BMS, peuvent s'avérer difficiles voire impossibles à collecter à cause des conditions extrêmes, météorologiques ou simplement d'accessibilité, et d'importants coûts logistiques. Par ailleurs, ces données, bien que précises, ont comme limite principale une représentativité spatiale (très) limitée.

Une seconde méthode permettant d'évaluer le BMS a vu le jour en 2003 avec la mission satellitaire GRACE. Il s'agit de la **méthode gravitaire** qui estime le bilan de masse par les variations de champs gravitaire mesurées par le satellite (Gardner *et al.*, 2013 ; Shuanggen *et Fang*, 2015). Cette méthode n'est valable que pour de très grandes étendues glaciaires.

L'évaluation du BMS par méthode gravitaire peut être aussi appliquée pour de plus petites étendues à l'aide d'autres instruments mesurant les variations de gravité le long de transects, effectués sur le glacier.

Une troisième méthode d'estimation du BM(S) se fait à l'aide de **modèles climatiques** de complexité variable. Les plus évolués permettent de représenter le climat de façon plus précise, soit de l'ensemble de la terre (cas des modèles climatiques globaux) ou d'une région donnée (cas des modèles climatiques régionaux). Ces derniers ont une meilleure résolution et représentent également davantage de processus spécifiques de la zone étudiée (Fettweis *et al.*, 2013).

Enfin, une quatrième méthode de suivi de l'évolution des glaciers est l'utilisation de la **télédétection** (Haeberli *et al.*, 2007). Cette méthode présente plusieurs avantages car elle se base sur l'observation de phénomènes visibles à distance et non sur des équations mathématiques régissant les modèles, et elle ne requiert pas de présence physique sur le terrain. Cependant, cette méthode plus récente n'offre qu'une vue en deux dimensions et demande nécessairement d'être complétée par une information relative au terrain. De plus, elle ne permet qu'un suivi plus limité temporellement.

### 1.2.3 Projection

Un avantage des modélisations climatiques est leur capacité de prévision de l'évolution future à moyen ou à long terme du BMS et de l'état des glaciers. Ces projections permettent alors de mieux comprendre les enjeux et paramètres influençant le BMS et l'alimentation des glaciers.

Cependant, ces prévisions à long terme ne sont pas certaines. Ainsi, pour augmenter leur fiabilité, les modèles climatiques doivent être calibrés sur le climat passé et présent avant de pouvoir simuler le climat futur. Afin d'améliorer cette calibration, ils peuvent être forcés via des observations servant de base à la projection. Au vu de la relation, d'une part entre la température et la fonte, et, d'autre part, entre la température et l'altitude, un modèle numérique de terrain (MNT) précis et à très haute résolution est primordial pour simuler l'évolution d'un glacier.

Le travail réalisé dans ce mémoire vise à élaborer un protocole d'acquisition permettant de fournir ce genre de MNT tout en limitant les interventions humaines. Dans le cas où ces données rencontrent une précision suffisante, elles pourront alors permettre une étude de l'évolution interannuelle du glacier, être utilisées pour l'évaluation de modèles climatiques, mais également en tant que donnée altimétrique continue et à (très) haute résolution spatiale pour forcer le modèle climatique.

### 1.2.4 Cas spécifiques des petits glaciers

Il est important de noter que les petits glaciers ne peuvent pas être aisément mesurés via les méthodes traditionnelles citées ci-dessus.

En effet :

- les observations *in-situ*, en particulier les carottages, sont difficiles à réaliser étant donné la complexité de la technique à mettre en œuvre ;
- les méthodes satellitaires et les modèles climatiques produisent de mauvais résultats liés à une résolution grossière voire insuffisante ;
- la télédétection aéroportée produit un résultat altéré par la présence de nombreux débris en surface et/ou de zones d'ombres.

### 1.3 Glacier du *Travignolo*

Le protocole d'acquisition et de traitement de données développé dans ce mémoire a été appliqué au Glacier du *Travignolo* (IT). Son objectif est de produire un MNT de la surface du glacier à intervalles réguliers (durée d'un lustre ou d'une décennie) pour quantifier de façon continue l'évolution du glacier et de son BMS. Pour mieux comprendre le contexte dans lequel notre protocole sera appliqué ainsi que les contraintes de ce protocole, nous présentons ci – dessous :

- le site géographique du glacier ;
- le contexte climatique du glacier ;
- les principales évolutions du glacier durant le XX<sup>ème</sup> siècle.

#### 1.3.1 Localisation géographique

Le Glacier du *Travignolo* est situé dans les *Dolomites* italiennes (Figure 2) dans la Province autonome du Trentin au sein du massif des *Pale di San Martino* (Figure 3). Parmi les neuf glaciers qui couvrent ce massif dolomitiques, seuls le *Travignolo* et celui de la *Fradusta* sont encore vivants (WGMS et NSIDC, 1989). Le Glacier du *Travignolo* s'écoule vers le Nord-Ouest entre la *Cima della Vezzana* au Nord-Est et le *Cimon della Pala* au Sud-Ouest. Il est surmonté par le *Passo del Travignolo* qui culmine à près de 2850 m d'altitude et la partie inférieure du glacier se trouve à une altitude de 2310 m (WGMS et NSIDC, 1989).



Figure 2 : Localisation du Glacier du *Travignolo*



Figure 3 : Massif des Pale di San Martino

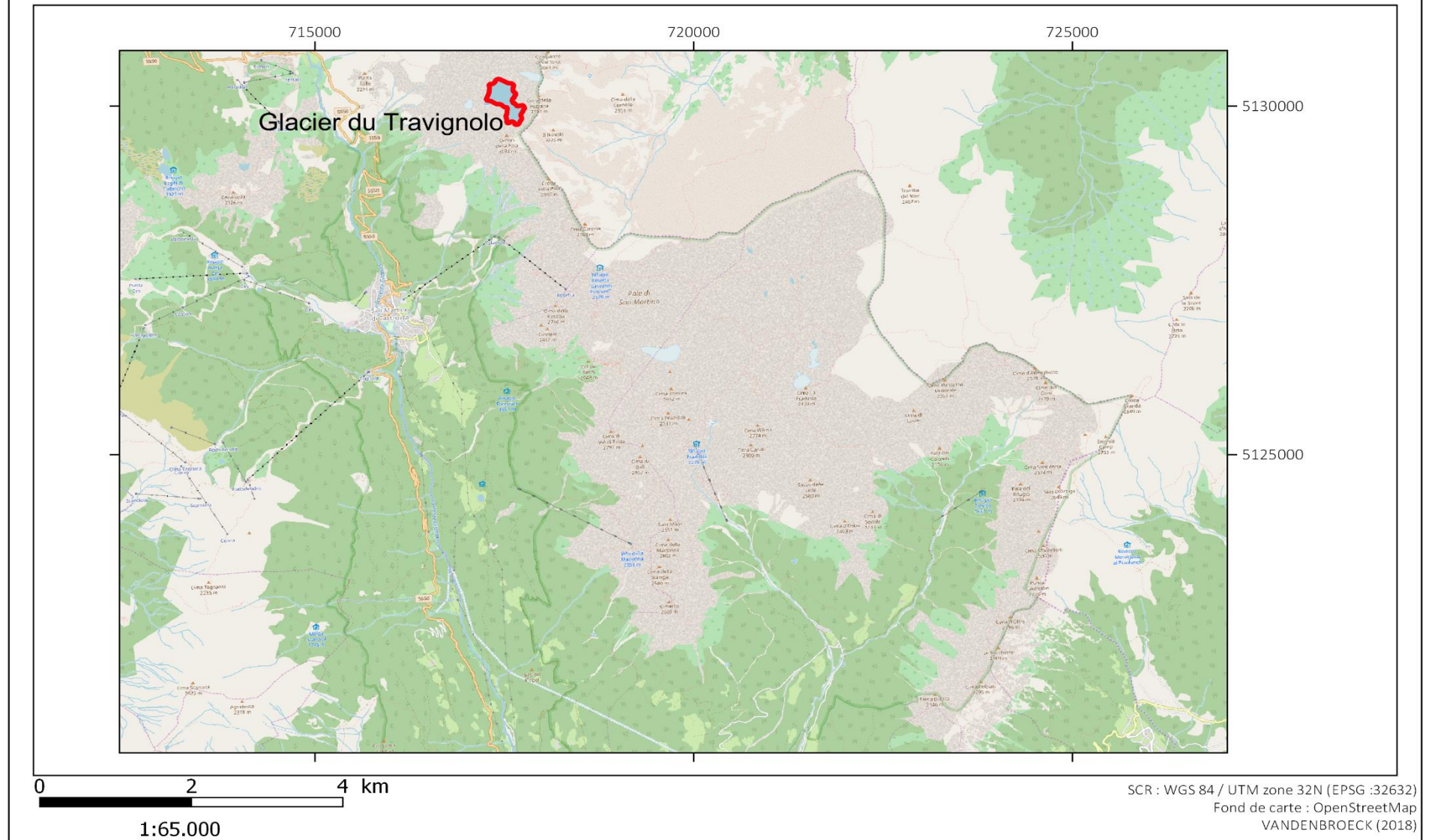


Figure 3 : Massif des Pale di San Martino

### 1.3.2 Environnement climatique et glaciaire

Le Glacier du *Travignolo* est un glacier de montagne s'étendant sur une superficie de 14 ha. Les parois latérales de la *Cima della Vezzana* et du *Cimon della Pala* qui l'entourent sont formés de parois quasiment verticales de plusieurs centaines de mètres constituant son cirque glaciaire. Cela a un effet d'abri orographique protégeant notamment le glacier du rayonnement solaire et de certaines précipitations. Les parois latérales sont traversées par un ensemble de couloirs d'avalanche qui assurent une partie de l'alimentation du glacier. Il s'agit du système d'alimentation dominant du glacier, bien que les apports directs en neige ne soient toutefois pas négligeables (Valcanover, 2013).

Durant la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle, le glacier s'étendait depuis le *Passo del Travignolo* et s'écoulait d'abord en un corps glaciaire avant de se séparer en deux langues dont les dépôts morainiques sont clairement visibles et très frais jusqu'à une altitude d'environ 2 000 m. Elles constituaient certainement l'avancement du glacier au terme du petit âge glaciaire au début de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ensuite, il a subi un recul intense, tant dans sa partie basse que dans le secteur supérieur. Un suivi du glacier a été opéré durant le XX<sup>ème</sup> siècle, permettant de connaître son évolution récente (Valcanover, 2013). Cette évolution est reportée ci-dessous.

### 1.3.3 Principales observations récentes du glacier

Les Figures 4 et 5 représentent l'évolution de l'emprise au sol du glacier entre 1915 et 2006.

- **1928 : Première observation scientifique du glacier**  
Le glacier s'étendait sur une surface de 38 ha (Castiglioni, 1928).
- **1930 – 1945 : Fonte importante du glacier**  
Le glacier a perdu environ un tiers de son volume de glace. La partie frontale du glacier s'est retirée de plusieurs centaines de mètres (Morandini, 1950).
- **1945 – 1955 : Faible fonte du glacier**  
La fonte observée du glacier durant cette décennie est très faible. Cela peut s'expliquer par deux phénomènes particuliers au Glacier du *Travignolo*. Premièrement, les langues dans la partie aval étaient protégées par des débris rocheux les recouvrant. Ensuite, la neige était accumulée de façon importante sur le front du glacier. Cet amas de neige s'explique par les pentes très raides. Cette pente supérieure à la pente normale d'un glacier favorise les couloirs de neige à la surface du glacier (Morandini, 1951).
- **1954 – 1981 : Pas de mesure**
- **1981 : Séparation des langues dans la partie aval**  
La partie aval du glacier était caractérisée par deux langues s'écoulant autour d'un verrou rocheux qui se réunissaient en aval de ce dernier. À partir de 1981, les deux langues sont séparées et une moraine médiane apparaît, empêchant leur réunification aval. Leur étendue s'arrête à une vingtaine de mètres en aval du verrou.
- **1981 – 1991 : Pas de mesure**
- **1999 : Détachement de la glace du verrou rocheux**  
Les deux lobes frontaux de glace ayant reculé progressivement chaque année n'atteignent plus à présent le verrou rocheux (Cesco-Cancian, 2000).
- **2010 : Le glacier s'étend sur une surface inférieure à 20 ha**

Une mission visant à calculer la superficie sur laquelle s'étend le glacier est menée en 2010. Cette mission se base sur l'utilisation de techniques modernes (GPS, orthophotos, données LIDAR). La surface calculée est de 17.98 ha (Tauer et Filippi Gilli, 2011).

- **2013** : Dernière mesure de la superficie du glacier

Le *Catasto dei Ghiacciai Italiani* (Cadastre des Glaciers Italiens) évalue sa superficie à 14 ha (Valcanover, 2013).

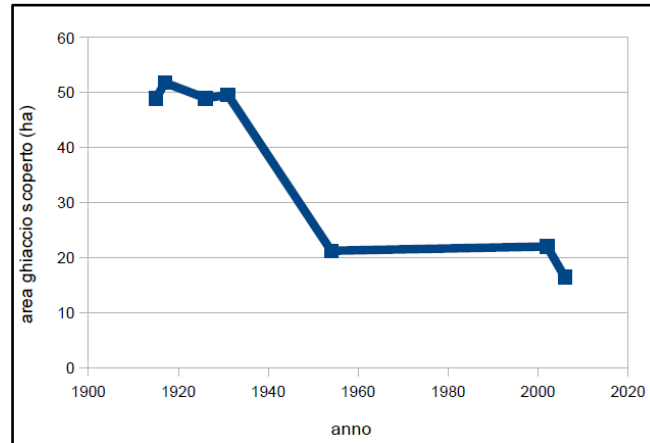


Figure 4 : Variation de la superficie du glacier entre 1915 et 2006  
(Source : Valcanover, 2013)

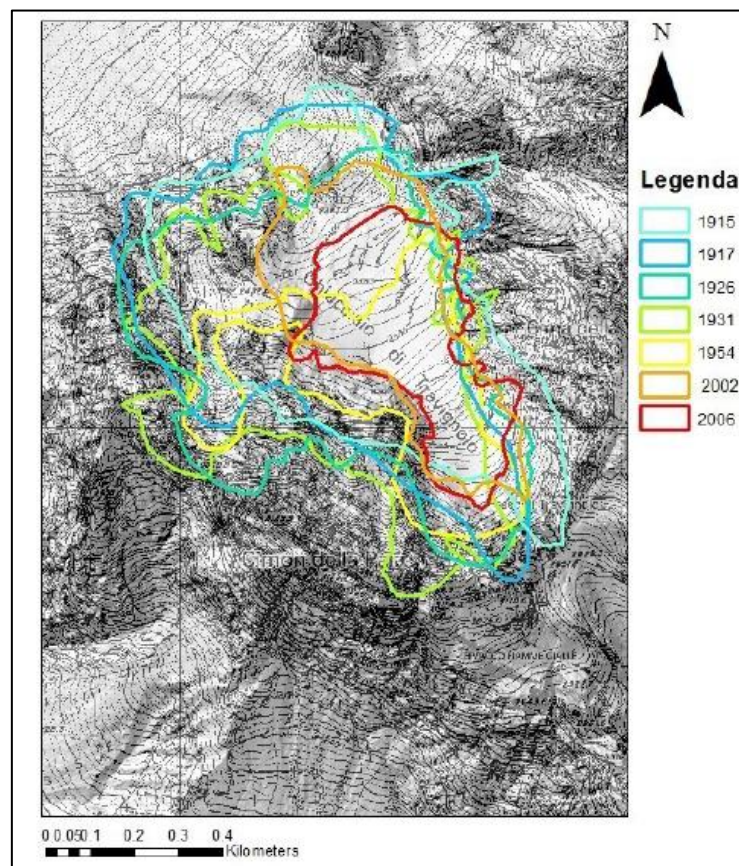


Figure 5 : Evolution de la limite du glacier entre 1915 et 2006  
(Source : Valcanover, 2013)

## 2 Photogrammétrie

La photogrammétrie, littéralement « science de mesure dans une photographie » est une « *technique permettant d'obtenir une représentation du terrain à l'échelle et en trois dimensions à partir de simples photographies* » (Milles et Lagofun, 2007).

Cette technique de restitution est basée sur le principe de la stéréoscopie. Elle exploite la faculté à percevoir le relief à partir de deux images planes d'un objet, prises de deux points de vue différents.

Notre travail nous a amenés à utiliser, dans le but d'une modélisation tridimensionnelle de la surface du glacier, des techniques de reconstruction 3D basées sur ce principe de stéréoscopie et sur l'utilisation de clichés photographiques. Les différents concepts théoriques et pratiques nécessaires à la bonne compréhension de la méthodologie suivie sont détaillés dans ce chapitre, divisé en deux parties :

- Premièrement un historique de la photogrammétrie sera dressé (2.1) ;
- Ensuite, les divers concepts théoriques seront détaillés (2.2).

### 2.1 Bref historique de la photogrammétrie

Bien que la photogrammétrie utilise en priorité de nos jours l'imagerie digitale, ses concepts remontent historiquement au XV<sup>ème</sup> siècle, époque à laquelle Léonard de Vinci a réalisé ses premiers travaux concernant la perspective géométrique (Burtch, 2008).

Il aura néanmoins fallu attendre le XVII<sup>ème</sup> siècle pour voir les premières formulations mathématiques du concept développées par Jean-Henry Lambert (Laurent, 1987).

En 1826, Niépce inventa un procédé permettant de fixer une image sur une plaque. Cela marqua l'invention de la photographie (Marignier, 1998).

En 1838, Charles Wheatstone décrit le principe de la perception du relief grâce à la vision binoculaire.

Suite à l'invention de Niépce en 1826, Laussadat eut l'idée en 1850 d'appliquer le principe de la vision binoculaire de Wheatstone et c'est ainsi qu'apparut la photogrammétrie.

En 1867, Meydenbauer élaborait la première caméra grand-angle dédiée à la cartographie et plus particulièrement pour les levés architecturaux. C'est également lui qui employa pour la première fois le terme de photogrammétrie (Burtch, 2008).

L'évolution récente de la photogrammétrie peut généralement être séparée en trois phases selon le niveau de technicité des équipements utilisés (Linder, 2009).

La première phase, appelée *photogrammétrie analogique*, est apparue à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et a été utilisée jusqu'aux années 70 (INSAS, 2011). Durant cette période, la reconstitution de l'orientation des photographies et les mesures étaient réalisées par des outils optico-mécaniques très sophistiqués, tels que le stéréo-reconstructeur analogique. Les clichés utilisés provenaient de chambres métriques embarquées dans des avions pour réaliser des prises de vue aériennes.

Durant les années 70, l'invention du microprocesseur a permis un développement et une démocratisation des ordinateurs. La photogrammétrie a pu profiter de ce développement, en particulier de l'automatisation des traitements des données par l'utilisation d'algorithmes. Ce changement important a vu apparaître la seconde phase, la *photogrammétrie analytique*. Cette période a vu la complexité et la taille des outils nécessaires à la photogrammétrie diminuer. Les clichés analogiques proviennent toujours de chambres métriques qui se sont perfectionnées durant le XX<sup>ème</sup> siècle.



La troisième et dernière phase est la *photogrammétrie digitale*. Elle se développe dans les années 1990 et est caractérisée par un traitement réalisé entièrement par ordinateurs. Les clichés nécessaires peuvent être analogiques ou numériques. Dans le premier cas, les négatifs doivent être scannés pour permettre leur traitement.

## 2.2 Principes théoriques

Cette partie est composée :

- d'un rappel théorique des notions de stéréoscopie,
- d'un détail de la méthode de reconstruction 3D à proprement parler, basée sur :
  - le rétablissement de la géométrie des clichés qui existait lors la prise de vue,
  - les différentes techniques de reconstruction 3D telles que l'identification des points homologues et l'aérotriangulation.

### 2.2.1 Stéréoscopie

La stéréoscopie est basée sur l'observation d'une même scène à partir de deux points de vue différents. Elle permet la reconstitution de la perception du relief au départ de deux images planes, telles que des clichés photographiques.

Le taux de recouvrement longitudinal entre deux photos consécutives est défini par la partie commune couverte sur les deux clichés.

Ce taux dépend notamment de la distance séparant les deux clichés, encore appelée base et identifiée par la lettre B dans la représentation graphique ci-dessous.

#### Représentation graphique de l'influence du relief contraignant la longueur de B

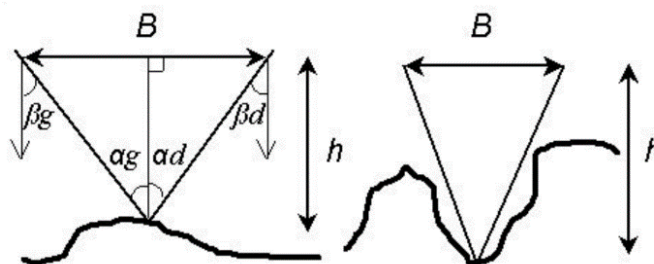


Figure 6 : Influence du relief sur le rapport  $B/h$  (Source : Jacome Pereira, 2010)

La **qualité stéréoscopique** est définie par le rapport entre la base B, et la hauteur au-dessus du sol des prises de vue h. Elle est optimale lorsque ce rapport vaut 1 (Kraus et Waldhäusl, 1998).

Le relief du terrain, la couverture végétale du sol, la densité d'éléments obstruant la visibilité du sol,... sont des facteurs contraignant ce rapport (Figure 6) (Dandois et al., 2015). Il peut alors atteindre 0.3 voire 0.2 dans des milieux extrêmes comme en montagne où les versants sont très pentus, rendant les angles d'incidence beaucoup plus verticaux afin de ne masquer aucune partie (Jacome Pereira et al., 2007) et produisant une erreur d'intersection plus importante influençant notamment la précision sur l'altitude estimée des objets restitués.

Outre ce recouvrement longitudinal, les images doivent aussi couvrir des parties communes de la zone étudiée de façon transversale par rapport à la trajectoire du vol pour permettre la reconstitution du relief. Un recouvrement transversal minimum de 15 % est nécessaire pour une reconstitution photogramétrique. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 40 % et peuvent atteindre jusqu'à 80% dans certaines applications forestières (Torres-Sánchez et al., 2018).

## 2.2.2 Reconstruction tridimensionnelle

La première étape de la reconstitution tridimensionnelle propre à la photogrammétrie est d'établir la géométrie de la prise de vue. Cette dernière est composée d'une orientation interne définissant un référentiel permettant les mesures sur un cliché et d'une orientation externe permettant de se rapporter à l'objet sur le terrain.

Ensuite, une seconde étape permettant la reconstruction tridimensionnelle du modèle consiste en la détection des points homologues présents sur les différents clichés.

### 2.2.2.1 Géométrie des prises de vue

#### Orientation interne

La géométrie de la prise de vue consiste premièrement à reconstruire la gerbe perspective qui existait lors de la prise de vue. Cela s'appelle l'orientation intérieure et elle est à réaliser pour chaque cliché. La gerbe perspective est formée de l'ensemble des rayons optiques passant par le centre de la lentille de l'objectif et orientés vers chaque point d'un objet quelconque capturé sur un cliché (Collignon, 2010).

Lors de cette étape, on va donc établir la colinéarité des éléments de l'objet photographié, du centre optique de l'appareil de prise de vue et de l'image de l'objet.

L'orientation interne consiste ainsi à calculer avec précision la distance focale de l'appareil, la position du point principal et les paramètres de distorsions produite par la lentille. Tout appareil de prise de vue est équipé d'une lentille. En fonction du type d'objectif, les distorsions seront différentes. Un téléobjectif à focale longue formera une déformation dite en coussinet et un objectif grand angle et focale courte créera une déformation en barillet (Figure 7).

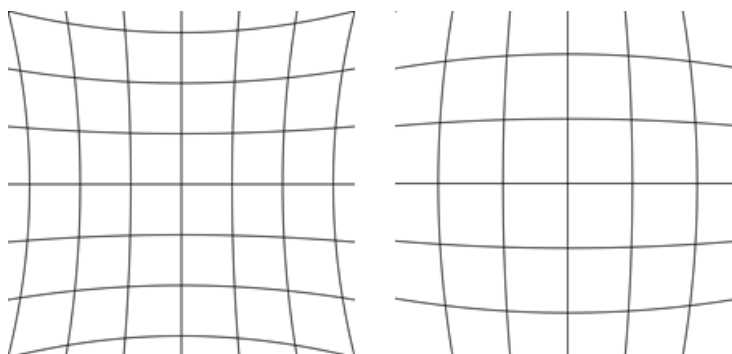


Figure 7 : Déformation en coussinet (gauche) et en barillet (droite) (Source : Wikipédia)

#### Orientation externe

L'orientation externe consiste à rapporter les mesures faites sur une image d'un objet aux mesures faites du même objet sur les autres images puis à l'objet lui-même sur le terrain.

Cette étape peut être réalisée directement lorsque l'on possède un lien entre les mesures sur le cliché et le système de référence. Lorsque nous ne possédons pas cette information, l'orientation externe peut être réalisée en deux étapes. Tout d'abord on réalise une orientation relative pour replacer la gerbe de rayons perspectifs de chaque cliché dans les mêmes positions et orientations que celles de la prise de vue (Collignon, 2010). Ensuite, on transforme le modèle vers un système de coordonnées. Cette transformation est appelée orientation absolue en photogrammétrie.

### Orientation relative

Lors de cette étape, on fait varier la position du plan de projection selon Z jusqu'à obtenir le plan  $\Pi_0$  pour lequel la composante transversale de la parallaxe est nulle (Figure 8).

Pour cela, il faut appliquer 3 rotations et 3 translations (dont une est fixée arbitrairement) d'une des deux gerbes perspectives (modèle par enchaînement). Sinon cette parallaxe transversale ne sera pas annulée.

La condition mathématique qui annule la composante transversale de la parallaxe est la suivante :

Soit A ( $x_1, y_1, z_1$ ) & B ( $x_2, y_2, z_2$ ),

$O_1, O_2, A$  et  $B$  sont coplanaires si le résultat du produit scalaire de  $O_1B$  avec le résultat du produit vectoriel de  $O_1O_2$  et  $O_1A$  est nul :

- I. Produit vectoriel de  $O_1O_2$  et  $O_1A$  = vecteur  $\vec{t}$  perpendiculaire au plan  $O_1O_2A$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \wedge \begin{pmatrix} bx \\ by \\ bz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \cdot bz - z_1 \cdot by \\ z_1 \cdot bx - x_1 \cdot bz \\ x_1 \cdot by - y_1 \cdot bx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

- II. Condition de coplanéité : le produit scalaire entre  $O_1B$  et le vecteur  $\vec{t}$  est nul

$$O_1B \times \vec{t} = x_2 \times t_1 + y_2 \times t_2 + z_2 \times t_3 = 0 \quad (2)$$

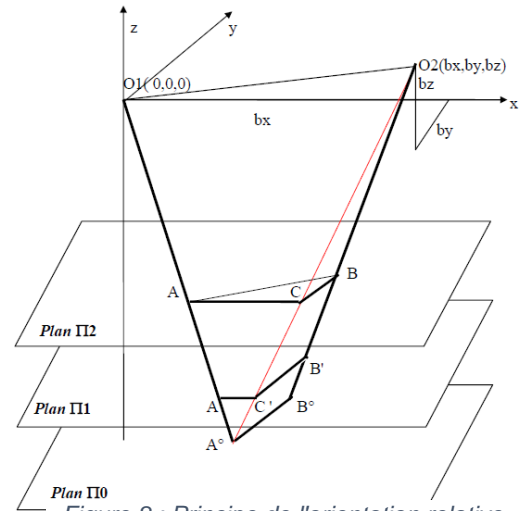


Figure 8 : Principe de l'orientation relative  
(Source : Colignon, 2010)

L'équation fondamentale de la parallaxe transversale permet de déterminer les cinq inconnues (composées pour rappel de 2 translations et de 3 rotations) permettant d'annuler cette parallaxe transversale.

### Orientation absolue

Sur base des deux orientations ci-dessus, nous obtenons un modèle tridimensionnel à échelle et orientation quelconque. L'orientation absolue permet de mettre à l'échelle et d'orienter le modèle pour qu'il soit dans la même configuration que l'objet réel dans le système de référence choisi (système de référence cartographique, plan d'une carte topographique, dans un référentiel relatif,...).

L'orientation absolue s'effectue selon sept (ou neuf) paramètres qui sont :

- trois paramètres de rotation  $\Omega, \Phi$  et  $K$  ;
- trois paramètres de translation  $U_0, V_0$  et  $W_0$  ;
- un (ou trois) facteur(s) de mise à l'échelle  $\lambda$ .

Pour tout point  $i$  du modèle stéréoscopique et de coordonnées ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) obtenus au terme de l'orientation relative, la transformation vers le modèle terrain à l'échelle avec un seul facteur d'échelle est formulée mathématiquement de la façon suivante :

$$\begin{pmatrix} U_i \\ V_i \\ W_i \end{pmatrix} = \lambda * \begin{pmatrix} \cos(K) & -\sin(K) & \Phi * \cos(K) + \Omega * \sin(K) \\ \sin(K) & \cos(K) & \Phi * \sin(K) - \Omega * \cos(K) \\ -\Phi & \Omega & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_0 \\ V_0 \\ W_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

### Aérotriangulation

Le recalage géométrique détaillé ci-dessus nous montre qu'il faut disposer d'un nombre minimum de trois points de calages identifiés sur deux clichés, connus dans le système de coordonnées désiré pour permettre le recalage. Ces points doivent donc être identifiés

visuellement par appariement sur les images et sur le terrain par méthode topographique et/ou géodésique.

L'aérotriangulation est une méthode permettant de réaliser l'orientation externe d'un grand nombre de clichés (appelé bloc de clichés) réalisés lors d'un vol photogrammétrique tout en minimisant le nombre de points de calage à déterminer sur le terrain (Henry, 1999).

La restitution d'un bloc de clichés par aérotriangulation peut se faire par deux méthodes de calcul différentes.

La première méthode est une **compensation en bloc par modèles indépendants**, basée sur un géoréférencement sans point d'appui au sol. L'emploi de cette méthode requiert l'utilisation de chambres métriques lors de la prise des clichés pour déterminer les coordonnées, correspondant à l'orientation relative, qui seront ensuite transformées dans le système de coordonnées terrain, ce qui correspond à l'orientation absolue. Les chambres métriques ont une orientation interne stable référencée par des marques fiduciaires dont les paramètres internes restent stables au-cours du temps (Karara et Faig, 1980). Le problème lié à ces chambres métriques est leur coût d'acquisition. Par ailleurs, cette méthode est très sensible à la position des points de calage dans la précision de la transformation vers le système de référence cartographique ou topographique choisi.

La seconde méthode est dite de **compensation par les faisceaux** ou *bundle adjustment*. Il s'agit d'une méthode transformant directement les coordonnées-image en coordonnées-terrain.

Cette méthode nécessite que les images du bloc de clichés aient un recouvrement longitudinal et transversal suffisant de respectivement 60 % et 20 % au minimum (Henry, 1999). Malgré cette contrainte, il s'agit de la méthode la plus précise pour effectuer le processus d'aérotriangulation, en particulier en ce qui concerne l'utilisation de plateforme « amateur » tel qu'un drone et d'appareils de prise de vue « grand public » pour l'acquisition de données. Elle permet en effet d'intégrer dans la résolution des inconnues supplémentaires telles que les paramètres d'orientation interne. Remarquons qu'au plus d'inconnues sont intégrées dans la compensation, au plus le nombre de points de calages total doit être élevé.

Un ajustement par moindres carrés peut être réalisé pour cette compensation si le nombre de points de calage (total) est supérieur au nombre d'inconnues.

#### 2.2.2.2 Identification des points homologues

L'étape de restitution de la surface par reconstruction tridimensionnelle exploitant les modèles ci-dessus est appliquée à une série de points homologues. Ces points visibles sur plusieurs images doivent idéalement être représentatifs de la complexité morphologique de la scène photographiée.

La recherche de ces points homologues revient à sélectionner un pixel sur une image et à identifier l'image du même objet dans les clichés issus des différentes prises de vue voisine.

De nombreux algorithmes effectuent cette tâche. Parmi ceux-ci, les plus courants en photogrammétrie sont :

- La méthode SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) appariant les points présentant la plus grande similarité de voisinage. Cette méthode permet d'être utilisée pour des clichés à échelle variable, dont l'éclairement varie d'un cliché à l'autre ;
- La méthode SURF (*Speeded Up Robust Features*), analogue à la méthode SIFT mais plus rapide ;
- La géométrie épipolaire, permettant d'établir une relation géométrique entre plusieurs images d'une même scène depuis différents points de vue. La droite épipolaire est définie par l'intersection entre le plan constitué par la base B et le rayon optique joignant le point au centre optique de la première image et le plan de la seconde image. La recherche de points homologues s'effectue dans une zone située autour

des droites épipolaires tracées sur les différents clichés. Si on combine deux images, la recherche le long de la droite épipolaire se fait alors en utilisant, par exemple, la technique de corrélation d'images. Si plus de deux images sont combinées, la détermination de la position du point sur chaque cliché est alors grandement accélérée car la zone de recherche devient très réduite.

## 3 Acquisition des images en télédétection et photogrammétrie

### 3.1 Méthodes classiques

Les moyens classiques d'acquisition de photographies et d'images numériques sont les caméras et capteurs-imageurs embarqués à bord d'avions, d'hélicoptères ou de satellites.

Le premier capteur satellitaire à moyenne résolution spatiale a été le capteur MSS (Multispectral Scanner) à bord de Landsat-1, lancé en 1972 (Anselme et Gadal, 2008), dont la résolution variait en X et en Y et valait respectivement 55 m et 79 m.

De nos jours, le satellite Pleiades-1A par exemple, lancé en Décembre 2011, est équipé d'un capteur multispectral et d'un capteur panchromatique opérant à haute et très haute résolutions spatiales. Il enregistre des images dont la résolution est de 2 m en mode multispectral et 0.5 m en mode panchromatique.

La résolution spatiale des capteurs embarqués dans des avions est bien plus fine que celles des satellites à haute et très haute résolutions spatiales, elle peut en effet atteindre l'ordre du décimètre.

Ces modes d'acquisition dépendent fortement des conditions extérieures pour la réalisation des missions et l'usage des satellites et des avions avec capteurs pour l'acquisition de données est soumis à certains inconvénients majeurs limitant la réalisation pratique de ces prises de données.

En effet, les altitudes de vol de ces deux types d'engins sont très hautes et ainsi, lorsque la couverture nuageuse est importante, cela altèrera la qualité du résultat. De plus, le coût de ces prises de données peut s'avérer très élevé.

Par ailleurs, le protocole d'acquisition doit être adapté à l'objectif de ces missions. Il faut notamment adapter les résolutions spatiale, temporelle, radiométrique et spectrale dont nous rappelons les définitions à l'Annexe 1. Notons que dans le cadre de notre étude, seules les résolutions spectrale et radiométrique constituent des points importants à maîtriser.

De nombreux paramètres environnementaux interviennent notamment lors de la prise de données réalisée en milieu montagneux, en particulier sur un glacier.

La couverture rocheuse du glacier, par exemple, peut constituer un paramètre à la fois positif et négatif. L'hétérogénéité provoquée par les blocs rocheux contribue au bon fonctionnement des algorithmes de détection des points homologues. Cependant, cette présence peut aussi rendre la délimitation du glacier plus difficile.

Autre paramètre négatif, les ombres portées par le relief alentour qui altèrent la reconstruction photogrammétrique.

Les altitudes auxquelles opèrent les avions et les satellites pour l'acquisition de données en photogrammétrie les rendent dépendant de la couverture nuageuse pouvant contaminer le résultat.

Les hélicoptères peuvent quant à eux voler à une plus faible hauteur et se caractérisent par une taille qui leur permet d'opérer plus aisément en milieux montagneux. Ils représentent donc un moyen d'acquisition de données approprié dans ce type d'environnement. Néanmoins, ils se trouveront limités par les dimensions d'un cirque glaciaire ou d'un glacier de petite taille tel que celui du *Travignolo*.

Les données obtenues à l'aide de ces méthodes classiques d'acquisition ne sont donc pas adaptées aux reconstructions photogrammétriques des petits glaciers de montagne. En effet, la résolution à laquelle les clichés sont produits influence les précisions planimétrique et altimétrique du résultat.

Comme nous l'avons souligné à la section 1.2.4, ces glaciers ont une dynamique imposant aux reconstructions photogrammétriques une résolution permettant de mettre en évidence des modifications de la géométrie de la surface du glacier de l'ordre de 14 cm par année (Rossini *et al.*, 2018).

Néanmoins, afin d'analyser la tendance générale de l'évolution des glaciers, il peut s'avérer intéressant de prendre en compte un laps de temps plus long entre deux reconstructions, par exemple une durée de cinq ans ou lustre voire une décennie.

Nous proposons donc d'utiliser une solution adaptée à notre problème. Celle-ci est d'ailleurs de plus en plus souvent adoptée par les géomètres et les scientifiques. Il s'agit de l'acquisition des images numériques à l'aide d'un appareil photographique numérique monté à bord d'un drone.

## 3.2 Place du drone dans l'acquisition des données

L'usage du drone peut s'avérer très utile car la faible hauteur de vol et la qualité de la caméra utilisée permettent d'obtenir un résultat à très haute résolution spatiale (inférieure à 5 cm). Par ailleurs, le poids de l'appareil et son faible coût d'acquisition permettent une utilisation à très haute résolution temporelle également.

Au cours des dernières années une nouvelle terminologie de « photogrammétrie par véhicule aérien sans pilote », incluant les drones, a vu le jour dans la littérature (Eisenbeiss, 2008). Elle décrit une plateforme de mesure photogrammétrique opérant de façon (semi)autonome et sans présence de pilote dans le véhicule.

Cette plateforme est équipée d'un système de mesure photogrammétrique incluant de façon non-restrictive un système de caméra, de petite ou moyenne taille, à système thermique ou infrarouge. Les drones actuels permettent l'enregistrement et le suivi de leur trajectoire dans un système de coordonnées. Ainsi, la « photogrammétrie par véhicule aérien sans pilote » peut être considérée comme un nouvel outil de mesure photogrammétrique (Eisenbeiss, 2009).

## 3.3 Types de drone et usage respectif

Les drones peuvent être classés en 4 catégories en fonction de leur taille et de leur puissance. Ce sont ces deux caractéristiques qui distinguent la charge de portage, leur hauteur de vol, leur zone d'action, ... et qui en définissent l'usage (Andreson *et* Gaston, 2013).

### 3.3.1 Drones larges et moyens

Les drones de type large (Figure 9) ont la plus grande taille, ils sont adaptés du monde militaire et de surveillance du territoire (feux de forêt, par exemple). Ce type de drone requiert une logistique très importante, un personnel spécialisé et des infrastructures particulières comme une piste de décollage. L'utilisation de ce type de drone est donc fort onéreuse.

Un drone de type large est capable de couvrir une zone de mission de 500 km et d'effectuer des vols d'une durée pouvant atteindre 2 jours à une altitude de vol de 3 à 20 km de haut. Ils peuvent être chargés de 200 kg de matériel.

Les drones de type moyen (Figure 10) peuvent couvrir la même zone que les drones de type large mais leur autonomie n'est que de 10 h environ. Ces drones volent à une altitude inférieure ou égale à 4 km.



Figure 9 : Ikhana - Drone de type large utilisé pour la surveillance des feux de forêt  
(Source : NASA, 2009)



Figure 10 : Sierra - Drone de type moyen  
(Source : NASA, 2010)

### 3.3.2 Drones de petites tailles

Un drone est de petite taille s'il pèse moins de 20 kg et si son autonomie n'est que de quelques heures seulement. On retrouve parmi ces drones 3 types différents en fonction de leur poids et puissance. Nous les décrivons ci-dessous.

#### 3.3.2.1 Drones à voilure fixe

Les drones à voilure fixe (Figure 11) sont constitués d'une aile composée de mousse densifiée propulsée par une hélice. L'aile mesure généralement de 1 à 3 m d'envergure et les décollages sont effectués par lancé manuel, ou catapultés par un élastique. L'atterrissage est réalisé par un glissement au sol contrôlé.

La vitesse de vol de ce type de drones est plus élevée que celle des drones à rotors (voir 3.3.2.2). Tout comme pour les drones de type militaire (voir ci-dessus), leur trajet est programmé au préalable par ordinateur et effectué par pilotage automatique suivant des points définis (*way-points*) et localisés par GPS.

#### 3.3.2.2 Drones à rotors

La principale différence entre ce type de drones et ceux à voilure fixe est leur capacité à réaliser des vols stationnaires. Deux types de conception existent pour ces drones. La première est caractérisée par des hélices placées autour d'un corps central sur lequel est fixée la charge, par exemple un appareil photo. La seconde conception possible est un arrangement des hélices sur des bras dont le nombre peut varier de deux à huit.

Ces drones peuvent être pilotés plus aisément que les drones à voilure fixe. Le suivi d'une trajectoire en vol automatique suivant un itinéraire prédéfini par ordinateur est aussi possible. Ils peuvent également être pilotés par commande.

Les drones à rotor (Figure 12) présentent plusieurs avantages par rapport aux voilures fixes. L'utilisation de plusieurs hélices permet un pilotage beaucoup plus précis et une meilleure stabilité durant le vol. Cela permet de fournir de meilleures données pour des usages scientifiques comme celui du suivi photogrammétrique d'un glacier à des fins glaciologiques et climatologiques.





Figure 11 : eBee - Drone à voilure fixe  
(Source : senseFly, 2017)



Figure 12 : DJI Phantom : Drone à rotor  
(Source : DJI, 2016)

### 3.3.2.3 Drones de nouvelles classes

Certains domaines, tant militaires que techniques ou scientifiques, nécessitent l'utilisation de drones spécialement conçus pour une utilisation spécifique, par exemple dans des lieux où d'autres types de drones créeraient des nuisances sonores trop importantes, par exemple pour l'exploration de zones ennemies. Ils peuvent alors avoir la forme et la taille nécessaire à l'application pour laquelle ils sont dédiés. Le *SmartBird* (Figure 13) est un drone en forme d'oiseau mesurant 1.5 m et dont l'envergure est de 2 m. Son poids inférieur à 500 g le rend inoffensif s'il venait à tomber. Le nano-drone *Nano-Hummingbird UAV* (Figure 14) est un drone utilisé dans le monde militaire mesure 15 cm et ne pèse que 15 g. Son poids et sa taille le rendent très manœuvrable et discret pour réaliser des missions d'observation.



Figure 13 : SmartBird  
(Source : www.festo.com)



Figure 14 : Nano-Hummingbird  
(Source : www.airforce-technology.com)

## 3.4 Législation

D'un point de vue légal, l'utilisation d'un drone en Belgique implique bien entendu de se conformer à un ensemble de dispositions (Arrêté royal relatif à l'utilisation des aéronefs télépilotes dans l'espace aérien belge, 2016). Les exigences auxquelles il faut satisfaire pour utiliser un drone dépendent du poids du drone et de l'endroit souhaité pour le faire voler.

L'arrêté royal distingue trois classes (SPF Mobilité, 2016):

- une classe relative à l'usage privé qui concerne des drones de moins de 1 kg volant au-dessus d'un terrain privé ;
- une classe 2 qui concerne des drones de moins de 5 kg volant sans dépasser une hauteur de 45 m hors des espaces aériens contrôlés, des villes et des communes, sans survoler des personnes ;
- une classe 1 concernant tous les autres cas.

Une licence de télépilote permet d'utiliser des drones de classe 1 et 2.

Etant donné que le lieu de notre travail expérimental est situé en Italie, nous avons inclus à l'Annexe 2.1 les dispositions de la législation italienne relative à l'utilisation des drones dans ce pays et fourni par la même occasion une comparaison entre les dispositions réglementaires italiennes et belges.

### 3.5 Conclusion

Les éléments cités ci-dessus nous montrent que l'usage du drone pour des missions scientifiques n'en est encore qu'à l'exploration des étendues possibles rendues par ce type d'engin. L'usage du drone en milieu glaciaire est très récent et ne cesse de se développer. Il a déjà permis d'estimer la vitesse d'écoulement de glacier (Immerzeel *et al.*, 2014), l'épaisseur au pic d'accumulation neigeuse (De Michele *et al.*, 2016), l'élaboration de technique et méthode pour cartographier un manteau neigeux et la comparaison de précision obtenue par rapport à des données satellitaires (Marti *et al.*, 2016),...

Cependant, aucune de ces études n'a établi de protocole clair assurant la géométrie de la modélisation et la répétabilité du procédé afin de réaliser une analyse diachronique à long terme (plusieurs années). Dans ce cadre, la méthode proposée ci-dessous tente d'être innovante.

## 4 Présentation du projet

Notre travail est un travail de photogrammétrie dans une région à fort relief dont nous désirons obtenir une modélisation de la surface tridimensionnelle. Il s'agit de la surface du Glacier du *Travignolo* en Italie dans les Dolomites.

La photogrammétrie permet de réaliser cette modélisation à l'aide de photographies aériennes qui peuvent être enregistrées par des moyens classiques représentés par les avions, hélicoptères et satellites ou encore, depuis la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, par l'utilisation de drones.

L'arrivée sur le marché de drones bon marché a permis de faciliter les prises de vue et, par conséquent, de réaliser plus aisément une modélisation de la surface des glaciers permettant de suivre leur évolution dans le temps.

Néanmoins, une revue détaillée de la littérature tend à montrer que l'usage du drone pour des missions scientifiques n'en est encore qu'à l'exploration des applications rendues possibles par ce type d'engin. En milieu glaciaire, il a déjà permis d'estimer la vitesse d'écoulement de glaciers (Immerzeel *et al.*, 2014), l'épaisseur au pic d'accumulation neigeuse (De Michele *et al.*, 2016), l'élaboration de techniques et méthodes pour cartographier un manteau neigeux et la comparaison de précision obtenue par rapport à des données satellitaires (Marti *et al.*, 2016), etc.

Cependant, aucune de ces études n'a établi de protocole clair assurant la géométrie de la modélisation et la répétabilité du procédé afin de réaliser une analyse diachronique à long terme (plusieurs années). Dans ce cadre, la méthode proposée ci-dessous tente d'être innovante.

Le travail réalisé a consisté à mettre au point de façon originale un protocole destiné à évaluer si le drone est un moyen d'acquisition de données efficient en milieu montagneux, plus précisément dans le cadre d'un petit glacier.

La réalisation sur le terrain de ce protocole doit permettre la reproductibilité du lever photogrammétrique à des fins de comparaison du glacier de montagne en vue de suivre la dynamique de son évolution.

# Hypothèses

---

Pour rappel, la question de recherche orientant ce mémoire est la suivante :

**« Le drone est-il un moyen d'acquisition de données efficient en milieu montagneux, plus précisément pour l'élaboration d'un protocole de lever photogrammétrique, reproductible à des fins de comparaison, d'un glacier de montagne? »**

L'état de l'art bibliographique décrit précédemment permet alors de poser les hypothèses suivantes :

**H1 :** « *Le drone fournit des données de qualité suffisante dans le cadre d'une reconstruction photogrammétrique de glacier de montagne.* »

La **qualité suffisante** dans le cadre d'un lever photogrammétrique est définie par :

- la maîtrise du drone du point de vue de :
  - sa trajectoire ;
  - la hauteur de vol ;
  - la vitesse de vol ;
  - la prise des clichés
  - la précision de l'appareil photo;
- des images :
  - riches en détails ;
  - de résolution suffisamment fine ;
- la reconstruction qui doit être:
  - spatialement homogène au départ des clichés fournis ;
  - de précision spatiale suffisante par rapport à la dynamique du phénomène observé.

**H2:** « *Le protocole de lever photogrammétrique d'un glacier de montagne utilisant le drone en tant que moyen d'acquisition de données est reproductible en vue d'établir un suivi du glacier au cours du temps.* »

**La reproductibilité** du protocole établi signifie que ce dernier peut être réitéré avec les mêmes conditions expérimentales. L'objectif étant de réaliser un suivi du glacier par répétition de ce lever photogrammétrique dans une période de l'ordre de 5 ans environ.

# Développements théoriques

---

Ce chapitre a pour but de présenter de façon théorique le protocole d'acquisition de données en milieu glaciaire développé pour les petits glaciers en utilisant le drone comme moyen d'acquisition de ces données. L'application de ce protocole au cas du Glacier *Travignolo* permettra par la suite de répondre aux hypothèses de recherches dressées au chapitre précédent.

*« Le protocole d'expérimentation regroupe la description des conditions et du déroulement d'une expérience ou d'un test. La description doit être suffisamment claire afin que l'expérience puisse être reproduite à l'identique et il doit faire l'objet d'une analyse critique pour notamment détecter d'éventuels biais. »* (Bernard, 2009).

Pour rappel, l'objectif de notre travail est de créer un modèle numérique de surface du glacier à l'aide de clichés pris par drone.

Une première étape, réalisée avant la mission sur le terrain, a consisté à définir les différents paramètres nécessaires à l'acquisition des images par le drone. Cette partie est primordiale car des données de médiocre qualité engendreront un résultat de mauvaise qualité voire un échec de la reconstitution du relief. Il est important de noter que les paramètres ont été déterminés au préalable en laboratoire avant de subir une validation lors de la mission sur le glacier.

Nous avons défini les éléments suivants :

- l'élaboration du plan d'acquisition des images par le drone ;
- les paramètres photographiques ;
- les paramètres de vol.

Lors de la mission sur le glacier, nous avons procédé en tout premier lieu à la mise au point et à la réalisation des techniques topographiques nécessaires au géo-référencement et au traitement ultérieur des données par le logiciel utilisé pour la reconstruction tridimensionnelle.

Les techniques à mettre au point ont été les suivantes :

- choix des stations de référence et cheminement ;
- cibles et lever topographique ;
- géo-référencement.

Au retour de notre mission, nous avons procédé à la reconstruction tridimensionnelle du glacier au départ des clichés acquis sur le terrain de la façon suivante :

- sélection des clichés ;
- utilisation du logiciel ContextCapture.

# 1 Paramètres d'acquisition d'images

## 1.1 Elaboration du plan d'acquisition d'images

Le plan d'acquisition des images consiste à déterminer :

- le type de vol,
- la finesse de détails des images requis pour le travail et
- le recouvrement nécessaire entre les prises de vue afin d'obtenir une couverture d'images permettant d'observer sur un nombre suffisant de clichés voisins le même point.

Il est important de préciser que la qualité de l'image est définie par un contraste élevé et par l'absence de flou, de bruit, de distorsions et de saturation de pixels (Pix4D, 2018a).

Le plan d'acquisition va définir le chemin suivi par le drone, la hauteur de vol à adopter afin de respecter le *Ground Sampling Distance* (GSD) désiré et le recouvrement entre les images permettant la reconstruction photogrammétrique.

### 1.1.1 Type de plan de vol

Le type de plan de vol est déterminé par le chemin suivi par le drone pour la prise de vue. Il dépend du contexte dans lequel la mission se déroule tout en suivant un canevas général comme le montre la Figure 15. Ce canevas devra être adapté aux conditions particulières du lever. Dans le cas d'un environnement montagneux, dans lequel la neige est très présente et l'hétérogénéité du terrain est assez faible, il faut veiller à avoir un haut taux de recouvrement, tant longitudinal que transversal, et veiller à bien définir les paramètres d'exposition de l'appareil photo afin d'obtenir le plus de contraste possible. Pour obtenir ces images radiométriquement comparables, il est préférable de voler lorsque la zone d'intérêt ne présente pas de variations d'éclairement trop importantes liées à la présence ou à l'absence de nuages.

La surface du glacier est trop grande pour réaliser un lever complet en un seul vol. En effet, la batterie du drone utilisé permet un maximum de 25 minutes de vol en adaptant la marge de sécurité de 5 minutes. Cette contrainte ajoute une difficulté supplémentaire lors du plan de vol. Il faut en effet que les différentes zones puissent être rattachées lors de la reconstruction du modèle photogrammétrique. Pour que cela soit possible, les différents vols doivent se recouvrir suffisamment pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur les orientations relatives entre les deux séries de données (Figures 16 et 17).

De plus, afin d'avoir un rendu le plus homogène possible au niveau radiométrique, il faut s'assurer que les conditions d'éclairement dans lesquelles les deux prises de données sont réalisées soient les plus identiques et homogènes possible.

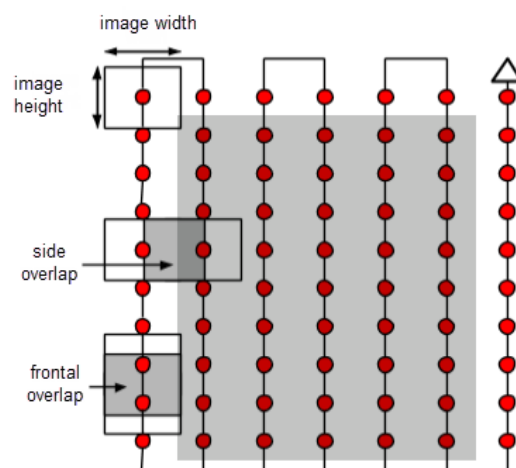


Figure 15 : Plan d'acquisition idéal - cas général  
(Source : Pix4D.com)

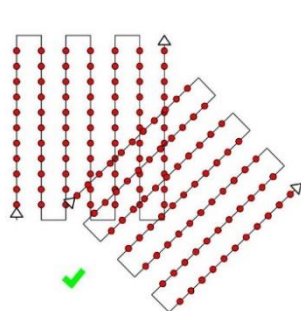


Figure 16 : Recouvrement suffisant entre deux vols  
(Source : Pix4D.com)

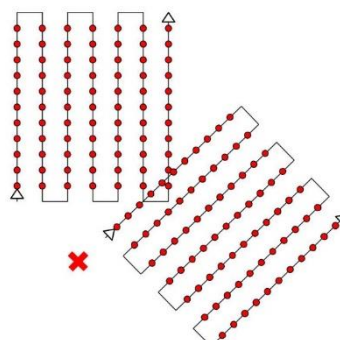
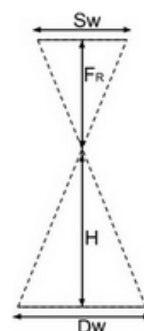


Figure 17 : Recouvrement insuffisant entre deux vols  
(Source : Pix4D.com)

### 1.1.2 Détermination de la hauteur de vol

La hauteur de vol (Figure 18) du drone est définie au départ du GSD sachant que légalement, en Italie, il est interdit de dépasser 70 m *Above Ground Level* (AGL) pour un usage privé et 150 m pour un usage professionnel (Annexe 2.1). Ce dernier correspond à la distance au sol séparant le centre de deux pixels consécutifs.

Pour un GSD donné, il est possible de déterminer la hauteur de vol au départ de la longueur focale, de la taille du capteur de l'appareil photo embarqué par le drone et de la taille de l'image formée.



La détermination du GSD pour la réalisation de la méthode est décrite aux sections 1.2.2 et 1.3.1.2.

Figure 18 : Altitude de vol  
(Source : Pix4D.com)

### 1.1.3 Taux de recouvrement entre les prises de vue

La photogrammétrie est basée sur la stéréoscopie, c'est-à-dire sur la reconstitution du relief au départ de plusieurs points de vue d'une même scène. Dans des milieux complexes comme celui du glacier dans lequel la mission s'est déroulée, il est conseillé d'avoir un haut taux de recouvrement entre les images (Figure 19) (Pix4D, 2018b). Ce taux de recouvrement est obtenu en fonction de la fréquence à laquelle l'obturateur de l'appareil photo s'ouvrira, de la vitesse de vol du drone, du champ de vue de la caméra et de la hauteur de vol.

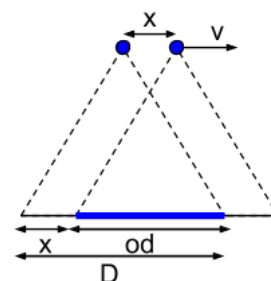


Figure 19 : Recouvrement longitudinal  
(Source : Pix4D.com)

## 1.2 Paramètres de prise de vue

La reconstruction photogrammétrique par drone se fait au départ d'images enregistrées par des appareils photo numérique pouvant être de différents types tels qu'un appareil photo reflex *full-frame*, d'un compact plus léger ou encore d'une caméra type « *action-cam* ». Notons qu'au plus l'appareil est perfectionné, plus son poids augmente, ce qui nécessite l'utilisation d'une plateforme pouvant supporter cette charge plus importante.

La littérature permet d'effectuer une série de recommandations quant à la prise des clichés afin d'être dans les meilleures conditions pour une acquisition de données de qualité (Dandois *et al.*, 2015):

- Il faut préférer l'éclairage diffus de la scène afin d'éviter la coexistence d'ombres portées et de zones subissant l'éclairage direct du soleil ;
- L'éclairage direct peut être la source de saturation de l'image dans le cas où la scène photographiée réfléchit fortement la lumière comme cela sera le cas sur le glacier ;
- Les clichés seront effectués avec la meilleure résolution de l'appareil utilisé afin de produire un modèle 3D le plus précis possible et une orthoimage avec le maximum de détails.

Les prises de vue effectuées dépendent de deux éléments : l'appareil de prises de vue composé du boîtier et de l'objectif et les réglages de la caméra.

### 1.2.1 Boîtier et objectif

Le choix du boîtier et de l'objectif utilisés pour la réalisation d'une mission photogrammétrique dépendent des conditions dans lesquelles elle sera réalisée. Les *action-cam* sont utilisées préférentiellement pour l'imagerie à basse altitude car elles proposent le plus grand angle de vue et la meilleure résolution. Concernant la longueur focale des objectifs, lorsqu'on vole à haute altitude, il faut avoir une focale assez longue pour éviter les déformations telles que celles créées par les objectifs *fish-eyes* par exemple.

Le drone utilisé lors de la mission ne permet pas de changer de caméra. Nous avons donc utilisé la caméra montée sur le drone conçue par DJI.

#### 1.2.1.1 Dimension du capteur

Le capteur installé dans la nacelle du drone DJI Phantom 4 pro est un capteur 1 pouce mesurant 8.8 × 13.2 mm.

La dénomination 1" (correspondant à 2.54 cm) ne donne pas la dimension du capteur, que ce soit sa longueur (13.2 mm), sa largeur (8.8 mm) ni même sa diagonale (15.9 mm). Cette dénomination est d'origine historique. Les fabricants d'écrans à tube cathodique exprimaient la dimension de ces écrans en fonction du diamètre du tube cathodique. Un tube cathodique de 1" de diamètre permet de créer une image de 15.9 mm de diagonale (Drouet, 2017).

#### 1.2.1.2 Focale et focale équivalente

Les spécifications techniques du manuel du drone précisent que sa caméra a une focale de 8.8 mm et que la focale équivalente est de 24 mm.

L'expression « focale équivalente » est utilisée en photographie pour exprimer l'angle de champ de l'objectif. Par le passé, une très grande majorité des photos étaient enregistrées sur des films/négatifs de 36 mm. Il est possible de déterminer si l'objectif était un objectif grand-angle ou un téléobjectif simplement par sa focale. Aujourd'hui, les tailles des capteurs n'étant plus de 24 × 36 mm, à l'exception des capteurs *full-frame*, cette identification du type d'objectif par sa focale n'est plus valide. Il faut dès lors préférer l'expression *focale équivalente*, qui permet de se ramener à cette identification rapide de l'angle de champ.

#### 1.2.1.3 Exposition

La qualité de l'information enregistrée sur les prises de vue dépendra de l'exposition. Lorsqu'elle est correctement ajustée, l'image ne sera pas bruitée et son contraste sera important.

L'exposition d'une photo se règle par 3 paramètres :

- la vitesse d'obturation : correspond au temps durant lequel le diaphragme est ouvert ;
- l'ouverture du diaphragme : correspond au diamètre d'ouverture du diaphragme ;
- l'ISO : correspond à la sensibilité du capteur à la lumière.

Les deux premiers paramètres sont des réglages mécaniques qui peuvent engendrer un flou sur l'image produite. Ils sont détaillés au point 1.3.4.1 Flou. Le troisième paramètre est électronique dans le cas des capteurs numériques et un mauvais réglage peut créer un bruit dans la prise de vue enregistrée.

#### 1.2.1.4 Profondeur de champ

L'ouverture du diaphragme lors de la prise de vue permet de faire rentrer plus ou moins de lumière dans l'appareil et influence aussi la profondeur de champ. Cette dernière correspond à la zone de netteté de l'image, soit la distance sur laquelle l'image est nette. C'est-à-dire entre la distance maximale (identifié DP dans la formule 6) et minimale (identifié PP dans la formule



6) dans lequel l'objet produira une image nette. Elle dépend de la focale de l'objectif, de la distance de mise au point et du cercle de confusion (ou diffusion).

Pour calculer la profondeur de champ, on utilise la focale du capteur et le cercle de confusion, correspondant à la taille limite séparant ce qui est flou de ce qui est net (Breillat, 2010), soit :

$$\begin{cases} c = \frac{D}{1730} [m] \\ H = \frac{f^2}{c * N} [m] \end{cases} \text{ tel que } \begin{cases} PP = \frac{P * H}{H + P} [m] \\ DP = \frac{P * H}{H - P} [m] \end{cases} \quad (4)$$

où :

- c : cercle de confusion [m]
- D : diagonale du capteur [m]
- f : distance focale [m]
- H : distance hyperfocale [m]
- N : nombre d'ouverture [/]
- P : distance de mise au point [m]
- PP : premier plan[m]
- DP : dernier plan [m]

#### 1.2.1.5 Angle de champ

Pour les capteurs actuels, de taille variable, il est possible de calculer l'angle de champ à l'aide de la focale de l'objectif, soit :

$$FoV = 2 * \text{atan} \left( \frac{\text{frame size}}{2 * \text{focal} * (m + 1)} \right) \quad (5)$$

$$m = \frac{\text{focal}}{\text{focus distance} - \text{focal}} \quad (6)$$

Dans notre cas, on peut assimiler  $m = 0$  car la hauteur de vol est grande et la distance de mise au point (*focus distance*) sera fixée à l'infini.

On obtient donc que le champ de vue :

- est de 53.13° sur le petit côté (8.8 mm) ;
- est de 73.73° sur le grand côté (13.2 mm) ;
- est de 84.06° sur la diagonale (15.9 mm).

Comme l'angle de champ est supérieur à 45°, l'objectif monté sur le drone est un objectif de type *grand-angle* (Louiche, 2012).

#### 1.2.2 Ground Sampling Distance

Une fois l'angle de vue connu, il faut déterminer le GSD. Il correspond à la distance au sol séparant le centre de deux pixels jointifs. Le GSD peut être calculé à l'aide de la formule :

$$GSD = \frac{H * S_{det} * 100}{I_{m_W} * f}; [m/pixel] \quad (7)$$

avec :

- H : la hauteur de vol [m],
- $S_{det}$  : la hauteur du capteur [mm],
- $I_{m_W}$  : la longueur de l'image [pixel],
- f : la focale [mm].

## 1.3 Paramètres de vol

### 1.3.1 Hauteur de vol

La situation de la mission ne permet que peu d'erreurs concernant le matériel utilisé. Pour s'assurer les conditions les plus favorables à la réalisation du travail, nous allons, dans chaque partie traitée ci-dessous, étudier le cas le plus défavorable pour la mise en œuvre de la mission.

#### 1.3.1.1 Surface à photographier

La surface enregistrée par une image vaut  $A = l * L$  ( $L$  et  $l$ , longueur et largeur au sol enregistrées sur une photo) lorsque la surface photographiée est parallèle au plan de la photographie. Ainsi, nous allons étudier l'effet de la pente sur la surface photographiée par le drone. L'aire observée par chaque photo dans le cas d'une pente d'un angle  $\alpha$  vaut  $A = \frac{l * L}{\cos(\alpha)}$ .

L'aire observée augmente donc lorsque la pente augmente. La pente maximale rencontrée sur le glacier est d'environ  $45^\circ$ . L'aire capturée si l'entièreté du glacier était inclinée serait, pour chaque photo,  $A' = L * l * \sqrt{2} = A * \sqrt{2}$ .

Cela signifie que le cas le plus défavorable, c'est-à-dire maximisant le nombre d'images à enregistrer, se présente lorsque la zone à relever est parallèle au plan de la prise de vue.

Les bords latéraux du glacier du Travignolo sont distants de maximum 400 m. En considérant le glacier comme un rectangle de largeur correspondant à cette distance et de longueur de 500 m, la surface couverte par le glacier vaut  $400 \times 500 = 200\,000 \text{ m}^2$ . La hauteur de vol et le taux de recouvrement des prises de vue vont déterminer le nombre de photos nécessaires pour couvrir cette surface.

#### 1.3.1.2 Volume de données

Les images seront stockées sur une carte mémoire dont la capacité détermine le nombre d'images enregistrables. Connaissant la surface couverte par une photo à chaque altitude de vol en fixant le taux de recouvrement, il est possible de calculer le volume de données créé par les vols effectués aux diverses hauteurs de vol. Lorsque la hauteur de vol augmente, le GSD augmente également. Ainsi, à une hauteur par rapport au sol de 80 m, le GSD est de 2.19 cm/pixel, ce qui permet d'enregistrer l'information à une précision suffisante (De Michele *et al.*, 2016).

Le taux de recouvrement est également important pour la précision de la reconstitution du modèle photogrammétrique. Un recouvrement longitudinal supérieur à 80 % et transversal supérieur à 60 % sont conseillés (De Michele *et al.*, 2016). Ce sont donc ces valeurs qui ont été choisies.

Le nombre de prises de vue et par conséquent le volume de données à enregistrer va diminuer lorsque l'altitude de vol augmentera.

### 1.3.2 Hauteur minimale de vol

Le volume de données à enregistrer lors d'un vol effectué à 5 m de hauteur est supérieur à 500 Go, ce qui n'est pas enregistrable sur une carte mémoire externe classique telle qu'utilisée pour la mission. Cette dernière a un volume de données enregistrable de 16 Go. Cette limite de volume nous impose de voler à une altitude minimale de 30 m (Tableau 1).

### 1.3.3 Distance à parcourir

La distance à parcourir lors du vol dépendra de la hauteur de vol car la surface observée sur une image variera avec la hauteur. Pour un recouvrement latéral de 60 %, l'interdistance entre deux lignes de vol voisines à une hauteur de vol de 30 m sera de  $0.4 \times 30.08 = 12.032 \text{ m}$  (Tableau 1), et ce pour chaque nouvelle ligne effectuée par le drone. Pour rappel, comme nous l'avons cité à la section 1.3.1.1, le glacier mesure 500 m de longueur et 400 m de largeur. Il

faudra donc effectuer 33 déplacements latéraux si les lignes de vol sont parallèles à la ligne de pente maximale du glacier.

La distance totale à parcourir, calculée à partir de la formule ci-dessous pour une hauteur de vol de 30 m, sera alors de  $33 \times (12.032 + 500) = 16\,897.065$  m.

De façon générale, la distance totale à parcourir est donnée par la formule :

$$Distance = Arrondi_{supp} \left[ \frac{400}{0.4 * l} \right] * [(0.4 * l) + 500]; [m] \quad (8)$$

### 1.3.4 Vitesse de vol

La vitesse maximale de déplacement du drone est notamment limitée par l'apparition de flou sur les images. C'est pourquoi, nous allons tout d'abord fournir quelques détails concernant l'apparition de ce flou et son impact sur la vitesse.

#### 1.3.4.1 Flou

##### 1.3.4.1.1 Flou lié à la profondeur de champ

Le calcul de la profondeur de champ ayant été réalisé, on remarque qu'aucun flou ne sera créé par la profondeur de champ. En effet, dès 10 m d'altitude de vol, le dernier plan net se situe à une distance infinie. Cela s'explique par l'utilisation de l'objectif grand angle à grand nombre d'ouverture.

##### 1.3.4.1.2 Flou produit par le déplacement du drone

La vitesse d'obturation limitera la vitesse de déplacement du drone. La limitation apportée par le volume de données exprimé à la section 1.3.1.2 nous donne une altitude minimale de vol de 30 m par rapport à la surface du glacier. À cette altitude, les images enregistrées couvrant une surface de 2 413 m<sup>2</sup> ont un GSD de 0.82 cm/pixel (pour rappel, voir la formule (9) à la section 1.2.2 ci-dessus et le Tableau 1).

La vitesse horizontale peut créer un flou sur l'image si le déplacement est trop important durant le temps d'ouverture du diaphragme. En conditions normales d'éclairement, on peut supposer qu'une sensibilité d'ISO-400 et un temps de pose de 1/125 s pour chaque photo permettront de réaliser des prises de vue de bonne qualité.

Le flou provoqué par le déplacement du drone est perceptible si un même point au sol est enregistré sur deux pixels voisins. Le flou créé sur une photo est calculable par la formule suivante (O'Connor *et al.*, 2017) :

$$Flou = \frac{V * t}{GSD}; [pixel] \quad (9)$$

Lorsque le flou est inférieur à 1 pixel, il n'est pas perceptible sur l'image. Lorsqu'il est supérieur à 1 pixel, l'image obtenue est floutée et de moins bonne qualité.

#### 1.3.4.2 Vitesses

##### 1.3.4.2.1 Vitesse horizontale

La vitesse horizontale maximale correspond à la limite pour laquelle le flou créé par le déplacement du drone est égal à 1. Il suffira de faire voler le drone à une vitesse inférieure pour que le flou ne soit pas visible sur les photos. On peut donc calculer :

$$V_{max} = \frac{GSD}{Flou * t} = \frac{GSD}{t}; [m/s] \quad (10)$$

#### 1.3.4.2.2 Vitesse verticale

La vitesse verticale du drone dépendra de la pente du glacier puisque nous avons décidé d'orienter les lignes de vol parallèlement à la ligne de plus grande pente (extension longitudinale du glacier). Pour une pente de  $45^\circ$  (pente moyenne rencontrée sur le glacier), la vitesse verticale sera égale à la vitesse horizontale.

Elle sera donnée par la formule suivante :

$$V_{\text{verticale}} = \text{tg}(\alpha) * V_{\text{horizontale}}; [m/s] \quad (11)$$

où  $\alpha$  correspond à la pente du glacier.

#### 1.3.4.3 Durée du vol

Grâce à la distance de vol en fonction de la hauteur choisie et à la vitesse maximale trouvée à la section 1.3.4.2.1, il est possible de déterminer la durée nécessaire pour effectuer le vol aux différentes hauteurs de vol.

La durée du vol est donnée par la formule :

$$\text{Temps}_{\text{vol}} = \frac{\text{Distance}}{V_{\text{max}}}; [s] \quad (12)$$

### 1.3.5 Synthèse et paramètres de vol

L'ensemble des paramètres calculés ci-dessus sont rassemblés dans le Tableau 1. On peut remarquer que le volume disponible sur la carte mémoire impose la hauteur supérieure à 30 m.

La durée de vol, quant à elle, est beaucoup plus contraignante sur la hauteur du vol. En effet, l'utilisation de 2 ou 3 batteries d'une autonomie de 20 min chacune permet seulement d'effectuer les vols à une hauteur minimale de 60 m au-dessus de la surface du glacier.

Enfin, pour s'assurer une marge de sécurité suffisante quant à l'autonomie du drone, nous avons préféré un vol à une hauteur de 80 m.

Ainsi, à cette hauteur de vol de 80 m, les valeurs des paramètres sont les suivantes:

- Largeur d'une photo : 80.01 m ;
- Longueur d'une photo : 120.01 m ;
- Surface couverte par la photo : 9 602 m<sup>2</sup> ;
- GSD : 2.19 cm/pixel ;
- Volume de données : 2.01 Go ;
- Distance totale à parcourir : 6 916.05 m ;
- Vitesse maximale : 2.737 m/s ;
- Durée de vol : 42 min.

Tableau 1 : Paramètres de vol et de prises de vue

<i>Hauteur de vol</i>	<i>Largeur d'une photo</i>	<i>Longueur d'une photo</i>	<i>Surface d'une photo</i>	<i>GSD</i>	<i>Premier plan</i>	<i>Dernier plan</i>	<i>Volume de données</i>	<i>Distance à parcourir</i>	$V_{max}$	$V_{max}$	<i>Durée du vol</i>
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m<sup>2</sup></i>	<i>cm/pixel</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>Go</i>	<i>m</i>	<i>m/s</i>	<i>Km/h</i>	<i>minutes</i>
5	5.01	7.52	37.675	0.14	2.666	40.201	510.95	100 400.80	0.175	0.630	9 561
10	10.03	15.04	150.851	0.27	3.634	∞	127.61	50 401.20	0.3375	1.215	2 488
15	15.04	22.56	339.302	0.41	4.135	∞	56.73	33 903.07	0.5125	1.845	1 102
20	22.00	33.00	726.000	0.55	4.441	∞	26.52	23 404.80	0.6875	2.475	567
30	30.08	45.12	1 357.210	0.82	4.797	∞	14.18	16 897.06	1.025	3.690	283
40	40.11	60.16	2 413.018	1.10	4.997	∞	7.98	12 901.10	1.375	4.950	156
50	50.13	75.20	3 769.776	1.37	5.124	∞	5.11	10 401.04	1.7125	6.165	101
60	60.16	90.24	5 428.838	1.64	5.213	∞	3.55	8 909.09	2.050	7.380	72
70	70.01	105.01	7 351.750	1.92	5.279	∞	2.62	7 920.06	2.400	8.640	55
80	80.01	120.01	9 602.000	2.19	5.329	∞	2.01	6 916.05	2.737	9.855	42

## 2 Lever topographique

Le lever topographique consiste à établir les coordonnées de points de la surface du sol ou d'objets particuliers le couvrant dans un système de coordonnées cartésien. Celui-ci peut être local lorsqu'il est défini de façon arbitraire par l'utilisateur ou global, permettant alors l'interopérabilité des données. Le passage d'un système local à un système global s'appelle le géo-référencement et est détaillé ci-dessous.

Le lever topographique s'établit par la réalisation d'un cheminement reliant des stations de références permettant par la suite d'effectuer le lever proprement dit. Dans notre cas, nous lèverons des cibles servant pour la reconstruction photogrammétrique et dont certaines matérialisent les stations d'un cheminement.

### 2.1 Détermination des coordonnées des stations de référence

#### 2.1.1 Stations de référence

La première étape du lever consiste à matérialiser un ensemble de stations de référence utilisées pour lever les cibles qui vont servir à la reconstruction photogrammétrique.

Nous avons défini trois stations de référence (REF\_1, REF\_2 et REF\_3) situées sur des affleurements rocheux stables du *bedrock* à proximité du glacier et au départ desquelles il sera possible de viser les cibles qui seront utilisées par la suite lors de l'établissement de la géométrie des prises de vue (orientations relative et absolue).

Ce réseau de stations, formant une polygonale à trois sommets, a été défini par visées à la station totale.

L'emplacement de ces stations doit respecter certaines contraintes autant que possible :

- les stations doivent être situées à équidistance l'une de l'autre ;
- la géométrie formée par l'ensemble du réseau de stations doit former un polygone régulier.

L'emplacement des stations doit permettre :

- le lever au prisme optique de l'ensemble de la zone ;
- la mesure de leur position à l'aide d'un récepteur GNSS ;
- les intervisées entre les stations pour permettre un ajustement par moindres-carrés ;
- d'éviter les visées hautes ou basses ;
- de retourner sur ces stations après une longue durée.

Ces conditions permettent d'augmenter la précision du calcul de la position des stations et éventuellement la reproduction du lever pour le contrôler ou ajouter des cibles.

#### 2.1.2 Cheminement

Le cheminement permet de déterminer les coordonnées des stations de référence, il consiste à mesurer les distances et les angles entre chaque station de référence.

Le cheminement peut être tendu, lorsque le point final est différent du point d'arrivée, ou en boucle, lorsque le point d'arrivée coïncide avec le point de départ.

Le cheminement fermé en boucle consiste à effectuer en fin de lever une visée vers le point de départ, de coordonnées connues (arbitrairement ou dans un système de référence connu), et de ne pas stationner deux fois sur une même station ; la visée de la station de référence vers la dernière station du cheminement étant réalisée au moment du tour d'horizon effectué sur cette station de référence.

Cette technique permet un gain de temps (Vandenbroeck et Willems, 2017) et a été appliquée lors la mission.

## 2.2 Détermination des coordonnées des cibles

### 2.2.1 Installation des cibles

Pour permettre la reconstruction photogrammétrique, des cibles ont été installées sur le terrain. Ces cibles doivent être visibles depuis au moins une des stations de référence établies lors du cheminement afin d'être levées à la station totale pour déterminer leur position. La répartition spatiale des cibles est importante pour la reconstruction photogrammétrique.

Une première série de cibles, rigides, placées sur le pourtour du glacier ont été forées dans la roche. Afin d'être visibles par le drone, elles ont été placées à l'horizontale. Lorsque les parois étaient inclinées, nous avons utilisé un système d'équerre pour attacher les cibles horizontalement.

Idéalement, la position de fixation de ces cibles doit rester identique dans le futur. Ceci afin de faciliter toute autre expérimentation nécessitant un géo-référencement du glacier concerné par notre étude. Ainsi, nous avons adopté des équerres et des cibles de dimensions et avec perforations standards dont les caractéristiques géométriques sont fournies au chapitre 5.

La position de chaque cible rigide sera utilisée comme paramètre contraignant lors de l'aérottriangulation photogrammétrique.

Une autre série de cibles, souples celles-ci, destinées à la validation de notre méthode ont été fixées à l'aide de pics de tente dans la neige et ont été enlevées à la fin de la mission. Leur dimension est semblable à celles des cibles rigides.

Les cibles de validation auront comme seul rôle de permettre de comparer l'altitude et la position planimétrique de la surface du glacier mesurée par technique topographique et l'altitude modélisée par la reconstruction photogrammétrique.

### 2.2.2 Lever des cibles

L'ensemble des cibles placées sur le terrain ont été levées à l'aide de la station totale, par double retournement ce qui a permis de s'affranchir d'erreurs détaillées à la section 2.3.

Leurs coordonnées locales ont été établies par méthode de points rayonnés après la mission.

Les équations déterminant les coordonnées des points visés sont les suivantes :

$$X = X_{station} + D_{oblique} * \sin(G) \quad (13)$$

$$Y = Y_{station} + D_{oblique} * \cos(G) \quad (14)$$

$$Z = Z_{station} + h_{station} - h_{prisme} + D_{oblique} * \cos(V) \quad (15)$$

La précision avec laquelle les cibles sont levées influencera l'aérottriangulation et le produit final de la reconstruction photogrammétrique.

## 2.3 Sources d'erreurs

L'incertitude sur la position des stations est définie par la précision des instruments utilisés. Dans notre cas, les sources d'erreurs sur la position des stations son principalement la station totale et son utilisation.

Les erreurs peuvent être de différentes sources :

- **environnementale** : cette erreur provient de changements dans l'environnement tels qu'une variation de pression atmosphérique durant la prise de mesure, de température, etc ;
- **personnelle** : l'erreur personnelle est due aux limitations de perception humaines comme l'acuité visuelle de l'opérateur ;
- **instrumentale** : cette erreur est liée à la qualité de fabrication de l'instrument employé. Dans le cas d'une station totale, comme celle employée lors de cette mission (Figure 31), ce type d'erreur se présente par exemple lorsque les axes ne sont pas parfaitement orthogonaux entre eux.

L'ensemble des sources d'erreurs citées ci-dessus peuvent également être classées selon leur type (Billen, 2017). Cette classification permettra de savoir s'il est possible de corriger ou non l'erreur commise.

Les types d'erreurs sont :

- **systématiques** : l'erreur systématique produit une déviation de la mesure par rapport à la valeur normalement mesurée (Université TELUQ, sd). Elles peuvent généralement être corrigées par des modèles de correction ;
- **grossières** : ce type d'erreur est à éviter. Il provient d'une utilisation non rigoureuse du matériel et ne peut se produire lors de travaux professionnels ;
- **aléatoires** : ces erreurs représentent la partie restante des erreurs possibles lorsqu'on a corrigé les erreurs systématiques et évité les erreurs grossières. Elles sont généralement faibles et peuvent être positives et négatives. Elles suivent une distribution normale. Pour se prémunir contre ce type d'erreurs, il faut effectuer un nombre important de mesures. La valeur centrale sera celle qui approche l'erreur aléatoire nulle.

Pour comprendre les sources d'erreurs qui peuvent se produire lors d'une mesure topographique, rappelons certains éléments caractéristiques de la station totale :

- La station totale est constituée de 3 axes perpendiculaires entre eux :
  - L'axe principal (identifié SA sur la Figure 20). Il doit être vertical et passer par le point levé situé sous la station.
  - L'axe secondaire (identifié KA sur la Figure 20), ou axe des tourillons. Il doit être perpendiculaire à l'axe principal.
  - L'axe optique (identifié ZA sur la Figure 20). Il doit balayer un plan vertical contenant l'axe principal et perpendiculaire à l'axe secondaire.
- La mesure de la distance effectuée par la station totale se base sur la mesure du déphasage entre une onde émise et celle réfléchi et détectée par l'appareil.

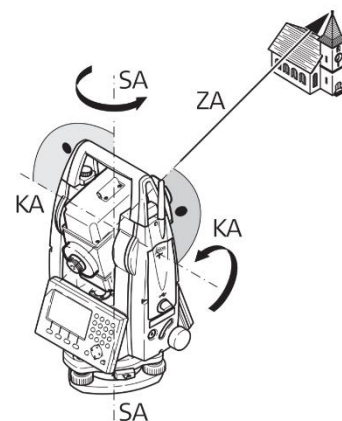


Figure 20 : Axes d'un théodolite  
(Source : Leica)

Les erreurs systématiques liées à la fabrication de l'instrument découlent d'une non-perpendicularité d'un ou plusieurs des axes.

Ces erreurs systématiques sont :

- l'erreur d'inclinaison ou de tourillonnement. Elle se produit lorsque l'axe secondaire n'est pas perpendiculaire à l'axe primaire ;
- l'erreur de collimation horizontale. Elle correspond à un défaut de perpendicularité entre l'axe des tourillons et l'axe optique ;



- l'erreur de collimation verticale. Elle représente une non-perpendicularité entre l'axe principal et l'axe optique.

Ces trois erreurs peuvent être corrigées en effectuant les mesures par double retournement. Ainsi, l'ensemble des visées effectuées sur le terrain, tant pour le cheminement que pour le lever des cibles a été réalisé en appliquant cette méthode.

Outre ces erreurs systématiques liées à un défaut de fabrication de l'instrument, une erreur systématique liée à la mesure de distance peut également se produire. Lors de la mesure, l'onde électromagnétique est influencée par le milieu qu'elle traverse. La mesure du déphasage servant au calcul de la distance est alors faussée. Si cette perturbation ralentit la vitesse de propagation de l'onde, par exemple, la distance mesurée est surestimée. La correction à appliquer correspond à un terme correctif dépendant de la température (notée  $T$  dans les équations ci-dessous, de la pression atmosphérique (notée  $P_{atm}$  dans les équations ci-dessous) et de l'humidité relative de l'air (notée  $H$  dans les équations ci-dessous).

Cette correction est formulée de façon suivante :

$$\Delta D = 283.04 - \left( \frac{0.29195 * P_{atm}}{1 + (a * T)} - \frac{4.126 * 10^{-4} * H}{(1 + (a * T) * 10^x)} \right) \quad (16)$$

$$x = 0.7857 + \left( \frac{7.5 * T}{237.3 + T} \right) \quad (17)$$

Enfin, une autre erreur peut apparaître. Il s'agit d'une erreur de fermeture liée à un déplacement de la station durant le lever topographique. Afin de mesurer ce déplacement, une visée de référence est réalisée avant le commencement des mesures et cette visée est réitérée pour terminer le lever. L'écart observé entre les deux visées est alors compensé au prorata du nombre de mesures réalisées. Dans le cas où les mesures sont nombreuses, il est conseillé de réaliser une visée vers la référence tous les 50 points mesurés.

## 2.4 Précision

Une fois la position des stations et des cibles déterminée, il est nécessaire de calculer la précision sur cette position. L'ajustement de l'aérotriangulation dépend des précisions sur chacune des cibles et de la qualité de la recherche de points homologues permettant entre autre l'orientation relative.

### 2.4.1 Cheminement

La précision du cheminement est calculée par propagation de variance des erreurs de mesures d'angles et de distances produites au cours du cheminement.

L'expression générale de la propagation de variances – covariances est la suivante :

$$\Sigma_y = J * \Sigma_x * J^T \quad (18)$$

où :

- $y$  est une fonction non-linéaire de  $x$  telle que  $\underline{\tilde{y}} = \underline{f}(\underline{\tilde{x}})$  ;
- $J$  est le Jacobien de  $f$  ;
- $\Sigma_x$  est la matrice de variance – covariance du vecteur  $\underline{\tilde{x}}$ .

### 2.4.2 Cibles

Lorsque la précision de la position des stations de référence obtenue lors du cheminement a été estimée, on peut appliquer la même méthode de propagation vers chacune des cibles. La précision de position des cibles dépendra alors de la précision avec laquelle la position de la

station de référence a été déterminée et de la précision de l'instrument utilisé pour viser ces cibles depuis cette station.

Cette précision est exploitée pour viser la cible considérée pour pondérer l'ajustement réalisé lors de l'aérotriangulation. Nous avons calculé la propagation de variance produite sur les stations du cheminement. Cette opération a été réalisée sur Matlab et le code est fourni à l'Annexe 3.1.

## 2.5 Positionnement au GNSS et géo-référencement

### 2.5.1 Mesure GNSS

La première étape du géo-référencement consiste à mettre en station un récepteur de type « *Global Navigation Satellite System* », appelé couramment récepteur GNSS, sur les stations de référence établies lors du cheminement afin de déterminer leurs coordonnées dans un système de projection.

Le positionnement d'un récepteur par GNSS se base sur le calcul de la distance séparant un récepteur de plusieurs (4 au minimum) satellites (Figure 21). La distance est calculée au départ du temps mis par un signal émis par le satellite et reçu par le récepteur.

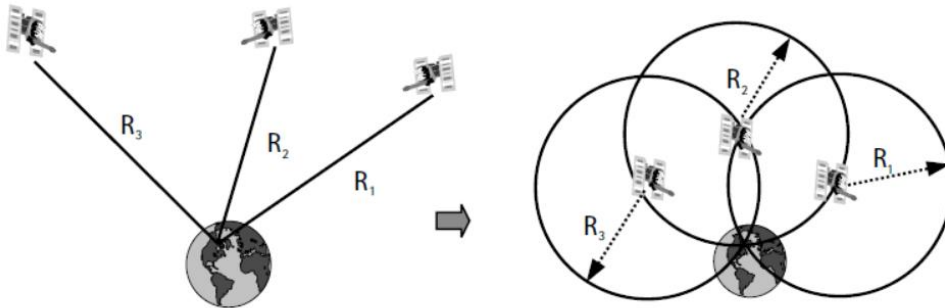


Figure 21 : Principe de la détermination de position par GNSS (Source : Warnant, 2016)

### Types d'observables

#### Code

Le signal émis par les satellites est un code transmis à l'aide d'ondes électromagnétiques porteuses. Les codes sont une séquence de durée définie de «0» et de «1», appelés *ships* (Figure 22), générés à une fréquence donnée. Ces *ships* modulent la phase (Figure 23) de l'onde et le récepteur reconstitue le code en analysant ces modulations. Une fois reconstitué, ce code permet au récepteur de déterminer la distance le séparant du satellite en mesurant le déphasage temporel entre la réplique du code émis par le satellite générée par le récepteur (de façon synchrone) et le code émis par le satellite et reçu par le récepteur.

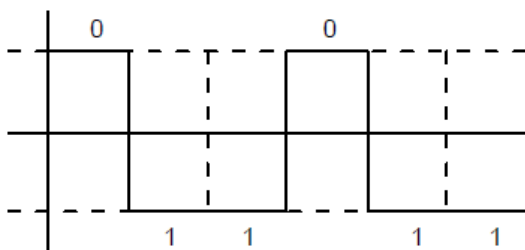


Figure 22 : Séquence de "ships" composant le code (Source : Warnant, 2016)

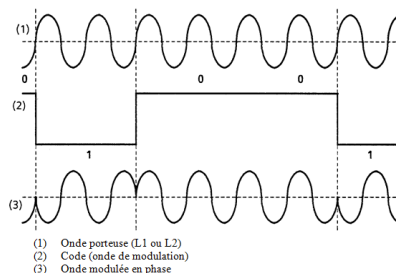


Figure 23 : Modulation de l'onde par code (Source : Warnant, 2016)

### Onde porteuse

Il est aussi possible d'effectuer la mesure du battement de phase entre l'onde reçue par le récepteur et la réplique de ce code générée par le récepteur (Figure 24). Cette méthode est beaucoup plus précise. Elle permet d'atteindre des précisions de quelques centimètres, mais également beaucoup plus complexe pour la détermination de la distance séparant le satellite du récepteur. En effet, cette méthode requiert la détermination d'ambiguïté de phase (on peut mesurer la part fractionnaire du battement de phase mais pas le nombre de cycles entiers). Notons que cette ambiguïté reste constante durant une session d'observation si le signal est reçu de façon constante par le récepteur. Si, à un moment donné, la réception du signal est interrompue, il se produit alors un saut de cycle et une ambiguïté apparaît.

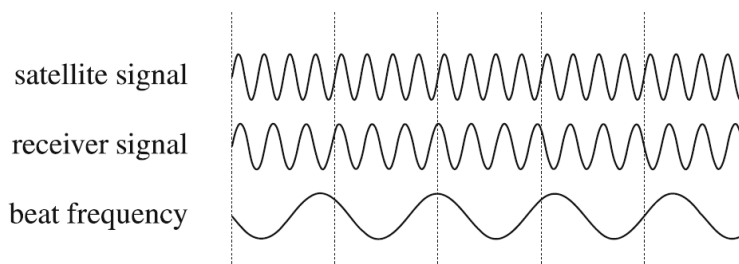


Figure 24 : Principe de la mesure de battement  
(Source : Hofmann – Wellenhopf et al., 2008)

### Types de mesures

#### Temps réel

La mesure de position effectuée par les signaux GNSS peut être effectuée en temps réel quand les résultats sont disponibles sur le terrain. Le positionnement est alors dit *instantané* car une seule époque d'observation est utilisée pour déterminer la position du récepteur.

#### Post-traitement

La détermination de la position en post-traitement se fait lorsque les observations et le calcul de la position sont asynchrones. On effectue une séance d'observations de signaux durant plusieurs époques et la position du récepteur est déterminée en analysant l'ensemble de ces observations.

### Méthode de positionnement

#### Single Point Positioning (SPP)

Le SPP est une méthode de positionnement dit « absolu ». Cette méthode s'effectue sur les mesures de codes.

La position déterminée par cette technique est peu précise. En effet, les sources d'erreurs ne sont pas parfaitement modélisées lors de l'utilisation des codes. Parmi ces erreurs, on retrouve les erreurs d'orbite et d'horloge du satellite, différentes erreurs atmosphériques agissant sur la propagation du signal ou encore des erreurs liées à la fabrication du récepteur.

Le tableau 2 reprend les ordres de grandeurs de l'imprécision liée à chaque source d'erreur.

Tableau 2 : Ordre de grandeur des différentes sources d'erreur dans la détermination de la position en SPP  
(Source : Warnant, 2016)

Source d'erreur	$\sigma$
<b>Satellite</b>	
- orbite	1 – 2 m
- horloge	1 – 2 m
<b>Propagation du signal</b>	
- ionosphère (2 fréquences)	cm - dm
- ionosphère (modèle, meilleur cas)	1 – 2 m
- ionosphère (modèle, moyen)	5 – 10 m
- ionosphère (modèle, pire cas)	10 – 50 m
- troposphère (modèle)	dm
- multi-trajet(s)	1 – 2 m
<b>Récepteur</b>	
- bruit	0.2 – 1 m
- délais hardware	dm – m
- centre de phase de l'antenne	mm - cm

### DGPS

Le DGPS est un positionnement différentiel. Il s'agit d'un cas particulier du SPP dont la précision est améliorée en utilisant des corrections précises transmises par une station de référence.

Les corrections fournies par la station de référence concernent les erreurs liées au satellite et à la propagation du signal, à l'exception du multi-trajet(s).

La précision de la correction dépend de la distance qui sépare la station de référence du lieu d'observation.

### Dilution Of Precision (DOP)

La précision de la mesure de position dépend des erreurs citées ci-dessus mais également de la géométrie des satellites exploitables de la constellation.

Le PDOP représente l'imprécision liée au positionnement tridimensionnel. On peut l'interpréter comme l'inverse du volume du tétraèdre le plus ouvert formé par les lignes de visée vers chaque satellite.

Le contexte du glacier du Travignolo aura une grande influence sur le PDOP. En effet, les parois verticales entourant le glacier ne permettront pas d'avoir un tétraèdre d'observation très ouvert (Figure 25).

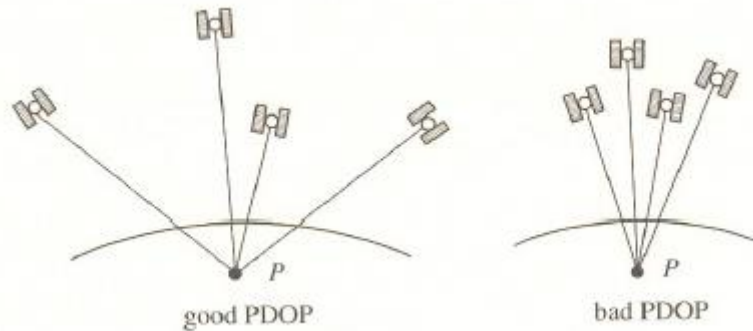


Figure 25 : PDOP et influence de la géométrie des satellites  
(Source : Warnant, 2016)

## 2.5.2 Géo-référencement

Le géo-référencement consiste à rattacher un relevé établi dans un système de coordonnées locales à un système de coordonnées terrestre global. Cette opération permet alors l'interopérabilité des données.

A l'aide d'observations réalisées sur des points dans les deux systèmes de coordonnées, nous pouvons effectuer une transformation de Helmert en 2D illustrée à la Figure 26 et caractérisée par quatre paramètres (Watson, 2006) :

- deux translations ;
- une rotation ;
- un facteur d'échelle.

Les équations de changements sont les suivantes :

$$\begin{cases} X = -m * \sin(\omega) * y + m * \cos(\omega) * x + d \\ Y = m * \cos(\omega) * y + m * \sin(\omega) * x + c \end{cases} \quad (19)$$

où

- (X,Y) : système cible (global) ;
- (x,y) : système source (local) ;
- m : facteur d'échelle ;
- $\omega$  : angle de rotation ;
- c et d : termes de translations.

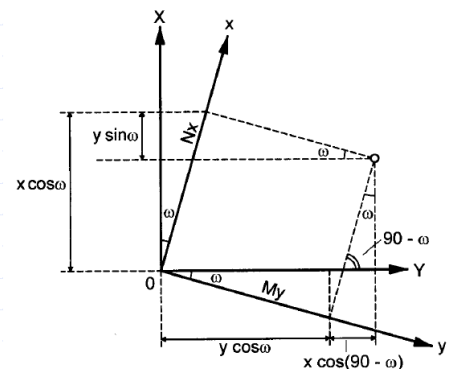


Figure 26 : Transformation de Helmert à 2 dimensions  
(Source : Billen, 2014)

## 3 Reconstruction photogrammétrique tridimensionnelle

### 3.1 Recommandation relatives aux prises de vue

Pour rappel, l'objectif de la méthode est de créer un modèle numérique de surface du glacier à l'aide de clichés pris par drone. Pour ce faire, nous allons utiliser le logiciel de reconstruction photogrammétrique ContextCapture de Bentley.

Pour obtenir un résultat de la meilleure qualité possible, le producteur du logiciel fournit un ensemble de recommandations à suivre :

- chaque partie de l'objet à reconstituer doit être photographiée à partir d'au minimum 3 points de vue différents ;
- l'angle entre les axes optiques des prises de vue doit être de maximum  $15^\circ$  ;
- le recouvrement minimum entre deux prises de vue doit être de deux tiers d'image ;
- la longueur focale utilisée pour le capteur lors des prises de vue doit toujours être identique. Notons que le logiciel peut automatiquement estimer les distorsions produites par la lentille de l'objectif ;
- les réglages de l'appareil photo (temps d'exposition, ouverture, ISO) doivent permettre d'éviter toute saturation de l'image qui, par ailleurs, ne pas être floutées.

La reconstitution tridimensionnelle produit un *mesh 3D*.

### 3.2 Reconstruction photogrammétrique par utilisation du logiciel ContextCapture

Nous avons utilisé le logiciel « ContextCapture » de Bentley pour la reconstruction photogrammétrique dans le cadre de ce travail. Ce logiciel permet d'effectuer une série de traitements détaillés ci-dessous.

#### 3.2.1 Calibration de l'appareil de prise de vue

Comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 2, la photogrammétrie peut s'effectuer sur des clichés obtenus par une chambre métrique.

Celles-ci ont comme particularités techniques d'avoir :

- une structure robuste du système optique ;
- une géométrie stable : les paramètres liés à l'orientation intérieure restent inchangés durant une longue période ;
- de faibles distorsions créées par le système de lentilles ;
- un *offset* du point principal quasiment nul ;
- un système de coordonnées image défini par un ensemble de marques fiduciaires.

Leur utilisation en photogrammétrie permet de faciliter certaines procédures comme l'orientation intérieure des clichés. Cependant, ce genre de caméra présente plusieurs inconvénients parmi lesquels un poids important, une complexité d'utilisation importante et un prix très élevé (Peipe et Stephani, 2011).

Le drone utilisé pour cette mission ne peut être équipé de ce genre d'instrument de prises de vue car la caméra dont il est équipé ne peut être enlevée. La caméra du drone est de type amateur dont les spécifications techniques ne sont pas celles d'une caméra métrique. Les seules informations que nous possédons à son propos sont celles fournies par le fabricant. Cette caméra étant non-métrique, une calibration s'avère indispensable. Elle permet de déterminer les valeurs exactes de la focale ainsi que divers autres paramètres détaillés ci-dessous.

Cette caméra amateur peut alors présenter des distorsions radiales et tangentielles. En fonction du type d'objectif, les distorsions radiales seront différentes. Un téléobjectif à focale longue produira une déformation dite en coussinet et un objectif grand angle et focale courte créera une déformation en barillet. La Figure 8 du Chapitre 2 représente graphiquement ces distorsions.

La calibration de la caméra consiste à déterminer les paramètres d'ajustement d'un modèle de ces distorsions.

Le logiciel « ContextCapture » réalise cette calibration à l'aide du modèle de distorsion de Brown–Conrady (Bentley, 2016). Ce modèle qui porte le nom de *decentering distortion* corrige les distorsions radiales et tangentielles causées par un désalignement des éléments d'une lentille (Brown, 1966). Sa formulation mathématique est la suivante :

$$x_u = x_d + (x_d - x_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4) + (P_1(r^2 + 2(x_d - x_c)^2) + 2P_2((x_d - x_c)(y_d - y_c))) * (1 + P_3 r^2) \quad (20)$$

$$y_u = y_d + (y_d - y_c)(K_1 r^2 + K_2 r^4) + (2P_1(r^2 + 2(x_d - x_c)^2) + P_2((x_d - x_c)(y_d - y_c))) * (1 + P_3 r^2) \quad (21)$$

avec

- $(x_d; y_d)$  = point de l'image qui doit être corrigée des distorsions radiales et tangentielles ;
- $(x_u; y_u)$  = point de l'image corrigée ;
- $(x_c; y_c)$  = point principal (de distorsion nulle) ;
- $K_n$  = coefficients de distorsion radiale ;
- $P_n$  = coefficients de distorsion tangentielle ;
- $r = \sqrt{(x_c - x_d)^2 + (y_c - y_d)^2}$  .

### 3.2.2 Aérotriangulation

Comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 2, l'aérotriangulation est une méthode de restitution de position d'un bloc de clichés en minimisant le nombre de points de calages nécessaires.

Pour effectuer cette aérotriangulation, le logiciel utilise le *bundle adjustment*, ou compensation par faisceaux, permettant de transformer directement les coordonnées images en coordonnées terrain.

Pour rappel, la forme générale de cette compensation par faisceau est la suivante :

$$\varphi = \varphi_0 - c * \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (22)$$

$$\eta = \eta_0 - c * \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (23)$$

Où  $(\varphi, \eta)$  sont les coordonnées image d'un point,  $(\varphi_0, \eta_0)$  les coordonnées du point principal,  $(X, Y, Z)$  sont les coordonnées terrain du point,  $(X_0, Y_0, Z_0)$  les coordonnées-terrain du centre de projection et  $r_{ij}$  sont les coefficients de rotation, fonction de  $(\Omega, \Phi, K)$ .

### 3.2.3 Identification des points homologues

La détection des points homologues réalisée dans le logiciel ContextCapture est réalisée par l'algorithme « *Scale-invariant feature transform* » ou SIFT. Cet algorithme, développé par David Lowe (1999), est un descripteur d'image pour l'identification de points homologues.

L'identification des points homologues par l'algorithme SIFT est réalisée en trois étapes (Lowe, 1999 ; Lowe, 2004 ; Linderberg, 2012) :

1. **Identification des points d'intérêt**

La première étape de l'algorithme consiste à identifier les points délimitant un objet. Les coordonnées (images) de ces points sont enregistrées.

2. **Description des points d'intérêt**

Les points d'intérêt sont caractérisés par un vecteur caractérisant le voisinage du point et une orientation est affectée selon le gradient local dominant.

Cela permet d'analyse entre images de points de vue différents d'un même objet, prises à des distances différentes des objets (changement d'échelle) ou encore dont l'éclaircissement des scènes varie.

3. **Appariement des vecteurs similaires**

Les vecteurs définis à l'étape précédente sont comparés entre les images. Les vecteurs similaires sont associés et les points auxquels sont affectés ces vecteurs sont définis comme homologues entre les images.

### 3.2.4 Qualité de la reconstruction

La qualité de la reconstruction photogrammétrique peut être décrite à l'aide de l'erreur d'intersection, c'est-à-dire l'erreur de parallaxe résiduelle après l'ajustement. Le logiciel ContextCapture ne reprend pas cette information. Elle reprend cependant la médiane et la *Root Mean Square* (RMS) de l'erreur de reprojection, exprimée en pixel et la RMS des distances aux rayons, exprimée dans l'unité de mesure du système de coordonnées utilisé, à savoir le mètre.

L'erreur de reprojection (Figure 27) correspond à la distance moyenne entre la position d'un point ajustée par moindres carrés et la position de ce point renseignée sur les différents clichés. Cette distance est exprimée en pixel en divisant la distance par le GSD moyen défini pour ce point.

Lorsqu'un point est observé par un grand nombre de clichés, les rayons perspectifs identifiant sa position ne s'intersectent pas exactement en ce point. La RMS de distances aux rayons (Figure 28) exprime la moyenne des distances orthogonales séparant la position du point ajustée par moindres carrés et chacun des rayons perspectifs.

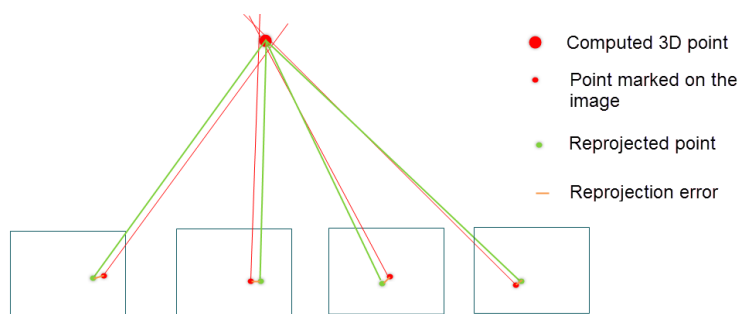


Figure 27 : Erreur de reprojection  
(Source : Pix4D.com)

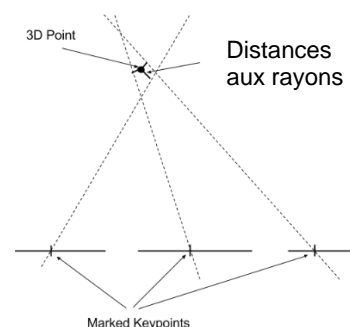


Figure 28 : Distances aux rayons  
(Source : Pix4D.com)



# Application

Ce chapitre met en pratique et adapte au cas du glacier du *Travignolo* le protocole d'acquisition de données décrit de façon théorique au chapitre précédent. Il livre également les résultats obtenus lors de notre travail expérimental.

Le chapitre s'articule autour :

- d'une description de la mise en place sur le terrain, et de leurs réglages, des différents paramètres nécessaires à l'acquisition des données ;
- de l'acquisition et du traitement des données en vue de la réalisation de la reconstruction photogrammétrique ;
- de la présentation, en fonction de nos hypothèses de travail, des résultats obtenus.

## 1 Mises en place sur le terrain

### 1.1 Réglages du drone

#### 1.1.1 Acquisition d'images

##### 1.1.1.1 Plan de vol

Pour rappel, le type de plan de vol est caractérisé par le chemin suivi par le drone durant l'acquisition des données.

Les dimensions du glacier étaient supérieures à nos attentes et couvraient une surface trop importante que pour pouvoir effectuer l'ensemble des clichés en une seule session de vol. Le nombre de prises de vue a donc été plus important que prévu et le temps de vol allongé.

Pour des raisons d'autonomie du drone, nous avons donc découpé le glacier en deux zones, la première s'étendant sur la partie amont du glacier et la seconde sur la partie aval. Les deux parties s'étendaient sur environ 500 m de longueur chacune. Les parties supérieure et inférieure ont été survolées sur deux journées. Un total de quatre sessions d'acquisition de données réparties sur trois sessions de vol a été effectué. Le Tableau 3 reprend la durée de chaque session d'acquisition de données.

Tableau 3 : Durée d'acquisition des données

Durée d'acquisition des données				
Session d'acquisition n°1	Session d'acquisition n°2	Session d'acquisition n°3	Session d'acquisition n°4	TOTAL
378 [s]	1066 [s]	1199 [s]	552 [s]	3 195 [s]

Notons que pour la partie aval du glacier, durant laquelle les sessions d'acquisition n°3 et 4 ont été réalisées, nous avons utilisé le mode *way-point* ce qui nous a permis de suivre le plan d'acquisition (Figure 15). La partie amont, quant à elle, a été levée à l'aide d'un vol manuel car le signal GPS n'a pas permis d'utiliser le mode automatique.

Il est important de noter que pour permettre le rattachement des deux zones du glacier, nous avons veillé à ce que les différents vols se recouvrent suffisamment au cours des quatre sessions pour permettre la reconstruction photogrammétrique de l'ensemble du glacier.

Ce recouvrement se retrouve représenté à la Figure 29 qui montre la découpe du glacier en deux parties ainsi que la zone couverte par chacune des sessions de vol. La carte montre plus précisément les zones couvertes par les clichés lors de chaque session de vols.

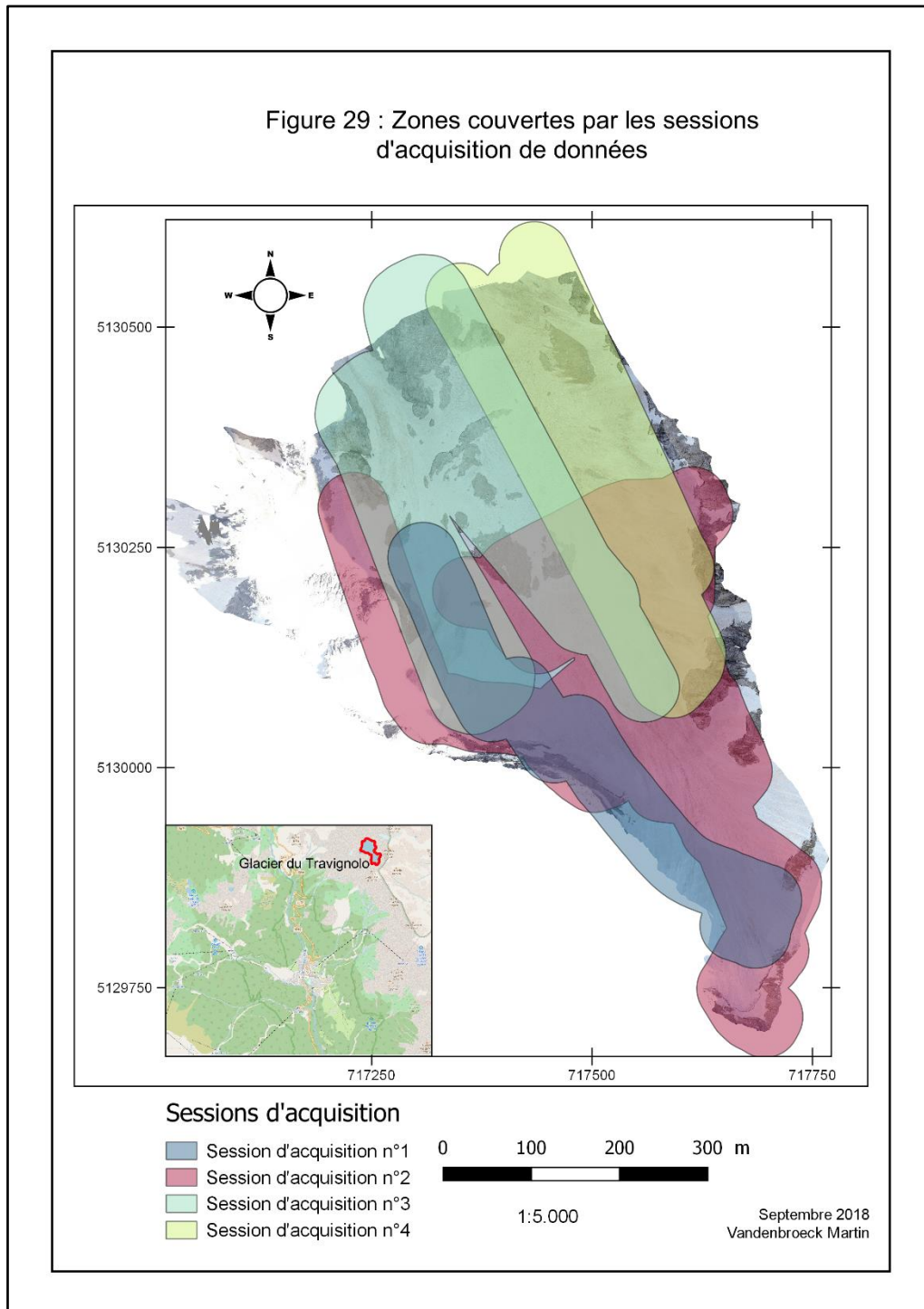


Figure 29 : Zones couvertes par les sessions d'acquisition de données

#### 1.1.1.2 Paramètres de prise de vue

Le plan d'acquisition d'images, tel que présenté au Chapitre 4 - Section 1.1, est défini par la finesse de détails sur les images requise pour le travail, la hauteur de vol ainsi que la fréquence de prise de vue.

La caméra embarquée sur le drone est une caméra légère montée sur une nacelle stabilisatrice afin de réduire le bruit dû aux vibrations du fonctionnement du drone. Concernant ses caractéristiques techniques, la longueur focale est de 8.8 mm et 24 mm exprimée en focale équivalente, sa résolution est de 20 mégapixels et elle a un angle de champ de 80°. Il s'agit donc d'une caméra de type *grand-angle* caractérisée par des distorsions en barillet (Chapitre 2 – Section 2.2.2.1).

L'ensemble des paramètres de la caméra détaillés dans le Tableau 1 - Chapitre 4 ont permis une bonne préparation du matériel et des conditions de vol, à l'exception des paramètres de prise de vue.

Pour rappel, les parties supérieure et inférieure ont été survolées sur deux journées et le réglage du temps d'ouverture a dû être modifié entre les deux journées de vol.

La surface du glacier réfléchit très fortement la lumière, il a donc fallu diminuer la sensibilité du capteur ainsi que le temps de pose. Nous avons procédé par essais/erreurs pour déterminer les réglages optimaux pour obtenir le meilleur contraste. Nous avons utilisé une ouverture de f/2.8 et un temps d'exposition de  $\frac{1}{1000}$  s pour la partie supérieure et de  $\frac{1}{1600}$  s pour la partie inférieure. Pour limiter les sources de bruit sur les clichés, la sensibilité lumineuse a été réglée au minimum, c'est-à-dire ISO-100.

Ces paramètres ont permis de s'affranchir des problèmes de vitesse de vol car ils permettent un déplacement plus rapide que la vitesse maximale du drone limitée à 58 km/h en mode automatique. La vitesse de vol a par ailleurs été limitée par la fréquence des prises de vue. Le logiciel de commande du drone permet de prendre une image toutes les 3 secondes. Afin d'assurer un recouvrement longitudinal supérieur à 80 %, il faut que le déplacement effectué en 3 secondes soit de  $0.2 * l = 0.2 * 80 = 16$  m. Ainsi, la vitesse de vol maximale est de  $\frac{16}{3} = 5.333$  m/s. Etant donné que le drone doit également monter et descendre, les vitesses d'ascension et de descente sont aussi à prendre en compte. Parmi les vitesses maximales de déplacement fournies dans les spécifications techniques du drone (Annexe 2.2), la vitesse maximale de descente est la plus faible et est, par conséquent, la variable la plus limitante pour la vitesse de déplacement du drone.

Les paramètres du plan d'acquisition et des prises de vue sont repris dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Paramètres du plan d'acquisition

Paramètres du plan d'acquisition				
<i>hauteur de vol</i> [m]	<i>GSD [cm/pixel]</i>	<i>Fréquence de prise de vue</i> [s <sup>-1</sup> ]	<i>Vitesse (oblique)</i> [m/s]	<i>Recouvrement (Long - Trans)</i> [%]
80	2.19	3	3	80 - 60
<i>Ouverture</i> [ ]	<i>Longueur focale</i> [mm]	<i>Temps d'exposition (amont)</i> [s]	<i>Temps d'exposition (aval)</i> [s]	<i>Sensibilité lumineuse</i>
f/2.8	8.8	$\frac{1}{1000}$ s	$\frac{1}{1600}$ s	ISO-100

## 1.2 Cibles

Avant notre départ, nous avons fait réaliser un total de 100 cibles. Les cibles utilisées sont d'une forme carrée de 50 cm de côté dont le dessin est le suivant :

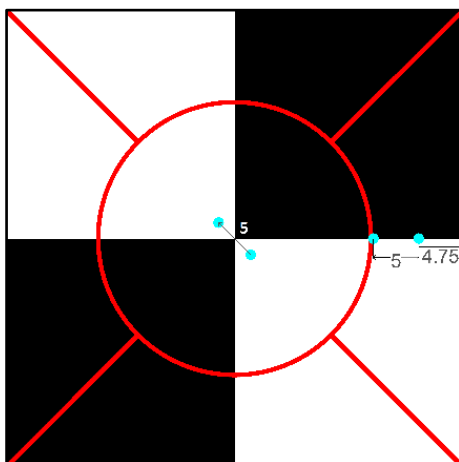


Figure 30 : Dessin de la cible  
(et des trous percés pour les cibles rigides)

Au cours de notre étude, nous avons utilisé un nombre total de 35 cibles.

### 1.2.1 Cibles rigides

Les cibles rigides ont été réalisées en PVC de 3 mm d'épaisseur. Nous pensions que cela assurerait la rigidité souhaitée pour le travail. Lors de la mise en place sur le terrain, ces cibles ont présenté un balancement lorsqu'elles étaient accrochées. Ce défaut est discuté dans le Chapitre 6.

L'Annexe 2.3 reprend les informations du fournisseur de ce matériel.

Pour rappel, les cibles rigides doivent permettre d'être ré-établies dans le futur pour assurer la reproductibilité du protocole. Elles ont donc été placées à des endroits accessibles et forées dans la roche de manière à pouvoir être replacées lors d'une future mission. Avec l'aide d'un guide de haute montagne, nous en avons placé un total de 9 autour du glacier.

Afin d'augmenter le nombre de contraintes pour la reconstruction photogrammétrique, nous avons également utilisé les positions des stations de référence pour y établir des cibles rigides, portant ainsi le nombre total de ces cibles à 12.

Notons que lors de la fin de la mission, la plupart des cibles étaient cassées (Figures 31 et 32). Dans le cas d'une éventuelle mission ultérieure, de nouvelles cibles, plus rigides mais de même dimension et avec les mêmes dispositions de trous de fixation, devraient être installées aux mêmes positions.

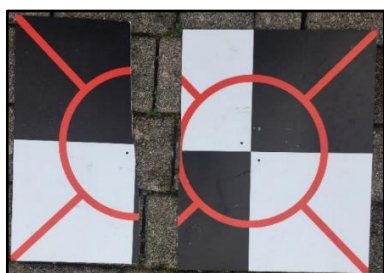


Figure 31 : Cibles rigides cassées retrouvées sur le terrain en fin de mission



Figure 32 : Totalité des cibles retrouvées sur le terrain en fin de mission

## Préparation des cibles

Les cibles rigides utilisées sur le terrain ont dû être préparées avant la mission. Cette préparation consiste à réaliser un ensemble de trous permettant d'attacher les cibles en fonction des différentes situations et conditions d'attache détaillées ci-dessous. La Figure 30 ci-dessus montre la position des trous sur les cibles.

### ***Attache directe contre la roche***

Pour permettre l'attache de la cible directement contre sur la roche, nous avons réalisé 2 trous symétriques par rapport au centre de la cible et disposés sur la diagonale à 2.5 cm du centre.

### ***Attache à l'aide d'une équerre***

Lorsqu'il n'était pas possible de placer directement la cible sur la roche, nous avons eu recours à des équerres (Figure 33) que nous avons fixées à la roche (Figure 34). Les cibles étaient ensuite fixées à ces équerres.

Pour permettre cette accroche aux équerres, les cibles ont également été perforées sur leur médiane. Les trous ont été réalisés à 4.75 cm et 9.75 cm du bord de la cible le long de la médiane.



Figure 33 : Équerres permettant l'attache des cibles

## Méthode de fixation

La procédure de la fixation de l'équerre à la roche et de la cible à l'équerre est détaillée ci-dessous.

### ***Fixation directe contre la roche***

Pour fixer la cible contre la roche, nous avons en général :

- perforé 2 trous de 8 mm de diamètre dans la roche
- utilisé 2 chevilles de 8 mm de diamètre ;
- utilisé les 2 trous disposés sur la diagonale à un *inch* de part et d'autre du centre de la cible ;
- utilisé 2 écrous et 2 vis à métaux à tête fraisée (diamètre M5 x 16 mm) et 2 rondelles (diamètre 5.3 x 10 mm).

### ***Fixation « équerre + cible »***

- Pour fixer l'équerre console dans la roche, nous avons :
  - utilisé les 2 trous du petit côté de l'équerre;
  - perforé 2 trous de 8 mm de diamètre dans la roche pour assurer une quasi-horizontalité du côté long de l'équerre-console ;
  - utilisé 2 chevilles de 8 mm de diamètre ;
  - utilisé des vis à bois de 6 mm de diamètre et de 45 mm de longueur.
- Pour fixer la cible à l'équerre console, nous avons :
  - utilisé les 2 trous dans la cible sur la médiane ;
  - utilisé les 2 trous les plus éloignés du coude de l'équerre-console sur le côté le plus long de celui-ci ;

- utilisé 2 écrous et 2 vis à métaux à tête fraisée (diamètre M5 x 16 mm) et 2 rondelles (diamètre 5.3 x 10 mm).



Figure 34 : Cible rigide forée à la roche à l'aide d'une équerre de 30 - 60°

### 1.2.2 Cibles de validation

Les cibles de validation ont été réalisées en une matière de type « bâche » et percées d'œillets en aluminium aux quatre coins permettant de les attacher (Figure 35).

Ces cibles souples, placées sur la surface du glacier, serviront pour valider les coordonnées 3D calculées par photogrammétrie. Leur rôle n'étant que temporaire, le système d'accroche peut être moins résistant que celui des cibles rigides. Ainsi, de simples piquets de tente ont suffi pour les accrocher. Nous en avons placé 23 sur le glacier.



Figure 35 : Cible de validation ancrée dans la neige par des piquets de tente



## 2 Acquisition de données

### 2.1 Détermination des coordonnées terrain

Les coordonnées terrain des stations de référence et des différentes cibles sont obtenues par cheminement et lever topographique.

#### 2.1.1 Instruments

Le matériel utilisé pour effectuer ces prises de données est le matériel disponible dans l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège (Figure 36).

Il se compose :

- d'une station totale Leica TCR 1205 ;
- d'un récepteur GNSS Trimble R10 ;
- de 3 trépieds ;
- de 3 embases ;
- de deux prismes circulaires Leica ;
- d'un mini-prisme standard Leica.

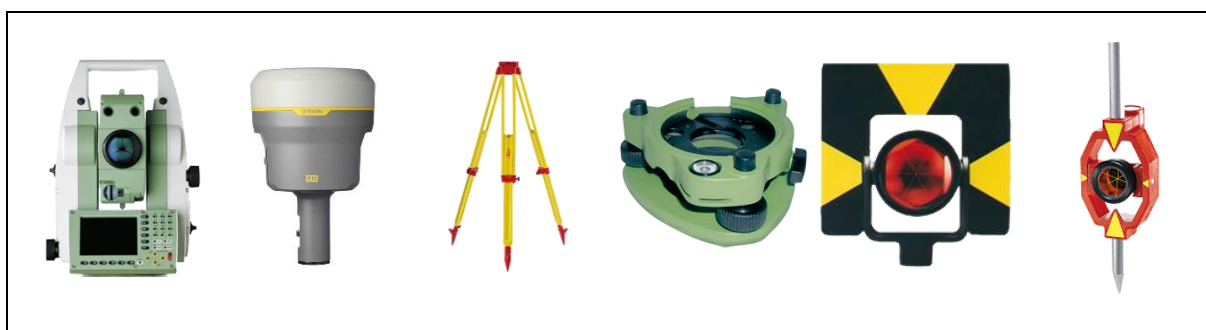


Figure 36 : Matériel topographique utilisé (Source : Leica, Trimble)

#### 2.1.2 Lever topographique

##### Stations de référence

Le choix des stations de référence a été fait en essayant de respecter les contraintes citées au Chapitre 4 – Section 2.1.1. Les conditions de terrain du glacier n'ont cependant pas permis d'établir un polygone régulier dont les sommets sont équidistants. Toutefois, la position de ces stations de référence a permis de réaliser un lever au prisme optique de l'ensemble des cibles placées sur le glacier.

Le cheminement, de type fermé en boucle en centrage forcé, a été effectué sur les trois stations de références REF\_1, REF\_2 et REF\_3, il est représenté sur le plan repris à la Figure 37. Les coordonnées (Tableau 5) établies lors de cette étape sont locales. L'ajustement a été compensé après une propagation de variance estimant l'écart de fermeture car il n'y avait pas d'intervisées possibles pour effectuer une compensation par moindres carrés. Le relief du glacier s'étendant sur plusieurs centaines de mètres de dénivelée, les visées hautes étaient nécessaires à la réalisation de ce travail.

Tableau 5 : Coordonnées locales des stations de référence

Cible	Coordonnées locales		
	X	Y	Z
REF_1	5000.000	868.378	94.705
REF_2	5000.000	1000.000	100.000
REF_3	5470.321	1045.067	300.803

Figure 37 : Stations de référence et cibles

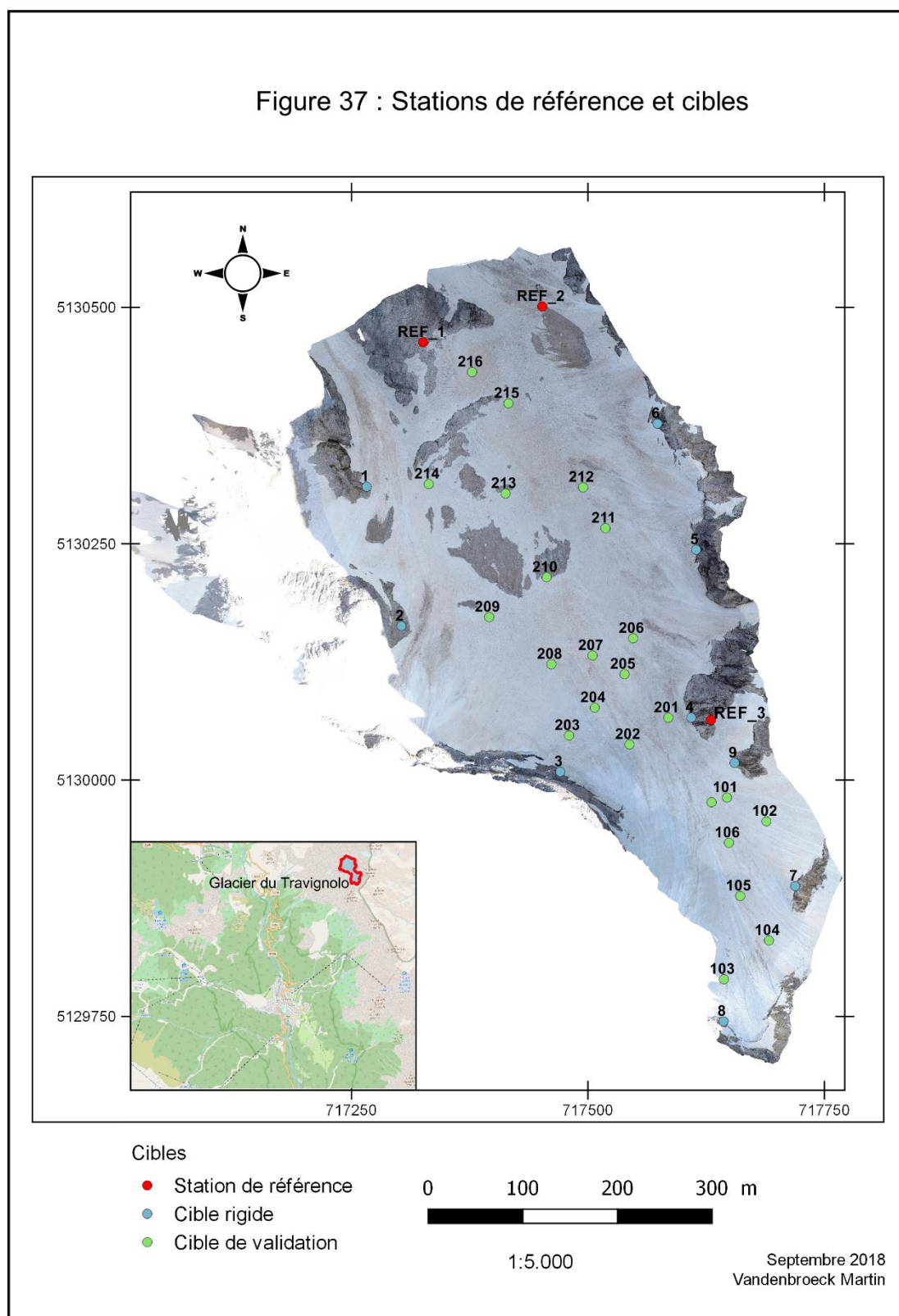


Figure 37 : Stations de référence et cibles

Le cheminement effectué peut alors être validé par une analyse de la fermeture angulaire observée par rapport à des fermetures théoriques admissibles (« Erreur admissible » selon la précision du matériel employé et « Tolérance de Miles&Lagofun ») dont les formules sont détaillées à l'Annexe 1.



Lors de cette validation, nous calculons la précision des coordonnées (Tableau 6) des différentes stations par propagation de variance dont la formule est détaillée dans le Chapitre 4.

Tableau 6 : Précision des coordonnées des stations de référence

Cible	Sigma		
	X	Y	Z
REF_1	0.0023	0.0076	0.0031
REF_2	0.0000	0.0157	0.0000
REF_3	0.0221	0.0088	0.0123

### Lever des cibles

Les cibles ont été levées par la méthode des points rayonnés comme nous l'avons mentionné dans le Chapitre 4. La Figure 37 présente la position des cibles rigides et de validation sur le glacier. L'Annexe 4.2 présente les coordonnées locales et globales de ces différentes cibles.

### Erreurs de mesure

Le double retournement réalisé lors de chaque visée a permis d'éliminer les erreurs de tourillonnement et de collimation verticale et horizontale.

L'erreur atmosphérique dépend de trois paramètres que sont la température, l'humidité relative et la pression atmosphérique. Ce terme, pour être parfaitement ajusté, aurait nécessité l'utilisation d'une station météorologique mesurant ces paramètres durant les mesures.

À défaut de ce type de matériel, des valeurs standards ont été utilisées afin de corriger ces effets. Elles sont reprises dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Paramètres de correction atmosphérique

Paramètres de correction atmosphérique		
T°	PRESSION	HUMIDITE
(°C)	hPa	%
2	750	60

Pour limiter les erreurs grossières telles que la non-verticalité du prisme lors du lever, nous avons eu recours à un mini-prisme dont la hauteur est très réduite (10 cm au minimum) et est adaptable par un système d'allonges mesurant 30 cm, rendant ce matériel polyvalent pour les différentes conditions de visées rencontrées.

### 2.1.3 Géo-référencement

#### Observation des signaux GNSS

Les coordonnées calculées à la section 2.1.2 sont établies dans un système de projection local défini par l'utilisateur. Pour que ces données soient interoperables, il est nécessaire de rattacher ce système à un système de coordonnées global. Nous avons opté pour le système « UTM-32N » (EPSG : 32632).

Pour établir les paramètres de transformation de Helmert permettant ce changement de coordonnées, nous avons observé certains points à l'aide d'un récepteur GNSS.

Le récepteur utilisé sur le terrain est un récepteur TRIMBLE R10. Ce dernier peut effectuer des observations sur les signaux de codes et de phases, chacune ayant une précision propre.

Le glacier est caractérisé par des parois verticales très élevées. Cette configuration du milieu a eu pour effet de rendre uniquement possible les observations sur les stations de références placées dans le bas du glacier, où la visibilité des satellites était meilleure. La troisième station,

située dans une partie plus encaissée du glacier et plus proche des parois, n'a pu être mesurée par GNSS.

### Détermination de la position

La position des stations de références observées au GNSS a été définie en post-traitement après la mission. Nous avons donc procédé à de longues sessions d'observation sur les deux stations de référence.

Le Tableau 8 reprend les durées d'observations sur chacune des stations de référence.

Tableau 8 : Durée et nombre d'observation(s) des signaux GNSS aux stations de référence

Durée d'observation		Nombre d'observations	
Station REF_1	Station REF_2	Station REF_1	Station REF_2
04h 02' 30"	02h 12' 00"	485	264

Au cours de ces séances d'observation, nous avons effectué un calcul de position toutes les 30". Cela permet d'obtenir un grand nombre d'observations pour déterminer la position par post-traitement.

### Observation des codes

Les observations effectuées sur les codes ont été traitées par les logiciels RTKLIB et MatLab. Le premier logiciel permet d'obtenir les positions à chacune des époques d'observation. Il offre la possibilité de déterminer la position selon les méthodes *Single Point Positioning* et DGPS décrites au Chapitre 4.

Dans le cas du DGPS, il faut fournir au logiciel les données des corrections à appliquer transmises par la station de référence. Dans notre cas, la station fournissant des corrections est la station *Forte Dossaccio* (FDOS) située à moins de dix kilomètres au Nord-Ouest du glacier dans la Province du Trentin. Ces données sont fournies par le fournisseur de données GNSS de la Province autonome du Trentin, appelé TPOS, et disponibles à l'URL : <http://www.tpos.provincia.tn.it/SpiderWeb/frmlIndex.aspx>

Ensuite un script MatLab (Annexe 3.2) a servi à traiter ces positions pour en déterminer la position moyenne ainsi que la précision de chacune des coordonnées. Le tableau repris à l'Annexe 4.4 reprend ces différents paramètres.

### Observation des ondes porteuses

Les observations effectuées sur les ondes porteuses ont été traitées par le service « *Trimble CenterPoint™ RTX™ post-processing service* » fourni par *Trimble* et accessible via une interface WEB à l'URL : <https://trimblertx.com/>

Les positions déterminées par cette méthode d'observation sont reprises dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Coordonnées WGS 84 des stations de références déterminées par observation des ondes porteuses

Station : REF_1			Station : REF_2		
X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
4 322 845.217	904 792.641	4 589 559.797	4 322 799.194	904 913.079	4 589 586.715

Le service de traitement fourni par Trimble effectue les corrections suivantes :

- Corrections atmosphériques ;
- Marrées solide, polaire et océanique ;
- Correction relativiste ;
- Saut de phase ;

- Erreur de position du centre de phase de l'antenne du satellite.

### Géo-référencement

Les coordonnées des deux cibles de référence, établies dans le système local et dans le système UTM – 32N, ont permis de calculer les paramètres de la transformation de Helmert définis au Chapitre 4 - Section 2.5.2. Les positions des stations déterminées par le GNSS sont établies dans le système géocentrique WGS 84. Par conséquent, elles ont été préalablement transformées « à la volée » vers le système cartographique UTM-32N.

Notons que cette transformation s'effectue pour les composantes planaires des coordonnées. La composante verticale est transformée par un calcul de transfert d'altitude établi par les données altimétriques obtenues directement par les observations au GNSS également.

Les paramètres calculés à l'aide du script Matlab fourni à l'Annexe 3.3 de cette transformation sont repris dans le Tableau 10:

Tableau 10 : Paramètres de géo-référencement

Paramètres de la transformation de Helmert				
m [ ]	$\omega$ [rad]	c [m]	d [m]	Transfert d'altitude [m]
0.99964406	-1.27915369	5135000.73	715057.097	2333.0825

## 2.2 Prise des clichés

### 2.2.1 Instrument

L'appareil utilisé pour la prise des clichés est un drone DJI Phantom 4 Pro de type petit et à rotor. Ses caractéristiques techniques sont reprises à l'Annexe 2.2.

### 2.2.2 Prise des clichés

L'enregistrement des données photographiques par l'appareil photo du drone s'est fait en volant selon les paramètres déterminés à la section 1.1.

La méthode utilisée pour effectuer les vols a été détaillée à la section 1.1.1.2.

Au total, un nombre de 1019 clichés ont été effectués lors des campagnes d'acquisition. Les clichés pris par la caméra du drone ne sont pas tous utiles ou de qualité suffisante pour être utilisés lors de la reconstruction du modèle. Il a fallu dès lors procéder à une sélection manuelle des clichés qui ont été utilisés par la suite pour la reconstruction. Après le tri, 739 clichés ont été conservés. La Figure 38 représente la position respective de chacune de ces prises de clichés obtenus au cours des quatre sessions d'acquisition de données.

Figure 38 : Position des prises de vue

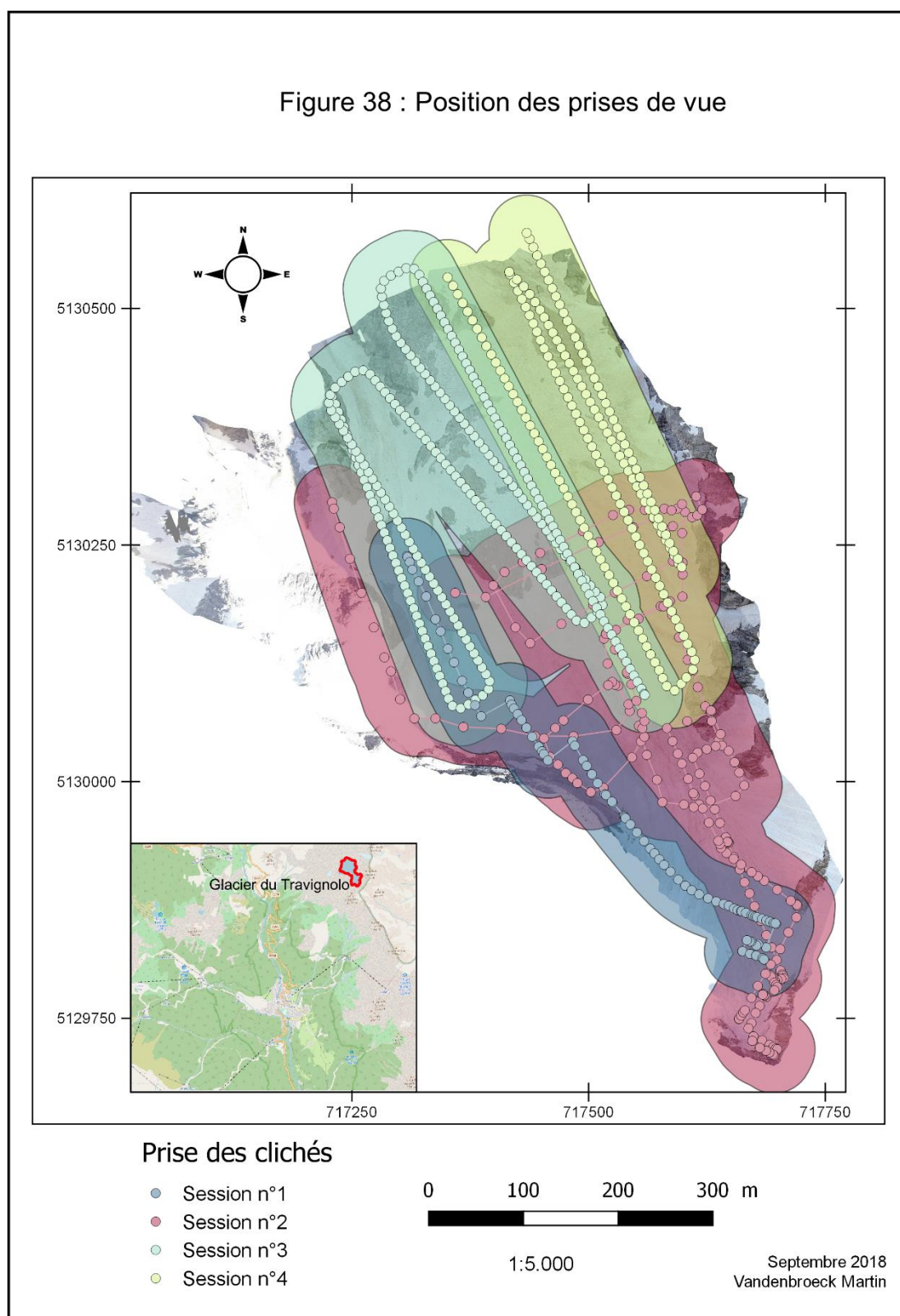


Figure 38 : Position des clichés

### 3 Reconstruction du modèle 3D

Les clichés obtenus permettent la reconstruction du modèle tridimensionnel du glacier.

Après sélection des images du glacier, il a été possible d'effectuer la reconstruction tridimensionnelle. Cette opération a été réalisée exclusivement dans le logiciel ContextCapture à l'aide des 4 étapes suivantes :

1. **Importation des images** : La première étape à réaliser est l'importation des images de l'objet à modéliser (Figure 39). Les images sont groupées par *photogroup*. Ce groupement s'effectue selon les spécifications techniques de l'appareil de prise de vue utilisé. Il permet donc l'acquisition de clichés par des appareils photo différents pour une même reconstruction.

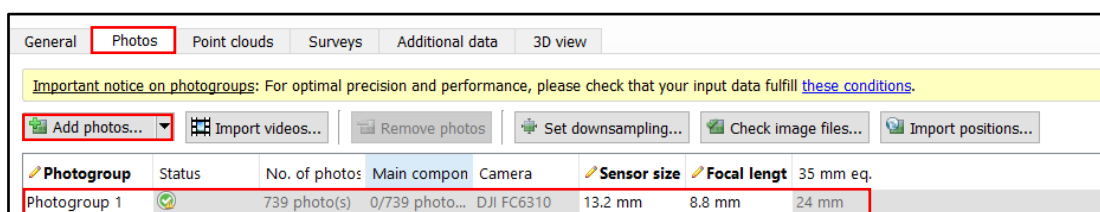


Figure 39 : Importation des images sous ContextCapture

2. **Points de contrôle** : Lors de l'importation des clichés, le logiciel lit les métadonnées relatives à la position du drone au moment de la prise de vue. Ces positions étant de faible précision, elles ne seront pas utilisées pour la reconstruction. Afin de positionner correctement les clichés, nous utilisons des points de contrôle localisés sur le glacier par méthode topographique. Ils sont renseignés en position terrain et leur emplacement sur image est établi par pointage sur les différents clichés (Figure 40).

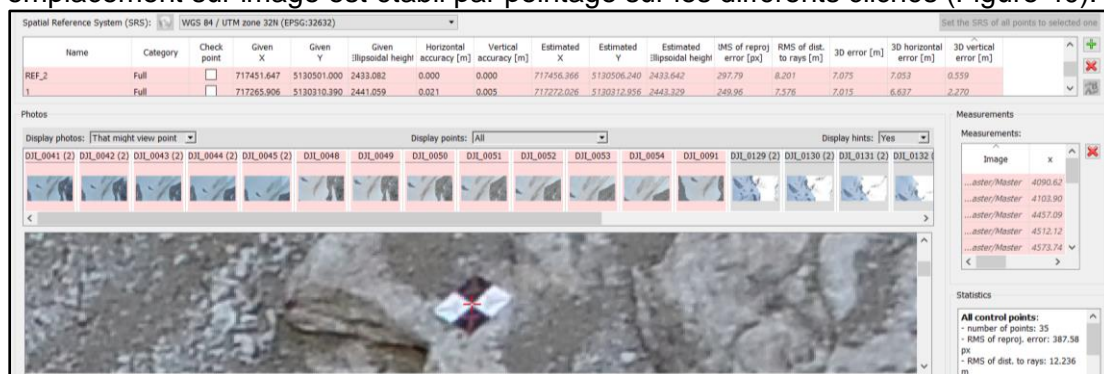


Figure 40 : Pointage des points de contrôle sous ContextCapture

3. **Aérotriangulation** : Les cibles photogrammétriques renseignées permettent de réaliser l'aérotriangulation. Cet ajustement transforme directement les coordonnées images en coordonnées terrain, correspondant à l'orientation absolue des clichés. Le rapport d'aérotriangulation contient le détail des RMS de l'erreur de projection et des distances aux rayons pour chaque point de contrôle. Notre reconstruction présente une RMS de l'erreur de reprojection de 0.31 pixel et une RMS de l'erreur des distances aux rayons de 0.019 m. Un exemple de rapport d'aérotriangulation pour l'orientation absolue est repris à l'Annexe 5.1. De plus, lors de l'aérotriangulation, le logiciel fournit les paramètres de la calibration de la caméra suivant le modèle de Brown détaillé au chapitre précédent. Ces paramètres sont repris dans la section 5 de ce chapitre.



4. **Production** : Une fois ces trois étapes successives réalisées, nous pouvons réaliser la production du modèle photogrammétrique tridimensionnel. La reconstruction du glacier est montrée à la Figure 41.

En plus de ce modèle tridimensionnel, il est possible de réaliser la production d'une orthophoto et du modèle numérique de surface permettant une visualisation et une analyse dans des logiciels SIG tels que QGIS ou ARCGIS.

Ainsi, au terme de cette étape, nous obtenons

- un modèle tridimensionnel visualisable dans un logiciel *viewer* (Figure 41) ;
- les orthophotos (Figure 42) et le MNS (Figure 43) au format Geo-TIFF permettant l'analyse de la reconstruction sur des logiciels tiers. La résolution de ces produits a été définie selon le GSD médian calculé lors de l'aérotriangulation, soit 3 cm/pixel.

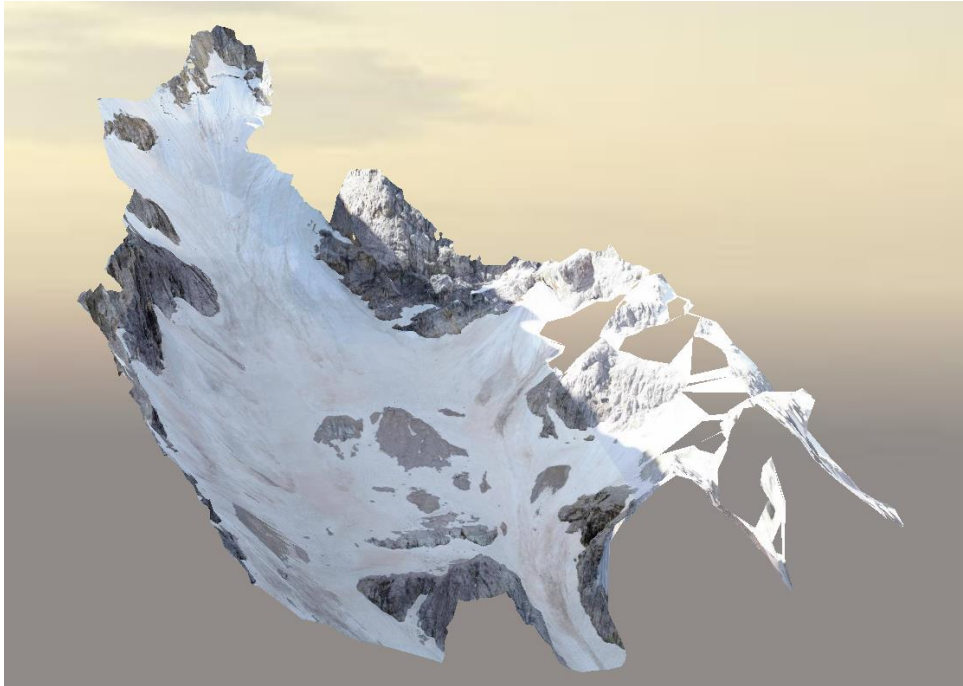


Figure 41 : Reconstruction tridimensionnelle du glacier

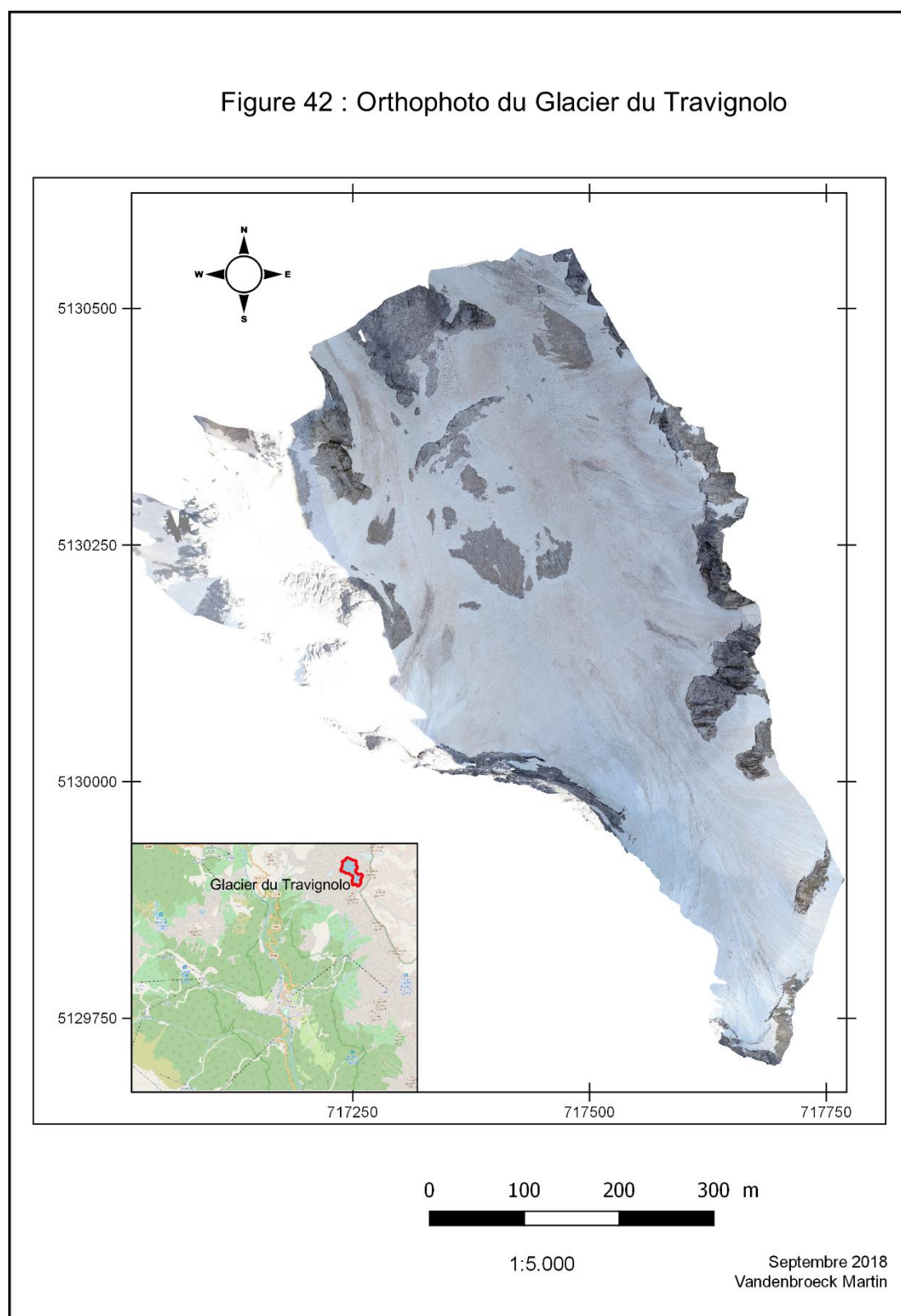


Figure 42 : Orthophoto du Glacier du Travignolo

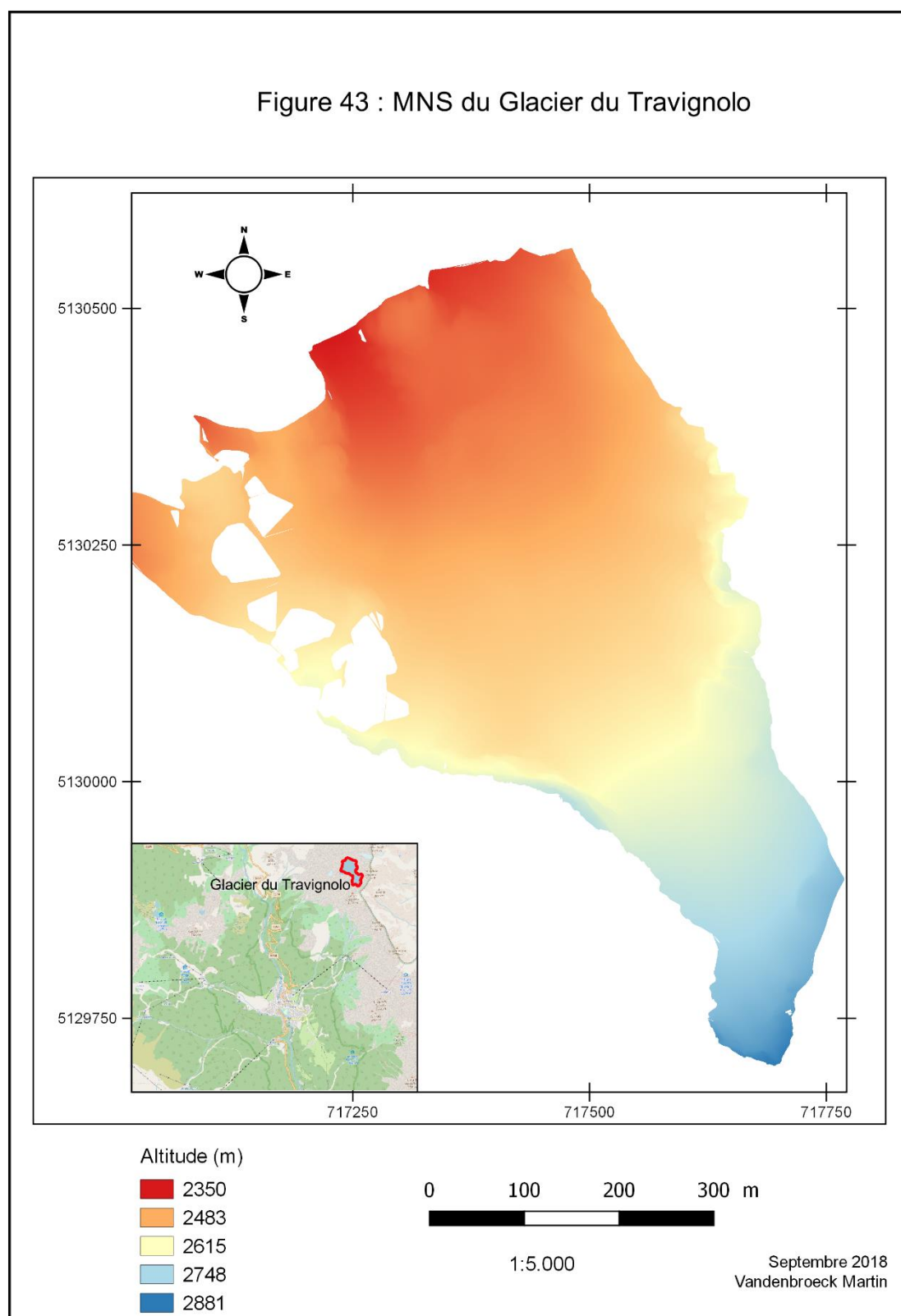


Figure 43 : MNS du Glacier du Travignolo



## 4 Analyse de la reconstruction

L'analyse a été effectuée à l'aide du logiciel Open-Source QGIS.

Outre la visualisation du MNS et des orthophotos sur ce logiciel, nous pouvons effectuer la validation du modèle ou d'autres traitements donnant des informations sur les principales caractéristiques de la reconstruction tridimensionnelle du glacier (pente, emprise, courbes de niveau, etc.).

La validation du modèle est présentée à la section 5.1.3 de ce chapitre.

A titre illustratif, nous avons généré un ensemble d'informations sous forme de cartes et d'histogrammes présentés à l'Annexe 6. Ces informations décrivant le glacier pourront être générées lors d'une expérimentation future entreprise sur la base de ce protocole et permettront d'effectuer le suivi de l'évolution du Glacier du Travnolo.

## 5 Résultats

Cette partie présente les résultats qui permettront de valider ou d'infirmer nos hypothèses de travail.

Elle sera ainsi divisée en deux parties de façon à correspondre à chacune de nos hypothèses.

### 5.1 « Le drone fournit des données de qualité suffisante dans le cadre d'une reconstruction photogrammétrique de glacier de montagne »

Pour rappel, la qualité des données utilisées lors d'une reconstruction photogrammétrique d'un objet est définie par :

- la maîtrise du drone ;
- la qualité des images ;
- la qualité de la reconstruction.

#### 5.1.1 Maîtrise du drone

##### 5.1.1.1 Trajectoire

La trajectoire suivie par le drone a été élaborée en tentant de respecter le « plan d'acquisition idéal dans un cas général » de reconstruction photogrammétrique, montré à la figure 15 du Chapitre 3.

Concernant la partie aval, survolée à l'aide de l'option *way-point*, le dessin de la trajectoire suivie à l'aide de points de passage s'est effectué sur le terrain. Les repères visuels extérieurs ont permis de réaliser un parcours proche du plan théorique.

La partie située en amont, où ce mode était impossible à utiliser, n'a pas suivi ce canevas général. Un plan reprenant les trajectoires des différents vols est repris à la Figure 44.

##### 5.1.1.2 Hauteur de vol

La hauteur de vol s'est avérée être un paramètre difficile à conserver durant le vol. En effet, le drone ne fournit pas en temps réel l'altitude à laquelle il vole mais seulement sa hauteur par rapport à son lieu de décollage. Il a donc été difficile de s'assurer de la hauteur à laquelle le drone volait à chaque instant.

Pour s'approcher au mieux de la hauteur définie lors de l'élaboration de la méthode, nous avons défini, pour rappel, pour la partie inférieure, un ensemble de *way-point* situés au-dessus des cibles par lesquels le drone passe et nous avons calculé la hauteur par rapport au lieu de décollage à laquelle le drone doit se trouver lorsqu'il passe au-dessus de ces cibles. Entre ces points, le drone volera avec une ascension constante.

La partie supérieure a quant à elle été relevée en volant à l'aide de la télécommande directement. Ainsi les paramètres de hauteur et de vitesse étaient beaucoup plus approximatifs.

L'analyse de la hauteur de vol n'a pu être réalisée de façon précise qu'après la reconstruction photogrammétrique. C'est en effet seulement après cette étape que nous obtenons un modèle précis de la surface du sol et la position ajustée des clichés déterminée lors de l'aérotriangulation.

Le Tableau 11 reprend les valeurs caractéristiques des hauteurs de vol lors de chacune des sessions d'acquisition de données.

Figure 44 : Trajectoire du drone en fonction de la session d'acquisition de données

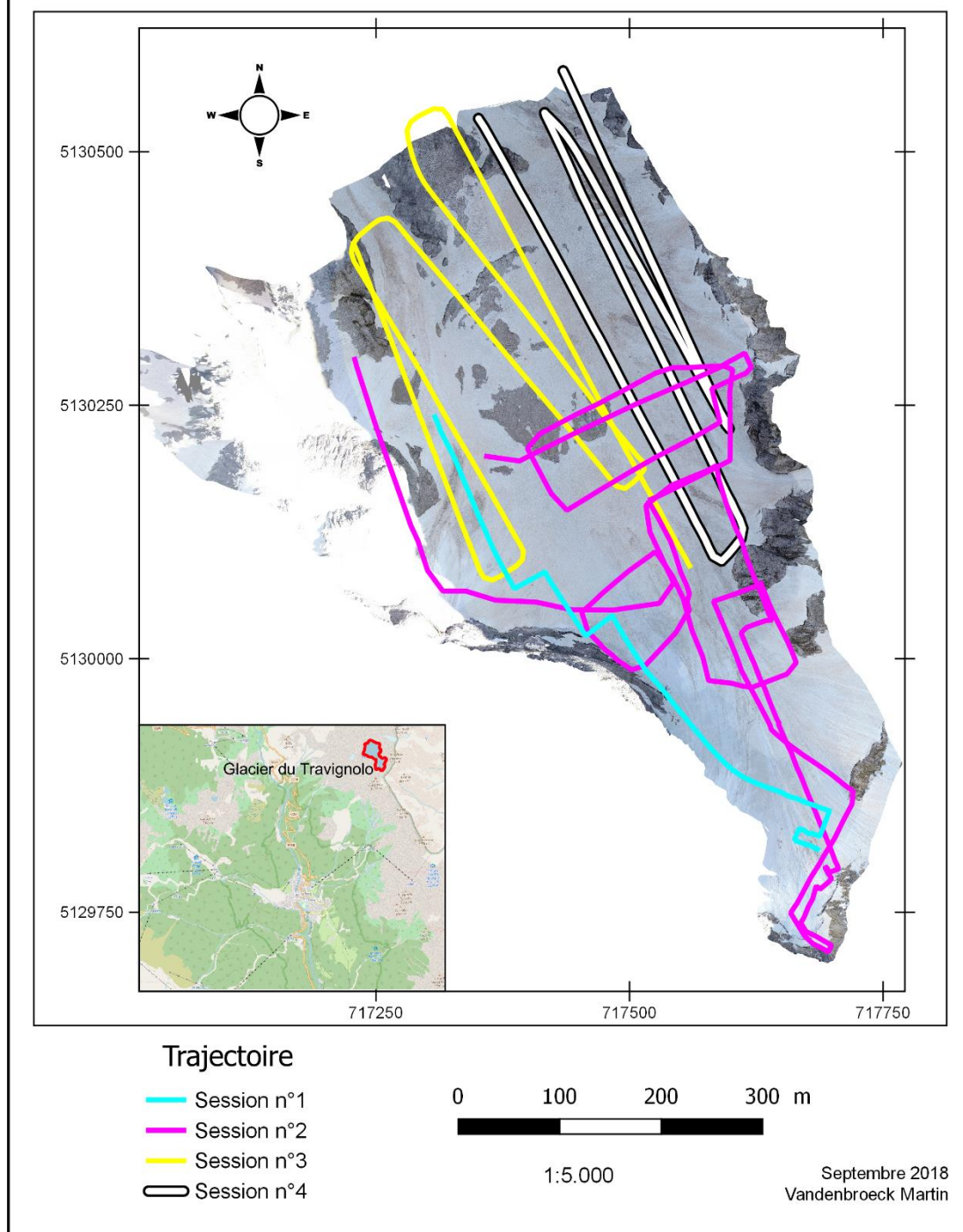


Figure 44 : Trajectoire du drone en fonction de la session d'acquisition de données

Tableau 11 : Hauteur de vol lors des différentes sessions

Hauteur de vol [m]					
Session d'acquisition n°1			Session d'acquisition n°2		
Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
11.543	59.675	117.953	12.489	127.848	283.586

Session d'acquisition n°3			Session d'acquisition n°4		
Minimum	Moyenne	Maximum	Minimum	Moyenne	Maximum
57.273	121.889	174.943	95.321	137.859	122.256

On peut constater qu'aucune des sessions d'acquisition de données n'a été effectuée à la hauteur initialement prévue de 80 m. La variation de hauteur de vol effective et le décalage entre la hauteur moyenne à laquelle le drone a volé et la hauteur prévue peuvent s'expliquer par plusieurs contraintes liées au drone et à son fonctionnement.

Lors des missions *way-point*, le drone a volé en suivant une ligne droite entre les différents points de passage. Ces points ne suivant pas les variations de relief du glacier, une imprécision et une variation de la hauteur est apparue lors de ces déplacements.

Concernant le haut du glacier dont le relevé s'est fait en volant directement à l'aide de la télécommande, la hauteur et la distance auxquelles se trouvait le drone rendaient son pilotage beaucoup plus compliqué. De plus, les parois, dont les sommets étaient beaucoup plus hauts que la hauteur à laquelle le drone volait, rendaient le lever des bords très périlleux par leur proximité. Ce contexte a rendu la mission de vol très complexe dans la partie supérieure du glacier.

#### 5.1.1.3 Vitesse de vol

La vitesse de vol, pour la partie basse, est définie de façon automatique lors de la sélection du mode *way-point*. Ainsi, ce paramètre a été très bien maîtrisé.

Concernant la partie supérieure du glacier, le télépilotage et l'acquisition de données se sont faits manuellement. La gestion des vitesses horizontales et verticales s'est avérée être très complexe à réaliser pour le pilote. Ainsi, la vitesse, et plus particulièrement dans les zones où le *way-point* n'était pas disponible, a été problématique dans la maîtrise du drone durant l'acquisition de données.

#### 5.1.1.4 Prise des clichés

Dans cette partie, nous nous limitons aux détails de la mise en œuvre concernant la prise des clichés. La qualité des images est traitée à la Section 4.1.2 ci-dessous.

Les clichés effectués par le drone peuvent être enregistrés à une fréquence donnée de manière automatique durant le vol et plus particulièrement lors d'un vol suivant une mission *way-point*. Cette automatisation du procédé de prises de vue permet d'affirmer que nous avons maîtrisé la prise de clichés dans la partie basse du glacier.

De même que pour la vitesse de vol, la gestion de la prise des clichés dans la partie haute du glacier n'a pas été optimale. Nous aurions cependant pu nous prémunir contre ce problème en utilisant le mode de prise de clichés automatique dans cette partie.

### Position des photos

Le rapport de qualité fourni lors de l'aérotriangulation donne la position calculée des clichés lors de l'ajustement et l'incertitude liée à ce positionnement.

Cette position permet d'analyser la distance de correction entre cette position ajustée et celle fournie par les métadonnées des clichés, qui est celle mesurée par le GPS à bord du drone.

Le Tableau ci-dessous reprend les valeurs caractéristiques de l'incertitude de positionnement et des distances d'ajustement des clichés.

Tableau 12 : Paramètres liés au positionnement des clichés après aérotriangulation

	Incertainde de positionnement [m]			Ecart de distance[m]	
	X (UTM-32N)	Y (UTM-32N)	Z (UTM-32N)	Planimétrique	Altimétrique
<b>Minimum</b>	0.00035	0.00045	0.00026	0	0
<b>Moyenne</b>	0.00477	0.00449	0.00296	4.431	12.282
<b>Maximum</b>	0.1989	0.06828	0.02262	11.569	28.716

#### 5.1.1.5 Précision de l'appareil photo

Le rapport de qualité fourni lors de l'aérotriangulation donne les paramètres de calibration de la caméra après l'ajustement. Cette calibration est effectuée, pour rappel, suivant le modèle de Brown-Conrady.

Le Tableau ci-dessous reprend ces paramètres.

Tableau 13 : Paramètres de calibration de la caméra

	Focal Length	Focal Length Equivalent 35 mm	Principal Point X	Principal Point Y
	[mm]	[mm]	[pixels]	[pixels]
<b>Previous Values</b>	8.8	24		
<b>Optimized Values</b>	8.83	24.08	2734.73	1540.46
<b>Difference Previous / Optimized</b>	0.03	0.08		
<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
0.0054	-0.0091	0.0092	0	0

La position du point principal doit normalement se trouver au centre du capteur, à savoir aux coordonnées image (2736,1539). Dans notre cas, on remarque que cette position diffère de 1.27 et de 1.46 pixels.

Pour pouvoir détailler l'importance des distorsions créées par les paramètres repris dans le Tableau 13, une représentation géométrique des déformations spatiales en fonction de la distance du point principal serait utile. Le rapport de qualité reprend une grille représentant ces déformations. Cependant, l'épaisseur des traits du grillage rend toute analyse impossible.

## 5.1.2 Qualité des images

### 5.1.2.1 Détails des clichés

Nous avons utilisé le mode manuel pour fixer l'ouverture, le temps de pose et la sensibilité de façon à obtenir des images très contrastées.

Afin de maximiser les chances d'enregistrer des données de qualité, nous avons effectué les prises de vue en suivant les recommandations mentionnées au Chapitre 4 – Section 1.2.

Ainsi, la prise de clichés a été réalisée au lever du jour lorsque le soleil n'éclairait pas directement la surface du glacier.

### 5.1.2.2 Précision des clichés

Pour rappel, le GSD définissant la densité de l'échantillonnage radiométrique au sol dépend, entre autre, de la hauteur de vol. Ce paramètre, comme nous l'avons montré à la section 5.1.1.2 ci-dessus, n'a pas été parfaitement maîtrisé.

Le Tableau 14 présente les GSD moyens et maximums des clichés obtenus lors de chaque session d'acquisition de données.

Tableau 14 : GSD moyen et maximum pour chaque session de vol effectuée

GSD [cm/pixel]			
Session d'acquisition n°1		Session d'acquisition n°2	
Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
1.63	3.23	3.5	7.77

Session d'acquisition n°3		Session d'acquisition n°4	
Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
3.34	4.79	3.35	3.77

## 5.1.3 Caractéristiques de la reconstruction

La première analyse à effectuer concerne la qualité de la reconstruction et sa validation.

Les résultats fournis par le logiciel permettant d'analyser la reconstruction s'avèrent être peu nombreux et dont l'utilité est discutable.

Les documents contenant ces informations qualitatives sont les rapports d'aérotriangulation, de qualité et des photos. Ces différents rapports contiennent un nombre important de cartes représentant spatialement l'erreur mais des tableaux permettant d'effectuer des analyses statistiques de ces erreurs seraient beaucoup plus utiles pour analyser la qualité de notre travail.

Le rapport de l'aérotriangulation repris à l'Annexe 5.1 contient une information concernant la précision de la reconstruction en chaque point homologue.

Les informations principales de cette précision sont reprises dans le tableau 15:

Tableau 15 : Précision du modèle reconstruit

Points homologues générés					
Nombre de points	Nombre de photos par point	Nombre de points par photo	Erreur de reprojection	Erreur de reprojection	Distances aux rayons
	médiane	médiane	médiane	RMS	RMS
		[pixel]	[pixel]	[pixel]	[m]
350 276	4	2749	0.5	0.66	0.019

Concernant la validation du modèle tridimensionnel, celle-ci s'opère en mesurant les écarts entre les positions modélisées par la reconstruction et les positions obtenues par mesure topographique des cibles de validations.

Le résultat de cette analyse est repris dans le Tableau 16 :

Tableau 16 : Ecarts de la reconstruction

	Ecarts de reconstruction		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
<b>Minimum</b>	0.004	0.0148	0.025
<b>Moyenne</b>	0.104	0.152	0.399
<b>Maximum</b>	0.492	1.030	0.764

Notons qu'il est difficile de juger de la pertinence de ces résultats. En effet, ils ont été obtenus sur un petit échantillon composé de 23 points répartis sur le glacier. Ils permettent simplement d'évaluer les écarts de façon ponctuelle en ces différents points mais, par manque de représentativité spatiale, ne permettent pas d'autres conclusions quant à l'exactitude de la reconstruction. Les résultats ci-dessus dépendent de la qualité des données présentées aux sections 5.1.1 et 5.1.2 et de l'efficacité de l'algorithme lors de la réalisation de la reconstruction photogrammétrique. De la même manière que pour les rapports de qualité, les développeurs du logiciel ne fournissent que peu d'information concernant le fonctionnement du logiciel. Outre le fait qu'il utilise l'algorithme SIFT, aucune autre information n'est disponible concernant son fonctionnement pour l'identification des points homologues.

#### 5.1.3.1 Homogénéité spatiale

La procédure de reconstruction tridimensionnelle réalisée par le logiciel a identifié 350 276 points homologues.

L'homogénéité spatiale de la qualité de la reconstruction peut être analysée de plusieurs manières. Le rapport de l'aérotriangulation fournit une information quant au nombre de photos observant un même point homologue détecté ainsi que l'incertitude sur la détermination de la position de ces points homologues. La répartition et la variation spatiale de cette incertitude permet de contrôler l'homogénéité spatiale de l'erreur de la reconstruction.

#### Précision de la position des points homologues

Tableau 17 : Imprécision de la position des points homologues

Imprécision de la position [m]		
Minimum	Moyenne	Maximum
0.002	0.072	1.971



Les cartes réalisées par le logiciel lors de l'aérotriangulation, présentées à la Figure 45, montrent la variation spatiale de cette imprécision.

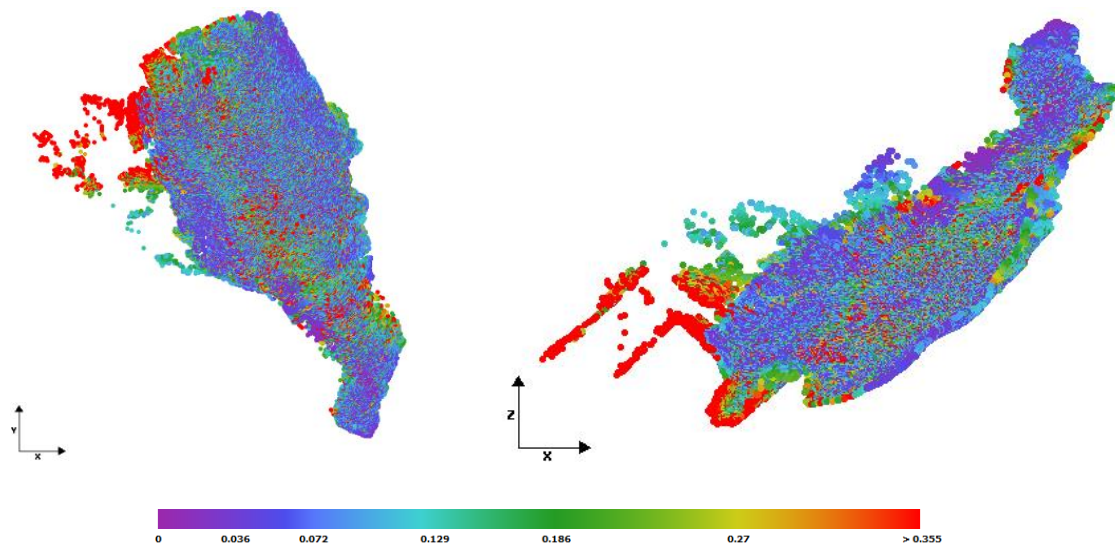


Figure 45 : Incertitude de positionnement des points homologues identifiés lors de la reconstruction

On peut remarquer que seules les parties latérales situées à l'extérieur du glacier sont très imprécises ( $> 35$  cm). La majorité du glacier est de couleur bleue – mauve, représentant une imprécision égale ou inférieure à l'imprécision moyenne reprise dans le Tableau 17.

### Nombre de photos observant un point homologue

Tableau 18 : Nombre de photos observant un même point homologue

Nombre de photos observant un point homologue [ ]		
Minimum	Moyenne	Maximum
3	5	70

Les cartes réalisées par le logiciel lors de l'aérotriangulation, présentées à la Figure 46, montrent le nombre de photos observant un même point homologue.

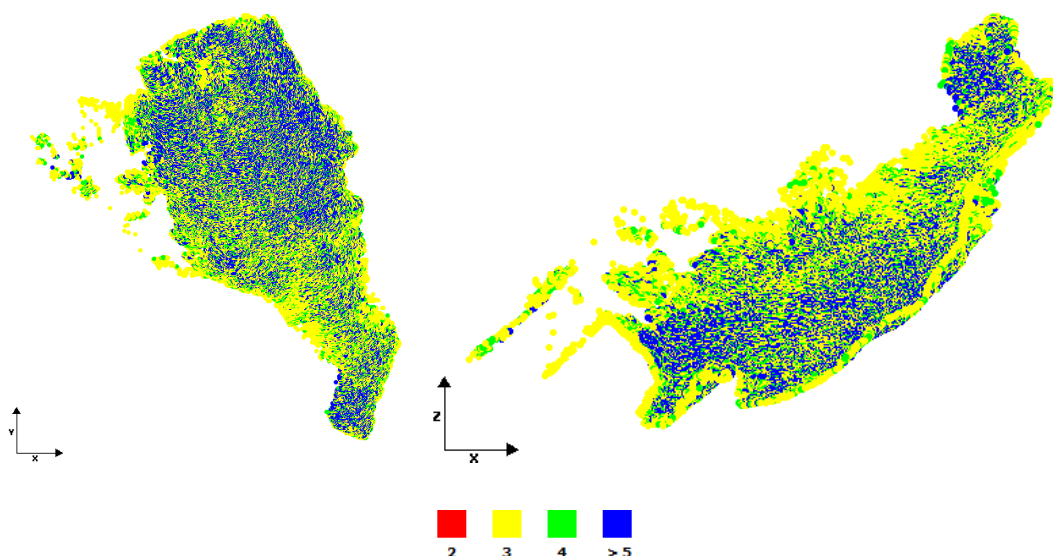


Figure 46 : Nombre de photos identifiant un point homologue identifié lors de la reconstruction



On peut remarquer que la partie aval et le sommet du glacier sont majoritairement représentés en bleu, soit 5 photos ou plus observant un même point. Le pourtour ainsi qu'une partie située dans la partie haute sont d'avantages représentés en jaune et en vert, soit un même point observé par 3 ou 4 photos.

Notons que comme le montre le Tableau 18, le minimum de photos observant un point homologue est de 3. Cela permet de vérifier que l'on suit les recommandations relatives aux prises de vue fournies par le logiciel (Chapitre 4 - Section 3.1).

#### 5.1.3.2 Précision suffisante par rapport à la dynamique du glacier

La précision géométrique du modèle photogrammétrique résulte d'un ensemble d'opérations successives ayant chacune sa propre précision.

De façon résumée, la précision spatiale finale dépend elle-même des différentes précisions obtenues pour :

1. **le cheminement**

Lors du calcul de l'écart de fermeture, nous obtenons la précision sur les coordonnées des points de références contraignant la restitution photogrammétrique.

2. **le lever**

Lors de la propagation de variance, nous obtenons la précision sur les cibles.

3. **la reconstruction photogrammétrique**

Nous utilisons les précisions des cibles calculées à l'étape précédente pour effectuer la reconstruction.

4. **le produit 3D final**

Le rapport d'aérotriangulation reprend la résolution des points homologues.

### **Cheminement**

La première source d'imprécision géométrique est le cheminement réalisé sur les trois stations de références.

#### **Fermeture angulaire**

Lors de cette opération, nous pouvons tout d'abord calculer l'erreur de fermeture angulaire.

Si l'erreur observée dans notre travail dépasse l'erreur admissible, le cheminement réalisé est entaché d'une erreur trop importante et cette opération est à recommencer.

Le Tableau 19 reprend l'erreur angulaire observée et comparée aux erreurs admissibles mentionnées au point 2.1.2 et calculées selon les formules reprises à l'Annexe 1.

L'Annexe 4.1 reprend le détail de tous les calculs topographiques. Ces résultats sont discutés au Chapitre 6.

Tableau 19 : Erreur de fermeture angulaire

Erreur de fermeture angulaire [mgon]		
Erreur admissible	Tolérance de Miles&Lagofun	Erreur observée
11,7	7,01	17,1

#### **Fermeture planimétrique**

De la même manière que pour l'écart de fermeture angulaire, il est possible de calculer l'erreur planimétrique réalisée sur le cheminement. Cette erreur, calculée par propagation de variance au départ des mesures d'angle et de distance, est alors comparée à l'erreur admissible dépendant de la précision de l'appareil utilisé.

Le Tableau 20 reprend les écarts planimétriques observé et admissible. Les formules définissant l'erreur admissible sont reprises à l'Annexe 1.

Tableau 20 : Ecart de fermeture planimétrique

Ecart de fermeture planimétrique [m]	
Erreur admissible	Erreur observée
0.032	0.018

### Précision des coordonnées du cheminement

Cette méthode de propagation de variance fournit également les précisions sur les coordonnées des stations de référence composant le cheminement. Le résultat de cette propagation de variance, déjà repris dans le Tableau 6 est rappelé ici dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Précision des coordonnées

REF_1			REF_2			REF_3		
$\sigma_X$ [m]	$\sigma_Y$ [m]	$\sigma_Z$ [m]	$\sigma_X$ [m]	$\sigma_Y$ [m]	$\sigma_Z$ [m]	$\sigma_X$ [m]	$\sigma_Y$ [m]	$\sigma_Z$ [m]
0.0023	0.0076	0.0031	0	0.0157	0	0.0221	0.0088	0.0123

### Lever topographique des cibles

Comme nous l'avons détaillé dans le Chapitre 4, la précision des coordonnées de chaque cible est calculée par propagation de variance des mesures effectuées vers cette cibles en tenant compte de l'imprécision sur les coordonnées de la station au départ de laquelle cette cible a été visée et de l'incertitude sur les angles et les distances.

La Figure 47 représente les ellipses d'erreur de chacune des cibles.

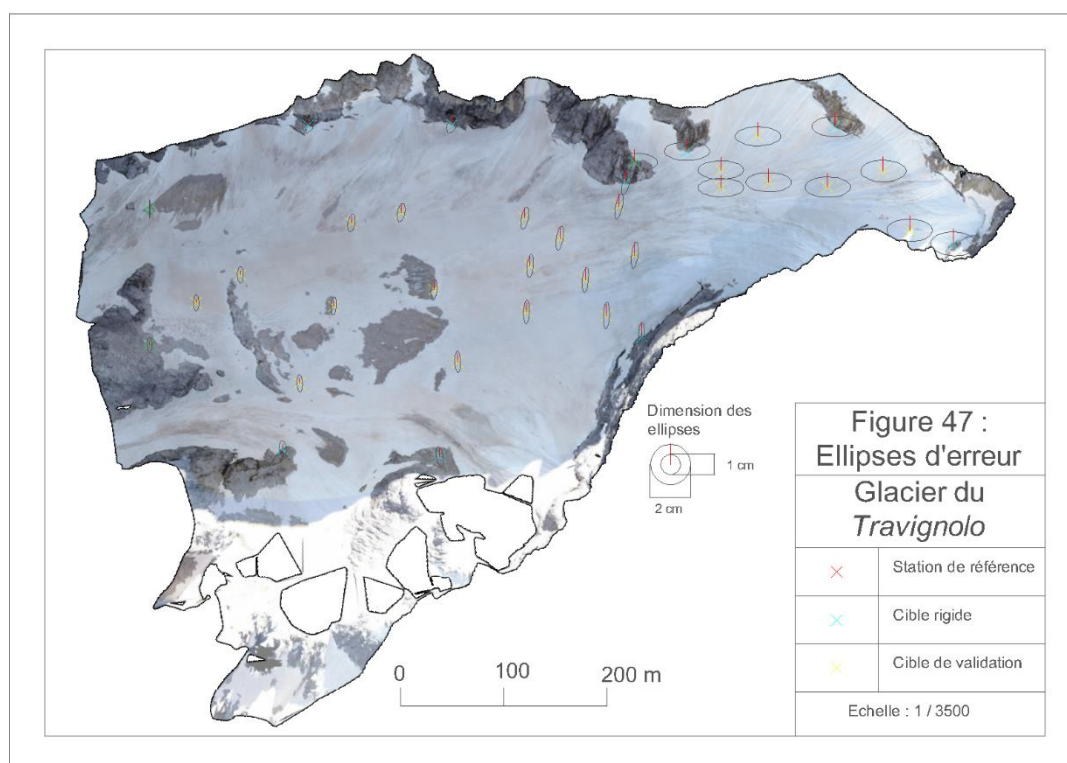


Figure 47 : Ellipses d'erreur sur les cibles

Le tableau en Annexe 4.3 reprend les précisions sur les coordonnées des cibles.

### Géo-référencement

Le choix de la méthode de positionnement pour effectuer le géo-référencement est opéré en fonction de la précision offerte par chacune de ces méthodes et celle requise pour la mission. Nous avons par conséquent utilisé les coordonnées fournies par les observations réalisées sur les ondes porteuses.

Le Tableau 22 reprend la précision de ces coordonnées.

Tableau 22 : Précision des coordonnées obtenues par observation des ondes porteuses

Station : REF_1			Station : REF_2		
$\sigma_X$ [m]	$\sigma_Y$ [m]	$\sigma_Z$ [m]	$\sigma_X$ [m]	$\sigma_Y$ [m]	$\sigma_Z$ [m]
0.011	0.005	0.010	0.014	0.007	0.013

L'Annexe 4.4 reprend la précision de chacune des autres méthodes.

### Reconstruction tridimensionnelle

Les précisions mentionnées ci-dessus permettent de calculer les précisions planimétrique et altimétrique finale de chaque cible utilisées pour effectuer l'aérotriangulation.

Le rapport de qualité contient les cartes, montrées à la Figure 46, reprenant les erreurs de reprojection de chacun des points homologues identifiés lors de la reconstruction photogrammétrique.

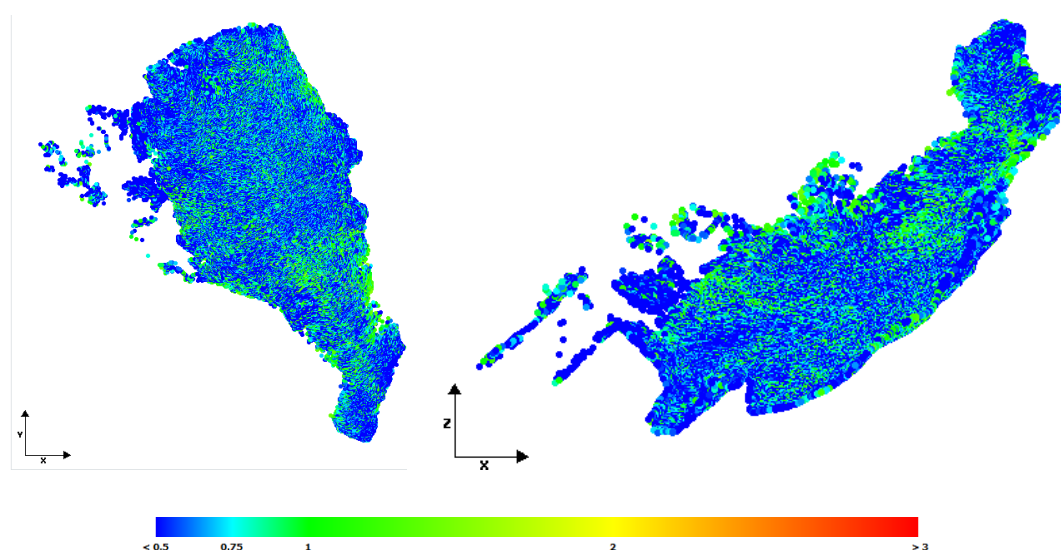


Figure 48 : Erreurs de reprojection de chacun des points homologues identifiés lors de la reconstruction photogrammétrique

Le Tableau 23 reprend les valeurs caractéristiques de l'erreur de reprojection des points homologues identifiés lors de la reconstruction photogrammétrique.

Tableau 23 : Erreur de reprojection des points homologues

Erreur de reprojection [pixel]		
Minimum	Moyenne	Maximum
0.001	0.66	1.88

## 5.2 « Le protocole de lever photogrammétrique d'un glacier de montagne utilisant le drone en tant que moyen d'acquisition de données est reproductible en vue d'établir un suivi du glacier au cours du temps »

La reproductibilité du protocole défini ci-dessus dépend des éléments suivants :

- La position des cibles rigides est accessible et permet l'installation de nouvelles cibles lors d'une prochaine mission ;
- La reproduction des vols assurant la cohérence géométrique des reconstructions effectuées à différents moments.

### 5.2.1 Position des cibles

Ce protocole a été établi en ayant comme objectif de limiter le nombre d'opérations à réaliser pour réaliser un lever photogrammétrique ultérieur. Les étapes de topographie consistant à réaliser le cheminement, le lever topographique des cibles rigides et les observations à l'aide du récepteur GNSS sont laborieuses et prennent beaucoup de temps. Idéalement, elles ne doivent pas être répétées.

La position des cibles rigides doit alors être suffisamment stable pour permettre d'installer ces cibles lors d'une prochaine mission. Ainsi, la seule opération préalable au vol du drone consiste à placer les cibles suivant la méthode décrite à la section 1.2.1, selon le mode de fixation utilisé pour chacune des cibles (Tableau 24).

La position de ces cibles et des stations de références, constituant l'ensemble des points d'orientation de la reconstruction, est connue en coordonnées UTM-32N. La Figure 37 identifie la position de chacune de ces cibles.

De plus, des marques à la peinture ont été effectuées pour retrouver ces positions sur le terrain.

#### Fixation des cibles rigides

\* Les cibles placées sur les stations de références ont été placées directement sur la roche mais ont nécessité un placement particulier. Nous avons en effet dû percer les cibles d'un trou supplémentaire au centre de celles-ci. Cela permet d'effectuer des mises en stations au-dessus de ces cibles. Ce placement particulier rend cependant l'identification du point de référence plus complexe pour ces cibles. Le trou central de la cible matérialisant la station REF\_1 se situe le plus au Sud parmi les deux trous dans la roche. La cible placée à la station REF\_2 est fixée par les deux trous placés sur la diagonale et un trou supplémentaire au centre de la cible matérialise la station. Le trou central de la cible matérialisant la station REF\_3 se situe le plus au Nord parmi les deux trous dans la roche.

Tableau 24 : Fixation des cibles rigides

Cible	Fixation
<b>Cible 1</b>	Directe sur la roche
<b>Cible 2</b>	Directe sur la roche
<b>Cible 3</b>	Equerre 90°
<b>Cible 4</b>	Equerre 30 - 60°
<b>Cible 5</b>	Equerre 90°
<b>Cible 6</b>	Equerre 90°
<b>Cible 7</b>	Equerre 90°
<b>Cible 8</b>	Equerre 90°

### 5.2.2 Reproduction des sessions de vol

Les vols effectués dans la partie aval du glacier ont été réalisés à l'aide de la mission *way-point*. Ces missions sont enregistrées dans la télécommande du drone et sont ainsi reproductibles.

Notons toutefois qu'il est également possible d'utiliser une télécommande branchée à un smartphone pour piloter le drone. Cette solution est alors plus flexible quant au drone utilisé car la mission est enregistrée dans le smartphone et non dans le drone.

L'acquisition des données réalisée dans la partie amont du glacier s'est faite au moment du vol réalisé manuellement par le pilote. Les vols, bien que non automatisés par l'usage d'une mission *way-point*, peuvent être réitérés selon les compétences du pilote manipulant le drone.

# Discussion

---

Après avoir testé et adapté notre protocole théorique, nous pouvons maintenant discuter nos résultats pour (in)valider nos hypothèses de travail.

Les discussions et conclusions de ce chapitre ne sont valables que dans le cadre de ce travail et ne constituent en aucun cas une méthode définitive à appliquer pour élaborer un lever photogrammétrique en milieu glaciaire.

Pour rappel, nos hypothèses de travail sont les suivantes :

- **H1** : « *Le drone fournit des données de qualité suffisante dans le cadre d'une reconstruction photogrammétrique de glacier de montagne.* »
- **H2** : « *Le protocole de lever photogrammétrique d'un glacier de montagne utilisant le drone en tant que moyen d'acquisition de données est reproductible en vue d'établir un suivi du glacier au cours du temps.* »

Nous allons maintenant discuter chacune de ces hypothèses en commençant par H1. Afin de la valider, nous devons valider chacun des éléments la constituant.

Cette première hypothèse étudie principalement la qualité des données fournies par le drone pour effectuer une reconstruction photogrammétrique. Nous allons donc nous concentrer principalement sur l'étude de la précision à laquelle la reconstruction a été réalisée par rapport aux attentes fixées.

Les données que nous avons utilisées pour effectuer la reconstruction photogrammétrique sont représentées par les clichés du drone ainsi que par les données terrain pour effectuer l'orientation du modèle, qui sont également à prendre en compte dans cette analyse car elles interviennent dans les traitements effectués par le logiciel de photogrammétrie pour réaliser la reconstruction photogrammétrique.

Concernant ces données terrain acquises par méthode topographique, l'imprécision liée à l'erreur de reprojection (Figure 27) et l'erreur des distances aux rayons (Figure 28) obtenues pour chaque point homologue est influencée par les données du cheminement, du lever topographique, du géo-référencement et de la reconstruction tridimensionnelle.

Concernant le **cheminement** qui, pour rappel, est hors tolérance, diverses sources d'erreurs sont à prendre en compte pour tenter d'apporter une explication de l'imprécision constatée. En effet, la forme du réseau est un triangle dont la base définie par les stations REF\_1 et REF\_2 mesure 100 m environ et la hauteur REF\_3 est située à plus de 500 m. Cette forme, éloignée de la forme idéale caractérisée par un polygone régulier, est une source d'incertitude.

De plus, les visées effectuées sont très inclinées (de l'ordre de 40 %). Une erreur de mise en station lors de l'installation de l'appareil provoque un balayement non vertical lors des mesures et est d'autant plus important que la visée est inclinée. Bien que normalement éliminée par la méthode du double retournement, cette source d'erreur est à considérer d'expliquer l'imprécision constatée.

Concernant l'effet atmosphérique, les paramètres n'ont pas pu être déterminés de façon exacte car nous n'avons pas de station météo lors de la mission. De plus, les visées entre les stations passent par endroit à plus de 20 m au-dessus de la surface du glacier. Cette variation de hauteur se répercute sur les mesures car le gradient vertical de température est important, et plus particulièrement encore le matin, c'est-à-dire lorsque les mesures ont été effectuées. Il ne nous a cependant pas été possible de mesurer cet effet. Une imprécision sur les mesures

d'angles (par réfraction) et de distances (par dispersion) s'est donc produite lors de cette étape.

Enfin, des erreurs de manipulations de l'instrument, bien qu'évitées autant que possible, ont pu se produire et créer une erreur de fermeture angulaire trop importante.

Ensuite, la détermination de la position des cibles rigides était également effectuée de manière imprécise. Les cibles ne sont pas assez rigides et celles accrochées à l'aide d'équerres présentent un mouvement sous l'effet du vent. De plus, lorsque ces positions ont été mesurées, le maintien vertical du mini-prisme, bien que monté sur un support très court (40 cm pour la plupart des mesures) s'est avéré très complexe étant donné l'instabilité du support sur lequel l'opérateur se trouvait.

Enfin, le **géo-référencement** a été établi au départ des données traitées par les données GNSS observées sur les ondes porteuses, de haute précision. Si nous avons utilisé les données provenant des codes (voir Annexe 4.4), nous aurions inséré une source d'imprécision supplémentaire.

Concernant les clichés enregistrés par le drone, l'imprécision liée à l'erreur de reprojection (Figure 27) et l'erreur des distances aux rayons (Figure 28) obtenues pour chaque point homologue est influencée par le GSD. Comme nous l'avons montré dans les résultats, à l'exception de la session de d'acquisition de données n°1 (Figure 38), les clichés ont été réalisés à une altitude moyenne de 128 m. À cette altitude, le GSD des clichés est de 3.5 cm/pixel.

La mesure de la dynamique glaciaire de petits glaciers effectuée par Rossini *et al.* (2018) est de l'ordre de 14 cm/pixel. L'analyse de la dynamique propre au Glacier du *Travignolo* étudiée par Valcanover (2016) nous permet d'établir que le glacier évolue à une vitesse de l'ordre du mètre par an. Dans notre expérimentation, le rapport de qualité, établi lors de l'aérotriangulation, montre que le GSD médian de la reconstruction (Annexe 5.2) vaut 3.1 cm/pixel. Ceci signifie que l'information disponible au départ de ces données est de qualité supérieure aux exigences généralement liées à l'acquisition de données pour la modélisation de petits glaciers.

**Ainsi, nous pouvons dire que la qualité des données fournies par le drone est suffisante à la reconstruction photogrammétrique du glacier de montagne du Travignolo, et valider par la même occasion notre première hypothèse.**

Notre seconde hypothèse étudie la reproductibilité du protocole en vue d'établir un suivi du glacier au cours du temps. Notre discussion doit se porter sur les deux éléments constituant cette hypothèse. Nous allons d'abord nous intéresser à la reproductibilité au sens propre du protocole, ensuite nous nous intéresserons aux différents éléments constitutifs de ce protocole, y compris l'époque de l'année à préférer pour mener pareille entreprise. Nous évaluerons par la même occasion dans quelle mesure les différents composants vont s'avérer pertinents ou non pour effectuer le suivi du glacier.

La reproductibilité du protocole peut être étudiée sous deux angles différents. En premier lieu, il faut se pencher sur la position des cibles d'orientation et le remplacement géométriquement similaire de ces cibles pour d'autres missions. Ces cibles ont été placées à des endroits permettant de retrouver aisément leur emplacement. Dans une optique de reproductibilité, ces emplacements se doivent d'être facilement accessibles pour un opérateur expérimenté de l'environnement montagneux ou avec l'aide d'un guide de haute montagne.

Une remarque concernant la stabilité du substratum rocheux doit être soulevée. En effet, nous avons, dans la mesure du possible, utilisé des positions pour établir les cibles qui paraissaient, au moment de la mission, être suffisamment stables dans le temps. Une revisite réalisée durant le mois de Juillet soulève des inquiétudes concernant les cibles REF\_2 et 3. La roche sur laquelle la station REF\_2 est établie pourrait être un bloc détaché et par conséquent,

meuble. La cible 3 est attachée, quant à elle, à une paroi présentant un risque de détachement dans les années à venir.

Les trous de forage représentent également un aspect important en termes de reproductibilité. Ils ont été effectués dans la roche de façon à permettre le placement de nouvelles cibles aux mêmes endroits que ceux choisis lors de ce travail.

En ce qui concerne les éléments constitutifs du protocole, il est important de rappeler qu'un protocole définit à la fois la méthode permettant de réaliser une expérimentation et les conditions dans lesquelles cette méthode doit se dérouler.

La période à laquelle la méthode doit se dérouler constitue certainement une des contraintes principales pour l'obtention et l'utilisation de tout résultat relatif aux principales caractéristiques du glacier telles que la pente, l'emprise, l'exposition,...

De façon générale, dans les Alpes, le moment préconisé par la littérature pour effectuer de façon optimale une modélisation correspond soit au minimum neigeux observable en fin de l'été ou en Septembre (Morandini, 1951 ; Cesco-Cancian, 1993), soit durant le pic d'accumulation neigeuse enregistré en Avril (De Michele *et al.*, 2016).

Les contraintes liées au délai de réalisation de ce travail nous ont obligés à mettre en œuvre notre protocole sur le terrain durant le mois de Juin. Nous n'étions donc pas dans les périodes optimales citées ci-dessus. Cela a eu une conséquence directe sur les choix effectués pour le positionnement des cibles. Celles-ci ont été placées de la façon qui semblait être la plus adaptée au moment de la mission. Lors d'une réalisation ultérieure de la mission à une période plus optimale, la position des cibles pourrait en effet se situer sous plusieurs mètres de neige ou à plusieurs mètres de hauteur le long d'une paroi rocheuse. Cependant, nous pensons que notre méthode est reproductible, moyennant d'éventuelles adaptations concernant la position des cibles, et ce, indépendamment de la période choisie pour réaliser une nouvelle expérimentation.

En ce qui concerne les paramètres propres à notre protocole, ils sont principalement représentés sur le terrain par le matériel utilisé pour l'acquisition des données composé du drone et de la caméra embarquée, de la station totale et du récepteur GNSS.

L'autonomie du drone et son mode de pilotage constituent à nos yeux les principaux facteurs critiques pour une utilisation reproductible du drone comme moyen d'acquisition des données en vue d'effectuer un suivi du glacier.

L'autonomie du drone et ses deux modes de pilotage, modes manuel ou *way-point*, peuvent être associés dans une même discussion.

En mode manuel, le drone est utilisable pour l'acquisition de données dès son décollage mais les clichés réalisés se font selon le pilote qui utilise l'appareil, elles sont donc sujettes à des variations qui peuvent influencer la répétabilité d'acquisition des données. En mode automatique, l'ensemble des réglages s'effectue après le décollage du drone, réduisant par la même occasion le temps de vol disponible. Cependant, le pilotage automatique permet par la suite de maximiser l'acquisition des données et permet de s'assurer de la fiabilité et de la répétabilité d'obtention des données acquises lors des vols.

Il est important de noter que la durée maximale de vol observée lors de l'utilisation du mode manuel a été de 1066 s. La durée maximale de vol observée lors de l'utilisation du mode *way-point* a été de 1751 s. Cette différence d'autonomie entre les deux modes plaide fortement pour une utilisation unique d'un mode de pilotage automatique. L'utilisation d'un drone équipé d'un récepteur GPS plus performant pourrait améliorer l'accès au signal GPS nécessaire et s'avérer plus pertinent. La meilleure répétabilité d'enregistrement des données obtenues lors d'un pilotage en mode automatique plaide également en faveur de ce type de pilotage.

Il est important de noter que dans le cas où l'acquisition des données ne peut se faire qu'à l'aide du mode manuel, nous préconisons d'effectuer des lignes de vol transversales car elles



permettront un meilleur suivi de l'évolution de la hauteur de vol durant l'acquisition des données.

En ce qui concerne la caméra embarquée, les possibilités offertes par le matériel utilisé sont, à nos yeux, suffisantes pour la bonne réalisation de notre travail. Un même type d'appareil peut être utilisé de façon pertinente lors d'une prochaine expérimentation.

Concernant la station totale, nous avons pu utiliser un matériel très onéreux et de très haute précision. Le niveau de précision offert par cette station s'est révélé approprié à nos conditions d'expérimentation.

Le dernier facteur d'acquisition des données que nous allons prendre en compte dans cette discussion est représenté par le récepteur GNSS. L'appareil utilisé s'est révélé très performant en offrant un degré de précision de l'ordre du centimètre, ce qui est largement suffisant pour notre travail.

**Ainsi, nous pouvons dire que le protocole suivi a offert, tant par ses constituants que par sa méthode, un ensemble de résultats assurant la garantie de sa reproductibilité en vue d'établir un suivi de l'évolution du glacier, et valider par la même occasion notre seconde hypothèse.**

# Conclusion

---

Le but de ce travail était de mettre en place un protocole d'acquisition de données par drone dans le contexte des petits glaciers, ceci en vue d'étudier si le drone est un moyen efficient d'acquisition de données en milieu montagneux et, plus précisément, de lever photogrammétrique permettant le suivi de l'évolution d'un glacier de montagne, plus particulièrement le *Travignolo*, au cours du temps.

Les conclusions et recommandations contenues dans ce travail pourraient servir d'orientation pour de futures recherches dans ce domaine.

La mise en application sur le terrain du protocole développé nous a permis de confirmer et de valider l'efficacité du drone en tant que moyen d'acquisition de données de qualité suffisante pour la reconstruction photogrammétrique d'un petit glacier de montagne. Nous avons également pu confirmer et valider la reproductibilité du protocole d'acquisition de données nécessaire au lever photogrammétrique.

Nous devons préciser toutefois que ce protocole est dépendant de la période à laquelle il est mis en œuvre. Nous n'étions donc pas dans les périodes optimales pour sa mise en œuvre. Cependant, nous pensons que notre méthode est reproductible, moyennant d'éventuelles adaptations concernant la position des cibles, et ce, indépendamment de la période choisie pour réaliser une nouvelle expérimentation.

D'un point de vue purement pratique, l'utilisation d'un drone en milieu montagneux s'est avérée totalement appropriée car, en plus des données qu'il permet d'acquérir jugées suffisantes pour la reconstruction photogrammétrique, son faible poids et l'agilité qu'il présente lors de son pilotage lui donnent des atouts supplémentaires pour être employé dans ces conditions.

Cependant, la dépendance du drone au signal GPS pour son pilotage et la prise automatique de données nous pousse à émettre quelques recommandations à ce propos. Etant donné l'intérêt de l'utilisation du mode *way-point*, un récepteur GPS plus performant que celui dont est équipé le drone utilisé pour ce travail est recommandé pour permettre l'emploi de ce mode de façon plus générale.

En terme de potentialités futures relatives à l'utilisation des résultats de ce travail, nous pensons que d'autres expérimentations pourraient être menées dans le futur, soit en effectuant une comparaison de plusieurs drones, soit en appliquant notre protocole à différents sites similaires ou encore en utilisant d'autres logiciels, de type Open-Source éventuellement, pour une reconstruction tridimensionnelle du ou des site(s) exploré(s).

# Bibliographie

---

Alley B. R., Lawson D. Evenson E., Larson J. G., Baker G. 2003. Stabilizing feedbacks in glacier-bed erosion. *Nature*. 424. pp.758-760.

Consulté le 05 août 2018 à l'URL :

[https://www.researchgate.net/profile/Daniel\\_Lawson3/publication/262260637\\_Stabilizing\\_feedbacks\\_in\\_glacier-bed\\_erosion/links/554249450cf234bdb219f411.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Daniel_Lawson3/publication/262260637_Stabilizing_feedbacks_in_glacier-bed_erosion/links/554249450cf234bdb219f411.pdf)

Arrêté royal du 10 avril 2016 relatif à l'utilisation des aéronefs télépilotés dans l'espace aérien belge. 2016. *Moniteur Belge*. 15 avril. pp. 25 944 – 25 968.

Bentley. 2016. ContextCapture User Guide. 238 p.

Consulté le 15 juillet 2018 à l'URL :

[http://195.250.185.245:8080/MyWeb/get/Allalaetavad/ContextCapture\\_User\\_Manual.pdf](http://195.250.185.245:8080/MyWeb/get/Allalaetavad/ContextCapture_User_Manual.pdf)

Bernard A. 2009. *Citiong Electronic resources*. Techno-Science.net. Consulté le 25 juillet 2018 <https://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=2890>.

Berthier E., Vincent C. 2012. Relative contribution of surface mass-balance and ice-flux changes to the accelerated thinning of Mer de Glace, French Alps, over 1979-2008. *Journal of Glaciology*. 58(209). pp.501-512.

DOI : 10.3189/2012JoG11J083

Billen, R. 2014. Notes de cours : Introduction à la topographie. *Systèmes de coordonnées*. Faculté de sciences - Unité de géomatique ,Université de Liège, inédit .

Billen, R. 2017. Notes de cours : Application de la théorie des erreurs à la topographie. *Erreurs de mesures*. Faculté de sciences - Unité de géomatique ,Université de Liège, inédit.

Braithwaite R. J., Raper S. C. B., Candela R. 2013. Recent changes (1991–2010) in glacier mass balance and air temperature in the European Alps. *Annals of Glaciology*, 54(63), pp. 139 – 146.

DOI : 10.3189/2013AoG63A285

Brown D. C. 1966. Decentering distortion of lenses, *Photometric Engineering*, 32(3), pp. 444-462.

Consulté le 15 juillet 2018 à l'URL : [http://www.close-range.com/docs/Decentering\\_Distortion\\_of\\_Lenses\\_Brown\\_1966\\_may\\_444-462.pdf](http://www.close-range.com/docs/Decentering_Distortion_of_Lenses_Brown_1966_may_444-462.pdf)

Burch R. 2008. *History of Photogrammetry*. An unpublished teaching document : The center for photogrammetric training, Surveying Engineering Department, Ferris State University, U.S.A., 25p.

Consulté le 4 Août 2018 à l'URL :

<http://www.ferris.edu/htmls/academics/course.offerings/burtchr/sure340/notes/history.pdf>

Castiglioni. 1928. Relazioni delle Campagne Glaciologiche del 1927. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*. 8. pp. 206-207

Cesco-Cancian, M., 1993. Relazioni della campagna glaciologica 1992. *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 16(2), p. 245.

Cesco-Cancian, M., 2000. Relazioni della campagna glaciologica 1999. *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 23(2), p. 227.

Collignon, A., 2010. Notes de cours : *Notions de photogrammétrie*. Faculté de sciences - Unité de géomatique, Université de Liège, inédit.

Dandois, P. J., Olano, M. & Ellis, E. C., 2015. Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing*, 23 Octobre, Issue 7, pp. 13895-13920.

DOI :10.3390/rs71013895

De Michele, C., Avanzi, F., Passoni, D., Barzaghi, R., Pinto, L., Dosso, P., Ghezzi A., Gianatti R., Della Vedova, G. 2016. Using a fixed-wing UAS to map snow depth distribution : an evaluation at peak accumulation. *The Cryosphere*, 10, pp. 511-522.

DOI:10.5194/tc-10-511-2016

Drouet H. 2017. *Citiong Electronic resources*. La taille des capteurs des APN : comparatif - luzphotos.com.

Consulté le 04 Avril 2018 à l'URL : <http://www.luzphotos.com/materiel/apn/taille-capteur-apn-comparatif>

Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J.H., Lenaerts J.T.M., van den Broeke, M.R., Gallée H. 2013. Estimating greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise. *The Cryosphere*. 7. pp. 469 – 489.

Gardner A. S., Moholdt G., Cogley J. G., Wouters B., Arendt A. A., Wahr J., Berthier E., Hock R., Pfeffer W. T., Kaser G., Ligtenberg S. R. M., Bolch T., Sharp M. J., Hagen J. O., Van Den Broeke M. R., Paul F. 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise; 2003 to 2009. *Science*, 340(6134), pp. 852-857.

DOI : 10.1126/science.1234532

Gerbaux, M., Genthon, C., Etchevers, P., Vincent, C., & Dedieu, J. 2005. Surface mass balance of glaciers in the French Alps: Distributed modeling and sensitivity to climate change. *Journal of Glaciology*, 51(175), pp. 561-572.

DOI:10.3189/172756505781829133

Haeberli W. 1998. Historical evolution and operational aspects of worldwide glacier monitoring. In : Haeberli W. Hoelzle M. Suter S. *Into the second century of worldwide glacier monitoring*. 1<sup>e</sup> ed. Unesco. pp. 35 – 51.

Consulté le 5 Juillet 2018 à l'URL :

[https://wgms.ch/downloads/published/other\\_reports/WGMS\\_IntoThe2ndCentury\\_1998.pdf](https://wgms.ch/downloads/published/other_reports/WGMS_IntoThe2ndCentury_1998.pdf)

Haeberli, W., Hoelzle, M., Paul, F., & Zemp, M. 2007. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: The European Alps. *Annals of Glaciology*, 46, pp. 150-160.

DOI :10.3189/172756407782871512

Eisenbeiss H. 2008. UAV photogrammetry in plant sciences and geology, In: *6th ARIDA Workshop on "Innovations in 3D Measurement, Modeling and Visualization*, Povo (Trento), Italy.

Henry J. B. 1999. Rapport de Stage : *Modélisation numérique du glissement de terrain de Super Sauze par voir de photogrammétrie aérienne*. UFR de Géographie – CEREG, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 93p. Consulté le 26 Juillet 2018 à l'URL : [http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/Henry\\_1999\\_StageENSAIS.pdf](http://eost.u-strasbg.fr/omiv/Publications/Henry_1999_StageENSAIS.pdf)

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems GPS ? GLONASS, Galileo and more. Springer, Vienna, 516 p.

DOI : 10.1007/978-3-211-73017-1

Houghton J.T., Ding Y., Griggs D. J., Noguer M., van der Linden P. J., Dai X., Maskell K., Johnson A. 2001. *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. Cambridge, Cambridge University Press. v. 1. 881 p.

Consulté le 5 Juillet 2018 à l'URL :

[https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WGI\\_TAR\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/pdf/WGI_TAR_full_report.pdf)

Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg (INSAS), 2011. *Photogrammetry Project*. Consulté le 13 Juillet 2018 à l'URL : <http://photo.insa.free.fr/historique.html>

Jacome Pereira A., Puech C., Raclot D., Bailly J.-S. 2007. *Extraction d'un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone*. Clermont-Ferrand, pp. 79-100.

Jacome Pereira A. 2010. *MNT à très haute résolution spatiale pour la représentation 3D de ravines d'érosion en montagne*. Thèse de doctorat. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, AgroParisTech, 260 p.

Jóhannesson T. 1997. The response of two Icelandic glaciers to climatic warming computed with a degree-day glacier mass-balance model coupled to a dynamic glacier model. *Journal of Glaciology*, 43(144), pp.321-327.

DOI:10.3189/S0022143000003270

Karara, H. M. & Faig, W., 1980. An expose on photographic data acquisition systems in close-range photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry*. 14(5). Hamburg, pp. 402 - 418.

Kraus, K. & Waldhäusl, P., 1998. *Manuel de photogrammétrie : Principes et Procédés Fondamentaux*. Paris: Hermès.

Kuhn M., Markl G., Kaser G., Nickus U., Obleitner F., 1985. Fluctuations of climate and mass balance: Different responses of two adjacent glaciers. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*. v.21. pp. 409 – 416

Consulté le 7 Juillet 2018 à l'URL : <hdl:10013/epic.51413.d001>

Laurent, R. 1987. *La place de J-H Lambert (1728 – 1777) dans l'histoire de la perspective*. Paris : Nathan, 310 pp.

Consulté le 5 Août à l'URL : [http://culturemath.ens.fr/nodeimages/images/Lambert\\_Full.pdf](http://culturemath.ens.fr/nodeimages/images/Lambert_Full.pdf)

Lindeberg, T. (2012). Scale Invariant Feature Transform. *Scholarpedia*, 7(5), 10491.

DOI: doi:10.4249/scholarpedia.10491

Linder, W., 2009. *Digital Photogrammetry : a partical course*. 3 éd. Berlin: Springer.

Lingrand, D. 2002. *Les capteurs visuels : Modèle de caméra classique et calibration*. Notes de cours, Ecole Supérieure en Sciences Informatiques. Consulté le 19 Juillet 2018 à l'URL : <http://users.polytech.unice.fr/~lingrand/Ens/polyModele.pdf>

Louiche P. 2012. *Citing Electronic resources. Focale et angle de champ in Comment apprendre la photo*. Consulté le 6 Juillet 2018 à l'URL : <https://www.comment-apprendre-la-photo.fr/focale-et-angle-de-champ/>

Lowe, D.G.1999. Object recognition from local scale-invariant features. *Proc. 7th International Conference on Computer Vision (ICCV'99) (Corfu, Greece)*, pp.1150-1157.

DOI:10.1109/ICCV.1999.790410

Lowe D.G. 2004. Distinctive image features from scale-invariant key points. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110.

DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94

Mayo L. R., Trabant D. C., March R. S. 2004. A 30-Year Record of Surface Mass Balance (1966-95) and Motion and Surface Altitude (1975-95) at Wolverine Glacier, Alaska.

Consulté le 6 Juillet 2018 à l'URL : <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1069/#surface>

Marignier J. L. 1998. *L'invention de la photographie par Nicéphore Niépce : apport de la voie expérimentale = Nicéphore Niépce's invention of photography : what experiments show.* France.

Milles, S. & Lagofun, J., 2007. *Topographie et topométrie moderne : Techniques de mesure et de représentation.*

Morandini, G., 1950. Relazioni delle Campagne Glaciologiche negli anni 1947-1948-1949. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, II(1), pp. 192-194.

Morandini, G., 1951. Relazioni delle Campagne Glaciologiche 1950. *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, I(3), p. 183.

NOAA, 2010. *TEN SIGNS OF A WARMING WORLD*. Consulté le 19 Juillet 2018 à l'URL : <https://cpo.noaa.gov/warmingworld/images/TenSignsofaWarmingWorld.jpg>

O'Connor, J., Smith, M. J., James, M. R. 2017. Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data. *Progress in Physical Geography*, 41(3), pp. 325–344. DOI:10.1177/0309133317703092

Peipe J., Stephani M. 2011. Performance analysis of a pole and tree trunk detection method for mobile laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W12, pp. 197-202, <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-5-W12-197-2011>

Pix4D. 2018a. *Step 1. Before Starting a Project > 2. Configuring the Camera Settings*. Consulté le 19 Juillet 2018 à l'URL: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557419>

Pix4D. 2018b. *A project from A to Z - 1.1.a. Selecting the Image Acquisition Plan Type*. Consulté le 19 Juillet 2018 à l'URL : <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type>

Rossini M., DiMauro B., Garzonio R., Baccoloa G., Cavallini G., Mattavelli M., De Amicis M., Roberto Colombo R. 2018. Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304, pp. 159 – 172. DOI : 10.1016/j.geomorph.2017.12.039

Shuanggen J., Fang Z. 2015. Re-estimation of glacier mass loss in Greenland from GRACE with correction of land–ocean leakage effects. *Global and Planetary Change*, 135(C), pp. 170-178. DOI : 10.1016/j.gloplacha.2015.11.002

Taufer, G. & Filippi Gilli, E., 2011. Relazioni della campagna glaciologica 2011. *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 35(2), p. 277

Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I. & Peña, J. M., 2018. Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards. *Precision Agriculture*, Issue 19, pp. 115-133. DOI : 10.1007/s11119-017-9502-0

Université TELUQ. sd. Introduction aux méthodes de recherche scientifique. *Précision, justesse, incertitude et erreurs systématiques sur les mesures*. Consulté le 3 Juillet 2018 à l'URL : <http://benhur.teluq.ca/ST/sciences/sci1013/textes/B7.htm>

Valcanover E. 2013. Tesi Di Laurea Triennale : *L'evoluzione del ghiacciaio del Travignolo nell'ultimo secolo*. 38 p. Consulté le 3 Juillet 2018 à l'URL : [http://tesi.cab.unipd.it/46749/1/frontespizio\\_valcanover.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/46749/1/frontespizio_valcanover.pdf)

Vandenbroeck, M., & Willems, H. 2017. *Projet intégré de géomatique*. Rapport de stage, Faculté de sciences - Unité de géomatique, Université de Liège, inédit.

Vaughan, D.G., J.C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang, 2013: Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Vincent C. 2010. *L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins*. Thèse de doctorat en Sciences de la Terre et de l'Univers. Université de Grenoble, Sciences de la Terre. Consulté le 5 Juillet 2018 à l'URL : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00596523/document>

Warnant, R. 2016. Notes de cours : GNSS. *Chapitre 4 : Modes et techniques de positionnement*. Faculté de sciences - Unité de géomatique, Université de Liège, inédit.

Watson G. A. 2006. Computing Helmert transformations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 197(2), pp. 387 - 394.  
DOI : 10.1016/j.cam.2005.06.047

World Glacier Monitoring Service (WGMS). National Snow and Ice Data Center(NSIDC). 1989. *World Glacier Inventory*.  
DOI : 10.7265/N5/NSIDC-WGI-2012-02

Zemp M., Paul F., Hoelzle M., Haeberli W. 2008. Glacier fluctuations in the European Alps, 1850–2000: an overview and spatio-temporal analysis of available data. *Darkening Peaks: Glacier Retreat, Science, and Society*. Berkeley, US: University of California Press, pp.152-167.  
DOI : 10.5167/uzh-9024