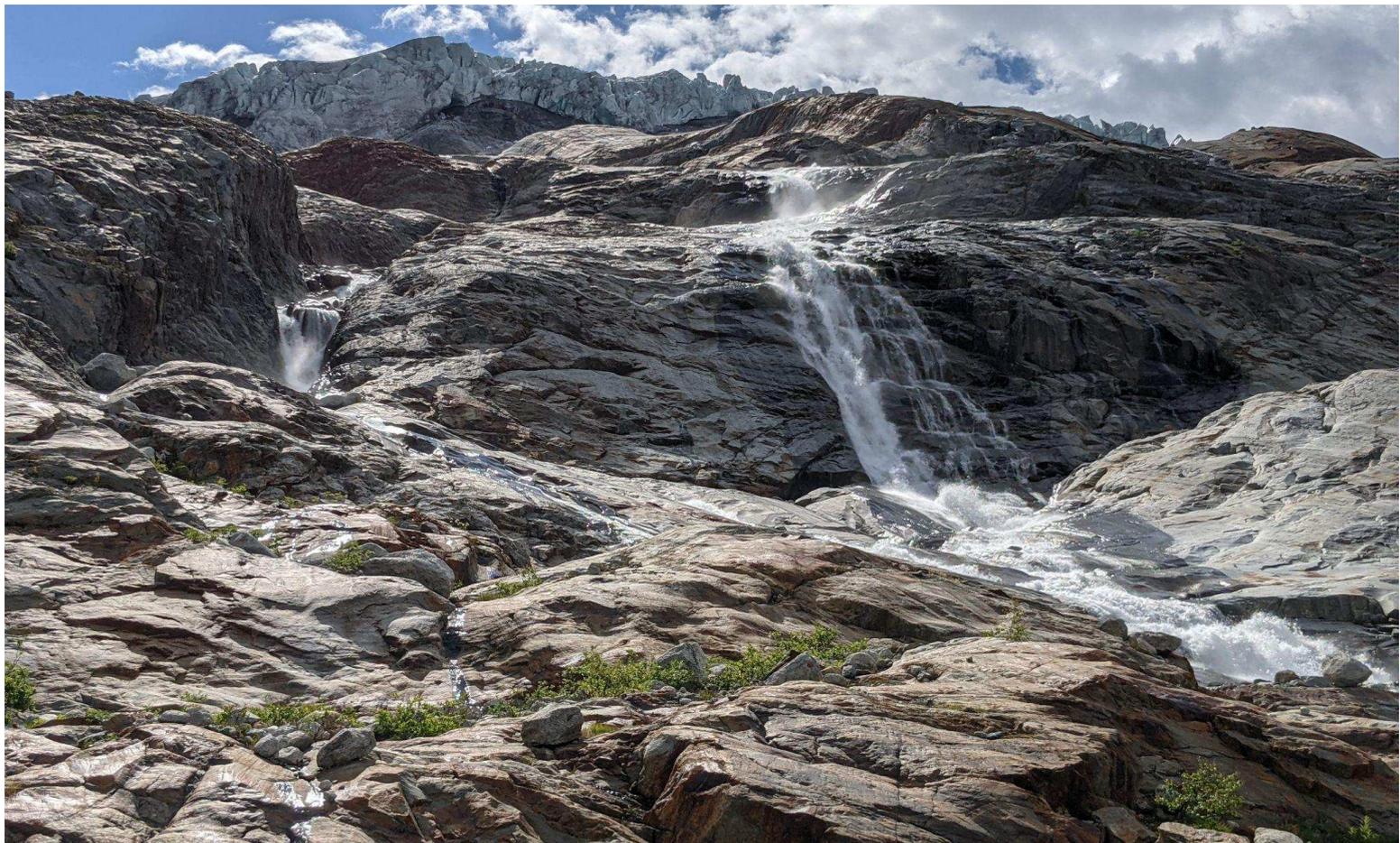


Application de photogrammétrie par drone et analyses d'images satellitaires pour l'étude de la végétation des marges proglaciaires



Master 1 - Géomatique

Maîtres de stage: Sophie Vallée & Anaïs Zimmer

Tuteur pédagogique : Marc Poupée

Stagiaire: Nicolas Rouyer

Juin-Septembre 2021

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier mes encadrantes, Sophie VALLEE et Anaïs ZIMMER, pour m'avoir accordé leur confiance pour mener à bien ce projet. Je les remercie également de s'être montrées disponibles pour échanger avec moi et m'apporter leurs connaissances et de précieux conseils durant l'ensemble du stage.

Je remercie également Marc ISENMANN et Paul SEGURA, géomaticiens au Conservatoire botanique national alpin (CBNA), pour leurs nombreux conseils, les échanges constructifs et leur aide sur le terrain.

Mes remerciements sont également adressés à Bertrand LIENARD, directeur, pour m'avoir donné l'opportunité de faire mon stage au CBNA, ainsi qu'à Sophie BISSUEL, Véronique BONNET, Ornella KRISTO, Mathieu MICHOUILLER, Gilles PACHE, Thomas LEGLAND, Lucile VAHE, David PAULIN et Jean-Michel GENIS pour leur accueil chaleureux et les très bons moments passés avec chacun d'entre eux.

Je remercie également, Danièle BONNEVIE et Simon PICHILLOU, gardes au Parc national de la Vanoise, pour leur aide et accompagnement lors des relevés sur le site de Gébroulaz.

Résumé

Dans toutes les régions montagneuses du monde, les glaciers reculent et des terres libres de glace émergent. Ces nouvelles surfaces, principalement situées au-dessus de la limite de la forêt dans les Alpes, représentent une opportunité pour la colonisation des végétaux. Ces zones libérées dite proglaciaire, où les conditions environnementales sont parmi les plus dures pour la végétation, sont encore très peu étudiées.

Les techniques de télédétection deviennent de plus en plus importantes dans la recherche et les travaux scientifiques sur les risques naturels. Elles peuvent être utilisées pour documenter avec précision les changements dans les paysages de hautes montagnes. La combinaison de la télédétection avec de l'imagerie drone multispectrale à très haute résolution spatiale peut permettre de détecter et d'étudier les écosystèmes alpins qui s'y développent.

L'objectif principal de ce stage est d'appliquer et d'optimiser la méthodologie d'acquisition par drone sur les zones alpines dans le but de générer des orthoimages à très haute résolution spatiale, puis de commencer à évaluer le potentiel de la télédétection pour l'observation de la végétation se développant sur les marges proglaciaires. Les nombreuses données ainsi récoltées et traitées par photogrammétrie sur différents sites sont une ressource considérable qui projette d'être étudiée et approfondie dans les prochaines années.

Mots clés : Marge proglaciaire, Drone, Photogrammétrie, Télédétection, Orthoimages, GNSS.

Abstract

In all mountainous regions of the world, glaciers are retreating and ice-free land is emerging. These new areas, mainly above the forest limit in the Alps, represent an opportunity for plant colonisation. These so-called glacier forelands or proglacial areas, where environmental conditions are among the harshest for vegetation, are still very little studied.

Remote sensing techniques are becoming increasingly important in research and scientific work on natural hazards. They can be used to accurately document changes in high mountain landscapes. The combination of remote sensing with multi-spectral drone imagery at very high spatial resolution can be used to detect and study the alpine ecosystems that are developing there.

The main objective of this internship is to apply and optimise the drone acquisition methodology on alpine areas in order to generate orthoimages at very high spatial resolution, then to start evaluating the potential of remote sensing for the observation of vegetation developing on glacier forelands. The large amount of data collected and processed by photogrammetry on different sites is a considerable resource that is planned to be studied and further developed in the coming years.

Key words: Glacier forelands, Drone, Photogrammetry, Remote sensing, Orthoimages, GNSS.

Liste des abréviations

ACP	: Analyse en Composantes Principales
CBNA	: Conservatoire Botanique National Alpin
CESBio	: Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
CNES	: Centre national d'études spatiales
CNRM	: Centre National de Recherches Météorologiques
DLR	: Agence spatiale allemande (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
GAM	: Generalized additive model
GCP	: Ground contrôle point
GDD	: Ground Degrés Day
GNSS	: Global Navigation Satellite Système
IGE	: Institut des Géosciences de l'Environnement
IGN	: Institut national de l'information géographique et forestière
INRAE	: Institut National de la Recherche Agronomique
KML	: Keyhole Markup Language
MNS	: Modèle Numérique de Surface
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MSI	: Moisture Sol Index
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NDVI	: Normalized Difference Vegetation Index
NSF	: National Science Foundation
ONG	: Organisation non gouvernementale
P4M	: Phantom 4 pro Multispectral
PAG	: Petit Age Glaciaire
RGP	: Réseau Géodésique Permanent
PIR	: Proche Infra-Rouge
RTK	: Real Time Kinematic
SIG	: Système d'Information Géographique
SMOD	: Snow Melt-Out Date
TOA	: Top Of Atmosphere
TPI	: Topographic Position Index

Liste des figures

Figure 1 - Représentation du contexte	7
Figure 2 - schéma du processus étudié	8
Figure 3 - Tapis d'Épilobe de Fleischer dans le Vallon de Prariond	8
Figure 4 - Territoire d'intervention du CBNA	10
Figure 5 - Déroulement du stage	11
Figure 6 - Relevé botanique sur un quadrat	13
Figure 7 - carte montrant la répartition des points aléatoires	13
Figure 8 - Représentation des différentes couches de données spatialisées	14
Figure 9 - Représentation du traitement appliqué par chronoséquence	15
Figure 10 - Drone DJI Phantom 4 Pro Multispectral prêt au décollage	16
Figure 11 - Altus APS3G installé avec son bipied sur la borne géodésique du glacier Saint-Sorlin	17
Figure 12 - Borne géodésique située sur la marge glaciaire de Gébroulaz	17
Figure 13 - Cible GCP installée sur la marge proglaciaire de Gébroulaz	18
Figure 14 - Représentation de la chronoséquence du glacier de Saint-Sorlin ainsi que de ses points d'approches et les altitudes associées	19
Figure 15 - Représentation des plans de vols sur la marge proglaciaire du Glacier de Saint-Sorlin	20
Figure 16 - Estimation de l'implantation des GCP	21
Figure 17 - Glacier de Saint-Sorlin le 26 Juillet 2021	23
Figure 18 - Indice NDVI et les bandes de chronoséquence étudié du glacier de Saint-Sorlin	23
Figure 19 - Histogrammes des résultats NDVI sur les différentes périodes de glaciation	24
Figure 20 - Cercle de corrélation	25
Figure 21 - Sites étudiés	26
Figure 22 - Pipeline du traitement photogrammétrique	28
Figure 23 - Résultat d'une orthoimage sur la marge proglaciaire de Saint-Sorlin en vraies couleurs et son indice NDVI	29

Sommaire

Remerciements	2
Résumé	2
Liste des abréviations	3
Liste des figures	4
Sommaire	5
1 Introduction	7
1.1 Contexte	7
1.2 Présentation des projets de stage	9
1.2.1 Analyses images satellites sous R	9
1.2.2 Acquisition d'images aériennes par drone et optimisation du traitement.	9
1.3 Structures d'accueil	10
1.4 Financements du projet	10
1.5 Ajustement du stage dû au COVID	11
2 Matériels et méthodes	12
2. 1 Première partie : traitements statistiques des images satellites sous R	12
2.1.1 Données exploitées	12
2.1.2 Méthodologie de traitement	14
2.2 Seconde partie : Acquisition d'images par drone	16
2.2.1 Matériels nécessaires et données exploitées	16
2.2.2 Méthodologie d'acquisition	18
3 Traitements et résultats	23
3.1 Première partie : statistiques avec R sur les images satellites	23
3.2 Seconde partie : résultat d'acquisition et orthorectification des images drone	26
4 Discussion	30
Conclusion	31
Glossaire	32
Bibliographie	33
Annexes	34

1 Introduction

1.1 Contexte

Les effets du **changement climatique** s'expriment de manière particulièrement marquée dans les territoires de montagne. Ainsi, la hausse des températures moyennes sur le siècle dernier est de l'ordre d'1°C en Europe, contre 2°C sur le massif alpin (Agence Européenne de l'Environnement, 2009). Le **recul des glaciers** offre une illustration marquante de ce réchauffement rapide. Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (1350-1850), un retrait généralisé des surfaces glaciaires est observé. De récentes études portant sur l'état et l'évolution des glaciers alpins prévoient la fonte de 63 à 95% du volume glaciaire alpin actuel d'ici 2100, en fonction des différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ([Zekollari et al., 2019](#)).

Les évolutions climatiques permettent de prévoir l'**augmentation de la durée de la période de végétation** avec pour conséquence la remontée altitudinale de la limite forestière ainsi que de l'ensemble des étages de végétation. Ces changements vont avoir des conséquences directes sur la phénologie des espèces (par exemple la date de floraison) ainsi que sur leur aire de répartition favorable, tant pour la faune que la flore.

Des **remontées altitudinales d'espèces** sont constatées et devraient s'amplifier : les espèces natives présentes actuellement à des altitudes plus basses vont progressivement se déplacer vers les sommets. Ainsi, on assiste depuis quelques années à des transformations rapides, et notamment à l'augmentation de la richesse spécifique floristique dans les montagnes européennes ([Lamprecht et al., 2018](#) ; [Steinbauer et al., 2018](#)), accompagnée du **verdissement** des étages alpins dans les Alpes en lien avec l'augmentation de la période de végétation ([Carlson et al., 2017](#)).

Les changements climatiques actuels modifient donc grandement le fonctionnement des habitats en montagne et notamment les habitats liés au pergélisol, aux névés et aux glaciers qui connaissent une fonte accélérée ([Rapport EFESE, 2018](#)). La végétation de ces milieux va certainement changer mais on ne connaît pas sa trajectoire. Il convient alors de suivre les habitats et les espèces "caractéristiques" de ces milieux pour comprendre et anticiper les **évolutions du paysage**.

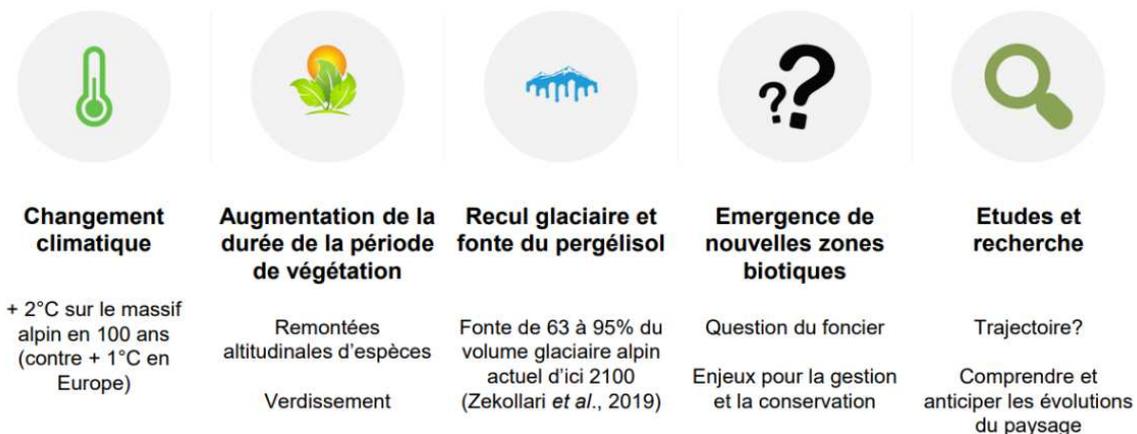


Figure 1 - Représentation du contexte (source : Sophie Vallée, CBNA).

Les zones libres de glace suite au recul glaciaire constituent de **nouveaux écosystèmes** qui sont un véritable laboratoire à ciel ouvert: comment la vie s'installe dans cet environnement hostile? Comment se crée un sol? Comment évolue le paysage? A qui appartiennent ces nouveaux territoires et comment sont-ils et seront-ils gérés?

Le terme de **marge proglaciaire** fait référence à la zone de retrait des glaciers depuis la fin du Petit Âge glaciaire (vers 1850/1860). “A l’intérieur des marges proglaciaires se trouve ce qu’on appelle une **chronoséquence** : des extensions variables du glacier au cours du temps, qui ces dernières années libèrent progressivement de l’espace et des nouveaux habitats potentiels pour les plantes. Une bande de la chronoséquence est la zone entre deux dates connues de l’extension du glacier” (Carlson, 2020).

L’utilisation des bandes de chronoséquence permettent d’étudier un processus écologique sur des sites de différents stades et âges de succession à des emplacements distincts. Cette méthode s’appuie sur le concept “Space for Time Substitution” (SFT) qui est utilisé dans la modélisation de la biodiversité pour déduire les trajectoires passées ou futures des systèmes écologiques.

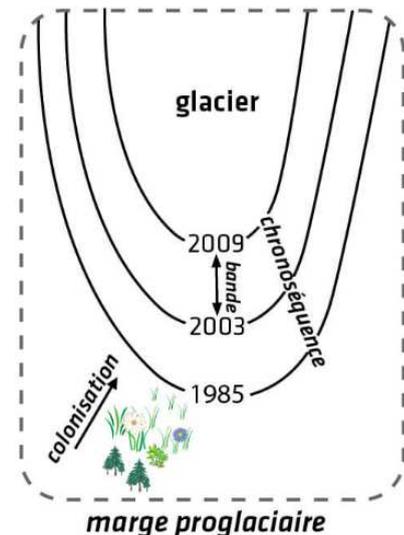


Figure 2 - représentation schématique d’une marge proglaciaire (source : blog du CREA Mont-Blanc).

Le milieu des marges proglaciaires est, par ses caractéristiques, hostile à la vie avec un sol composé de roches nues, des températures froides, du gel même en été, des radiations UV très importantes ainsi que des pentes parfois fortes accompagnées d’une érosion très active. Néanmoins, cela n’empêche pas certaines espèces pionnières de venir coloniser les espaces proches du front des glaciers.

Une étude récente menée dans les Alpes autrichiennes (Fischer et al., 2019) montre qu’environ 100 ans après déglaciation, le taux de recouvrement de la végétation atteint 80% sur les zones déglacées et n’augmente pas de façon significative ensuite. Par ailleurs, la richesse spécifique augmente de 10-20 espèces sur les zones récemment déglacées à 40-50 espèces au bout de 100 ans.

En termes de phytoécologie, on peut observer sur les marges proglaciaires les végétations herbacées pionnières des alluvions torrentielles subalpines et alpines à Epilobe de Fleischer, appelées *Epilobion fleischeri*. Ces communautés végétales sont observables, aux étages alpin et subalpin, sur les moraines glaciaires, les bords des torrents et dans les zones susceptibles d’être inondées (sables, graviers et galets). Cet habitat est très peu étudié en France. De nouvelles investigations sont nécessaires pour préciser l’aire des différentes communautés et leurs cortèges floristiques locaux.



Figure 3 - Tapis d’Épilobe de Fleischer dans le Vallon de Prariond, Vanoise (source : Sophie Vallée, CBNA).

L’étude sur les marges proglaciaires menée par le CBNA dans les Alpes et par Anaïs Zimmer, dans le cadre de sa thèse dans les Alpes et dans les Andes, vise à répondre à plusieurs questions:

- Quelle est la diversité végétale dans ces milieux et comment varie-t-elle le long des chronoséquences de recul glaciaire?
- Quels sont les principaux facteurs qui expliquent l’installation et l’évolution de la végétation le long de la chronoséquence? Plusieurs facteurs sont étudiés: processus géomorphologiques, temps écoulé depuis la déglaciation, climat, conditions topographiques, mécanismes éventuels de facilitation ou de compétition entre les espèces, caractéristiques physico-chimiques du sol, etc.

- Y a-t-il un lien entre la végétation observée sur le terrain et les indices de végétation type NDVI issus de la télédétection (drone, images satellites) ? Peut-on prédire la végétation avec les indices type NDVI issus de la télédétection, et comment ?

Sur ce dernier point, l'étude de Fischer *et al.* montre le **potentiel intéressant de la télédétection pour l'étude de la colonisation végétale des marges proglaciaires**: l'augmentation du NDVI calculé à partir des données satellites LANDSAT est très bien corrélée avec l'augmentation du recouvrement végétal mesuré sur le terrain ($R^2 = 0.84$).

L'étude menée par le CBNA et Anaïs Zimmer vise à travailler à **plusieurs échelles emboîtées**: à l'échelle locale, via des relevés de terrain, à l'échelle régionale, via la photogrammétrie par drones, ainsi qu'à l'échelle globale, via l'analyse de données satellitaires.

1.2 Présentation des projets de stage

Ce stage consiste en deux objectifs majeurs :

- 1) Préparer et effectuer les campagnes de terrain (acquisition d'images aériennes et relevés GNSS) sur les différents sites étudiés puis participer à la production des orthoimages des différentes marges proglaciaires ainsi que leur géo-rectification.
- 2) Traiter et analyser les données d'images satellites et les données de végétation collectées antérieurement par l'étudiante doctorante en utilisant le langage de programmation R ainsi que les résultats statistiques obtenus.

Dans le cas de notre étude, c'est l'avant-champ du glacier, déglacé au cours des 70 dernières années, qui fait l'objet de prises et de traitement de données. La zone déglacée juste après le Petit Âge Glaciaire correspond à la zone de contrôle. En général, les sites étudiés s'étendent sur environ 1 km en aval de l'actuel front glaciaire.

1.2.1 Analyses images satellites sous R

La première partie du stage consiste à évaluer la croissance de la végétation pionnière à travers différentes chronoséquences sur le glacier de Saint Sorlin grâce à l'utilisation de la télédétection et de traitements statistiques. Ce travail s'appuie sur une formation préalable à la télédétection en milieu alpin au profit du CBNA et dispensée par Brad Carlson, chargé de recherche au CREA Mont-Blanc (ONG scientifique). Cette formation a permis à l'équipe du CBNA d'effectuer des calculs d'indices de végétations et de traitements statistiques sur la marge proglaciaire du Glacier de Gébroulaz.

Ce travail a pour objectif d'adapter le script (langage R) sur le glacier de Saint-Sorlin en utilisant des données satellites Sentinel-2 ainsi que les données terrains associées pour finalement analyser et comparer les résultats obtenus sur les deux sites.

1.2.2 Acquisition d'images aériennes par drone et optimisation du traitement.

Comme prévu initialement la seconde partie du stage est dédiée à la collaboration entre le CBNA et l'étudiante doctorante Anaïs Zimmer afin de réaliser les acquisitions d'imagerie drone sur les 6 marges proglaciaires dans les Alpes, optimiser le traitement des images et produire les orthoimages multispectrales. L'objectif principal est d'appliquer, sur les sites alpins, le protocole d'acquisition d'images par drone, mis en place au préalable par Anaïs Zimmer. Le but étant de produire des orthophotos mosaïques géoréférencées à très haute résolution à partir des images multispectrales récoltées, et de vérifier leur intégrité géométrique et radiométrique.

Ce travail a pour finalité d'être un élément de comparaison pour l'évaluation et la détection de la végétation des marges proglaciaires entre des orthoimages à très très haute résolution spatiale et des images satellites à haute résolution spatiale, temporelle et spectrale.

1.3 Structures d'accueil

CBNA

Le Conservatoire Botanique National Alpin (CBNA) est un établissement public, créé en 1988, voué à la connaissance et la préservation de la flore et des végétations des Alpes françaises et de leurs piémonts (source: [CBNA](#)). Il fait partie de la Fédération nationale des conservatoires botaniques nationaux qui a été créée en 1999 par le Ministère chargé de l'environnement. L'équipe du CBNA est composée d'une équipe pluridisciplinaire de 35 personnes. Elle est répartie entre le siège situé à Gap (05), son antenne Alpes du Nord-Ain située à Chambéry (73) où je suis implanté, ainsi qu'un bureau en Haute-Savoie à Pringy (74).

Le CBNA est composé de 4 services :

- Connaissance : améliore la connaissance sur la flore et les milieux naturels alpins, via la réalisation de relevés phytoécologiques.
- Conservation : contribue à la sauvegarde de la flore et des milieux naturels rares et/ou menacés.
- Système d'information : administre et perfectionne les outils de collecte, de sauvegarde et de diffusion de la donnée géographique.
- Administration générale : direction, secrétariat, comptabilité, gestion financière, communication et documentation.

Il répond à 4 missions :

- La connaissance de l'état et de l'évolution de la flore sauvage et des habitats naturels et semi-naturels
- L'identification et la conservation *in situ* et *ex situ* des éléments rares et menacés de la flore et des habitats
- L'expertise par fourniture à l'État, à ses établissements publics et aux collectivités territoriales, d'un concours technique et scientifique
- L'information et l'éducation du public.

Son territoire d'intervention est centré sur la zone alpine française. Il est défini selon des critères biogéographiques et institutionnels. Il couvre les départements de l'Ain, des Alpes-de-Haute-Provence, des Hautes-Alpes, de la Drôme, de l'Isère, de la Savoie et de la Haute-Savoie.

Figure 4 - Territoire d'intervention du CBNA, (source : CBNA).



Université du Texas

Le Department of Geography and the Environment de l'Université du Texas à Austin (Etats-Unis) est une unité du Collège des Arts Libéraux. Le Département soutient des études régionales et internationales, avec un accent particulier sur le Texas et le Sud-Ouest des Etats-Unis, l'Amérique latine, le monde méditerranéen et le Moyen Orient, et l'Europe du Nord et de l'Est. Le Département offre des formations en Géographie culturelle, Science de la Terre et Cartographie, et possède plusieurs laboratoires de recherche (Hydrologie environnementale, Sols et géoarchéologie, Géochimie et minéralogie, Télédétection).

1.4 Financements du projet

Projet ROCVEG

Le projet [ROCVEG](#) est cofinancé avec le concours de l'Union européenne et le Fonds national d'aménagement et de développement des territoires dans le cadre du Programme opérationnel interrégional du Massif des Alpes.

- Fonds Européen de Développement Régional 2019-2021
- Fonds national d'aménagement et de développement du territoire 2019-2021



Opération soutenue par l'État

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE

Le projet ROCVEG, mené par le CBNA, vise entre autres à mieux connaître la végétation des marges proglaciaire, de suivre son évolution et d’y comprendre les dynamiques de colonisation grâce à deux méthodes complémentaires :

- le suivi par des méthodes phyto-écologiques
- le suivi par imagerie aérienne multispectrale à haute et très haute résolution spatiale (drones, images satellites).



Projet de Recherche “Human-Environmental Interactions in Deglaciating Landscapes”

Le projet de recherche de doctorat "Interactions homme-environnement dans les paysages de déglaciation" est financé par la [NSF 20-583](#) Human-Environment and Geographical Sciences Program - Doctoral Dissertation Research Improvement Awards, le laboratoire de Sols et Géoarchéologie du Département de Géographie de l’Université du Texas à Austin, et par la Société américaine de photogrammétrie et de télédétection ([ASPRS](#), [UTexas](#)).



Le projet de thèse vise à comprendre comment les écosystèmes postglaciaires qui se forment actuellement pourraient contribuer aux services indispensables pour les populations humaines vivant en aval des glaciers puis de fournir des propositions de gestion de ces nouveaux écosystèmes. Un des objectifs clé de la recherche est la reproductibilité, que les différentes méthodes, données et résultats puissent être utilisés sur des questions similaires.

1.5 Ajustement du stage dû au COVID

L’objectif du stage était initialement de participer à la mise en place et la validation de la méthodologie des acquisitions d’images par drones sur trois marges proglaciaire dans les Andes Tropicales Péruviennes (Cordillera Blanca) et d’appliquer la même méthodologie d’acquisition et d’analyse des données au sein des six sites d’études alpins.

Malheureusement, le déplacement dans les Andes a été annulé dû au risque engendré par la pandémie du Covid-19. Le stage a donc été adapté afin d’être réalisé entièrement en France.

Déroulement du stage

Ci-dessous est représenté de manière simplifié le déroulement du stage (Diagramme de GANTT Complet - Annexe N°1), on peut observer que la phase de préparation des missions (logistique, préparation du matériel et des données utiles, paramétrages des vols...) et de leur réalisation sur site (installation des repères, géolocalisation au GNSS, vols et prises de vue ...) sur les marges proglaciaire représentent une grande partie du stage. Ce sont au final six sites glaciaires qui ont fait l’objet de travaux de préparation et d’acquisition d’images aériennes.

Les moyens matériels (informatique et logiciel) étant utilisés pour l’ensemble des acquisitions, il était impossible de commencer les traitements et analyses des données acquises avant le **27 août**, date de la dernière mission sur le site d’Orny (Suisse).



Figure 5 - Déroulement du stage.

2 Matériels et méthodes

Dans une première partie, nous allons voir les différentes données exploitées et leurs spécificités. Puis dans une deuxième partie, nous présenterons la méthode de traitement et une première évaluation des résultats obtenus sur la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin.

2.1 Première partie : traitements statistiques des images satellites sous R

2.1.1 Données exploitées

Sentinel-2 : MultiSpectral Instrument (MSI)

Nous avons utilisé les données libres des satellites de la mission Sentinel-2 développée dans le cadre du programme Copernicus afin d'étudier la végétation se développant sur les marges proglaciaires, à l'aide d'indices spectraux. La mission Sentinel-2 est composée de deux satellites jumeaux : le 2A et le 2B, lancés respectivement le 23 juin 2015 et le 7 mai 2017. Ils produisent de l'imagerie optique à haute résolution (10m, 20m selon les bandes), avec un temps de revisite d'environ 5 jours et une diversité spectrale (13 bandes du visible au moyen infra-rouge).

Plateforme THEIA

Theia est une structure scientifique et technique créée fin 2012 par 9 institutions publiques françaises impliquées dans l'observation de la terre et les sciences de l'environnement.

Elle met notamment à disposition des produits Sentinel-2 prêts à l'emploi, après application des traitements par le centre Muscate (Cnes, avec le concours du Cesbio et le DLR).

Plusieurs produits Sentinel-2 sont ainsi disponibles :

- Le niveau 1C : Images ortho-rectifiées en réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA).
- Le niveau 2A : Issus du niveau 1C, le produit 2A fournit des réflectances de surface avec corrections des effets atmosphériques et masque de nuages .
- Le niveau 3A : Le niveau 3A est une synthèse hebdomadaire de la réflectance de surface issus des produits 2A.

Dans notre cas d'étude, les produits 2A sont utilisés puisqu'il est nécessaire d'acquérir une image satellite à une date précise et proche de celle où les relevés de terrain ont été réalisés.

Snow Cover

La plateforme Theia met également à disposition un produit Neige. Généré à partir des données Sentinel-2 (résolution spatiale de 20m) ou Landsat 8 (résolution spatiale 30m) et représente la présence de neige ou non par pixel ainsi qu'un masque des nuages.

Le produit neige est décliné en 2 versions :

- Le produit 2B représente la couverture de neige monodate.
- Le produit 3A est une synthèse annuelle du nombre de jours d'enneigement par pixel.

Ici, nous exploitons les données de synthèse annuelle.

Données météorologiques

Les données SAFRAN sont des données météorologiques spatialisées de modèles en points de grille sur la France Métropolitaine, elles sont produites et mises à disposition par Météo France et le CEN ([Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM](#)).

Les données météorologiques sont en libre accès sur la plateforme [Aeris](#) (pôle de données et services pour l'atmosphère).

Relevés écologiques

Les relevés écologiques consistent à étudier les relations des végétaux entre eux et leur milieu. Chaque relevé est effectué avec un quadrat de 2m * 2m, divisé en placette de 20 cm * 20 cm.

Pour chacun de ces quadrats sont notées les informations suivantes :

- pourcentage de recouvrement de la végétation
- pourcentage de recouvrement de la « croûte biologique du sol » (bryophytes, lichens, cyanobactéries)
- identification des espèces (espèces végétales présentes et leur pourcentage de recouvrement)
- hauteur végétative moyenne par espèce végétale
- granulométrie: pourcentage de recouvrement de dalles/blocs/roches/graviers/sables
- topographie : pente et orientation
- contexte géomorphologique (forme géomorphologique, processus géomorphologique, activité géomorphologique, ...)

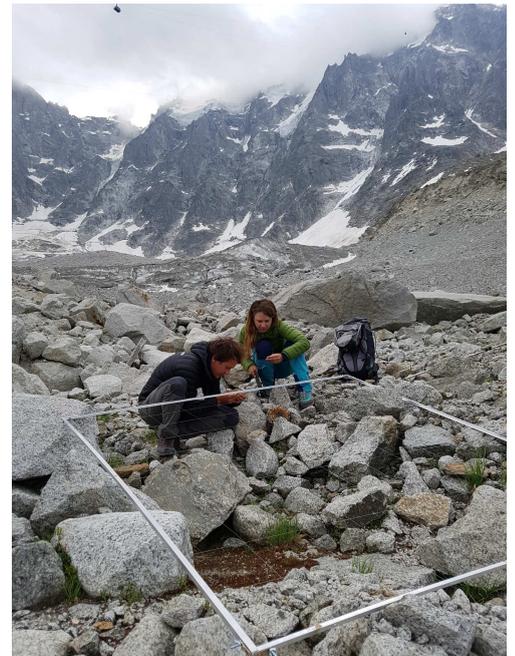
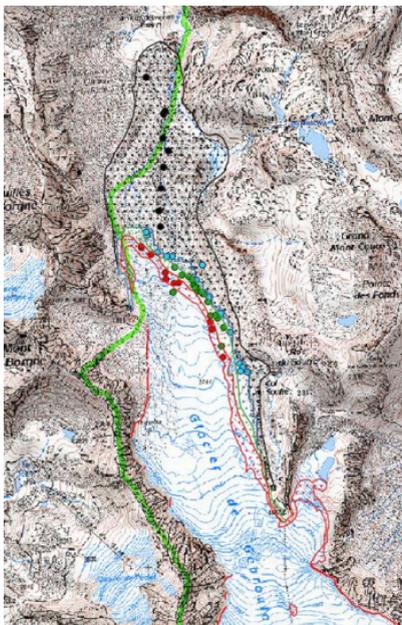


Figure 6 - Relevé botanique sur un quadrat (source : Brad Carlson, CREA Mont-Blanc).



15 points aléatoires ont été préalablement créés dans QGIS pour chaque bande de déglaciation étudiée.

Figure 7 - carte montrant la répartition des points aléatoires (source : Sophie Vallée, CBNA).

Utilisation du langage R et de l'interface RStudio pour les analyses

Le langage R ainsi que l'environnement RStudio ont été utilisés pour le traitement des images et les calculs statistiques.

R est un langage de programmation destiné essentiellement au développement statistique et à l'analyse de données.

Librairie principale utilisé :

- Gdal : Bibliothèque permettant de lire et de traiter un très grand format d'images.
- Raster : Bibliothèque de manipulation de données raster, dans notre cas d'étude il servira essentiellement à la découpe et au ré-échantillonnage de la donnée.

2.1.2 Méthodologie de traitement

L'objectif du traitement est d'effectuer des analyses statistiques sur des données spatialisées composées principalement de calcul d'indices de végétation issus du traitement d'image, des données ponctuelles de relevés phyto-écologiques ainsi que des données météorologiques et climatiques.

Afin d'harmoniser cet ensemble, il est nécessaire d'identifier la résolution spatiale à appliquer sur l'ensemble du traitement. Dans notre cas d'étude, nous souhaitons préserver l'intégrité de l'imagerie satellitaire. Pour cela, nous allons essentiellement exploiter les bandes spectrales "Rouge" et "PIR" issus du capteur MSI des satellites Sentinel-2 avec une résolution spatiale de 10 m. Les données annexes seront adaptées et interpolées à cette spatialisation.

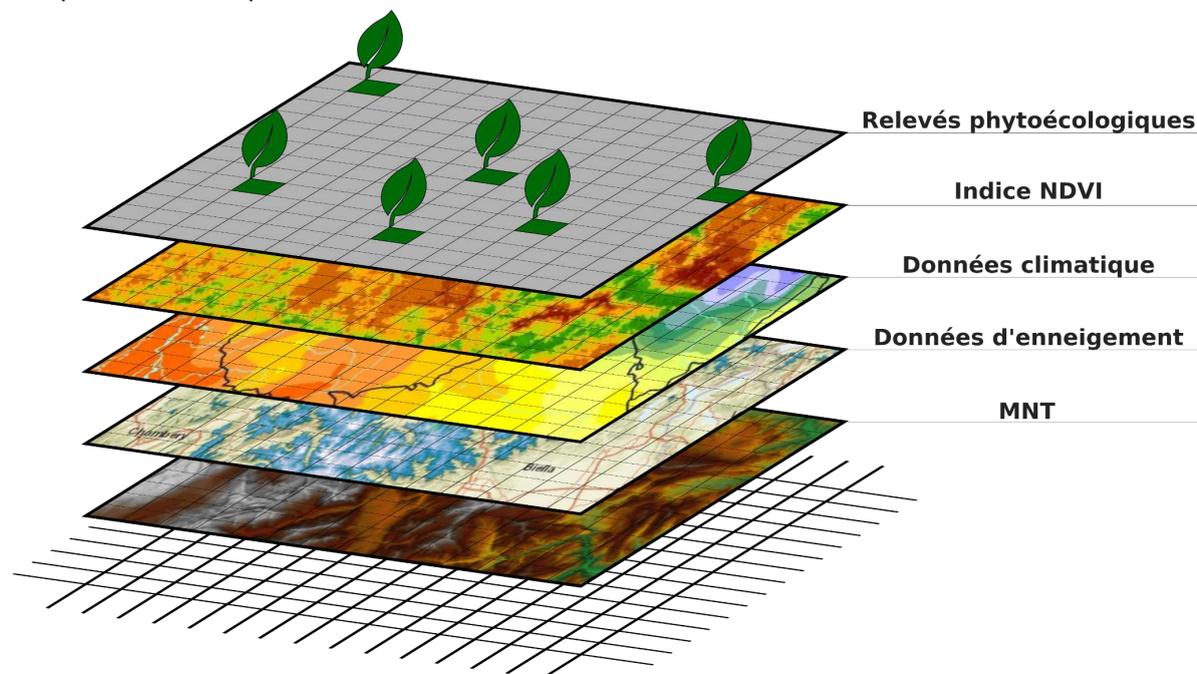


Figure 8 - Représentation des différentes couches de données spatialisées (source: réalisation personnelle).

La figure ci-dessus représente les données de base qui ont été mobilisées par les traitements et les analyses. A partir de ces données d'origine, de nombreuses autres caractéristiques ont été calculées et extraites dans le but d'être exploitées lors des traitements statistiques.

Données produites ou exploitées dans R :

- Indice de végétation - NDVI

Actuellement, il n'existe pas d'indice de végétation pertinent pour tous les types de végétation, une grande partie de ces indices utilise pour leur calcul de réflectance les longueurs d'onde dans le rouge (RED) et proche infra-rouge (PIR). Elles correspondent aux réflectances minimales et maximales de la signature spectrale de la végétation.

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) permet de déterminer le taux de couverture végétale ainsi que la santé de la végétation en mesurant la teneur en chlorophylle des plantes. Il est calculé en utilisant la différence de réflectance dans le rouge et le proche infra-rouge (PIR). Le résultat du NDVI est compris entre -1 et 1, la formation végétale est généralement comprise entre 0.1 et 0.7.

Formule du NDVI : $\text{PIR} - \text{Rouge} / \text{PIR} + \text{Rouge}$

- MNT - Calcul de pente

Calcul l'angle de la pente pour chaque pixel en se servant des 8 pixels voisins, le résultat est exprimé en degré.

- MNT - Calcul de l'aspect ou exposition
Calcul de l'orientation de la pente, le résultat est représenté de 0° à 360° à partir du nord (0).
- MNT - TPI (Topographic Position Index)
L'Indice de Position Topographique évalue la position de chaque pixel par rapport au pixels voisins, il permet globalement de déterminer si la position se situe sur un point haut, dans une dépression ou bien sur un terrain plat.
- Température moyenne
La température moyenne de chaque pixel.
- GDD (Growing degree days)
Permet de représenter l'accumulation de chaleur afin de déterminer la durée d'un développement biologique tel que la croissance d'une plante. Il est défini par la somme des températures par jour pour tous les jours où la température est supérieure à un seuil, dans notre cas 0°C.
- SMOD (Snow melt-out date)
Correspond à la date de disparition de la neige. Les dates sont données en nombre de jours depuis le premier jour de la synthèse.
- Temps de déglaciation
Calcul du temps de déglaciation en pourcentage par bandes de chronoséquence depuis le petit âge glaciaire. La bande du petit âge glaciaire représentant le nombre d'années médianes depuis la déglaciation.

Chacune de ces données sont ensuite découpées spatialement par bandes de chronoséquence, l'objectif est d'évaluer les environnements différemment dépendant de leur âge de déglaciation.

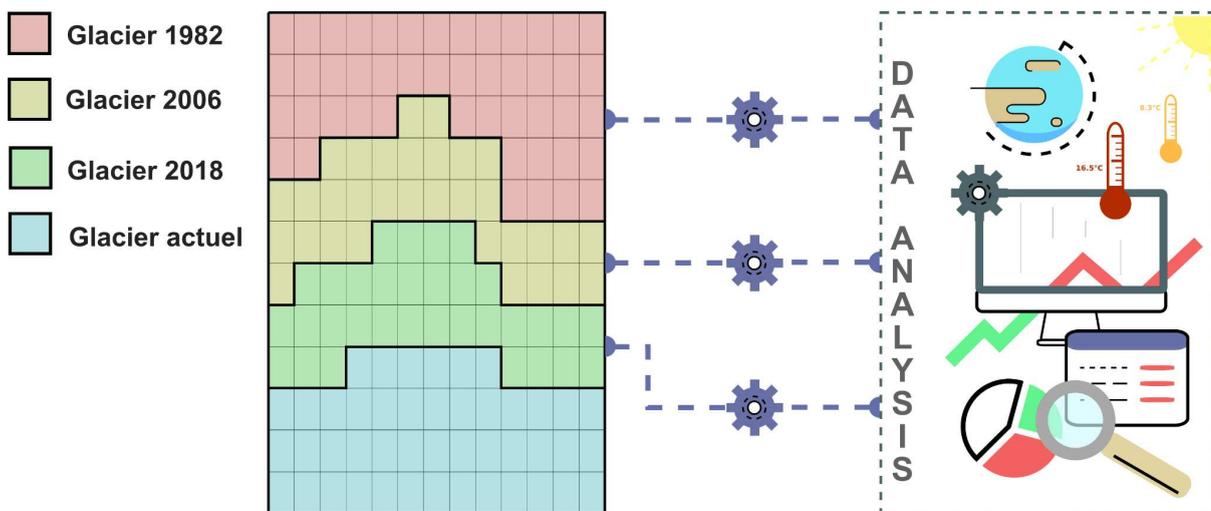


Figure 9 - Représentation du traitement appliqué par chronoséquence (source: réalisation personnelle).

Traitement statistique réalisé :

L'ACP (Analyse des Composantes Principale) est une méthode d'analyse de données multivariées, elle permet de traiter et d'interpréter de grandes sommes de données quantitatives. Dans notre étude, le résultat de l'ACP permet d'observer si telles ou telles variables sont corrélées entre elles et de déterminer quels peuvent être les facteurs déterminants à la présence ou non de végétation.

2.2 Seconde partie : Acquisition d'images par drone

Dans une première partie, nous allons voir les différents matériels mobilisés et déployés sur les sites d'études et leurs spécificités. Puis dans une deuxième partie, nous présenterons la méthode d'acquisition qui est appliquée sur les différentes zones d'études. Ce protocole a été décrit en s'appuyant sur les relevés de la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin.

2.2.1 Matériels nécessaires et données exploitées

Dans le but de partager les données produites avec d'autres institutions et chercheurs et d'appliquer une méthode qui pourra être reconduite ultérieurement, nous avons choisi d'opter pour une géoreférenciation absolue des données produites. Pour améliorer la précision des positions obtenues issus du drone, nous avons utilisé un GNSS centimétrique Altus APS-3G. Même si *a priori* une précision relative de l'acquisition est suffisante pour évaluer les résultats individuellement, cette précision centimétrique apporte une qualité indéniable aux premiers travaux réalisés. Elle permettra également d'approfondir et multiplier les analyses dans les années à venir.

Drone

La topographie du terrain alpin limite le choix des aéronefs exploitables pour ce type de mission.. En effet, la géomorphologie des sites en haute altitude s'associe souvent à l'absence de large terrains plats et meubles, ce qui empêche notamment l'utilisation d'aile volante qui ont l'avantage d'offrir des vols longs au profit d'appareil de type multicoptère qui pourront s'adapter aux conditions de décollage et d'atterrissage.

Dans le cadre de son doctorat, Anaïs Zimmer a opté pour l'utilisation du drone DJI Phantom 4 Pro Multispectral (P4M), ses 6 capteurs dans le visible et proche infrarouge permettent d'effectuer les différents traitements radiométriques et calculs d'indices spectraux de végétation nécessaires à l'étude.

Le Phantom 4 pro est un drone quadricoptère qui s'adresse autant aux particuliers qu'aux professionnels, il est la référence de la marque DJI et se décline en de nombreuses évolutions.

La version multispectrale sortie récemment est à la base destinée à l'agriculture de précision, néanmoins l'ajout de 6 capteurs fait du phantom 4 pro Multispectral un compromis poids/encombrement/prix idéal pour notre étude :



Figure 10 - Drone DJI Phantom 4 Pro Multispectral prêt au décollage (source: N. Rouyer).

- Son poids (1487 g) et son encombrement raisonnable permettent de le transporter en haute altitude et sur des zones escarpées.
- Le dispositif optique disposé sur une nacelle stabilisé 3 axes est composé d'une caméra RVB et un système cinq caméras multispectrales de 2MP chacune (Bleu 450nm ; Vert 560nm ; Rouge 650nm ; Red-edge 730nm ; PIR 840nm). La présence du rouge et du Proche Infrarouge permet notamment d'effectuer les traitements NDVI nécessaires à la détection de la végétation sur les zones d'études et de comparer nos résultats aux analyses d'images satellites préalablement effectuées. La présence des bandes Bleu, Vert et Proche-rouge permettra de tester d'autres indices de végétation, e.g. ARI (Anthocyanin Reflectance Index), Green NDVI, SAVI, ect.
- Un Pyranomètre spectral (senseur de luminosité) permet de mesurer le rayonnement solaire afin d'optimiser les résultats lors du post traitement. Ce dispositif est un atout considérable en milieu alpin où la luminosité est constamment changeante due aux conditions climatiques très variables.
- Un GNSS haute sensibilité avec une précision de 0.5 m en horizontal et 1.5 m en vertical permet dans un premier temps d'acquérir un positionnement correct des clichés.

Le P4M en notre possession dispose également d'un module RTK qui permet d'obtenir les positions des sommets de prise de vues au centimètre près. Cette option qui nécessite un récepteur GNSS avec une liaison radio est uniquement exploitable avec un module "base RTK" vendu par DJI. Pour des raisons de budget, ce dispositif n'a pas pu être déployé durant notre étude. La géo-rectification avec les points d'appuis positionnés sur le terrain est amplement suffisante.

Géoréférencement

- GNSS Centimétrique

Nous disposons de deux récepteurs GNSS Altus APS-3G Septentrio de haute précision avec un contrôleur Archer 2 (Ordinateur de bord) et deux jeux de cannes de relevés.

Ces deux appareils disposent d'une liaison radio et sont pré-paramétrés (Base et Rover) pour l'utilisation de la technologie RTK. Ils permettent d'effectuer des relevés avec une précision centimétrique en un minimum de temps d'observations.

Le kit GNSS a été fourni par le consortium UNAVCO (NASA-NSF) dans le cadre de la bourse de recherche de Timothy Beach et Anaïs Zimmer.



Figure 11 - Altus APS3G et son bipied sur la borne géodésique du glacier Saint-Sorlin (source: N. Rouyer).

- Borne géodésique

A la suite de collaborations avec l'IGE (Institut des Géosciences de l'Environnement) et l'INRAE (Institut national de la recherche agronomique), nous avons pu obtenir les coordonnées précises des différentes bornes géodésiques en place sur les marges glaciaires du Glacier Blanc, Saint Sorlin, et Gébroulaz.

Ces bornes constituent des points repères solides et pérennes qui ont été observés et calculés précisément. Elles sont en général destinées à être utilisées par des appareils de levés topographiques.



Figure 12 - Borne géodésique située sur la marge glaciaire de Gébroulaz (source: N. Rouyer).

Lat. 45.312870942 | Long. 6.621964375

- Cibles GCP / Points d'appuis

Les cibles GCP (Ground Control Point) ou point d'appui sont indispensables pour acquérir une bonne précision sur des relevés photogrammétriques. Elles sont placées au sol de manière homogène sur la zone d'études afin de la géo-référencer précisément.



Figure 13 - Cible GCP installée sur la marge proglaciaire de Gébroulaz (fabrication : Anaïs Zimmer).

Logiciel de captation :

DJI Ground Station pro est un logiciel de planification de plan de vol. Il a la particularité d'être libre d'utilisation et compatible avec le Phantom 4 pro multispectral.

Les logiciels de captation photogrammétrique génèrent automatiquement les missions de vols en respectant les paramètres définis par l'utilisateur. Ce sont des outils incontournables pour les acquisitions aériennes de grande envergure avec un drone.

2.2.2 Méthodologie d'acquisition

Contrainte d'acquisition

La réalisation d'une acquisition photogrammétrique en milieu alpin est encore sujet à des nombreuses expérimentations et réflexions.

Le fort dénivelé et la topographie accidentée des zones d'études est une contrainte forte pour une bonne acquisition photogrammétrique :

- Ils représentent un gros risque d'accidents pour le drone et compliquent l'obtention d'une résolution spatiale homogène à cause des variations abruptes d'altitude et donc de hauteurs de vol.
- La haute altitude et les conditions climatiques diminuent les capacités des batteries.
- Ils nécessitent un temps d'approche et de déplacements entre les vols non négligeables (la résolution spatiale attendue limite l'acquisition à de nombreux vols courts).

En réunissant toutes ces contraintes, on peut globalement identifier 3 méthodes d'acquisition potentielles, le but étant de trouver le meilleur compromis entre la sécurité, la qualité et le temps d'exécution :

- Le vol manuel : cette solution est généralement utilisée pour les acquisitions dans un environnement complexe (milieu exigü, barrage, falaise..) nécessitant une maniabilité avancée. Les paramètres comme la distance à la scène, le recouvrement longitudinal et latéral sont estimés par l'opérateur lors de l'acquisition sans toutefois pouvoir qualifier objectivement de l'exhaustivité des prises de vues. Cela nécessite une grande maîtrise et concentration. Le besoin d'acquérir des prises de vues homogènes sur l'ensemble des vols, le temps limité (créneau de prise de vue entre 11:30 h et 15:30 h), les grandes surfaces d'acquisition et le risque d'erreur dans les acquisitions rendent cette solution inappropriée pour l'étude.
- Plan de vol manuel : grâce à un MNT, il est possible de générer manuellement les points de passage et sommets de prise de vues de l'ensemble de l'acquisition. La modélisation du terrain permet donc à l'opérateur d'adapter la prise de vues au terrain. Cependant, cette solution comporte de nombreux risques, l'imprécision du MNT (ou de sa géo-rectification) peut s'avérer fatale pour le drone. La grande surface d'acquisition demanderait une étude du terrain ainsi qu'une préparation des vols conséquente.
- Plan de vol semi-automatique : les logiciels d'acquisition photogrammétriques entièrement automatisés permettent d'appliquer une acquisition optimisée et rapide tout en respectant les paramètres essentiels (recouvrement longitudinal, latéral, hauteur de vol...) exigés par l'opérateur. Cependant, la plupart des logiciels sur le marché ne permettent pas d'intégrer un MNT avant la génération du plan de vol. Ils sont généralement adaptés à un terrain globalement plat et respectent un recouvrement par rapport à une hauteur de vol donnée et constant dépendant du site de décollage de l'UAV. Néanmoins, cette solution présente le meilleur compromis sécurité/qualité si elle est appliquée avec une préparation et une découpe des zones de vols adaptées au terrain.

La solution exploitée dans notre cas d'étude est la génération de plans de vol semi-automatique, cette méthode a été élaborée et testée par Anaïs Zimmer dans les Andes et respecte les différentes conditions exigées (sécurité/qualité/temps) tout en permettant d'effectuer l'acquisition complète des zones d'étude (environ 100 hectares) avec un minimum de risques.

Première approche, évaluation et appréciation du terrain

La première étape, consiste à s'appropriier le terrain, la bonne évaluation de la morphologie du site d'étude est déterminante pour garantir la sécurité et la qualité des acquisitions.

Il est donc nécessaire de relever et d'évaluer tous les points hauts (moraines), les points bas (dépressions, rivières) et les limites extrêmes (falaise) de la zone d'études.

Pour cela, nous utilisons un GPS de multi-activité Garmin Montana qui est peu encombrant et rapide d'utilisation, les points particuliers relevés sont définis par plusieurs caractéristiques destinées à préparer les plans de vols. De cette manière, nous relevons les différents points hauts et bas présents sur la zone d'étude ainsi que les limites physiques à ne pas dépasser comme les parois rocheuses.

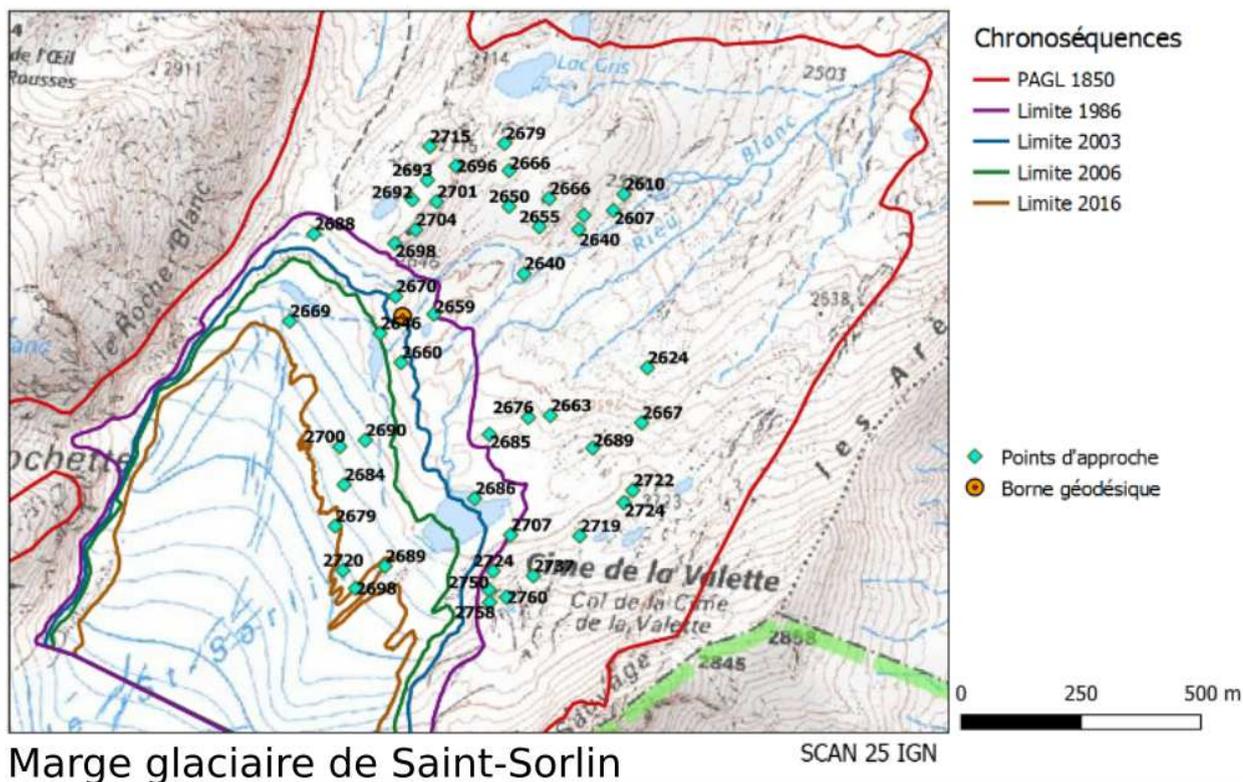


Figure 14 - Représentation de la chronoséquence du glacier de Saint-Sorlin ainsi que de ses points d'approches et les altitudes associées (source: réalisation personnelle).

L'exploration préliminaire de la zone d'étude nous permet également de vérifier l'état et la possibilité d'utilisation des bornes géodésiques partagées par l'IGE et INRAE et situées sur les marges glaciaires étudiées.

Préparation des plans de vols

La préparation des plans de vols est effectuée grâce au logiciel de captation DJI GSPRO. Une préparation minutieuse de cette étape assure une acquisition complète et homogène de la zone d'étude et réduit les risques d'accidents durant les vols. Les plans de vols sont adaptés suivant 3 éléments d'observations :

- Les coordonnées des données d'approches en tenant compte de la topographie
- Les différentes bandes de chronoséquence (représentant les périodes de deglaciation).
- Le positionnement des placettes de suivis phytosociologiques des végétation des marges proglaciaires

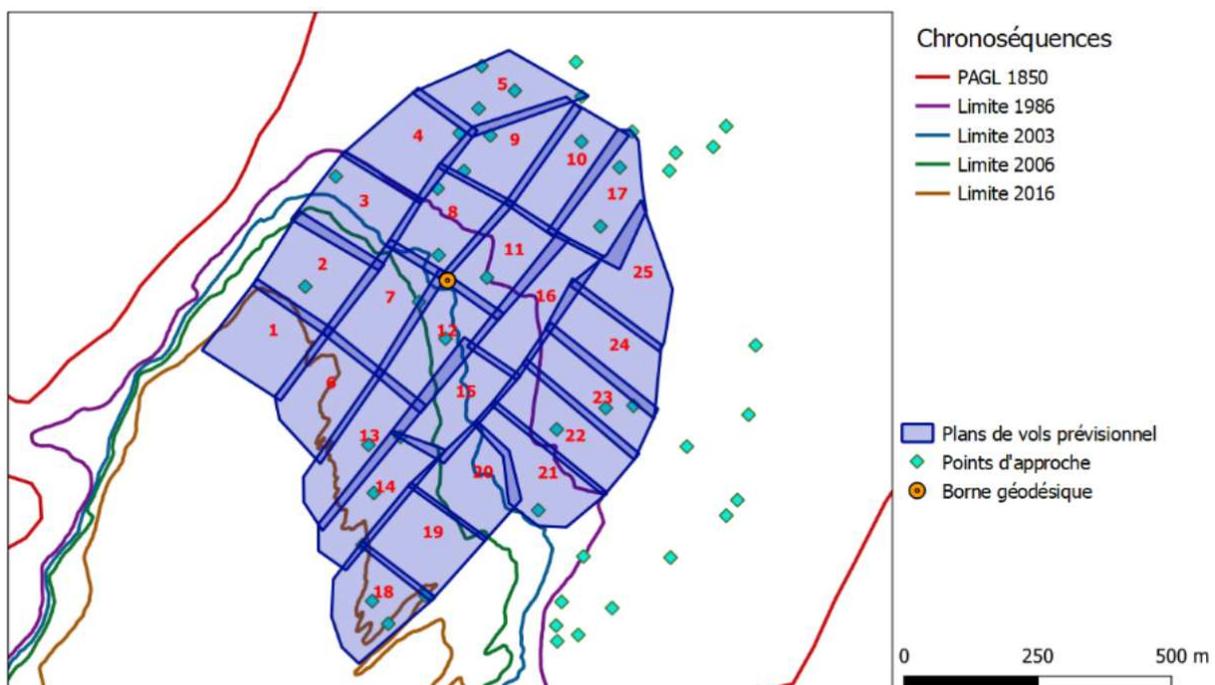
Les caractéristiques des acquisitions par drones ont été préparées et évaluées sur la base de publications et en adaptant des travaux de levés photogrammétriques afin de les adapter au milieu alpin. Ainsi les paramètres essentiels ont été estimés par Anaïs Zimmer et confirmés lors des différents travaux.

Les vols sont effectués à une hauteur de 65m permettant d'obtenir une résolution spatiale de 3-4 cm. L'acquisition s'effectue entièrement à une altitude constante pour assurer une résolution moyenne d'acquisition de 3cm à 5cm. Quant au recouvrement longitudinal et latéral, ils sont appliqués respectivement à 80% et 65%. Ce fort chevauchement est essentiel pour la bonne reconstruction 3D sur des terrains accidentés et la création de cartes de profondeur/MNS de grande précision.

Enfin, les découpes et la répartition des vols dans les différentes bandes de chronoséquence de la marge proglaciaire permettent de respecter un temps maximum d'acquisition d'environ 9 min de vol.

Pour chacun des plans de vols ainsi générés, nous pouvons associer l'altitude maximale et minimale grâce aux données d'approches observées directement sur le terrain et définir de manière plus opérationnelle leurs altitudes de décollage.

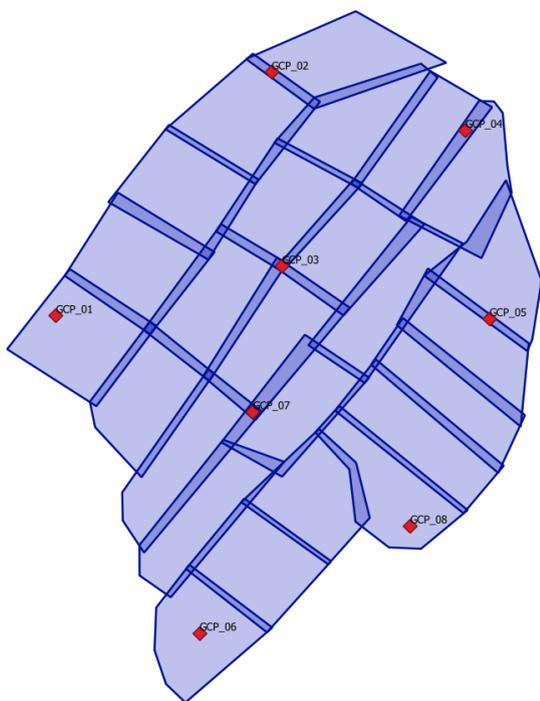
Il nous suffit ensuite de projeter, par photo-interprétation, l'ensemble des plans de vols dans un logiciel SIG. Il n'est en effet pas possible de visualiser plusieurs projets à la fois dans l'application ou bien d'exporter les zones d'études ce qui nous aurait permis de les exploiter sur un logiciel de cartographie. Cette opération donnant l'accès à une visualisation complète des acquisitions sur le site permet d'effectuer une vérification complémentaire du bon chevauchement inter-vol et de préparer le positionnement des points d'appuis.



Marge glaciaire de Saint-Sorlin

Figure 15 - Représentation des plans de vols sur la marge proglaciaire du Glacier de Saint-Sorlin (source: réalisation personnelle).

Les GCPs qui serviront de repère pour le géo-référencement de l'ortho-mosaïque sont répartis aux extrémités de la zone d'étude et disposés, de préférence en quinconce. L'objectif est de solidifier au maximum le maillage généré, d'éviter les zones convexes sans appui et de relever les points de topographie haute et basse pour ajuster les variations d'altitude du modèle final.



Les différentes données créées (plans de vols et positionnement GCP) sont ensuite exportées au format KML, exploitable sur des appareils mobiles, pour faciliter l'approche sur le terrain. Dans notre cas, nous avons utilisé nos smartphones avec un logiciel de positionnement adapté (OruxMap) couplé à une carte topographique ainsi qu'une orthoimage (IGN), l'objectif étant encore une fois de minimiser les risques d'accidents.

Figure 16 - Estimation de l'implantation des GCP (source: réalisation personnelle).

Relevée GNSS et captation drone

GCP

Dans un premier temps, il est nécessaire d'installer sur les sites les repères GCP. Il est également impératif de les avoir observés individuellement et de relever leur positionnement avec le GNSS avant leur désinstallation.

GNSS

L'acquisition GNSS avec les deux récepteurs altus APS3G de septentrio s'appuie sur la technologie RTK. Cette méthode nous permet de relever les points d'appui avec une précision centimétrique pour un temps d'observation de quelques secondes.

- **Le récepteur de référence** (la "base" paramétrée pour émettre les corrections par liaison radio).

Suivant la disponibilité ou non d'une borne géodésique proche de la zone, deux solutions ont été étudiées :

Utilisation d'une borne existante :

La solution idéale est d'exploiter une borne existante. De nombreuses bornes fixes sont implantées en France. Dans notre cas d'étude, l'IGE ainsi que l'INRAE nous ont partagé de nombreux points exploitables situés proches des glaciers que nous avons validés ou non lors de la phase d'approche.

La confiance n'excluant pas le contrôle, ces stations pérennes peuvent très bien avoir subi des dégradations et de légers déplacements (mouvement de terrain, chute de pierres). Nous avons donc également post-traité en différentiel l'observation complète du GNSS de base avec le service RGP afin de contrôler sa position.

Implantation d'une station de référence :

Cependant, si aucun point stationnable existe dans la zone d'étude, il est nécessaire de créer un point de référence, cela nécessite une observation respectant un minimum de temps dépendant de la zone d'étude.

Afin d'obtenir un point avec le maximum de précision, il est nécessaire de fixer les ambiguïtés* sur les fréquences mesurées. Pour cela, il faut un certain volume de mesure et donc un temps d'observation adapté pour améliorer la qualité du positionnement.

Nous avons estimé un temps d'observation de 4 heures ("Règles de base" = 10min d'observation +1min/km +1min/m de dénivelé) afin d'obtenir des coordonnées avec une précision centimétrique après le traitement différentiel.

- **Le récepteur mobile** (le "rover" paramétré pour réceptionner les corrections)

Une fois la connexion RTK appliquée, l'observation des GCPs peut se réaliser. Le relevé de l'ensemble des points est effectué de manière continue car l'installation du dispositif complet est relativement contraignant il est donc préférable d'éviter de devoir renouveler l'opération.

Une observation de 3 minutes pour chacun des points couplés à l'enregistrement des données brutes a également été appliquée. Cela nous permet d'assurer un minimum d'observation pouvant être traité en différentiel en cas de dysfonctionnement du positionnement RTK.

Drone

Les acquisitions par drone sont préparées et réalisées individuellement. Le nombre restreint de batteries limite le nombre de vols réalisables sur une journée (soit 10 batteries donc 10 vols maximum par jour). Les contraintes de charge des batteries (possible uniquement dans les refuges équipés de prises de courant et situés souvent bien en contrebas des sites d'étude) ainsi que les contraintes de temps pour réaliser tous les vols (3 jours programmés d'acquisition maximum pour une moyenne de 25 vols par zone d'étude) laissent peu de places aux erreurs.

De plus, les acquisitions des images par drone doivent être effectuées dans une plage horaire spécifique située entre 11:30 heure à 15:30 heure afin de limiter au maximum les ombres portées sur les roches, les plantes et les parois rocheuses. Elles demandent également de bénéficier de conditions météorologiques favorables et stables (absence de vent et de pluie).

Comme expliqué précédemment lors de la préparation des plans de vols, chaque acquisition doit avoir une altitude de décollage précise afin d'obtenir une résolution spatiale homogène sur la zone d'étude. La détermination du site de décollage est effectuée directement sur le terrain suivant les altitudes préalablement définies durant la préparation des plans de vols.

Du point de vue de la sécurité, nous avons systématiquement ajusté le déroulement des vols pour s'assurer de l'absence de randonneurs lors de la réalisation des vols. Sur le site de Gébroulaz, des observations complémentaires de la faune sauvage présente (principalement les bouquetins) a également été effectuées, en collaboration avec les gardes de la réserve du lac de Tueda et du Parc national de la Vanoise, afin de limiter au maximum l'effet du dérangement des vols sur la faune sauvage. Ces observations en temps réel ont permis d'évaluer la gêne sonore occasionnée par le drone sur les populations présentes de Bouquetins. Ce retour d'expérience est utile au Parc national de la Vanoise pour évaluer le degré d'impact de ce type de protocole d'étude. Une demande d'autorisation de vol avait été demandée préalablement au Parc national. Une présentation de l'étude et du protocole a été également réalisée auprès du comité scientifique du Parc national qui s'est tenu le 5 juillet 2021. Cette instance a ensuite donné un avis favorable en délivrant une autorisation de survol contenant un certain nombre de préconisations à respecter.

3 Traitements et résultats

3.1 Première partie : statistiques avec R sur les images satellites

Pour ce travail nous avons étudié la marge proglaciaire du Glacier de Saint-Sorlin. Il se situe sur la commune de Saint-Sorlin-d'Arves, dans le massif de Grandes Rousses en Savoie, et est dominé par le Pic de l'Etendard (3 464 m). Le glacier s'étend sur 2.8 kilomètres entre 2 600 et 3 400 mètres, et fait partie des cinq glaciers des Alpes Françaises sous étroite surveillance scientifique dans le cadre du projet GLACIOCLIM (programme français de suivi des glaciers dans le monde effectué par l'IGE et l'INRAE).



Figure 17 - Glacier de Saint-Sorlin le 26 Juillet 2021 (source : N. Rouyer).

Interprétation des résultats :

La figure ci-dessous présente le résultat du calcul NDVI sous R avec la projection des bandes de chronoséquence de la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin. Le traitement a été effectué avec une image **satellite Sentinel-2** du 23 juillet 2020, date la plus proche de la réalisation des relevés de terrain (21/22 juillet 2020). La bande du petit âge glaciaire (1852) a été volontairement tronquée de sorte à étudier uniquement la partie la plus ancienne, le secteur le plus en aval.

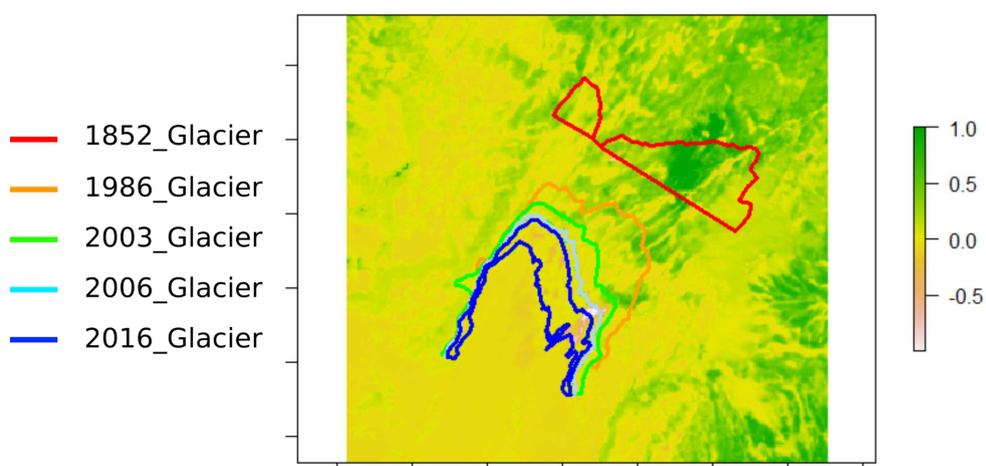


Figure 18 - Indice NDVI et bandes de la chronoséquence étudiée du glacier de Saint-Sorlin.

Ci-dessous, nous pouvons observer les résultats des histogrammes de l'indice NDVI sur les différentes bandes de la chronoséquence. Ces résultats nous montrent une augmentation du NDVI en fonction du temps de déglaciation, et notamment un signal net du NDVI pour les bandes déglacées il y a longtemps (PAG-1986). Ce premier résultat est plutôt cohérent malgré la résolution spatiale du capteur Sentinel-2 de 10m. Mais le temps n'explique pas tout, d'autres facteurs sont essentiels au développement de ces écosystèmes.

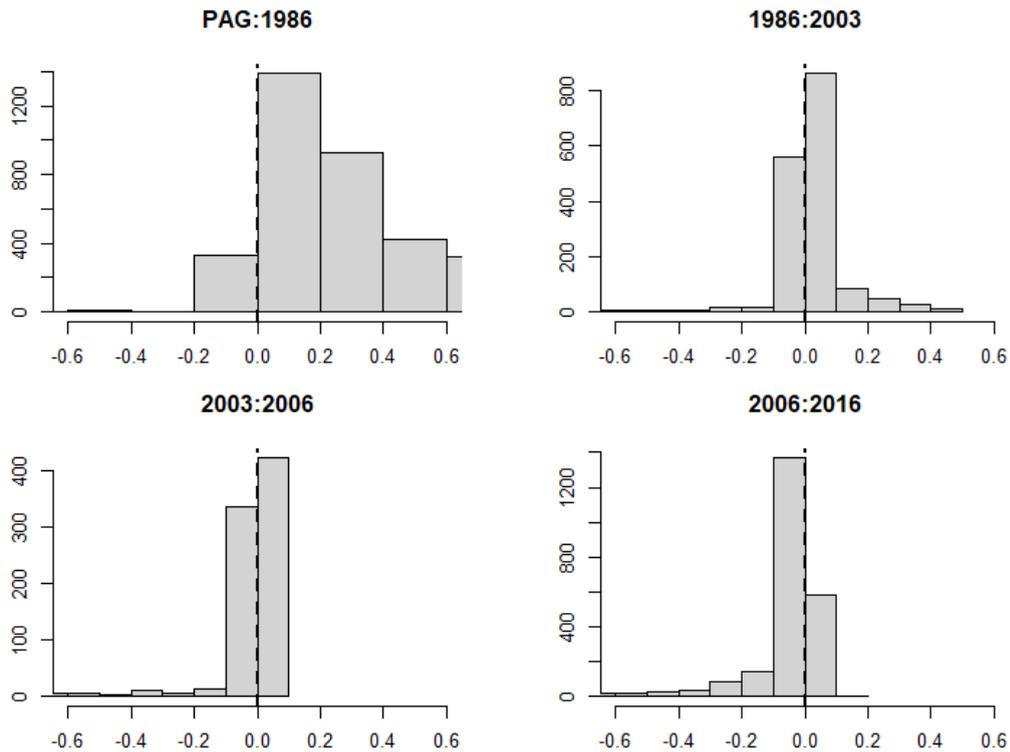


Figure 19 - Histogrammes des résultats NDVI sur les différentes bandes de déglaciation.

Résultats de l'ACP :

Comme expliqué dans le § 2.1.2, de nombreuses données disponibles ont été compilées: NDVI calculé avec Sentinel-2, données topographiques issues du MNT, données bioclimatiques issues de SAFRAN. Le résultat de l'ACP dans un cercle de corrélation (figure ci-dessous) permet de déterminer quelles sont les composantes principales qui sont corrélées entre elles. Dans notre cas, nous souhaitons déterminer quelles sont les valeurs qui sont liées ou non au résultat du NDVI qui détermine la présence de végétation.

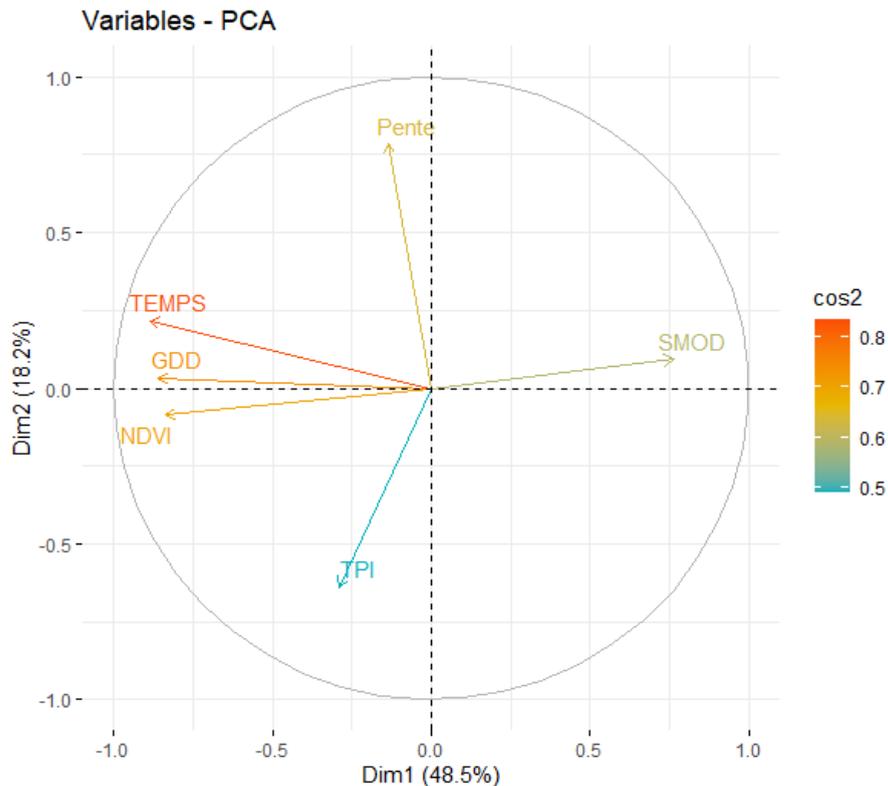


Figure 20 - Cercle de corrélation de l'ACP.

Interprétation du cercle de corrélation :

- Les variables positivement corrélées sont regroupées entre elles.
- Les variables négativement corrélées sont positionnées sur les côtés opposés de l'origine du graphique (quadrants opposés).
- La distance entre les variables et l'origine mesure la qualité de représentation des variables. Les variables qui sont loin de l'origine sont bien représentées par l'ACP.
- La qualité de représentation des variables sur la carte de l'ACP s'appelle \cos^2 (cosinus carré).

Nous pouvons ainsi déduire que le temps de déglaciation ainsi que le nombre de degrés cumulés par jour (GDD) sont bien corrélés au NDVI, alors que la date de déneigement (SMOD) est inversement corrélée, ce qui semble logique. En revanche, la pente et l'indice de position topographique n'expliquent pas vraiment le résultat du NDVI.

Les valeurs plus élevées du NDVI se trouvent sur les zones déglacées depuis longtemps, sur les zones où la température est plus importante et où l'enneigement est plus faible.

3.2 Seconde partie : résultat d'acquisition et orthorectification des images drone

La méthodologie décrite précédemment a été appliquée sur 6 glaciers dans les Alpes. Deux de ces glaciers, Saint Sorlin et Gébroulaz, sont des sites d'études du projet ROCVEG volet marges proglaciaires. Les autres glaciers (Glacier Blanc, Pelerins, Tour et Orny) sont étudiés dans le cadre de la thèse de doctorat d'Anaïs Zimmer en collaboration avec le CBNA.

La première acquisition de données s'est effectuée sur le site situé le plus au sud, c'est-à-dire ayant la plus faible latitude. Nous nous sommes ensuite déplacés progressivement sur les sites d'acquisition de plus fortes latitudes dans le but d'observer une végétation au même stade de développement phénologique. En effet, la position géographique des sites d'étude a un impact sur le développement des plantes : plus on monte en latitude, plus leur croissance est "en retard". Appliquer un décalage de temps en montant progressivement en latitude nous permet d'équilibrer ce processus et ainsi d'observer une végétation avec un état végétatif homogène en plus d'obtenir un enneigement relativement similaire sur l'ensemble des marges proglaciaires.

Sites d'étude ;

- Glacier Blanc - Massif des Ecrins
- Glacier de Gébroulaz - Massif de la Vanoise
- Glacier de Saint-Sorlin - Massif des Grandes Rousses
- Glacier des Pélérins - Massif du Mont Blanc
- Glacier du Tour - Massif du Mont Blanc
- Glacier d'Orny - Massif du Mont Blanc

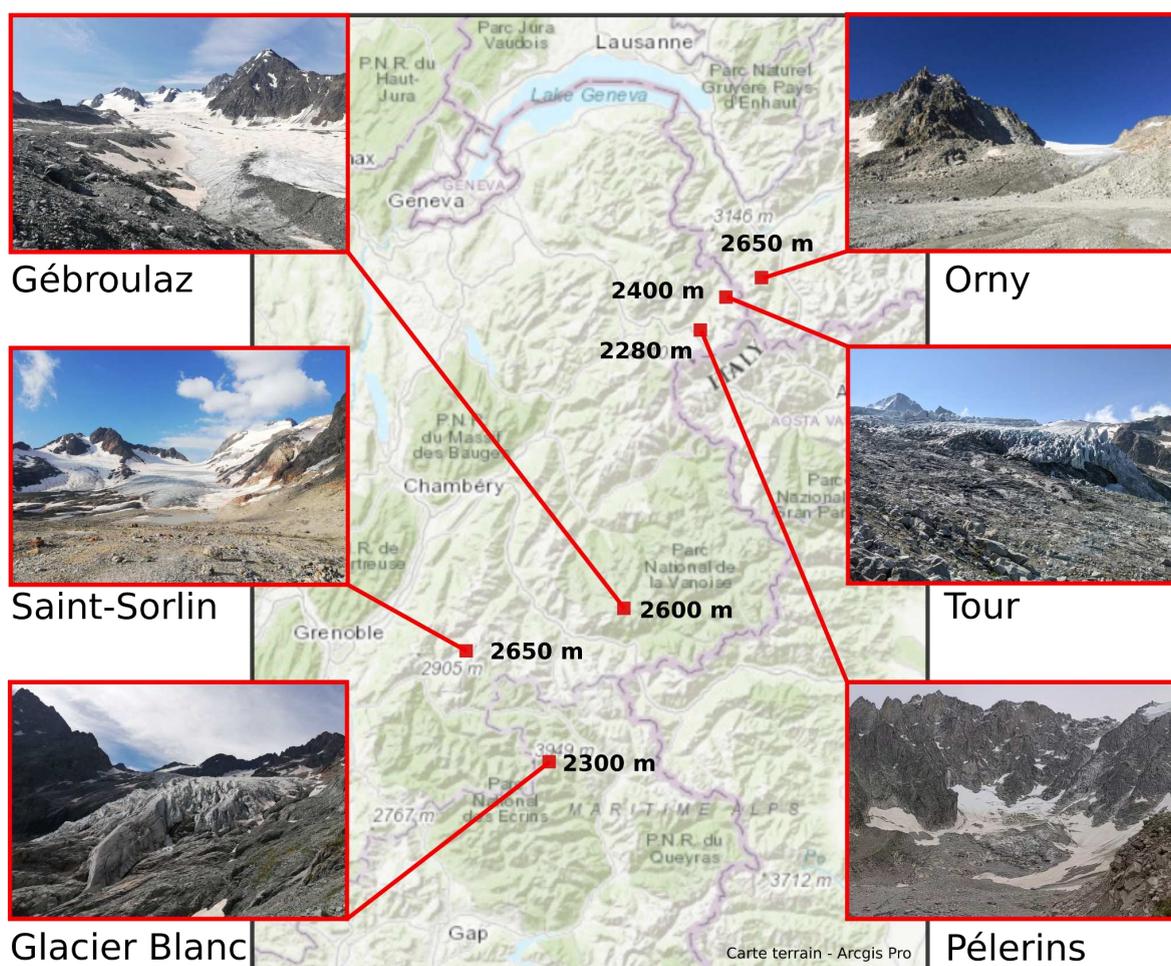


Figure 21 - Sites étudiés (source: réalisation personnelle).

Acquisition réalisé

Ci-dessous le résumé des acquisitions drone réalisées en milieu alpin durant 5 semaines :

Sites	Nombre de vols	Images acquises * 6 bandes	Point de contrôle observé	Surface couverte (m ²)
Glacier Blanc	28	4200	10	680 000
Gébroulaz	25	3 750	12	520 000
Saint Sorlin	27	4 050	10	640 000
Pèlerins	15	2 250	5	330 000
Tour	20	3 000	7	350 000

Post traitement de la station de référence GNSS

Les observations des stations de référence sont systématiquement post-traitées, soit pour effectuer un contrôle sur un point existant ou bien pour déterminer une position précise lors de l'observation d'une nouvelle implantation.

Les données brutes extraites des GNSS sont au format SBF (Septentrio Binary Format) qui est le format propriétaire de Septentrio.

Afin d'exploiter les données sous RTKLib, il est nécessaire de le convertir au format RINEX (Receiver Independent Exchange Format) qui correspond au format universel de stockage de données géodésiques.

La conversion au format RINEX s'effectue avec l'outil SBF Converter qui est présent dans la suite de logiciels fournis par Septentrio (Annexe 2).

Exécution sous RTKLib

RTKLib est un logiciel portable et libre de traitement standard et précis pour les GNSS. Pour nos travaux de post-traitement, nous utilisons l'application RTKPost (Annexe 3).

Nous effectuons un traitement différentiel afin d'obtenir des résultats précis de l'observation, ce processus de traitement utilise une station fixe (Base station) comme point connu de référence. Son observation permet de déterminer l'écart entre les positions indiquées par les satellites et la position réelle et de la transmettre à la station à déterminer. Pour cela, nous utilisons les données RGP qui sont un réseau de stations de référence en France diffusées par l'IGN et plus précisément la station la plus proche de notre site d'étude.

Ensuite, nous exploitons les différents fichiers RINEX de la station observée (Rover). Dans ce cas, il est nécessaire de déterminer un point précis issu des observations effectuées sur un point unique. Il est donc nécessaire d'appliquer un traitement statique "Static treatment" dans les paramètres de l'application.

Selon le temps passé suite à l'observation, il est possible d'exploiter les éphémérides diffusés par l'IGS. La diffusion des orbites rapides est disponible potentiellement une journée après la date d'acquisition et les orbites finaux environ 15 jours. Ces données permettent d'obtenir un résultat plus précis en exploitant la position plus précise des satellites et donc améliore le résultat.

Ces traitements sont appliqués sur chacun des sites, les résultats sont vérifiés spatialement à l'aide d'outil cartographique et d'images aériennes (IGN) puis qualitativement en croisant les différentes observations ou alors en comparant les coordonnées des points existants (Annexe 4).

Orthorectification

Le processus complet appliqué sur une marge proglaciaire n'a pas pu être effectué durant ce stage. En effet, le volume conséquent des données à traiter demande une grande quantité de ressources informatiques et de temps de travail. Le temps restant suite à l'acquisition par drone a été trop court pour initier une série de tests de traitement afin de définir les bons paramètres à appliquer, de lancer les chaînes de traitement photogrammétriques et radiométriques afin de finaliser les productions de l'ensemble des images nécessaires aux analyses spectrales ultérieures. Nous avons donc décidé de représenter un premier pré-traitement sur une zone de la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin (rapport de traitement avec les paramètres associés - Annexe 5).

Pour l'ensemble des processus d'orthorectification et géo-rectification, le logiciel Agisoft Metashape Pro est utilisé. Ce logiciel permet d'appliquer le processus photogrammétrique complet de l'appariement des images. Cette version dédiée aux professionnels a l'avantage de détecter et de traiter les images multispectrales.

Ci-dessous le pipeline prévisionnel du processus d'orthorectification.

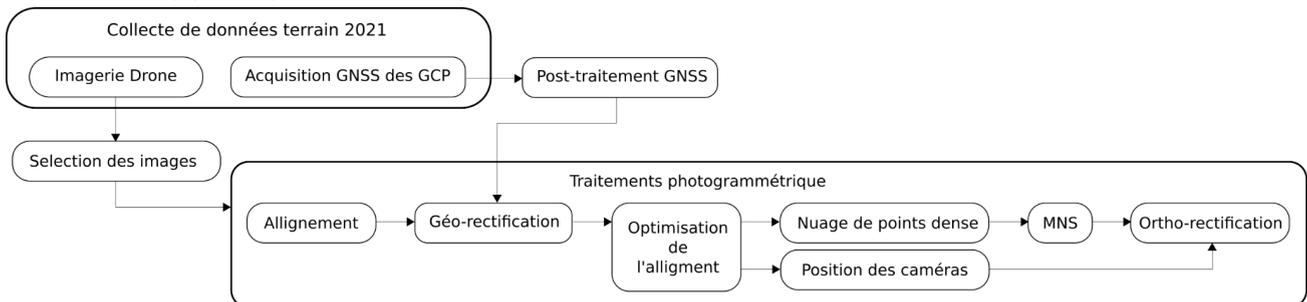


Figure 22 - Pipeline du traitement photogrammétrique (source: réalisation personnelle).

L'orthorectification est un processus photogrammétrique permettant de corriger géométriquement les images afin de les rendre superposables à la carte. Il permet de corriger les déformations visibles sur l'image issue de plusieurs origines comme la distorsion de la caméra, le relief, l'angle de prise de vues, la perspective etc.

Dans un premier temps, il est nécessaire d'effectuer une première vérification. Les acquisitions automatiques par drones génèrent un grand nombre de clichés sans que l'opérateur ne puisse vérifier leur exhaustivité in-situ. Ce contrôle doit permettre d'exclure d'éventuelles images qui ont des défauts trop importants, risquant d'impacter le processus photogrammétrique comme la présence de floue, nuages, reflet.

Cette étape manuelle est relativement longue et lourde à effectuer mais indispensable pour le bon déroulement de la suite des opérations.

Alignement

La première étape du traitement photogrammétrique dans le logiciel Metashape est l'alignement des images. Ce processus photogrammétrique utilise la superposition des clichés (recouvrement - Annexe 5 : survey data) afin de déterminer des points homologues (points de liaisons) entre les images. Ces points communs sont ensuite associés (appariement) puis permettent de déterminer les positions des caméras (sommets de prise de vue) qui est essentiel pour la suite du traitement et affinent les paramètres d'étalonnage de l'appareil optique (correction géométrique).

Le résultat de ce processus est un nuage de points représentant les différents points de liaisons détectés lors de l'opération. Ce résultat n'est pas utile pour la suite du traitement : il permet néanmoins de représenter globalement la reconstruction 3D.

Géo Rectification - GCP

La géo-rectification permet comme son nom l'indique de corriger géographiquement les données raster. A ce stade du processus, le résultat est :

- Soit dans un repère relatif, la différence de position entre les pixels dans l'espace par rapport à leur différence de position est respectée mais ils ne sont pas projetés géographiquement.

- Soit dans un repère absolu, ce qui est notre cas. Le processus utilise directement les positions des caméras présentes dans les métadonnées des images.

Dans notre étude la géo-rectification permet d'améliorer la précision absolue obtenue par le drone (positionnement sans la géo-rectification - Annexe 5 : Caméra locations) en s'appuyant sur les coordonnées précises des GCP, le résultat va ainsi être corrigé de ses erreurs de positionnement.

Reconstruction dense

Cette étape exploite la position des caméras et les données de calibrations pour effectuer la reconstruction 3D de la scène. Un nuage de points dense est ainsi généré et la densité de ce volume dépend de la résolution de l'image et des paramètres de reconstruction (qualité demandée).

Génération du maillage

En s'appuyant sur le nuage de point dense précédemment généré, nous pouvons ensuite calculer le maillage 3D (Annexe 5 : Digital Elevation Model). Dans notre cas, il correspond à un MNS du site traité. Cette représentation topographique du terrain est essentielle pour le processus d'orthorectification. Il servira à corriger et rectifier les erreurs associées aux déformations du relief.

Orthorectification

Enfin, le processus d'orthorectification va permettre de calculer une orthomosaïque où l'ensemble des images sont corrigées de leurs distorsions et de leurs perspectives assemblées.

Nous obtenons donc une orthomosaïque multibande contenant les 6 bandes spectrales corrigées. On peut maintenant utiliser cette image corrigée géométriquement pour y effectuer divers traitements et calculs spectraux comme des indices de végétations.

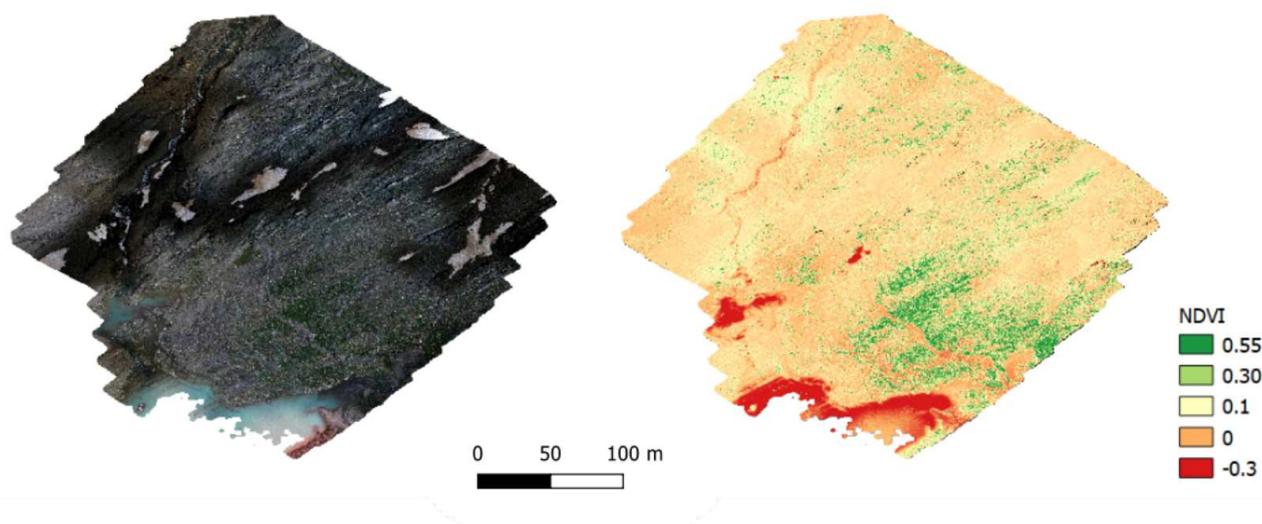


Figure 23 - Résultat d'une orthomosaïque sur la marge proglaciaire de Saint-Sorlin en vraies couleurs (gauche) et son indice NDVI (droite), (source: réalisation personnelle).

Dans l'optique d'un traitement complet :

Le traitement complet est divisé en plusieurs groupes (le terme dans le logiciel est "Chunk" qui signifie tronçon) de 4 ou 5 vols pour un total d'environ 800 images. Au-delà, le traitement qui consiste à juxtaposer et aligner toutes les photos ne s'effectue pas avec le poste informatique à notre disposition. Ce dernier ne dispose pas d'une configuration informatique suffisante pour traiter ce volume très important de données. Chacun des ces groupes étant calculés indépendamment, il est nécessaire par la suite d'aligner ces différents blocs pour ensuite les regrouper tout en ayant appliqué un étalonnage radiométrique.

4 Discussion

Traitement et analyse statistique sur des images satellites à haute résolution spatiale.

Le traitement statistique appliqué sur les images satellites, dans le but de déterminer un potentiel dynamique de la croissance végétale sur les marges proglaciaires, nous permet de générer rapidement de nombreux résultats statistiques. Les données satellitaires ont l'avantage d'être libres d'utilisation, disponibles rapidement et couvrant de très large zone avec une forte résolution temporelle et spectrale.

Les résultats obtenus durant le stage permettent d'apprécier l'impact de certains facteurs sur le NDVI. Le processus nécessite encore d'être affiné pour pouvoir déterminer son efficacité.

Il peut être envisagé de réaliser de nombreux autres traitements et même de comparer les résultats avec les acquisitions aériennes par drone pour déterminer si l'utilisation des images satellites est adaptée à la détection de la végétation sur les marges proglaciaires.

Acquisition des images drones et production d'orthoimages à très haute résolution spatiale.

La méthodologie d'acquisition d'imagerie aérienne appliquée sur les 6 marges proglaciaires dans les alpes est complète. Elle nous a permis de couvrir une surface conséquente sur les différents objectifs (relevés botaniques, études dans différentes bandes de déglaciation) sans aucune perte matérielle. Les images ainsi acquises, nous permettent d'obtenir une orthoimage avec une résolution spatiale d'environ 4cm, ce qui est très correcte dans le but de détecter et d'analyser les formations de végétation alpine.

Notre retour d'expérience durant ces 6 semaines de relevés, nous permet donc de confirmer l'efficacité de ce processus et échelle de travail tout en présentant quelques inconvénients :

- **Personnels et matériels :**
Ces acquisitions nécessitent environ 5 jours de travail complet pour une équipe de 2 à 3 personnes, sous réserve que les conditions météorologiques soient favorables pour réussir les missions. Les sites d'acquisition se situant à environ 2800m d'altitude, les marches d'approches depuis les refuges peuvent facilement atteindre 3h. Chaque mission implique un effort d'organisation et logistique important avec une contrainte de transport du matériel : drone, batteries, station de référence, terminaux GNSS, cibles, affaires personnelles adaptées aux milieux de montagne sur des distances importantes. De plus, les relevés à réaliser se situent de part et d'autre de la marge proglaciaire, dans un terrain accidenté comportant de nombreux névés, éboulis rocheux et moraines à traverser. Cependant il aurait été impossible de couvrir la zone étudiée seulement grâce à la réalisation d'évaluation in-situ de placettes.
- **Temps de traitement informatique :**
La volumétrie des données résultant du nombre des clichés ainsi que les caractéristiques multispectrales du capteur génèrent une quantité considérable d'images à manipuler, vérifier et traiter. Il peut être nécessaire d'utiliser des clusters de calcul qui consiste à regrouper et coordonner un ensemble d'ordinateurs afin de dépasser les limites d'une machine isolée. Cette solution qui est envisagée actuellement doit permettre de soustraire un temps non négligeable dédiés aux processus de calcul photogrammétriques et spectraux.

Optimisations:

- **Relevés GNSS**
Dans le but de pouvoir apporter un indice de précision sur la géo-rectification appliqué aux orthophotos mosaïques, il est nécessaire de déterminer/confirmer la précision obtenue lors de nos traitements. En effet, l'utilisation d'un GNSS de précision couplé à des méthodes de post-traitement effectuées avec un logiciel libre n'a pas été contrôlée de même que les positions des bornes géodésiques que l'on nous a partagées. Le contrôle du traitement de l'acquisition du GNSS pourrait être effectué soit en comparant les coordonnées obtenues avec un point fiable et confirmé ou bien en comparant l'observation de même nature (temps, heure et site d'observation) avec un appareil contrôlé.

- **Senseur de luminosité**

Le senseur de luminosité va avoir un rôle essentiel sur la calibration radiométrique de nos images. Il doit permettre d'homogénéiser tous nos résultats et ainsi optimiser les traitements qui seront réalisés ultérieurement.

Les acquisitions des photographies aériennes étant réalisées en haute montagne et à des jours/dates différentes, la luminosité ambiante est fortement impactée par les conditions météorologiques changeantes.

L'objectif est de corriger, dans un premier temps, les variances de luminosité entre les vols au sein d'une marge proglaciaire. Les premiers essais de construction des orthomosaïques étant effectués en plusieurs parties, chacun de ces résultats ont été calibrés indépendamment les uns des autres.

Puis dans un second temps, c'est l'ensemble des orthomosaïques qui seront homogénéisées radiométriquement.

Conclusion

Au travers de cette étude, nous pouvons constater la complexité à étudier la colonisation végétale des marges proglaciaires, que ce soit en ce qui concerne les acquisitions de données de végétation ou bien l'évaluation de celle-ci. L'utilisation de la télédétection permet d'apprécier la couverture végétale sur de très grandes zones, mais son efficacité pour détecter et cartographier les végétations des marges proglaciaires, qui sont basses, ouvertes et en mosaïque complexe avec des milieux minéraux, reste encore à évaluer.

Les premiers résultats statistiques avec les données satellites, appliqués sur la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin, montrent des résultats encourageants malgré une résolution spatiale peu adaptée (celle des images Sentinel-2 à la résolution de 10m) à la détection des espèces végétales de petite taille. Ce projet est encore ouvert à de nombreuses pistes de réflexions et d'optimisation, d'autant plus que l'apport des orthoimages aériennes va apporter de nouveaux résultats.

La méthodologie des acquisitions aériennes à quant à elle été appliquée sur les 6 glaciers dans les Alpes, avec succès. La documentation et le partage de ces connaissances permettront de progresser dans les méthodologies d'études de ces sites si particuliers.

Quant au travail de traitement des acquisitions aériennes, il ne fait que commencer. Il reste encore de nombreux facteurs à déterminer et à optimiser afin d'obtenir un résultat exploitable à analyser. Le volume de données acquis et la présence de 6 bandes spectrales laissent entrevoir de nombreuses possibilités d'exploitation et de traitement à approfondir.

Enfin, l'association de données de végétation, d'images acquises par drone ou par satellite permet d'étudier la végétation des marges proglaciaire à plusieurs échelles et résolutions spatiales, temporelles et spectrales. Avec suffisamment de données et d'optimisation, cette approche multi-scalaire pourrait permettre d'estimer qualitativement et quantitativement la couverture végétale de ces zones naturelles encore peu étudiées.

Glossaire

Ambiguïté de phase : Lorsque le récepteur reçoit un signal GNSS, il mesure un déphasage (fraction de longueur d'onde) et lui ajoute un nombre de cycles complets durant l'observation. Cependant lors de l'acquisition ou en cas de perte de signal un nombre entier de cycle est inconnu ce qui génère une ambiguïté de phase.

Bryophytes : plantes terrestres qui ne possèdent pas de vrai système vasculaire tel que les mousses, les hépatiques (embranchement des Bryophytes).

Cyanobactéries : micro-organismes qui se développent dans les milieux terrestres et aquatiques, dans les eaux douces comme dans les eaux salées.

DJI : créée en 2006 par Wang Tao, est une entreprise chinoise spécialisée dans le drone loisir et professionnel et détient 70% des parts de marché dans ce secteur.
<https://www.forbes.fr/technologie/comment-dji-a-conquis-le-marche-du-drone/>

Lichens : champignon, associé à une algue. Il pousse là où aucune plante ne peut vivre : en haut des montagnes, sur les rochers du bord de mer, sur la lave refroidie...

NDVI :

Normalized Difference Vegetation Index (Développée dans les années 70 par Rouse 1973 et Tucker 1979). Le NDVI est calculé à partir de la réflectance obtenue dans la bande Rouge (0,62-0,78 μm) et le proche infrarouge (0,78 à 2,5 μm).)

RTK :

“Le RTK (Real Time Kinematic/Cinématique en temps réel) est une technologie de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de la phase des ondes porteuses des signaux émis par les systèmes GPS, GLONASS ou Galileo. Une station de référence fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre.”

https://docs.centipede.fr/docs/centipede/2_RTK.html

RGP :

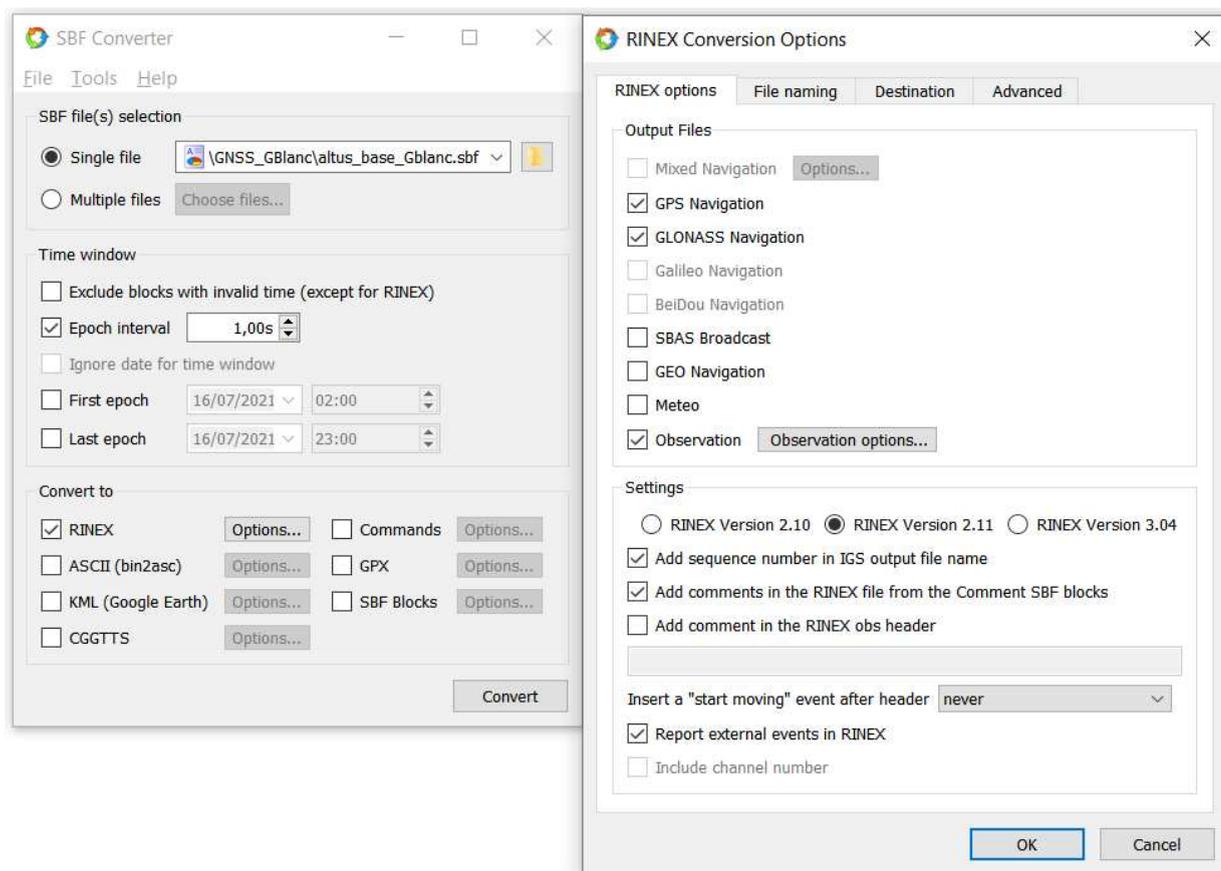
“Le réseau GNSS permanent ou réseau GPS permanent est un réseau de stations de mesure destinées au positionnement par satellite en temps réel en France, et maintenues par différents partenaires autour de l'Institut national de l'information géographique et forestière.”

https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9seau_GNSS_permanent

Bibliographie

- [1] H. Zekollari, M. Huss, et D. Farinotti, « Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble », *The Cryosphere*, vol. 13, n° 4, p. 1125-1146, 2019, doi: [10.5194/tc-13-1125-2019](https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019)
- [2] A. Lamprecht, P. Semenchuk, K. Steinbauer, M. Winkler, et H. Pauli, « Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps », *New Phytologist*, vol. 220, juin 2018, doi: [10.1111/nph.15290](https://doi.org/10.1111/nph.15290)
- [3] M. Steinbauer *et al.*, « Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming », *Nature*, vol. 556, avr. 2018, doi: [10.1038/s41586-018-0005-6](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6)
- [4] F. Alps *et al.*, « Observed long-term greening of alpine vegetation - A case study in the French Alps », *Environmental Research Letters*, vol. 12, oct. 2017, doi: [10.1088/1748-9326/aa84bd](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa84bd)
- [5] « L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques », *Ministère de la Transition écologique*.
<https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques>
- [6] « La vie en marge des glaciers : une diversité étonnante et croissante | Sciences en relief », mars 09, 2020. <https://blog.creamontblanc.org?p=2795>
- [8] « UT College of Liberal Arts » :
<https://liberalarts.utexas.edu/geography/news/anais-zimmer-awarded-2021-2022-nsf-ddri-grant>
- [9] Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>
- [10] « SAFRAN - Centre National de Recherches Météorologiques ».
<https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article788>
- [11] « The Comprehensive R Archive Network ». <https://cran.r-project.org/>
- [12] « L'inexorable déclin du glacier de Saint-Sorlin dans les Grandes Rousses », *France Bleu*, oct. 17, 2019.
<https://www.francebleu.fr/infos/environnement/video-le-lent-declin-du-glacier-de-saint-sorlin-dans-les-grandes-rousses-1571134546>
- [13] A. Fischer, T. Fickert, G. Schwaizer, G. Patzelt, et G. Groß, « Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space », *Sci Rep*, vol. 9, n° 1, p. 13918, sept. 2019, doi: [10.1038/s41598-019-50273-2](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2)
- [14] S. Gascoin, M. Grizonnet, M. Bouchet, G. Salgues, et O. Hagolle, « Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data », *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, n° 2, p. 493-514, avr. 2019, doi: [10.5194/essd-11-493-2019](https://doi.org/10.5194/essd-11-493-2019)

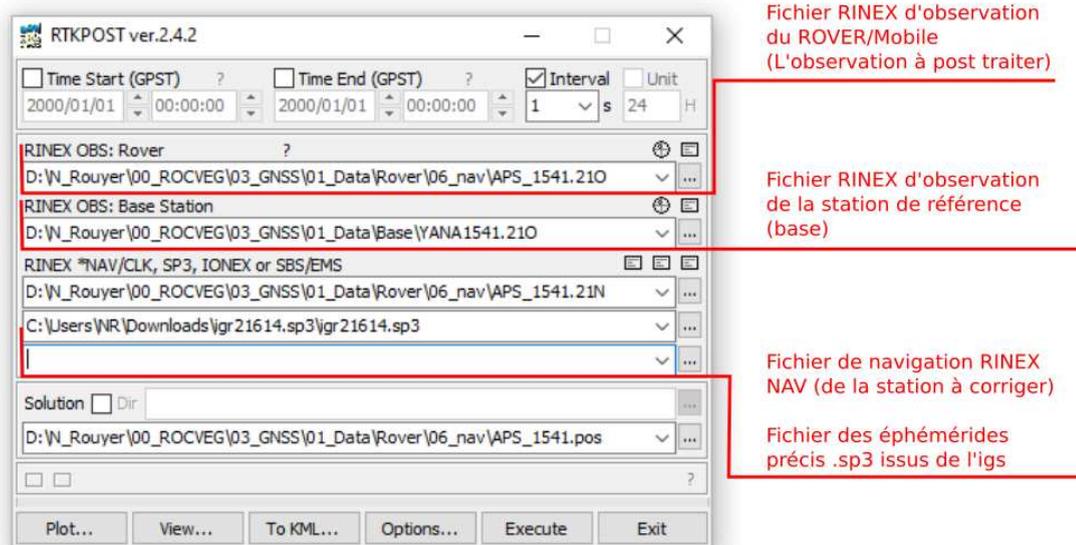
Annexe 2 - Méthode de conversion du format SBF au format RINEX 2.11



Les résultats obtenus sont les fichiers d'observation GNSS (.21O) avec le fichier de navigation GPS (.21N) et le fichier de navigation Glonass (.21G).

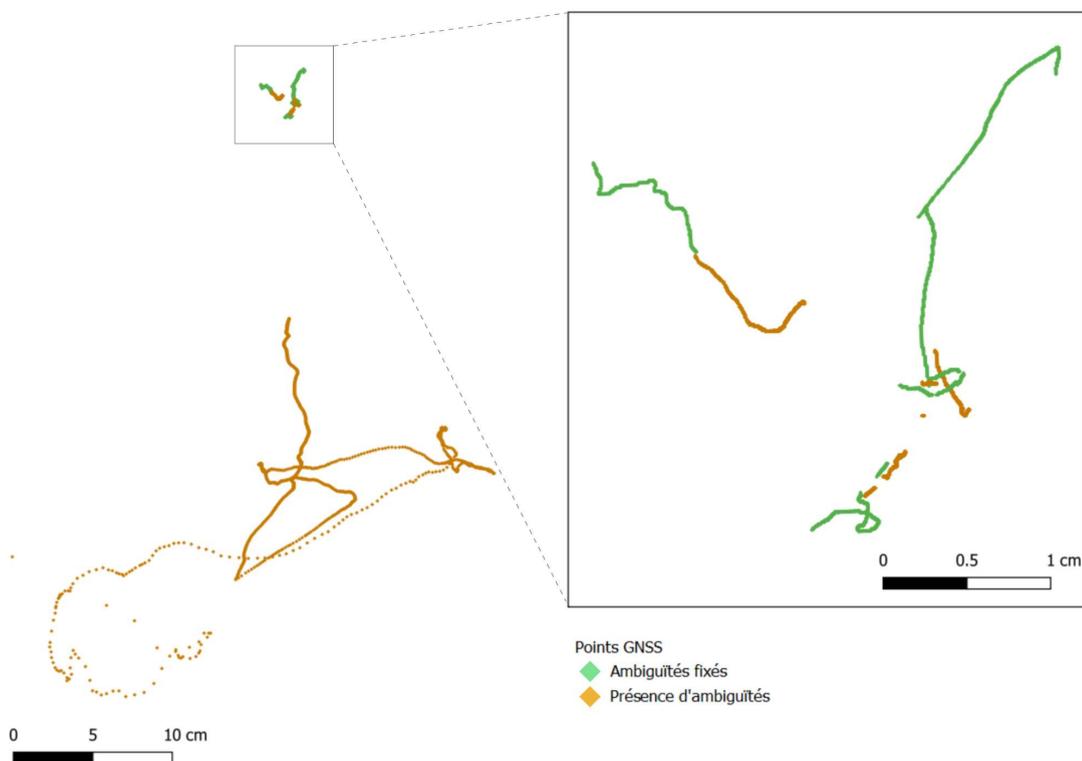
Annexe 3 - Traitement RTKLib

Ci-dessous une représentation de l'outil RTKPost ainsi que les différents fichiers permettant de post traiter les données GNSS.



L'image ci-dessous représente le résultat d'un post traitement d'une observation GNSS de 4 heures sur le glacier du Tour, cette observation est destinée à déterminer un point de base afin d'effectuer les jours suivants des relevés RTK sur les points d'appui au sol. La couleur des points définit la qualité "Q" en sortie du traitement. Lorsqu'elle est fixée, cela signifie que les inconnues liées sont résolues.

Pour ce traitement, nous avons utilisé l'observation de la station RGP de Marignier (74) qui était la plus proche de notre site d'acquisition.



A partir de cette étape, il est nécessaire de calculer la moyenne de ces points afin d'obtenir une position unique et précise du traitement. Mais avant cela, il est nécessaire de filtrer ces données afin de ne garder que les meilleures valeurs.

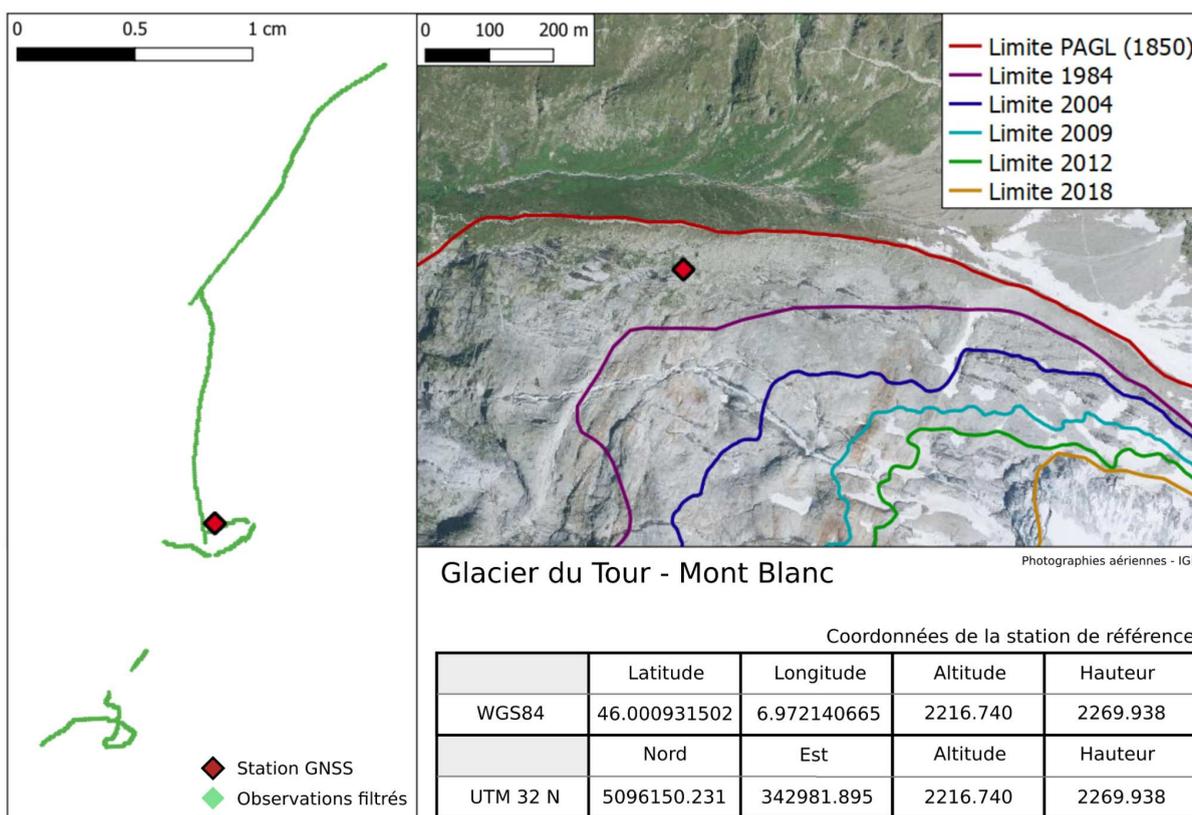
Pour cela, nous allons utiliser les champs "Q" ainsi que les champs "sdn / sde / sdu" qui représente respectivement l'écart-type Nord, Est et UP (élévation) en mètre.

Nous ne garderons que les données avec les ambiguïtés résolues, un écart-type en horizontale égale ou inférieure à 2mm et un écart-type en élévation égale ou inférieure à 4mm.

Expression de filtrage spécifique au fournisseur de données

```
"Q"=1 AND
"sdn(m)" <= 0.0002 AND
"sde(m)" <= 0.0002 AND
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Il suffit ensuite de calculer la position moyenne de la latitude, longitude et de l'élévation pour obtenir les coordonnées final de la station observée.



Glacier Blanc

Traitements et comparaison de la station de référence sur la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin avec la borne géodésique.

Date d'observation : 16 Juillet 2021

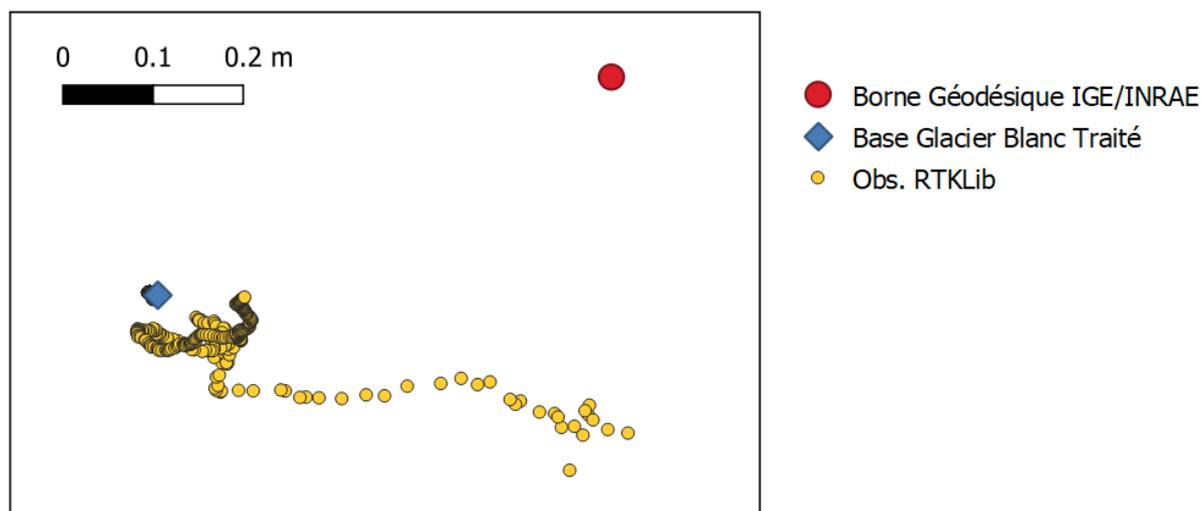
Stations RGP utilisée :



Fichier d'éphéméride : [igs21665.sp3](#)

Temps d'observation : 7H
Début et Fin (GPST) : 8h30 / 14H30

Ci-dessous la représentation des observations brutes et traité du 16 Juillet 2021 ainsi que la borne Géodésique partagés par l'IGE/INRAE projetés sur QGIS en WGS84.



On observe en **Vert** la borne géodésique, en **Orange** les observations brutes traitées par RTKLib et en **Bleu** la moyenne des points traités et filtrés.

Décalage entre les coordonnées de la borne et l'observation du 22 Juillet :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
51.7 cm	33 cm	173.3 cm

On observe un trop grand décalage entre la borne et le traitement réalisé.

Résultats Obtenus :

Résultats des observations du 16 Juillet.

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	44.9305145597 865	6.40937830735 079	2301.013	2355.473
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	295572.481	4978496.603	2301.013	2355.473

Coordonnées IGE/INRAE. "Glacier Blanc Tube A"

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	44.930517678	6.409384715	2299.28	2353.740
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	295572.998	4978496.933	2299.28	2353.740

Filtre appliqué :

```
"Q"=1 AND  
"sdn(m)" <= 0.0001 AND  
"sde(m)" <= 0.0001 AND  
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Glacier de Gébroulaz

Traitements et comparaison de la station de référence sur la marge proglaciaire du glacier de Gébroulaz avec la borne géodésique.

Date d'observation : 22 Juillet 2021

Stations RGP utilisée :



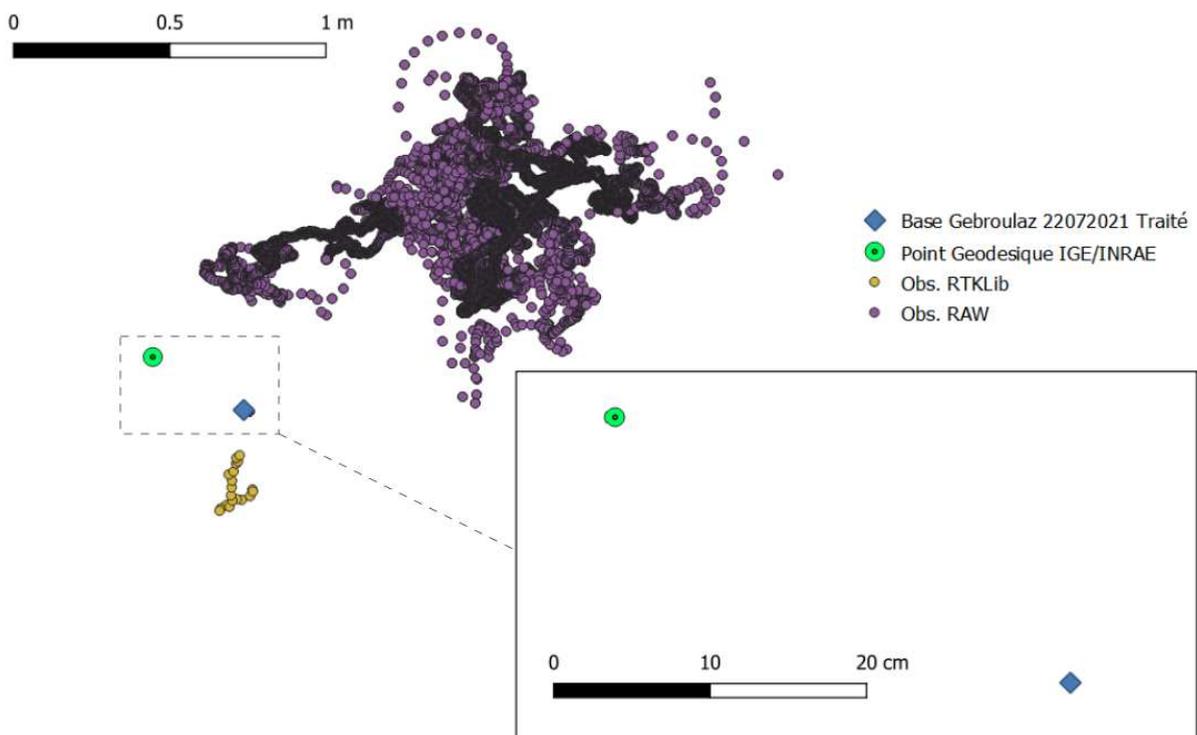
CHTL
Le Chatel

Station RGP MODA Hors service.

Fichier d'éphéméride : igr21674.sp3

Temps d'observation : 7H
Début et Fin (GPST) : 7h30 / 13H30

Ci-dessous la représentation des observations brutes et traité du 22 Juillet 2021 ainsi que la borne Géodésique partagés par l'IGE/INRAE projetés sur QGIS en WGS84.



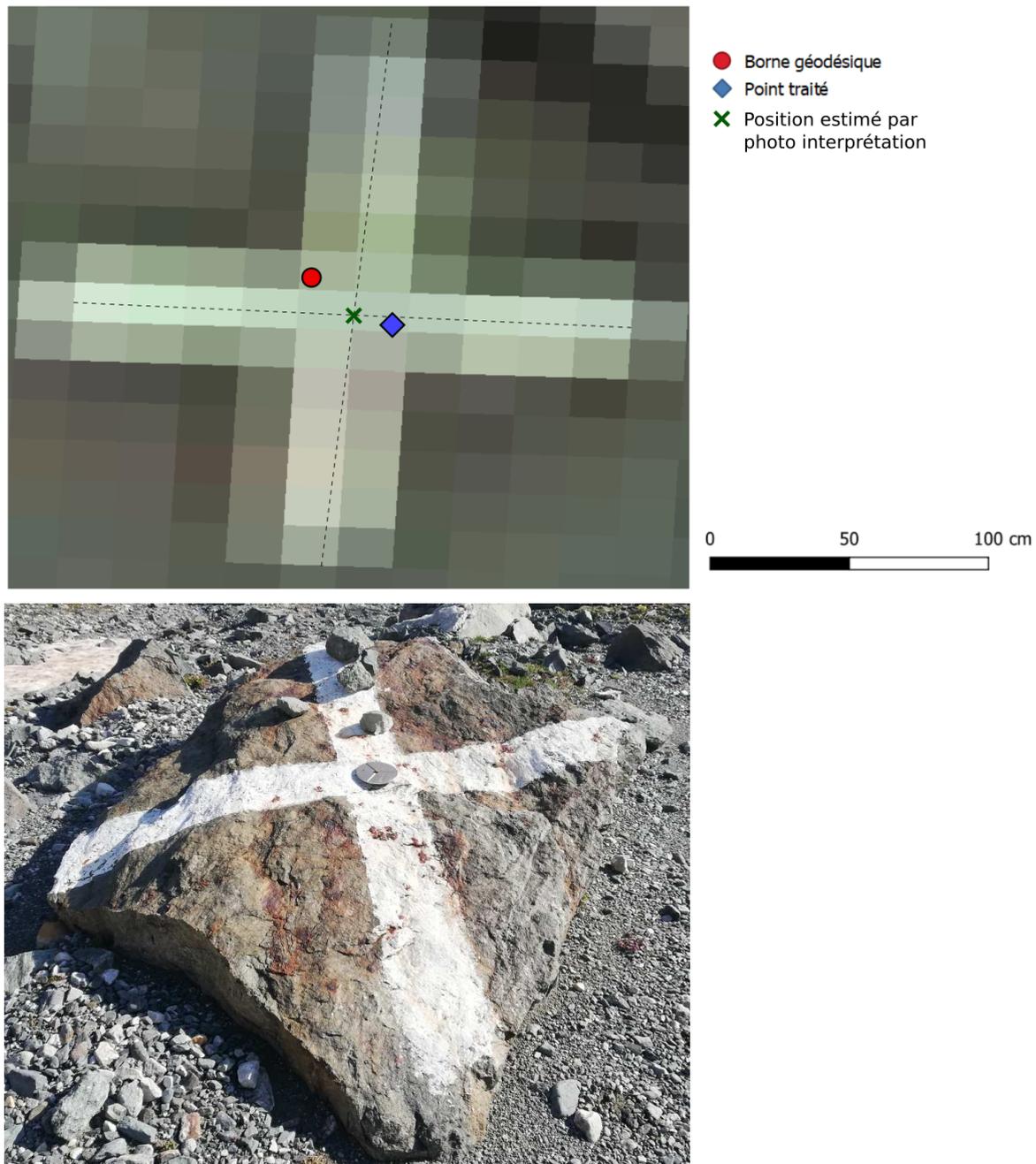
On observe en **Vert** la borne géodésique, en **Violet** les observations brutes extraites du GNSS, en **Orange** les observations brutes traitées par RTKLib et en **Bleu** la moyenne des points traités et filtrés.

On observe également un grand décalage entre les coordonnées entre la borne géodésique et le point calculé avec notre observation.

Décalage entre les coordonnées de la borne et l'observation du 22 Juillet :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
28.4 cm	25.1 cm	101.9 cm

La figure ci-dessous permet d'estimer le décalage à l'aide de l'ortho image de l'IGN (résolution spatiale 20 cm), la borne de Gébroulaz se prête bien pour cet exercice puisque une grande croix blanche est matérialisée directement sur le rocher.



Ci-dessus la borne géodésique observée à Gébroulaz.

Résultats Obtenus :

Résultats des observations du 22 Juillet.

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.3128687568 914	6.62196809088 907	2589.710	2643.8158
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	313598.044	5020458.067	2589.710	2643.8158

Coordonnées IGE/INRAE. "Gebroulaz Plaquettefront"

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.312870942	6.621964375	2588.691	2642.797
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	313597.760	5020458.318	2588.691	2642.797

Filtre appliqué :

```
"Q"=1 AND  
"sdn(m)" <= 0.0001 AND  
"sde(m)" <= 0.0001 AND  
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Glacier de Saint-Sorlin

Traitements et comparaison de la station de référence sur la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin avec la borne géodésique "".

Date d'observation : 29 Juillet 2021

Stations RGP utilisée :

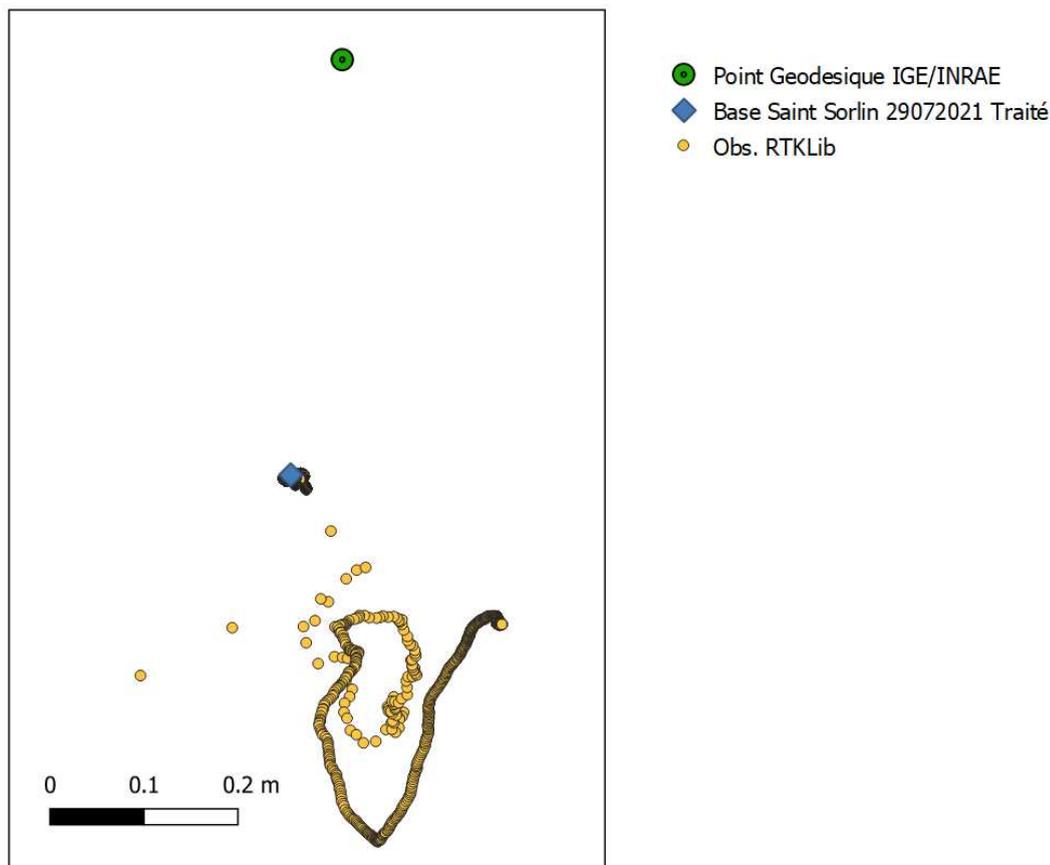


CHTL
Le Chatel

Fichier d'éphéméride : [igr21684.sp3](#)

Temps d'observation : 7H
Début et Fin (GPST) : 7h20 / 13H20

Ci-dessous la représentation des observations brutes et traité du 29 Juillet 2021 ainsi que la borne Géodésique partagés par l'IGE/INRAE projetés sur QGIS en WGS84.



On observe en **Vert** la borne géodésique, en **Orange** les observations brutes traitées par RTKLib et en **Bleu** la moyenne des points traités et filtrés.

On observe un grand décalage entre les coordonnées entre la borne géodésique et le point calculé avec notre observation.

Décalage entre les coordonnées de la borne et l'observation du 29 Juillet :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
5.8 cm	44.5 cm	146.5 cm

Résultats Obtenus :

Résultats des observations du 29 Juillet.

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.1708161129 987	6.16930238317 855	2666.272	2719.878
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	277562.050	5005824.738	2666.272	2719.878

Coordonnées IGE/INRAE. "Saint Sorlin, VisLeica_nelleBa"

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.170820131	6.169302918	2664.807	2718.413
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	277562.108	5005825.183	2664.807	2718.413

Filtre appliqué :

"Q"=1 AND
 "sdn(m)" <= 0.0001 AND
 "sde(m)" <= 0.0001 AND
 "sdu(m)" <= 0.0004

Glacier des Pèlerins

Traitements de la station de référence sur la marge proglaciaire du glacier de Pèlerins.

Date d'observation : 03 Août 2021

Stations RGP utilisée :



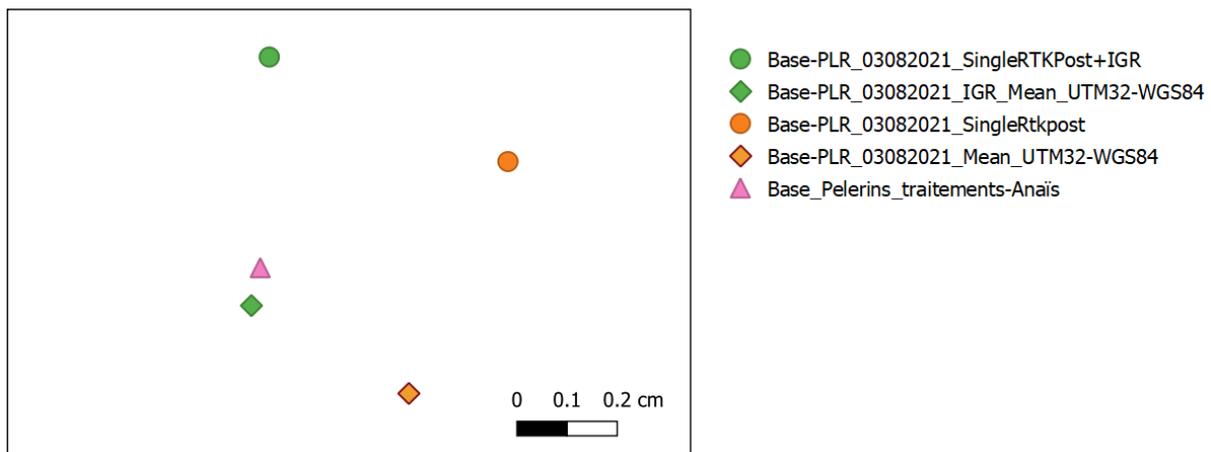
MARG
Marignier

Station RGP DEQU Hors service.

Fichier d'éphéméride : igr21696.sp3

Temps d'observation : 6H30
Début et Fin (GPST) : 8h30 / 15H

Ci-dessous les résultats des premiers traitements effectués sur l'observation du 03 Août 2021 projetés sur QGIS en WGS84.



On obtient en **Vert** les traitements avec les éphémérides appliqués et en **Orange** sans, les ronds sont les résultats issus directement du traitement Single de RtkPost et les losanges sont la moyenne calculés sur les données filtrés.

Le triangle **rose** est le résultat post-traité d'Anaïs.

Le léger décalage entre le traitement d'Anaïs et le mien peut s'expliquer par l'utilisation d'un filtre différent sur la donnée à traiter.

Décalage entre le traitement avec et sans l'application des éphémérides :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
0.3 cm	0.2 cm	0

Comparaison avec la seconde observation :

Observons maintenant le décalage avec les observations du 03 Août et celles du 05 Août et comparons uniquement les données avec les éphémérides IGR appliquées.

Date d'observation : 05 Août 2021

Stations RGP utilisée :





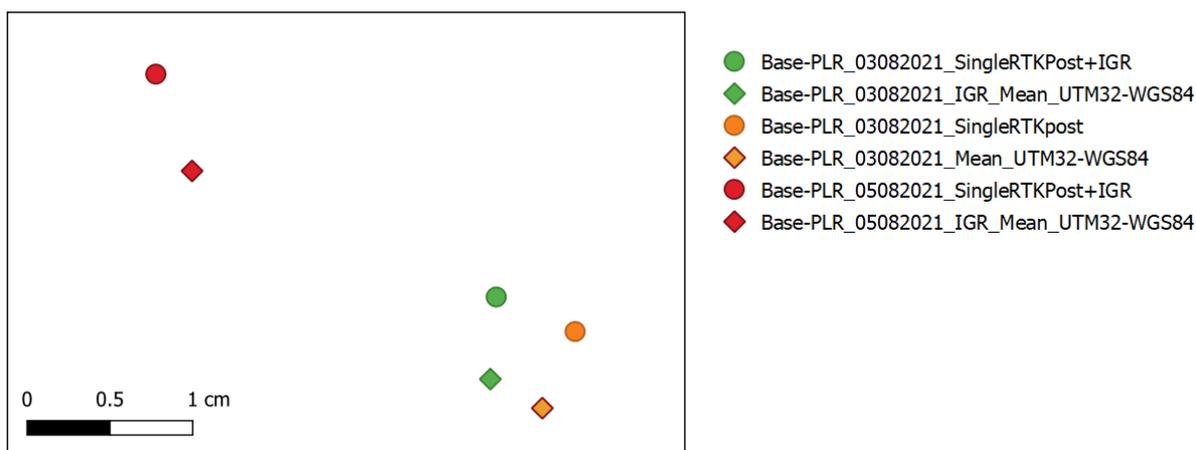
MARG
Marignier

Station RGP DEQU Hors service.

Fichier d'éphéméride : igr21696.sp3

Temps d'observation : 6H
Début et Fin (GPST) : 6h50 / 12H50

Ci-dessous les résultats des traitements effectués sur l'observation du 03 et du 05 Août 2021 projetés sur QGIS en WGS84.



On obtient en **Vert et Orange** les observations du 03 Août respectivement avec et sans les éphémérides IGR appliqués et en **Rouge** les observations du 05 Août avec les éphémérides IGR, les ronds sont les résultats issus directement du traitement Single de RtkPost et les losanges sont les moyenne calculées sur les données filtrées.

Décalage entre l'observation du 03 et du 05 avec les éphémérides appliqué au traitement :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
1.7 cm	1.4 cm	3.6 cm

En prenant en compte le temps d'observation et l'utilisation d'une station de base RGP plus loins que prévu (la station la plus proche n'étant pas fonctionnelle lors de nos acquisitions), le résultat est correct.

Résultats Obtenus :

Résultat des observation du 03 Août sans les éphémérides

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.8965897589 386	6.88086656616 625	2197.395	2250.748
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	335606.301	5084741.567	2197.395	2250.748

Résultat des observation du 03 Août avec les éphémérides

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.8965897758 768	6.88086652414 782	2197.395	2250.748
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	335606.298	5084741.569	2197.395	2250.748

Résultat des observation du 05 Août avec les éphémérides

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	45.8965898990 339	6.88086630691 957	2197.359	2250.712
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	335606.281	5084741.583	2197.395	2250.748

Filtre appliqué :

```
"Q"=1 AND  
"sdn(m)" <= 0.0001 AND  
"sde(m)" <= 0.0001 AND  
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Glacier du Tour

Traitements de la station de référence sur la marge proglaciaire du glacier du Tour.

Date d'observation : 07 Août 2021

Stations RGP utilisée :



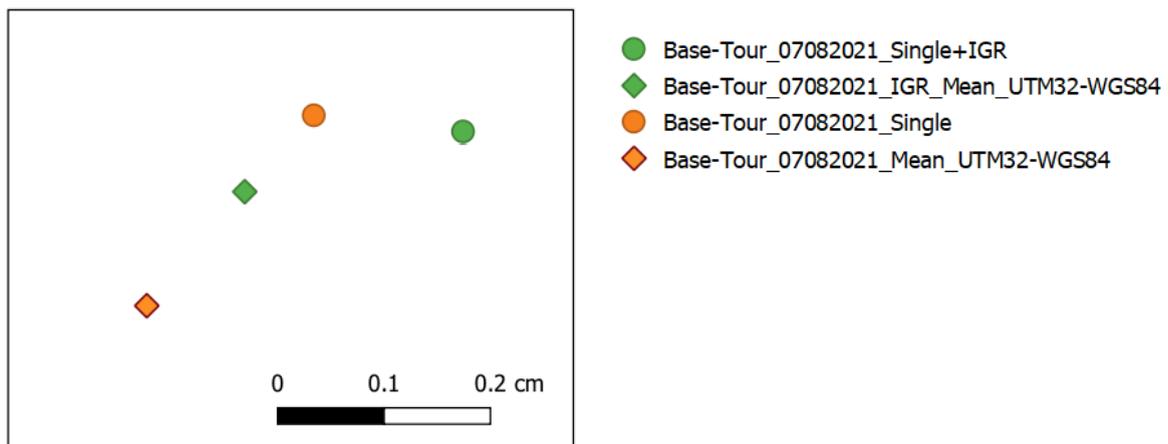
Station RGP DEQU Hors service.

Fichier d'éphéméride : igr21696.sp3

Temps d'observation : 6H

Début et Fin (GPST) : 8h20 / 12H20

Ci-dessous les résultats des premiers traitements effectués sur l'observation du 07 Août 2021 projetés sur QGIS en WGS84.



On obtient en **Vert** les traitements avec les éphémérides appliqués et en **Orange** sans, les ronds sont les résultats issus directement du traitement Single de RtkPost et les losanges sont la moyenne calculés sur les données filtrés.

Ici, nous obtenons un décalage d'environ 1 mm entre les points calculés par RTKPost et les coordonnées filtrées et moyennées. Ainsi qu'un décalage de 1 à 2 mm entre les traitements avec et sans les éphémérides IGR.

Décalage entre l'observation du 03 et du 05 avec les éphémérides appliqué au traitement :

Différence en Est	Différence en Nord	Différence en Altitude
0.1 cm	0.1 cm	3.6 cm

Résultats Obtenus :

Résultats des observation du 07 Août sans les éphémérides

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	46.0009314862 479	6.97214064278 247	2216.741	2269.939
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	342981.893	5096150.229	2216.741	2269.939

Résultats des observation du 07 Août avec les éphémérides

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	46.0009314956 731	6.97214065986 4	2216.741	2269.939
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	342981.894	5096150.230	2216.741	2269.939

Filtre appliqué :

```
"Q"=1 AND  
"sdn(m)" <= 0.0001 AND  
"sde(m)" <= 0.0001 AND  
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Glacier d'Orny

Date d'observation : **24 Août 2021**

Stations RGP utilisée :



MARG

Marignier

Station RGP DEQU Hors service.

Fichier d'éphéméride : **Non disponible**

Temps d'observation : **5H30**

Début et Fin (GPST) : **8h30 / 13h**

Résultats Obtenus :

Résultats des observations du 16 Juillet.

	Latitude	Longitude	Altitude	Hauteur
WGS84	46.0013395	7.07096545	2651.938	2705.151664
	Est	Nord	Altitude	Hauteur
UTM32N	350634.9431	5096005.415	2651.938	2705.151664

Filtre appliqué :

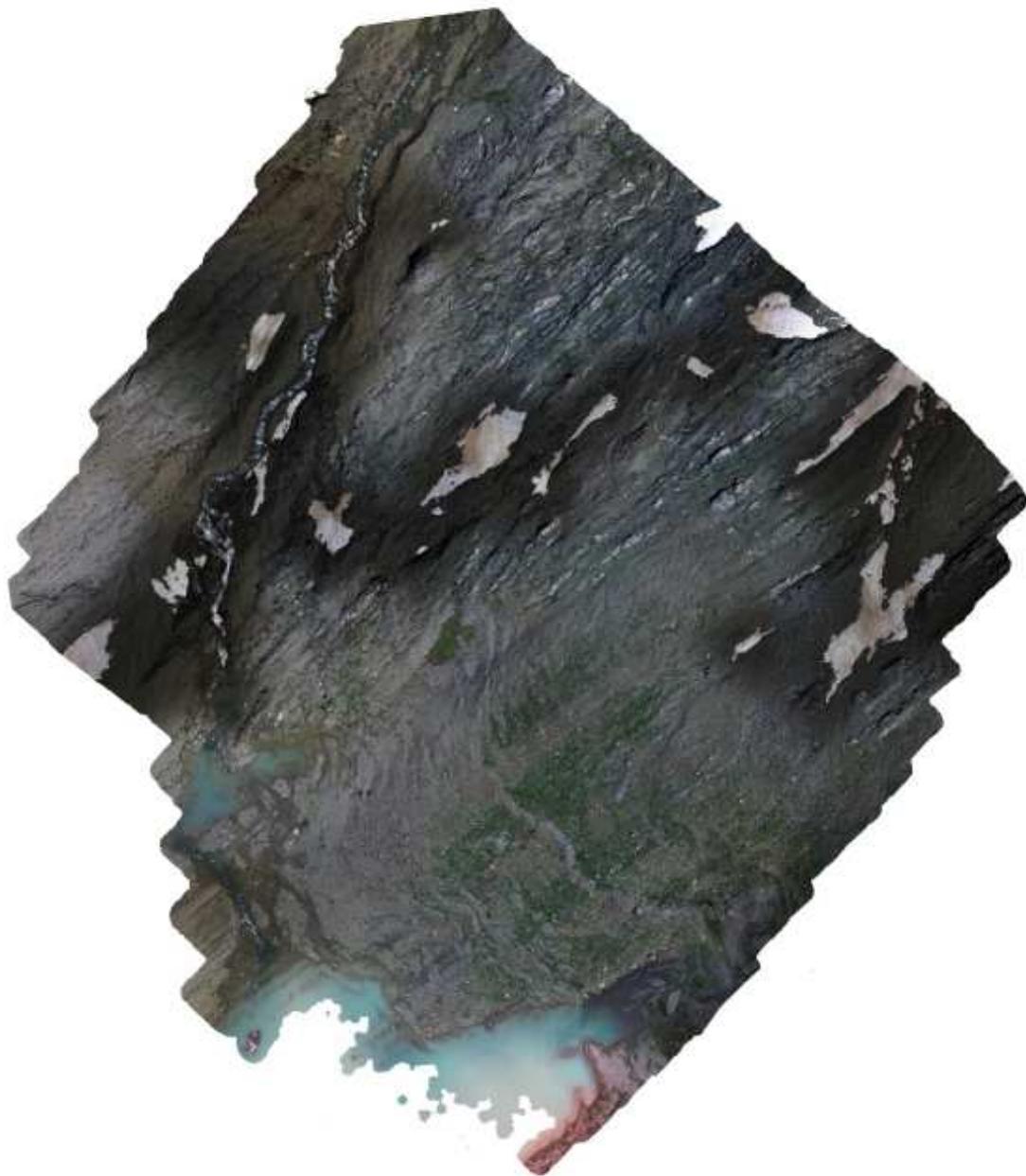
```
"Q"=1 AND  
"sdn(m)" <= 0.0001 AND  
"sde(m)" <= 0.0001 AND  
"sdu(m)" <= 0.0004
```

Annexe 5 - Rapport de traitement Metashape
sur la marge proglaciaire du glacier de Saint-Sorlin

Agisoft Metashape_Report

Chunk5_StSorlin

Processing Report
02 September 2021



Survey Data

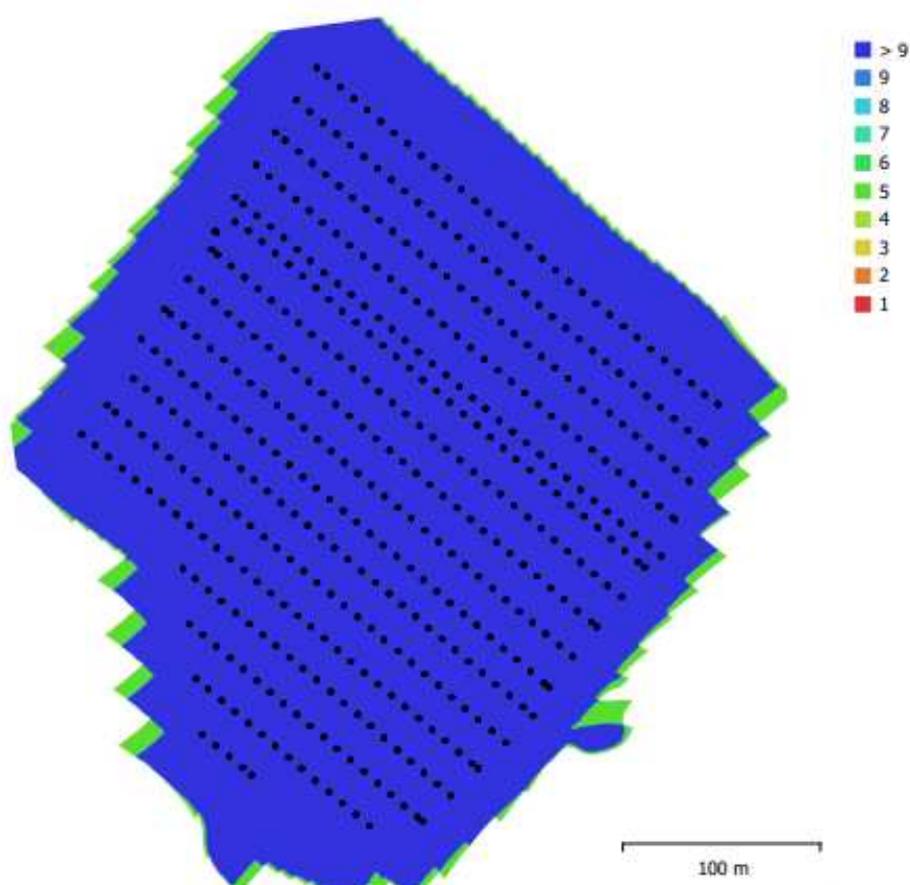


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	2,390	Camera stations:	2,390
Flying altitude:	71.3 m	Tie points:	1,582,679
Ground resolution:	3.58 cm/pix	Projections:	14,055,929
Coverage area:	0.109 km ²	Reprojection error:	0.656 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6360, Blue (5.74mm)	1600 x 1300	5.74 mm	3.01 x 3.01 μ m	Yes
FC6360, Green (5.74mm)	1600 x 1300	5.74 mm	3.01 x 3.01 μ m	Yes
FC6360, Red (5.74mm)	1600 x 1300	5.74 mm	3.01 x 3.01 μ m	Yes
FC6360, RedEdge (5.74mm)	1600 x 1300	5.74 mm	3.01 x 3.01 μ m	Yes
FC6360, NIR (5.74mm)	1600 x 1300	5.74 mm	3.01 x 3.01 μ m	Yes

Camera Locations

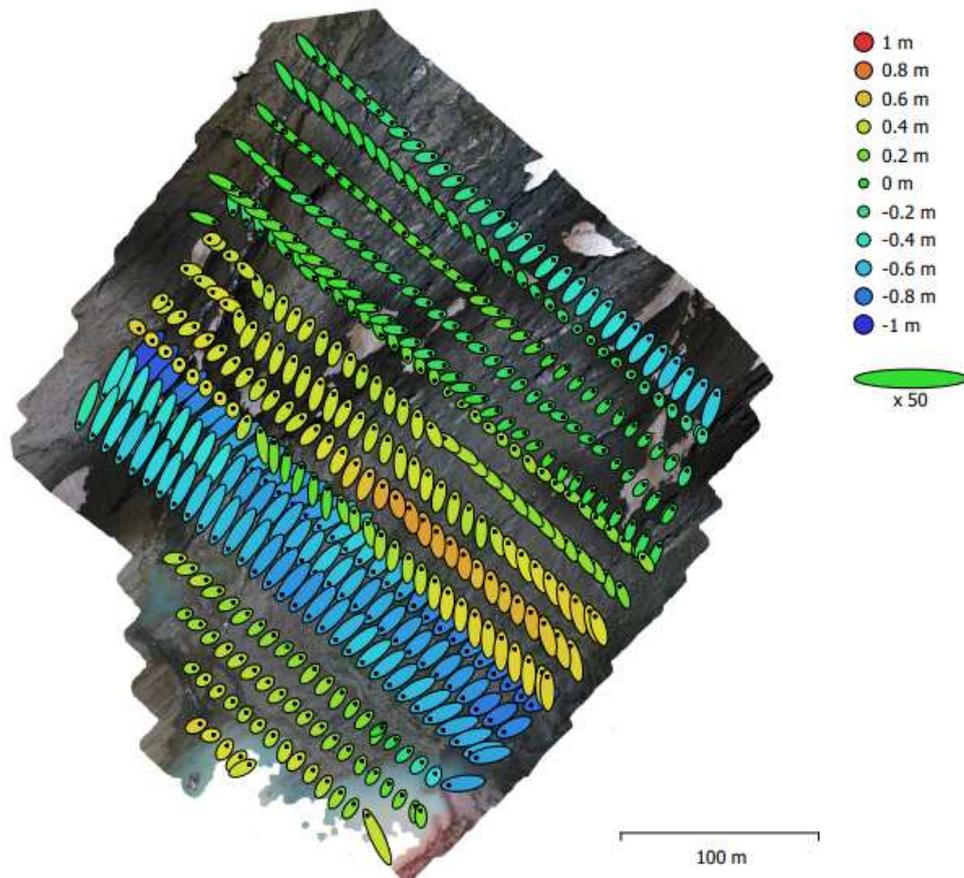


Fig. 7. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
12.9084	16.2332	41.0411	20.7399	45.9838

Table 7. Average camera location error.
X - Longitude, Y - Latitude, Z - Altitude.

Digital Elevation Model

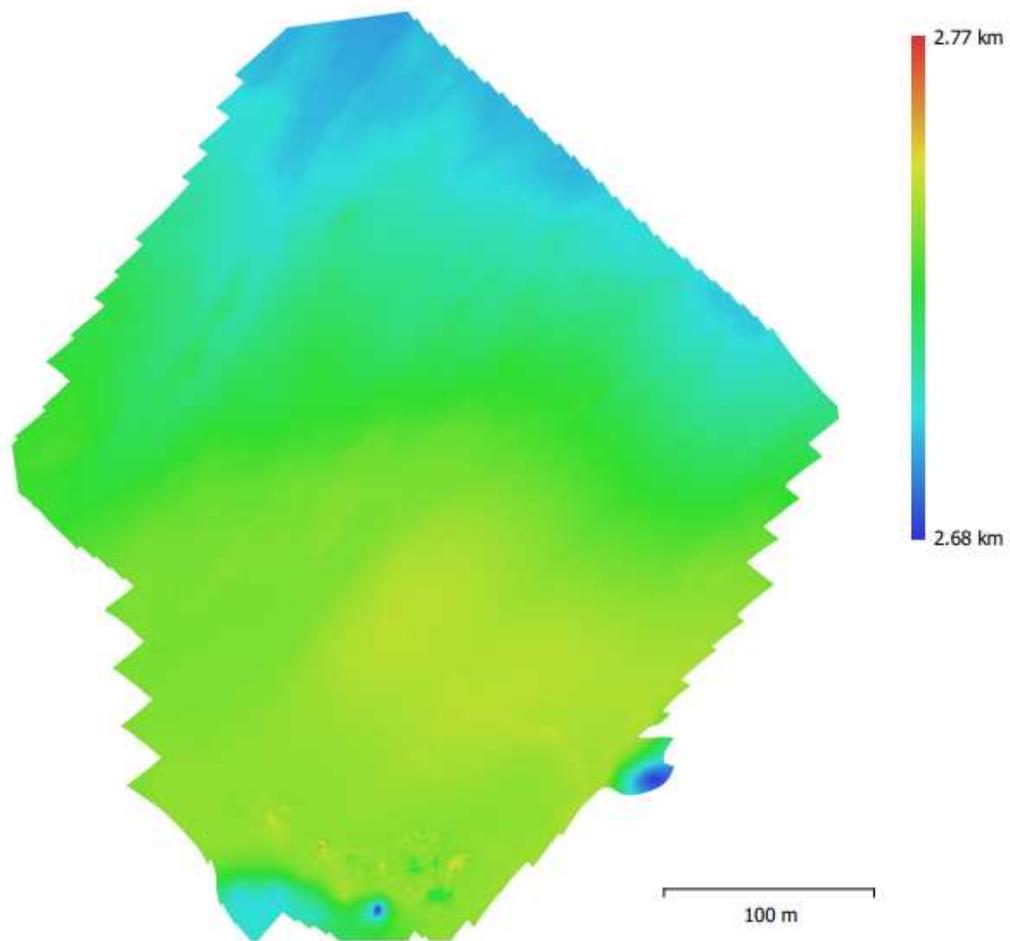


Fig. 8. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 7.15 cm/pix
Point density: 196 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras	2390
Aligned cameras	2390
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll

Point Cloud

Points	1,582,679 of 1,849,245
RMS reprojection error	0.177674 (0.656318 pix)
Max reprojection error	0.536921 (43.9287 pix)
Mean key point size	3.15689 pix
Point colors	1 bands, uint16
Key points	No
Average tie point multiplicity	11.6962

Alignment parameters

Accuracy	High
Generic preselection	Yes
Reference preselection	Source
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Exclude stationary tie points	No
Guided image matching	No
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	20 minutes 5 seconds
Matching memory usage	1.71 GB
Alignment time	1 hours 38 minutes
Alignment memory usage	1.69 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	370.10 MB

Depth Maps

Count	478
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mid
Processing time	12 minutes 10 seconds
Memory usage	908.04 MB
Software version	1.7.2.12070
File size	359.73 MB

Dense Point Cloud

Points	21,332,295
Point colors	5 bands, uint16
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mid
Processing time	12 minutes 10 seconds
Memory usage	908.04 MB
Dense cloud generation parameters	
Processing time	11 minutes 42 seconds
Memory usage	4.66 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	506.85 MB

Model	
Faces	4,266,452
Vertices	2,137,067
Vertex colors	5 bands, uint16
Texture	4,096 x 4,096, 6 bands, uint16
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	12 minutes 10 seconds
Memory usage	908.04 MB
Reconstruction parameters	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Strict volumetric masks	No
Processing time	15 minutes 41 seconds
Memory usage	10.89 GB
Texturing parameters	
Mapping mode	Generic
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	Yes
UV mapping time	4 minutes 6 seconds
UV mapping memory usage	3.25 GB
Blending time	18 minutes 43 seconds
Blending memory usage	1.80 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	328.34 MB
Tiled Model	
Texture	5 bands, uint16
Depth maps generation parameters	
Quality	High
Filtering mode	Mild
Processing time	12 minutes 10 seconds
Memory usage	908.04 MB
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Tile size	256
Face count	Low
Enable ghosting filter	No
Processing time	35 minutes 33 seconds
Memory usage	1.28 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	2.14 GB
DEM	
Size	6,265 x 6,952
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Reconstruction parameters	
Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Processing time	2 minutes 22 seconds
Memory usage	309.93 MB
Software version	1.7.2.12070
File size	67.36 MB
Orthomosaic	

Size	10,774 x 12,401
Coordinate system	WGS 84 (EPSG::4326)
Colors	5 bands, uint16
Reconstruction parameters	
Blending mode	Mosaic
Surface	Mesh
Enable hole filling	Yes
Enable ghosting filter	No
Processing time	16 minutes 43 seconds
Memory usage	1.93 GB
Software version	1.7.2.12070
File size	20.84 GB
System	
Software name	Agisoft Metashape Professional
Software version	1.7.2 build 12070
OS	Windows 64 bit
RAM	31.80 GB
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz
GPU(s)	GeForce GTX 1060 with Max-Q Design