



ÉCOLE NATIONALE
DES SCIENCES
GÉOGRAPHIQUES



Rapport de stage pluridisciplinaire

Analyse régionale de l'évolution des vitesses des glaciers rocheux dans les Alpes françaises

Herman Théo

Juin-Août 2021

ÉCOLE NATIONALE DES SCIENCES GÉOGRAPHIQUES
6-8 Avenue Blaise Pascal - Cité Descartes - 77420 Champs-sur-Marne
Téléphone 01 64 15 31 00 Télécopie 01 64 15 31 07
Non Confidentiel

Jury

Président de jury :

Delphine Genès

Commanditaire :

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc

Encadrement de stage :

Xavier Bodin

Enseignant référent :

Marc Poupée

Responsable pédagogique du cycle Ingénieur :

Jean-François Hangouët

Gestion du stage :

Delphine Genès

© ENSG

Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage, Xavier Bodin, pour son encadrement durant ces trois mois et pour m'avoir permis de découvrir les glaciers rocheux sur le terrain. Je remercie également Diego Cusicanqui qui a toujours pris le temps répondre à mes questions et organiser des réunions malgré les circonstances. Merci aussi à Romain Millan pour l'accès au serveur de calcul de l'Université de Grenoble même si je ne l'ai finalement pas utilisé et à Marco Marcer pour m'avoir fourni des données de déplacement sur le glacier du Ribbon.

Un grand merci à mon professeur référent Marc Poupée, qui a répondu aux différentes questions techniques que j'ai pu avoir, et qui m'a aussi aidé lorsque je me suis retrouvé dans une impasse. Je tiens également à remercier Delphine Gagnon-Genes avec qui j'ai pu parler de la suite de mon cursus à l'ENSG et de mes doutes.

Résumé

Les glaciers rocheux sont des structures rocheuses alpines constituées de roche et de glace en déplacement lent sous l'effet de la gravité. Depuis quelques décennies, une accélération de leur écoulement a pu être observée. Cette accélération s'accompagne d'un changement du comportement de certains de ces glaciers : ils se déstabilisent.

Le déplacement inhomogène des glaciers rocheux peut entraîner des déchirures dans la structure et des chutes de blocs, menaçant la population en aval. C'est pourquoi l'étude de ces formes de relief encore assez mal connues devient importante pour les autorités de gestion des risques.

L'objectif de mon stage est de proposer une chaîne d'automatisation de pré-traitements et de corrélation d'images aériennes des Alpes françaises ainsi que d'étudier les liens entre le déplacement des glaciers rocheux et les variables comme l'altitude, la pente, le rayonnement solaire... Pour ce faire j'ai travaillé sur les dalles aériennes IGN avec les modules de SAGA GIS.

Mots clés : photogrammétrie, télédétection, imagerie optique, glaciers rocheux, corrélation d'image

Abstract

Rock glaciers are alpine formations made of ice and rocks, moving slowly under the influence of gravity. Since a few decades, they started to accelerate. This acceleration is accompanied by a change in the behaviour of some of these glaciers: they are becoming destabilised.

The inhomogeneous movement of rock glaciers can lead to tears in the structure and to block falls, threatening the population downstream. This is why the study of these still relatively unknown landforms is becoming important for risk management authorities.

The objective of my internship is to propose an automated chain of pre-processing and correlation of aerial images of the French Alps and to study the links between the movement of rock glaciers and variables such as altitude, slope, solar radiation ... To do so, I worked on IGN aerial tiles with SAGA GIS.

Key words: photogrammetry, remote sensing, optical imagery, rock glaciers, image correlation

Table des matières

Glossaire et sigles utiles

1	Introduction	1
2	Contexte et objectifs	2
2.1	Contexte du stage	2
2.1.1	Le laboratoire EDYTEM	2
2.1.2	Place du stage	3
2.2	Objectifs principaux	3
3	Méthodes et outils	4
	Méthodes et outils	4
3.1	Matériel et données	4
3.2	Comparaison des solutions possibles	5
3.3	Structure de l'automatisation	6
3.4	Consolidation temporelle	6
4	Résultats et conclusions	8
	Résultats et conclusions	8
4.1	Analyse des résultats de Imcorr	8
4.2	Conclusions sur ces tests	13
5	Conclusion	14
	Bibliographie	15
6	Annexes	19
6.1	Exemple de fichier de sortie d'Imcorr	20
6.2	Code d'automatisation de chaîne de traitements en msdos	21

Glossaire et sigles utiles

EDYTEM Laboratoire étudiant les problématiques propres aux Environnements, Dynamiques et Territoire de Montagne

SIG Systèmes d'Informations Géographiques

API *Application Programming Interface*, interface de programmation

MNT Modèle Numérique de Terrain

Introduction

Les glaciers rocheux sont des formes de reliefs communes en haute montagne, constitués d'un mélange de glace et de débris rocheux. Ils se trouvent le plus souvent dans des zones montagneuses sèches comportant du permafrost.

Le mouvement d'un glacier rocheux est comparable sur le long terme à celui d'une coulée de lave. Sous l'effet de la gravité l'amas de glace et roche se déplace lentement de quelques centimètres à quelques mètres par an pour les plus rapides.

Le changement climatique qui est observé depuis plusieurs décennies a des effets certains sur le milieu alpin. S'il est connu du grand public que ce réchauffement global influe sur les glaciers en les faisant reculer chaque année, il l'est moins que ce réchauffement affecte aussi les glaciers rocheux.

La variation de vitesse de l'écoulement des glaciers rocheux a pu être liée à la variation de la température moyenne annuelle de la surface du sol (MAGST) [3] et [5].

Cette accélération des glaciers rocheux est pour certains accompagnée d'une déstabilisation de la structure, entraînant l'apparition de crevasses et pouvant provoquer des affaissements locaux du glacier rocheux. Des accidents liés à ces déstabilisations ont déjà été recensés dans les Alpes ces dernières années.

Il est donc devenu important aux yeux des autorités locales de comprendre les mécanismes que suivent les glaciers rocheux pour pouvoir mieux les surveiller.

Si des méthodes de corrélations d'images ou de flux optiques sont utilisées depuis des dizaines d'années par les chercheurs [7], elles le sont la plupart du temps à l'échelle de quelques glaciers.

Le laboratoire EDYTEM, qui est spécialisé dans l'étude des zones montagneuses au moyen d'une vision pluridisciplinaire, s'intéresse aux problématiques autour des glaciers rocheux et de leur déstabilisation.

C'est donc dans le cadre de mon stage que j'ai travaillé sur le développement de l'observation des glaciers rocheux des Alpes à une échelle régionale.

J'ai pu approfondir mes connaissances en SIG, en traitement d'image et en automatisation de processus ainsi que découvrir le domaine d'étude qu'est celui de la montagne.

Contexte et objectifs

2.1 Contexte du stage

2.1.1 Le laboratoire EDYTEM

Le laboratoire EDYTEM a été créé en 2003 par le CNRS et l'université Savoie Mont Blanc dans le but de pouvoir étudier les territoires de montagne grâce à l'union de chercheurs et chercheuses aux profils et aux sujets d'étude variés.

C'est à travers une approche pluridisciplinaire, en faisant appel aux géosciences et aux sciences sociales, que le laboratoire étudie les problématiques environnementales et humaines spécifiques à ce milieu.

Le laboratoire est scindé en quatre équipes qui permettent de regrouper les chercheurs travaillant autour de thématiques communes :

- Matières
- Morphodynamiques
- Sociétés
- Zone critique

En plus de ces quatre équipes de recherche, le laboratoire est constitué d'une plateforme technique d'appui à la recherche (PTAR) qui a pour but d'apporter un support technique et logistique à la recherche. Cette plateforme est-elle même séparée en cinq pôles :

- Images 5D
- Analyses et instrumentations de laboratoire
- Instrumentation, prélèvements, terrain
- Gestion de l'information scientifique
- Gestion administration secrétariat

2.1.2 Place du stage

Le travail réalisé lors de mon stage, s'insère dans les recherches réalisées par Diego Cusi-canqui lors de sa thèse co-dirigée par Xavier Bodin du laboratoire EDYTEM et Antoine Rabatel de l'institut des géosciences de l'environnement sur les "risques émergents liés à la cryosphère cachée dans les Alpes françaises".

La cryosphère alpine est en majorité non visible, et sa surveillance est donc complexe. Bien qu'il soit difficile actuellement de la localiser précisément, le changement climatique a un effet néfaste sur celle-ci. La thèse de Diego vise donc à mieux comprendre les risques qui pourraient exister en lien avec la disparition de la cryosphère dans les Alpes.

Les glaciers rocheux étant des composés de glace souterraine, ils sont des terrains intéressants à étudier pour comprendre les risques liés à la dégradation de la cryosphère. C'est donc dans ce contexte que la surveillance des glaciers rocheux dans l'ensemble des Alpes a été envisagée.

La création de ces cartes régionales n'ayant pas été la priorité de Diego lors de son travail, ce stage est né de l'intérêt que Xavier porte à la production de ces supports pour l'étude des glaciers rocheux et leurs comportements.

2.2 Objectifs principaux

L'objectif principal de ce stage est l'automatisation d'une chaîne de traitement permettant d'obtenir des cartes de vélocité des glaciers rocheux sur l'entièreté des Alpes Françaises. Pour ce faire, une première étape de documentation sur l'existant et de test sur les solutions envisagées a été nécessaire.

Après la mise en place du processus de traitements et son utilisation, si le temps le permet, un autre objectif est le croisement des résultats avec diverses données météorologiques et géomécaniques des Alpes pour observer ou non les liens qui existent entre le mouvement des glaciers rocheux et ces paramètres extérieurs.

Méthodes et outils

3.1 Matériel et données

Le laboratoire m'a fourni un disque dur externe, et donné accès à un serveur externe. Plusieurs ordinateurs fixes étaient aussi à ma disposition.

Le choix du logiciel et du langage de programmation était libre. Les possibilités que j'ai étudié lors de la première partie de mon stage étaient :

- Imcorr ou MicMac pour l'algorithme de corrélation à utiliser sur les images aériennes.
- Python ou msdos/bash pour l'automatisation de ma chaîne de traitements.

Les données à ma disposition pour la création des cartes sont des ortho-images des dalles IGN des Alpes françaises en Lambert-93 d'une résolution de 50cm ainsi que l'inventaire complet des glaciers rocheux au format shapefile.

L'agencement des données est le suivant :

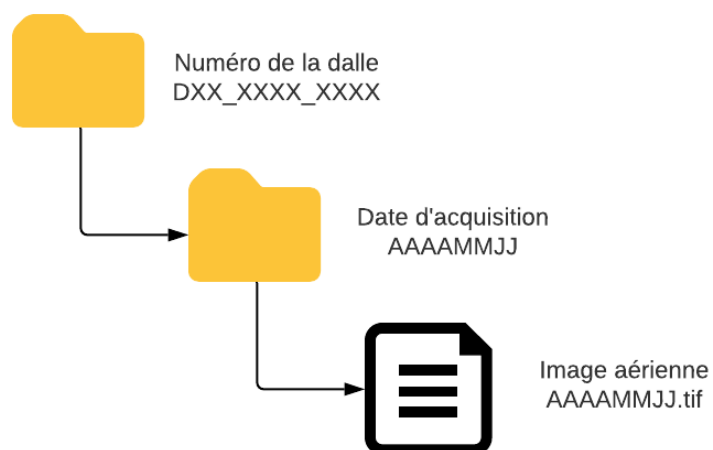


FIGURE 1 – Architecture des fichiers pour l'automatisation

La majorité des dalles possèdent cinq dates d'acquisition entre les années 2000 et 2020 sauf pour certaines qui en possèdent six. La répartition dans le temps des acquisitions est environ une image tous les cinq ans.

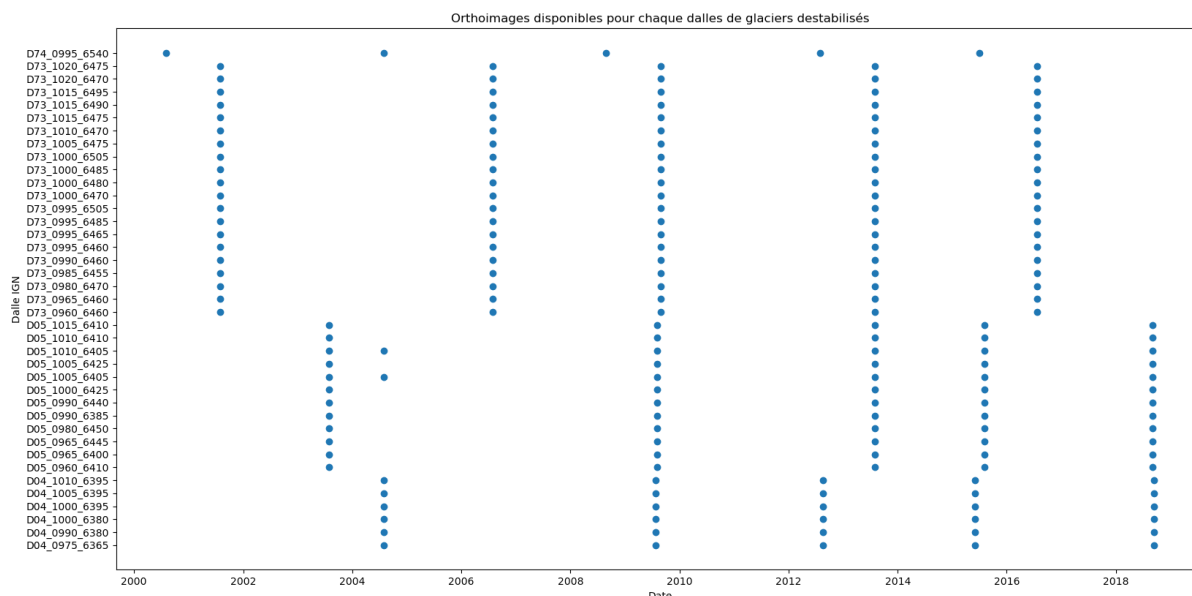


FIGURE 2 – Acquisitions aériennes par dalle dans les Alpes

3.2 Comparaison des solutions possibles

L'intérêt de l'utilisation d'images aériennes pour déterminer la vitesses des glaciers rocheux est de pouvoir éviter de grandes campagnes de terrain comme celle réalisée par Francou sur le glacier du Laurichard [1] qui nécessitent une maintenance et du matériel spécifique.

Lors de l'utilisation d'ortho-images pour ces déterminations de vitesses, les études se concentrent sur une zone d'étude se limitant bien souvent à un ou deux glaciers. Dans ce cas, la possibilité de travailler avec des images de meilleure résolution est plus simple que pour le travail à l'échelle des Alpes entières.

Dans leurs tests sur la corrélation d'images, Debella-Gillo et Käab [2] travaillent avec des images d'une résolution de 20cm. Il est donc important de déterminer si la corrélation d'images s'avère être une solution adéquate à des images de moindre qualité et d'emprise plus large.

Comme l'appuie [6], Micmac, le logiciel de traitements photogrammétriques open source de l'IGN semble être une solution fiable et pouvant être utilisée sur des images d'une résolution terrain allant jusqu'à 10 mètres. Le logiciel apporte des résultats globalement moins bruités que les autres logiciels sous license COSI-corr et Medicis.

Après des échanges avec Marc Pierrot-Deseilligny (directeur de recherche au LaSTIG et Luc Girod (chercheur à l'université d'Oslo), la fonction la plus appropriée pour répondre aux besoins du laboratoire est MM2DPosSism. Cette fonction permet une corrélation 2D entre deux images. En pratique, l'emploi de cet algorithme soulève deux problèmes :

- MM2DSismPos agit en découpant les images en zones de zoom et en faisant la corrélation à différentes résolutions de manière pyramidale. Même si cela entraîne en théorie des résultats plus précis, la durée de calcul lors des tests était de plusieurs heures par corrélation, ce qui est difficilement compatible avec la production de masse qui nécessite des centaines de corrélations.
- Le deuxième problème qu'il ne m'a pas été possible de résoudre, vient de la géocalisation des images de sortie. En donnant en entrée deux fichiers .tif projetés en Lambert-93, les fichiers résultats ne sont pas géoréférencés.

L'utilisation de MicMac MM2DPosSism comme algorithme a donc été écarté, non pas pour son efficacité mais pour sa praticité.

La deuxième solution open-source qui était envisagée pour le calcul des corrélations est l'algorithme stand alone de Magnus Bremer : Imcorr. Celui-ci, à l'heure actuelle, est inclus dans le SIG SAGA-GIS. À l'inverse de MicMac, Imcorr n'utilise pas de corrélation par itération. Cela le rend plus rapide avec des calculs de moins d'une heure avec le paramétrage le plus demandant et de quelques minutes avec les plus petites fenêtres de recherche. Les résultats sont bien géoréférencés avec les informations des fichiers d'entrée.

SAGA-GIS est un SIG ne possédant plus d'API Python depuis le passage à Python3 mais une version en ligne de commande. Le choix de coder en msdos/bash a donc été fait, car SAGA, au-delà d'être la passerelle d'utilisation de Imcorr, permet aussi d'effectuer un certain nombre de traitements d'image pré et post corrélation.

3.3 Structure de l'automatisation

Pour obtenir plus de redondance dans les résultats de chaque dalle, la corrélation doit s'opérer entre toutes les paires de dates dans les deux sens. La structure des images possédant chacune leur dossier permet donc à la fois un parcours simple de chaque paire au moyen de boucles et la création de dossiers résultats propre à chaque date et on chaque dalle.

En amont des corrélations, les images subissent une découpe par rapport à un buffer de 200 mètres de l'inventaire des glaciers rocheux des Alpes. Cela permet de réduire le temps de calcul en excluant les zones inutiles de l'image. L'intérêt d'utiliser un buffer est de pouvoir vérifier la qualité des résultats sur une zone supposée fixe comparé au glacier rocheux et de pouvoir en tirer un biais constant venant du corrélateur.

Des tests ont aussi été effectués en supprimant de l'image les pentes trop fortes à l'aide d'MNT 5 mètres de l'IGN. Un filtrage a aussi été fait pour enlever les valeurs trop élevées et trop basses de l'image pour ne pas appliquer la corrélation sur les zones d'ombre et de neige qui ne peuvent pas corrélérer et apportent donc une erreur.

3.4 Consolidation temporelle

À la suite de l'automatisation, on obtient un grand nombre de corrélations pour chaque dalle, avec des redondances entre les différentes dates comme le montre la figure 3. Ce surplus de données va être utile pour pouvoir consolider nos résultats en atténuant le bruit.

Pour ce faire, je me suis appuyé sur les travaux de Guilhem Marsy [4] lors de sa thèse "Apport de l'imagerie optique « time-lapse » stéréoscopique pour la quantification à haute résolution spatio-temporelle (4D) des dynamiques de versants en montagne". Une partie de son travail porte sur la mise au point d'une technique de consolidation temporelle basée sur le calcul de Relative Displacement Time Series (RDTs). Ce RDTs représente l'ensemble des déplacements moyens entre les autres dates et une date référence. On peut ensuite obtenir un décalage entre deux RDTs en faisant la moyenne de la différence de chaque corrélation entre les dates références et toutes les autres dates.

Ce décalage peut ensuite être utilisé pour aligner le deuxième RDTs par rapport au premier en soustrayant le décalage à chaque déplacement moyen constituant le deuxième RDTs. En choisissant une date par rapport à laquelle aligner le reste des RDTs on peut ainsi consolider notre référence.

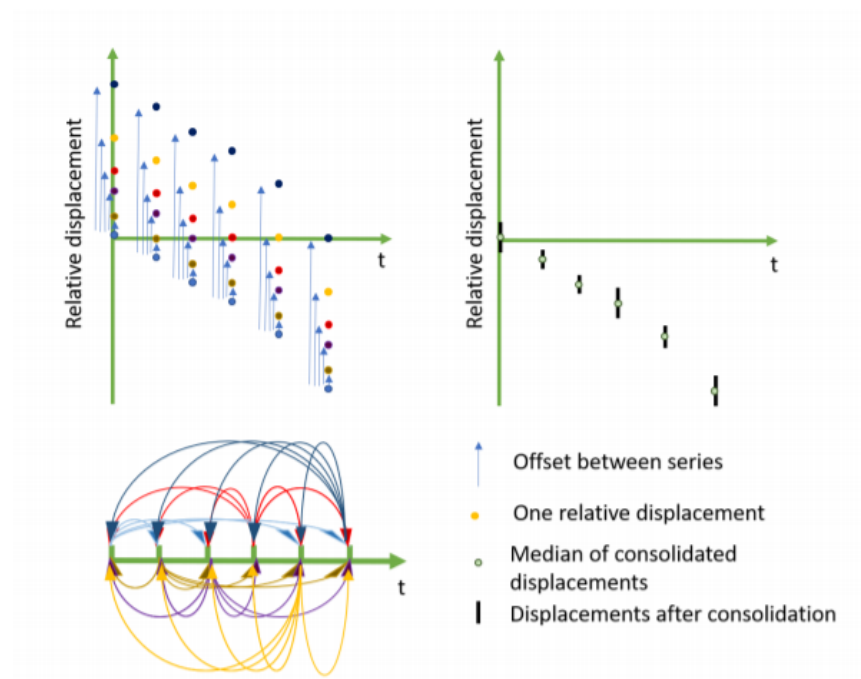


FIGURE 3 – Explication du principe de la consolidation temporelle par Guilhem Marsy provenant de son article [4]

Résultats et conclusions

4.1 Analyse des résultats de Imcorr

Les tests de l'algorithme Imcorr ont été effectués sur la dalle D7310156475 contenant le glacier rocheux du Ribbon, dont l'écoulement est très facilement visible et compréhensible comme le montre la figure 4. L'écoulement semblable à une coulée de lave est dirigée vers l'ouest et se distingue des zones fixes. D'après des pointages manuels réalisés par Marco Marcer sur le glacier du Ribbon, entre 2000 et 2006 le glacier se déplaçait à environ 1m par an.

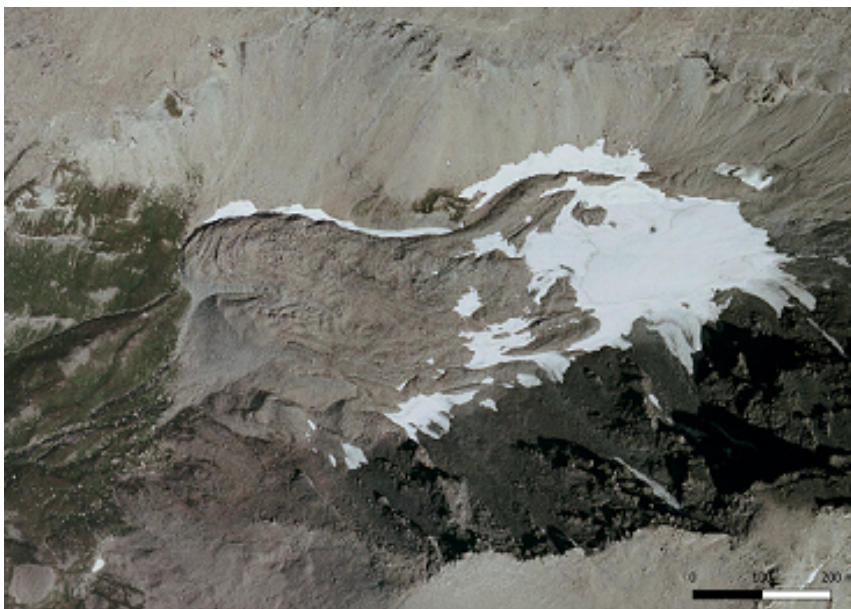


FIGURE 4 – Glacier du Ribbon

Les cartes de chaleur suivantes ont pu être créées à partir des résultats de Imcorr sur cette dalle entre 2001 et 2006 avec différents paramètres de fenêtre de recherche.

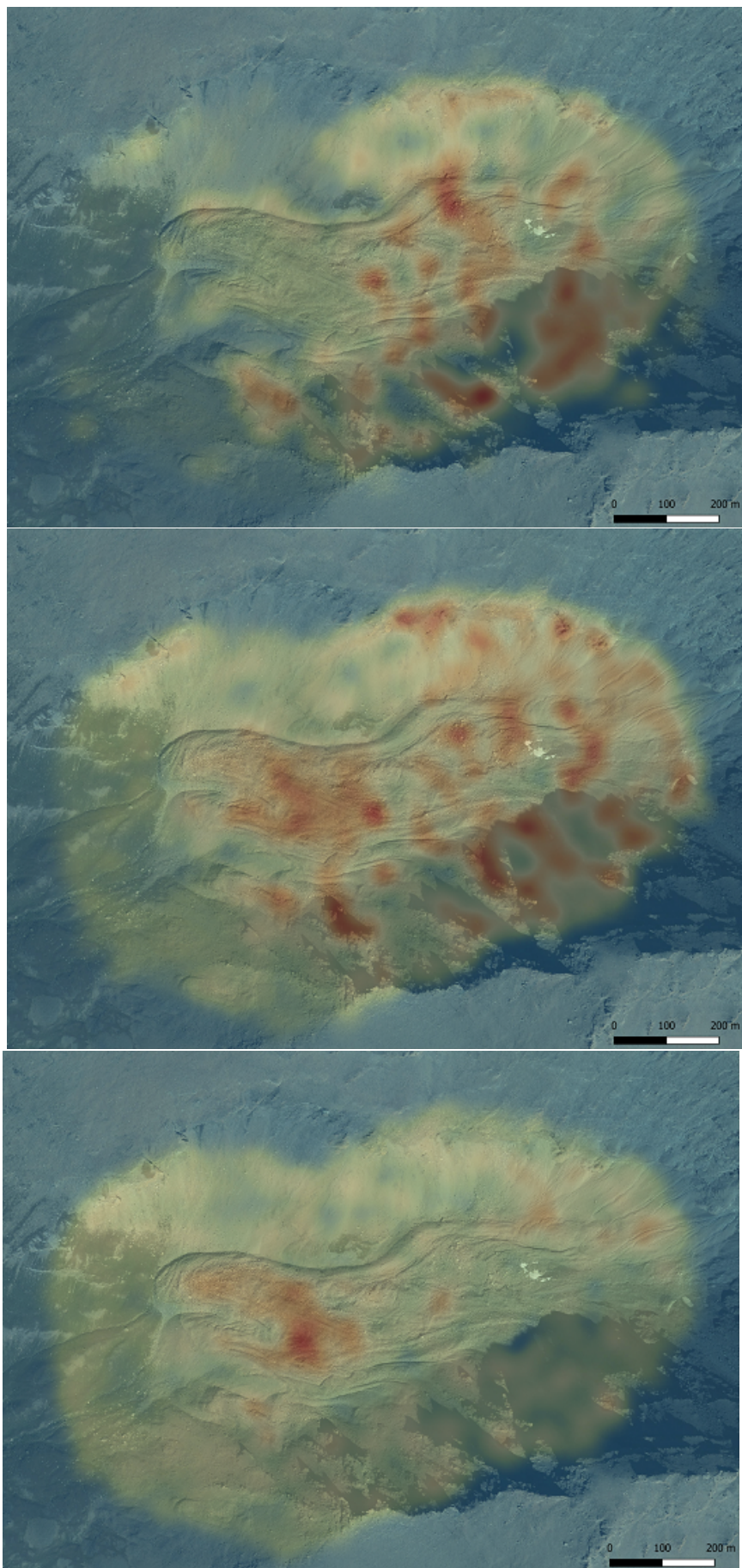


FIGURE 5 – Cartes de chaleur du déplacement du glacier du Ribbon entre 2001 et 2006

Imcorr utilise deux fenêtres pour détecter les zones se correspondant d'une image à l'autre. La fenêtre de recherche, la plus grande, définit la taille de la fenêtre dans laquelle on recherche une similitude par rapport à la référence de la première image. La fenêtre de référence définit la taille de la référence à chercher dans la deuxième image. Les trois cartes de chaleur de la figure 4 sont respectivement calculées avec 128pixels et 64pixels, 64pixels et 32pixels, 32pixels et 16pixels.

La zone la plus à droite du glacier est la zone où les pentes sont les plus fortes et qui possède le plus de zones d'ombre. De plus, se situant à une altitude plus importante, elle est plus souvent recouverte de neige. Cela peut expliquer les valeurs très élevées de déplacement trouvées dans cette zone par les deux premiers paramétrages car l'algorithme n'arrive pas à corréliser ces surfaces homogènes.

Utiliser des fenêtres de plus petites tailles semble permettre d'atténuer le bruit créé par ces zones où la corrélation n'est pas possible.

Paramètres de corrélation	Déplacement moyen sur le glacier (m)	Déplacement moyen sur la zone fixe (m)	Force moyenne sur le glacier	Force moyenne sur la zone fixe
recherche 128 référence 64	5.79	3.88	6.50	7.17
recherche 64 référence 32	3.08	2.19	5.94	6.48
recherche 32 référence 16	1.98	1.45	5.00	5.18

TABLE 1 – Comparaison statistique des différents paramétrages pour la corrélation sur le glacier du Ribbon entre 2001 et 2006

Une analyse statistique a été effectuée sur les résultats obtenus pour le glacier rocheux du Ribbon. Les résultats de la table 1 proviennent des lancements de Imcorr avec les trois paramétrages indiqués. Les moyennes ont été calculées avec le shapefile de l'inventaire des glaciers rocheux pour la zone en mouvement et un buffer de 200 mètres pour la zone fixe. La force est une valeur sans unité indiquant la fiabilité du résultat en un point. Comme référence pour le déplacement je m'appuie sur un pointage manuel qui a été effectué par Marco Marcer (chercheur postdoctorant à la Technical University of Denmark). Celui-ci trouve une vitesse moyenne de 6 mètres entre deux images de 2000 et 2006.

Bien que le paramétrage le plus petit permette de réduire le bruit sur la corrélation, de manière globale, on voit qu'il ne réussit pas non plus à détecter les vrais mouvements. À l'inverse, plus on augmente les fenêtres de recherche plus les déplacements trouvés se rapprochent d'une vérité terrain, mais cela se fait au détriment d'un bruit beaucoup plus important comme le montre le déplacement moyen des zones fixes. On observe une tendance entre l'augmentation de la taille de recherche et la force moyenne des valeurs en sortie de l'algorithme.

Une piste pour réussir à atténuer les erreurs liées aux zones qui décorrèlent est de filtrer les parties de l'image trop homogènes comme les ombres et la neige. Un autre facteur, que m'ont indiqué Diego et Xavier, est la pente. Des pentes trop fortes entraînent des difficultés pour la corrélation. Des tests identiques aux précédents ont été effectués en traitant dans un premier temps les images pour en retirer les zones de non-intérêt évoquées. Comme visible sur la table

2, les valeurs de déplacement après ce filtrage sont beaucoup plus faible que précédemment et la différence entre zone fixe et glacier devient imperceptible. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'une trop grande partie du glacier se retrouve supprimée de la corrélation. Cette méthode, dans l'état actuel n'est pas une solution satisfaisante pour obtenir des cartes de déplacement qui réduisent au maximum le bruit.

Paramètres de corrélation	Déplacement moyen sur le glacier (m)	Déplacement moyen sur la zone fixe (m)	Force moyenne sur le glacier	Force moyenne sur la zone fixe
recherche 128 référence 64	2.44	2.32	8.34	8.40
recherche 64 référence 32	1.90	1.81	7.15	7.20
recherche 32 référence 16	1.57	1.51	5.44	5.47

TABLE 2 – Comparaison statistique des différents paramétrages pour la corrélation sur le glacier du Ribbon entre 2001 et 2006 après élimination des ombres, pentes et de la neige

Un dernier indicateur très important du bon fonctionnement de nos corrélations est la direction des déplacements détectés par l'algorithme. Imcorr renvoie des résultats sous forme vectorielle et chaque élément possède une valeur d'aspect allant de 0 à 360 degrés.

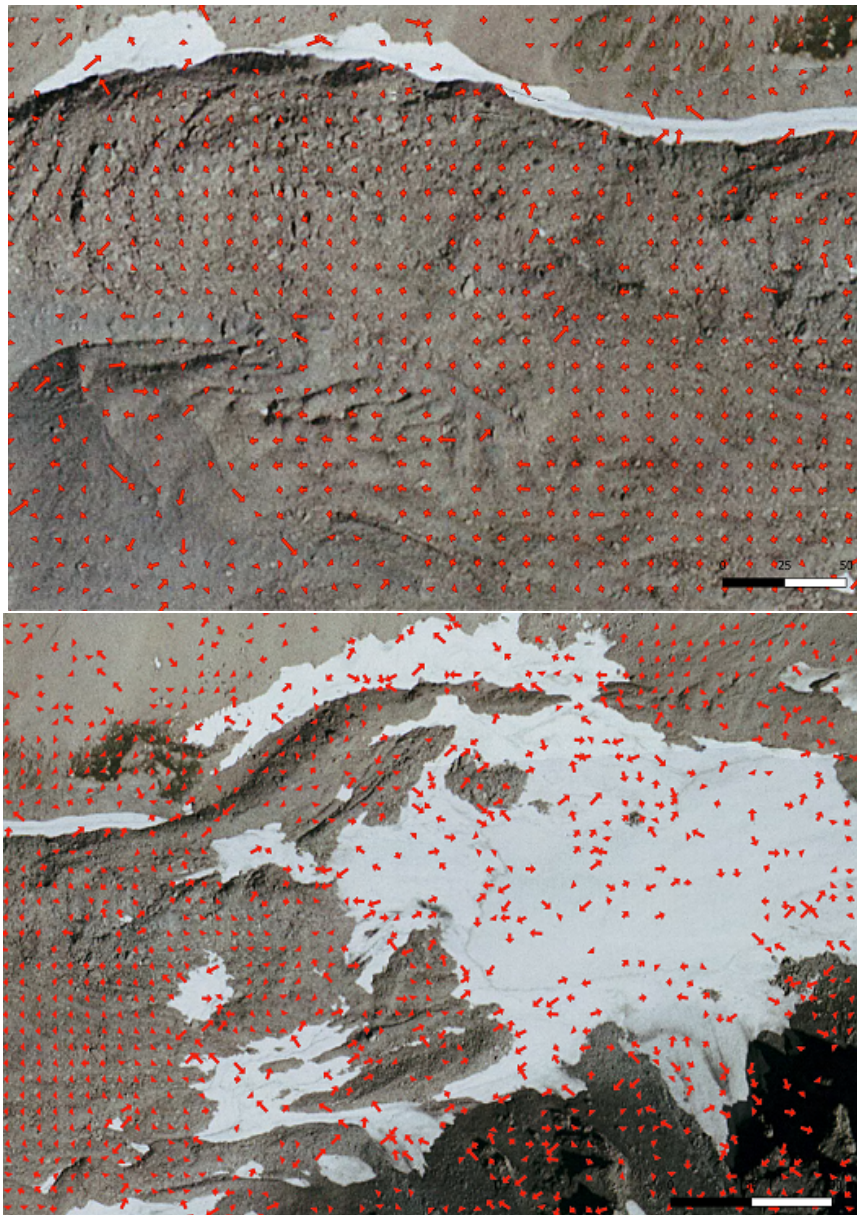


FIGURE 6 – Zoom sur le front et la partie haute du glacier rocheux du Ribbon, affichage des directions des résultats de la corrélation sans filtre avec paramétrage 64 32

Sur la figure 6, il apparaît que sur cette zone qui ne comporte pas d'éléments pouvant empêcher la corrélation, la direction du déplacement est homogène sur toute la zone. Il apparaît que de ce point de vue, l'algorithme ne rencontre pas de difficultés. Encore une fois, c'est en regardant la partie haute du glacier rocheux que l'on observe les limites de la corrélation, avec des directions de déplacement qui ne suivent plus de logique.

4.2 Conclusions sur ces tests

La conclusion de ces tests, est qu'Imcorr réussit dans l'ensemble à détecter les mouvements des glaciers rocheux et pourrait être utilisé pour la création de cartes régionales.

Cependant, dans le cas d'une utilisation non pas visuelle mais statistique des ces glaciers, l'apport très important de bruit par des zones indésirables au sein même du glacier reste problématique. Les filtres créés en utilisant les valeurs radiométriques de l'image ainsi qu'un MNT pour la pente ne sont pas assez fins pour éviter d'éliminer de la donnée utile. Cela vient d'un besoin d'abaisser la résolution des pixels que l'on souhaite éliminer car leur vectorisation est bien trop lourde à leur taille d'origine et entraîne des plantages de SAGA.

Conclusion

Pour conclure, les objectifs de ce stage n'ont été que partiellement remplis. J'ai pu créer une chaîne de traitements permettant la création de cartes de corrélation de manière automatique, mais les filtres utilisés en amont d'Imcorr dégradent encore trop la donnée en entrée et nécessitent d'être affinés pour permettre des résultats plus précis.

L'appropriation de la méthode de Guilhem Marsy fût beaucoup plus dure que prévue. Elle a été pensée lors de son doctorat pour être appliquée sur des zones de taille relativement faible (quelques mètres). Ainsi les moyennes des déplacements en amplitude et en direction restent assez cohérentes. Dans le cas d'une consolidation temporelle à l'échelle d'un glacier entier, le bruit prend une place très importante dans ces moyennes et rend les calculs beaucoup plus difficiles à concevoir de ce fait. Il faudrait appliquer cet algorithme en découpant le glacier en zones régulières.

Enfin, par manque de temps et de résultats satisfaisants, je n'ai pas pu réaliser l'analyse des liens entre le déplacement des glaciers rocheux et des paramètres climatiques et géomécaniques.

D'un point de vue personnel, ce stage a été une vraie remise en question de mon intérêt pour les sujets abordés du côté technique et de la façon dont j'envisage mon futur professionnellement.

Bibliographie

- [1] Xavier BODIN et al. "Two decades of responses (1986–2006) to climate by the Laurichard rock glacier, French Alps". en. In : *Permafrost and Periglacial Processes* 20.4 (oct. 2009), p. 331-344. ISSN : 1099-1530. DOI : 10.1002/ppp.665. URL : <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp.665/abstract> (visité le 16/10/2015).
- [2] Misganu DEBELLA-GILO et Andreas KÄÄB. "Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation". en. In : *Remote Sensing of Environment* 115.1 (jan. 2011), p. 130-142. ISSN : 00344257. DOI : 10.1016/j.rse.2010.08.012. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571000252X> (visité le 23/02/2017).
- [3] R. DELALOYE et al. "Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps". eng. In : *Delaloye, R; Perruchoud, E; Avian, M; Kaufmann, V; Bodin, X; Hausmann, H; Ikeda, A; Kääb, A; Kellerer-Pirklbauer, A; Krainer, K; Lambiel, C; Mihajlovic, D; Staub, B; Roer, I; Thibert, E (2008). Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps. In : 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, 29 June 2008 - 3 July 2008, 343-348. Fairbanks, Alaska : University of Zurich, juil. 2008, p. 343-348. ISBN : 9780980017922. DOI : 10.5167/uzh-7031. URL : [http://www.blue-europa.org/nicop_proceedings/2%20Vol%201%20\(251-504\).pdf](http://www.blue-europa.org/nicop_proceedings/2%20Vol%201%20(251-504).pdf) (visité le 25/08/2021).*
- [4] G. MARSY et al. "Temporal Consolidation Strategy for Ground Based Image Displacement Time Series". In : *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Waikoloa, HI, USA : IEEE, sept. 2020, p. 132-135. ISBN : 9781728163741. DOI : 10.1109/IGARSS39084.2020.9324394. URL : <https://ieeexplore.ieee.org/document/9324394/> (visité le 28/08/2021).
- [5] Isabelle ROER, Andreas KÄÄB et Richard DIKAU. "Rockglacier acceleration in the Turtmann valley (Swiss Alps) : Probable controls". en. In : *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 59.2 (juin 2005), p. 157-163. ISSN : 0029-1951, 1502-5292. DOI : 10.1080/00291950510020655. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00291950510020655> (visité le 25/08/2021).
- [6] Ana-Maria ROSU et al. "Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac". en. In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 100 (fév. 2015), p. 48-59. ISSN : 09242716. DOI : 10.1016/j.isprsjprs.2014.03.002. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271614000653> (visité le 08/06/2021).

- [7] Theodore A. SCAMBOS et al. "Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data". en. In : *Remote Sensing of Environment* 42.3 (déc. 1992), p. 177-186. ISSN : 00344257. DOI : 10.1016/0034-4257(92)90101-0. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425792901010> (visité le 15/06/2021).

Liste des tableaux













1	Comparaison statistique des différents paramétrages pour la corrélation sur le glacier du Ribbon entre 2001 et 2006	10
2	Comparaison statistique des différents paramétrages pour la corrélation sur le glacier du Ribbon entre 2001 et 2006 après élimination des ombres, pentes et de la neige	11

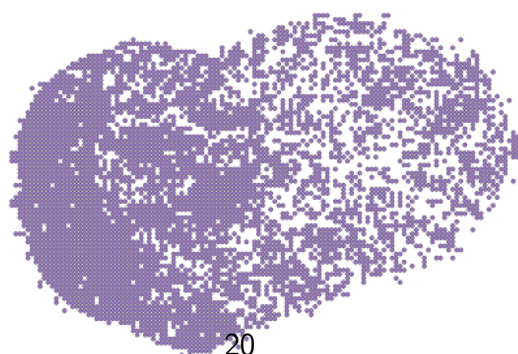
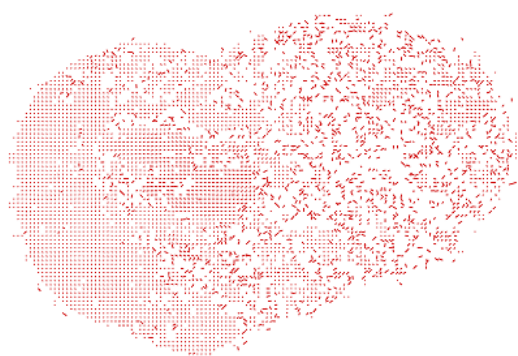
Table des figures

1	Architecture des fichiers pour l'automatisation	4
2	Acquisitions aériennes par dalle dans les Alpes	5
3	Explication du principe de la consolidation temporelle par Guilhem Marsy provenant de son article [4]	7
4	Glacier du Ribbon	8
5	Cartes de chaleur du déplacement du glacier du Ribbon entre 2001 et 2006 . .	9
6	Zoom sur le front et la partie haute du glacier rocheux du Ribbon, affichage des directions des résultats de la corrélation sans filtre avec paramétrage 64 32	12

Annexes

6.1 Exemple de fichier de sortie d'Imcorr

	20010801_20060801_lines.cpg	19/08/2021 12:07	Fichier CPG	1 Ko
	20010801_20060801_lines.dbf	19/08/2021 12:07	Classeur OpenOffi...	9 254 Ko
	20010801_20060801_lines.mshp	19/08/2021 12:07	Fichier MSHP	46 Ko
	20010801_20060801_lines.prj	19/08/2021 12:07	Fichier PRJ	1 Ko
	20010801_20060801_lines.shp	19/08/2021 12:07	Source de Forme ...	2 561 Ko
	20010801_20060801_lines.shx	19/08/2021 12:07	Forme compilée d'...	233 Ko
	20010801_20060801_points.cpg	19/08/2021 12:07	Fichier CPG	1 Ko
	20010801_20060801_points.dbf	19/08/2021 12:07	Classeur OpenOffi...	9 254 Ko
	20010801_20060801_points.mshp	19/08/2021 12:07	Fichier MSHP	46 Ko
	20010801_20060801_points.prj	19/08/2021 12:07	Fichier PRJ	1 Ko
	20010801_20060801_points.shp	19/08/2021 12:07	Source de Forme ...	815 Ko
	20010801_20060801_points.shx	19/08/2021 12:07	Forme compilée d'...	233 Ko



6.2 Code d'automatisation de chaîne de traitements en msdos

```
1 @echo off
2 for /d %%i in ("D*") DO (
3     for %%k in ("%i\*.asc") DO (
4         saga_cmd ta_morphometry 0 -ELEVATION %%k -SLOPE %%i\slope.sgrd -
UNIT_SLOPE 1
5         saga_cmd grid_tools 0 -INPUT %%i\slope.sgrd -OUTPUT %%i\slope.sgrd -
TARGET_USER_SIZE 10
6         saga_cmd shapes_grid 6 -GRID %%i\slope.sgrd -POLYGONS %%i\slope.shp
7         echo shapes_tools 3 -SHAPES %%i\slope.shp -FIELD 1 -EXPRESSION="a >
45" > %%i\selec_pente.txt
8         echo shapes_tools 6 -INPUT %%i\slope.shp -OUTPUT %%i\slope_sup_seuil
.shp >> %%i\selec_pente.txt
9         saga_cmd %%i\selec_pente.txt
10        saga_cmd shapes_polygons 5 -POLYGONS %%i\slope_sup_seuil.shp -
DISSOLVED %%i\slope_sup_seuil.shp
11        saga_cmd shapes_polygons 15 -A Inventory_buffer_200m.shp -B %%i\
slope_sup_seuil.shp -RESULT buffer_glacier_diff.shp
12        del /s %%i\*slope*
13        for /d %%j in ("%i\*") DO (
14            for %%l in ("%j\*.tif") DO (
15                saga_cmd io_gdal 0 -FILES %%l -GRIDS "%j\rouge.sgrd;%j\
vert.sgrd;%j\bleu.sgrd" -MULTIPLE 0
16                saga_cmd grid_visualisation 3 -R_GRID %%j\rouge.sgrd -G_GRID
%%j\vert.sgrd -B_GRID %%j\bleu.sgrd -A_GRID NULL -RGB %%j\rgb.sgrd -
METHOD 4 -STDDEV 2.000000
17                REM filtrage de la neige via les valeurs RVB
18                saga_cmd grid_calculus 1 -FORMULA="ifelse(g1>230, ifelse(g2
>230, ifelse(g3>230,g1, (-99999)),(-99999)),(-99999))" -GRIDS "%j\
rouge.sgrd;%j\vert.sgrd;%j\bleu.sgrd" -RESULT %%j\snow.sgrd
19                saga_cmd grid_tools 0 -INPUT %%j\snow.sgrd -OUTPUT %%j\snow.
sgrd -TARGET_USER_SIZE 15
20                saga_cmd shapes_grid 6 -GRID %%j\snow.sgrd -POLYGONS %%j\
snow.shp
21                saga_cmd shapes_polygons 5 -POLYGONS %%j\snow.shp -DISSOLVED
%%j\snow.shp
22                REM filtrage des ombres via les valeurs RVB
23                saga_cmd grid_calculus 1 -FORMULA="ifelse(g1<10, ifelse(g2
<10, ifelse(g3<10,g1, (-99999)),(-99999)),(-99999))" -GRIDS "%j\
rouge.sgrd;%j\vert.sgrd;%j\bleu.sgrd" -RESULT %%j\shadow.sgrd
24                saga_cmd grid_tools 0 -INPUT %%j\shadow.sgrd -OUTPUT %%j\
shadow.sgrd -TARGET_USER_SIZE 15
25                saga_cmd shapes_grid 6 -GRID %%j\shadow.sgrd -POLYGONS %%j\
shadow.shp
26                saga_cmd shapes_polygons 5 -POLYGONS %%j\shadow.shp -
DISSOLVED %%j\shadow.shp
27                REM diff rence entre le buffer des glaciers et la neige
28                saga_cmd shapes_polygons 15 -A buffer_glacier_diff.shp -B %%
j\snow.shp -RESULT buffer_glacier_diff.shp
29                REM diff rence entre le buffer des glaciers et les ombres
30                saga_cmd shapes_polygons 15 -A buffer_glacier_diff.shp -B %%
j\shadow.shp -RESULT buffer_glacier_diff.shp
31                saga_cmd grid_tools 31 -GRIDS %%j\rgb.sgrd -CLIPPED %%j\rgb.
sgrd -EXTENT 3 -POLYGONS buffer_glacier_diff.shp
```

```

32         del /s %%j\*rouge*
33         del /s %%j\*vert*
34         del /s %%j\*bleu*
35         del /s %%j\*snow*
36         del /s %%j\*shadow*
37     )
38 )
39 )
40 )
41 for /d /r %%i in ("D*") DO (
42     for /d %%j in ("%i\*") DO (
43         mkdir %%j\Imcorr
44         for /d %%k in ("%i\*") DO (
45             IF %%j == %%k (
46                 echo Same folder
47             ) ELSE (
48                 saga_cmd grid_analysis 19 -GRID_1 %%j\rgb.sgrd -GRID_2
%%k\rgb.sgrd -DTM_1 NULL -DTM_2 NULL -CORRPOINTS %%j\Imcorr\%%~nj_%%~
nk_points.shp -CORRLINES %%j\Imcorr\%%~nj_%%~nk_lines.shp -
SEARCH_CHIPSIZE 3 -REF_CHIPSIZE 2 -GRID_SPACING 10
49             )
50         )
51     )
52 )
53
54 for /d /r %%i in ("*") DO (
55     del /s %%i\*rgb*
56 )

```