

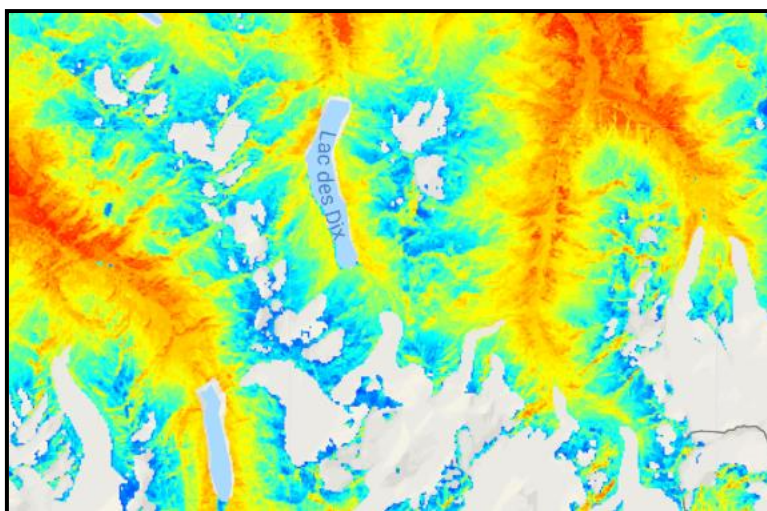
Relation entre la neige et le pergélisol à l'aide d'images satellitaires

---

Thierry Demierre

Sous la direction du Prof. Grégoire Mariéthoz  
Et du Dr. Christophe Lambiel

Expert : Nicola Deluigi



« Ce travail n'a pas été rédigé en vue d'une publication, d'une édition ou diffusion. Son format et tout ou partie de son contenu répondent donc à cet état de fait. Les contenus n'engagent pas l'Université de Lausanne. Ce travail n'en est pas moins soumis aux règles sur le droit d'auteur. A ce titre, les citations tirées du présent mémoire ne sont autorisées que dans la mesure où la source et le nom de l'auteur·e sont clairement cités. La loi fédérale sur le droit d'auteur est en outre applicable. ».

Plusieurs personnes ont participé à la réalisation de ce projet de mémoire. Je souhaite remercier chaque personne ayant de près ou de loin, collaboré avec moi. Plus personnellement j'aimerais remercier :

- Le Prof. Grégoire Mariéthoz et le Dr. Christophe Lambiel pour leurs conseils et leur aide au cours de la réalisation du mémoire.
- Le docteur Mathieu Gravey pour son aide lors de la conception du modèle informatique ainsi que pour sa disponibilité et les nombreuses questions auxquelles il a pu répondre.
- Les doctorants Luiz Gustavo Rasera et Fien De Doncker pour leur aide lorsque des problèmes informatiques m'empêchaient d'avancer.
- Nicoletta Trabucchi pour son soutien, son aide et ses remarques.
- Ma famille pour leur soutien
- Finalement, chaque étudiant de ma volée du Master de Géographie. Ces derniers m'ont soutenu et conseillé à de multiples reprises.

En Suisse, l'apparition du pergélisol en milieu de haute montagne se fait uniquement avec des conditions très spécifiques. Les variations annuelles de températures accentuées par le réchauffement climatique ont pour effet de modifier les conditions de présence du pergélisol. L'utilisation d'images satellites pour déterminer la présence du pergélisol dans les Alpes est compliquée à cause de l'hétérogénéité spatiale de la répartition du pergélisol ainsi que de la faible résolution spatiale des images satellites. Cependant, les images satellites ont la capacité de détecter certains phénomènes liés au pergélisol sur une longue période comme la neige. C'est pour cette raison que le but de cette recherche est d'étudier la relation entre la neige et le pergélisol avec des images issues du satellite Landsat sur une partie des Alpes valaisannes. Afin d'obtenir le plus d'information sur la neige, la durée d'enneigement et la répartition des névés permanents sont extraites de modèles distincts. Premièrement, une analyse qualitative est produite afin d'évaluer la pertinence des résultats des modèles. En second lieu, une analyse quantitative permet d'évaluer la relation entre les névés permanents et la répartition du pergélisol ainsi que la relation entre la durée d'enneigement et la répartition du pergélisol. Au travers des images déterminant la répartition des névés permanents, de nombreuses erreurs liées à la résolution spatiale du modèle sont détectées. En effet, certaines zones glaciaires ou lacustres sont identifiées comme névés permanents. Toutefois, une relation entre les névés permanents et les conditions météorologiques est décelée à partir d'images annuelles de répartition des névés permanents. Au vu de l'imprécision du modèle, il est difficile d'établir une relation entre les névés permanents et le pergélisol à partir de ce modèle. Contrairement aux névés permanents, la relation entre la durée d'enneigement et le pergélisol peut être démontrée. En effet, plus la durée d'enneigement est longue, plus la probabilité de présence du pergélisol est élevée. Cependant, les résultats démontrent que la relation n'est pas réciproque. Une probabilité de présence du pergélisol élevée n'implique pas une longue durée d'enneigement. Finalement, l'utilisation d'images satellites en milieu alpin montre certaines limites principalement liées à la résolution spatiale de ces images.

## Mots clés

Pergélisol ; neige ; névés permanents ; durée d'enneigement, images satellites ; télédétection ; réchauffement climatique

In Switzerland, permafrost appearance in high mountain environment only occurs under very specific conditions. Annual temperature variations accentuated by global warming, modify the conditions of permafrost presence. The use of satellite imagery to determine the presence of permafrost in the Alps is complicated owing to the spatial heterogeneity of the permafrost distribution as well as the low spatial resolution of satellite images. However, satellite images can detect some phenomena related to permafrost for a long period such as snow. For this reason, the aim of this research is to study the relationship between snow and permafrost with images from Landsat satellite over a part of the Alps in Valais. In order to obtain the most information on snow, the duration of snow cover and the distribution of permanent snow are taken from distinct models. First, a qualitative analysis is produced in order to assess the relevance of the model results. Second, a quantitative analysis makes it possible to assess the relationship between the permanent snow and the permafrost distribution as well as the snow cover duration with the permafrost distribution. Through the images determining the distribution of permanent snow, many errors related the spatial resolution of the model are detected. Indeed, some glacial or lake areas are identified as permanent snow. However, a relationship between permanent snow and weather data is detected from annual images of the permanent snow distribution. According to the model imprecision, it is difficult to establish a relationship between permanent snow and permafrost based on the model. Unlike permanent snow, the relationship between snow cover duration and permafrost can be demonstrated. In fact, the longer the snow cover persists, the probability of permafrost presence increases. However, the results show that the relationship is not reciprocal. A high probability of permafrost presence does not imply a long duration of snow cover. Finally, the use of satellite imagery in an Alpine environment shows some limitations, mainly linked to the spatial resolution of satellite images.

## Keywords

Permafrost; snow; permanent snow; duration of snow cover; satellite images; remote sensing; climate warming

## Table des matières

1.	Introduction.....	11
1.1	Situation.....	11
1.2	Questions de recherche .....	13
1.3	Cadre théorique.....	14
1.3.1	Le pergélisol .....	14
1.3.2	Facteurs influençant la répartition du pergélisol.....	16
1.3.3	Neige.....	18
1.3.4	La télédétection et les images satellitaires .....	20
1.3.5	Les modèles de répartition du pergélisol .....	22
2.	Région d'étude.....	25
3.	Méthodologie et méthodes.....	27
3.1	Généralités .....	27
3.2	Indices de présences de pergélisol .....	28
3.2.1	Normalized difference snow index (NDSI) .....	28
3.2.2	Identification des névés permanents .....	28
3.2.3	Identification de la durée d'enneigement.....	31
4.	Résultats.....	36
4.1	Névés permanents.....	36
4.1.1	Analyse quantitative.....	36
4.1.2	Analyse qualitative .....	40
4.2	Durée d'enneigement.....	51
4.2.1	Résultats bruts.....	51
4.2.2	Analyse générale de durée d'enneigement avec les données climatiques .....	52
4.2.3	Comparaison des durées d'enneigement avec la carte de répartition du pergélisol.....	56
4.2.4	Analyse de la surface enneigée .....	57
4.2.5	Analyse quantitative : graphiques en nuage de points .....	59
4.2.6	Graphiques spécifiques .....	60
5.	Discussion.....	67

5.1	Névés permanents .....	67
5.2	Durée d'enneigement .....	67
5.3	Relation entre la neige et les conditions climatiques annuelles .....	68
5.4	Améliorations et perspectives .....	69
6.	Conclusion .....	71
7.	Bibliographie .....	72
8.	Annexes .....	79
8.1	Code principal pour la durée d'enneigement .....	79
8.2	Code d'identification des névés permanents sur Matlab .....	92
8.3	Analyse des névés permanents sur Google Earth Engine .....	93
8.3.1	Données quantitatives pour les névés permanents annuels .....	93
8.3.2	Graphique en nuage de points pour les névés permanents annuels .....	95
8.3.3	Données quantitatives des névés permanents sur plusieurs années .....	97
8.3.4	Graphiques en nuage de points pour les névés permanents sur plusieurs années .....	100

Figure 1: Carte indicative du pergélisol dans les Alpes (Swisstopo, 2020).....	12
Figure 2: Stratigraphie du pergélisol (Deluigi, 2018).....	15
Figure 3: Processus de la télédétection (d'après Campbell et Wynne,2011) .....	21
Figure 4: Zone d'étude avec les trois zones spécifiques .....	26
Figure 5: Méthodologie pour la détermination des névés permanents et la durée d'enneigement.....	27
Figure 6: Dates des premières neiges à la station d'Arosa (MétéoSuisse, 2019).....	33
Figure 7: Durée d'enneigement d'un pixel pour chaque année étudiée .....	34
Figure 8: Répartition des névés permanents quinquennaux.....	36
Figure 9: Écart de température en été de 1864 à 2018 (d'après MétéoSuisse, 2019).....	37
Figure 10: Relation entre névés permanents et pergélisol : A : en utilisant chaque année, B : en regroupant les névés permanents quinquennaux avec un taux de confiance supérieur à 80%, C : en regroupant les névés permanents quinquennaux avec un taux de confiance supérieur à 90% .....	39
Figure 11: « Névés permanents » dans la zone à l'ouest du lac de Mauvoisin proche du sommet du Grand Tavé ; A : glaciers rocheux .....	42
Figure 12: « Névés permanents » dans la zone aux alentours du glacier de l'En Darrey ; 1 : glacier de l'En Darrey ; 2 : glacier du Pleureur ; A : névés permanents identifiés à proximité de marges proglaciaires ; B : névés permanents identifiés à proximité d'un petit glacier non identifié par le modèle ; C : regroupement de névés permanents sur une marge proglaciaire ; D : névés permanents plus ou moins éloignés des glaciers .....	43
Figure 13: « Névés permanents » dans la zone adjacente au glacier d'Otemma ; 1 : glacier de l'Aouille ; A : regroupement de névés permanents correspondant à un glacier ; B : névés permanents aux limites du glacier .....	44
Figure 14: « Névés permanents » dans le lac de Mauvoisin ; A : névés permanents identifiés sur le lac de Mauvoisin .....	45
Figure 15: « Névés permanents » proche du glacier du Mont Fort et du Grand Désert ; A : névés permanents identifiés sur un lac à l'est du glacier du Mont Fort ; B : névés permanents identifiés sur un lac au sud-est du glacier du Petit Mont Fort.....	46
Figure 16: Carte topographique aux alentours du glacier du Mont Fort (Swisstopo, 2020) ; A : lac du Grand Désert ; B : lac au sud-est du glacier du Petit Mont Fort .....	47
Figure 17: « Névés permanents » dans la paroi en aval du glacier des Bouquetins ; 1 : glacier des Bouquetins ; A : névés permanents identifiés sur la paroi rocheuse ; B : névés permanents identifiés à proximité du glacier.....	48
Figure 18: Carte du pergélisol et névés permanents où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50% proche du glacier de l'En Darrey et du Pleureur ; 1 : glacier de l'En Darrey ; 2 : glacier du Pleureur ; A : névés permanents identifiés dans une zone glaciaire ; B : peu de névés permanents identifiés dans les zones où la probabilité de présence du pergélisol est élevée .....	49



Figure 19: Carte du pergélisol superposée avec les névés permanents proches du glacier des Corbassière à l'ouest du Tournelon Blanc ; 1 : glacier des Corbassières ; A : plusieurs regroupements de névés permanents ; B : autres zones où des névés permanents sont identifiés avec une probabilité de pergélisol élevée .....50

Figure 20: Durée d'enneigement moyenne brute de la zone d'étude.....51

Figure 21: Durée d'enneigement moyenne colorée.....52

Figure 22: Durée d'enneigement aux alentours du Mont Fort. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015 ; 1 : courte durée d'enneigement ; 2 : longue durée d'enneigement proche des glaciers ; 3 : longue durée d'enneigement à cause du lac ; 4 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide ; 5 : durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide ; 6 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude ; 7 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude sur des lacs ; 8 : longue durée d'enneigement à une certaine distance des glaciers pour une année chaude .....53

Figure 23: Durée d'enneigement aux alentours du glacier de l'En Darrey. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015 ; 1 : courte durée d'enneigement ; 2 : longue durée d'enneigement proche des glaciers ; 3 : longue durée d'enneigement au sud-est du glacier de la Luette ; 4 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide ; 5 : durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide ; 6 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude ; 7 : durée d'enneigement plutôt longue à une certaine distance des glaciers pour une année chaude .....54

Figure 24: Durée d'enneigement aux alentours du Grand Tavé. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015 ; 1 : courte durée d'enneigement ; 2 : longue durée d'enneigement proche des glaciers ; 3 : longue durée d'enneigement à une certaine distance des glaciers ; 4 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide ; 5 : durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide ; 6 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude ; 7 : durée d'enneigement plutôt longue à une certaine distance des glacier pour une année chaude.....55

Figure 25: Durée d'enneigement où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50%. A : aux alentours du glacier du Mont-Fort ; B : aux alentours du glacier de l'En Darrey ; C : aux alentours du Grand Tavé ; 1 : longue durée d'enneigement.....57

Figure 26: Relation entre la durée d'enneigement et la probabilité de présence du pergélisol.....59

Figure 27: Relation entre la durée d'enneigement et la probabilité de présence du pergélisol avec moyenne et médiane mobile.....59

Figure 28: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol aux alentours du Mont-Fort .....61

Figure 29: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol aux alentours du Grand Tavé ; clusters séparant les données .....62

Figure 30: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol au-dessus de 2500 mètres .....64

Figure 31: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol au-dessus de 3000 mètres .....64

Figure 32: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol. A: en 2003; B: en 2011; C: en 2015.....65

## 1. Introduction

### 1.1 Situation

En Suisse, le pergélisol joue un rôle important dans les systèmes glaciaires et périglaciaires. Il recouvrait environ 5% de la surface du pays il y a environ 20 ans comme on peut le voir sur la *Figure 1* (Keller et al., 1998). Dans les pays aux latitudes plus élevées, les surfaces contenant du pergélisol peuvent devenir encore plus grandes comme au Canada par exemple, qui est recouvert à environ 50% par le pergélisol (ACGR, 1988). Au vu de son importance, il est considéré comme l'un des six indicateurs cryosphériques du réchauffement climatique du GCOS (Global Climate Observing System) (Harris et al., 2001). L'évolution du climat risque de considérablement changer au cours du 21<sup>e</sup> siècle. En effet, les scénarios climatiques suisses CH2018 démontrent que d'ici 2060 les températures estivales pourraient augmenter de 2.5 à 4.5°C. Les périodes de sécheresse pourraient être plus longues et les précipitations pourraient aussi considérablement augmenter autant en été qu'en hiver (NCCS, 2018). Les scénarios climatiques montrent que la tendance est à la hausse au fil des années. De ce fait, tous les écosystèmes seront touchés par ces changements. Les régions de montagne ne sont pas épargnées. En effet, les conditions extrêmes apparues ces dernières années pourraient devenir la norme d'ici le milieu du siècle en cours (Gobiet et al., 2014). Les conséquences pour les milieux alpins pourraient être dramatiques. Le réchauffement climatique aurait de graves conséquences sur la neige (Scherrer et al., 2013). En effet, une forte diminution de l'enneigement entre 1500 et 2000 mètres pourrait être observée (Beniston, 2012). Le pergélisol n'est pas épargné par ces changements. Une augmentation des dangers naturels provenant des glaciers ou du pergélisol peut déjà être observée. Le retrait des glaciers alpins provient aussi du réchauffement climatique actuel. La diminution de la surface des glaciers suisses est de plus en plus marquée (Haeberli et Beniston, 1998). Entre 1985 et 1999, le facteur de diminution de la surface glaciaire est sept fois plus élevé que pour la période 1850-1973 (Paul et al., 2007). Il est donc imaginable qu'un dégel et une dégradation progressive du pergélisol provoquent une augmentation des dégâts en montagne. (Jorgenson et al., 2006).

Ces changements climatiques modifiant les conditions de présence du pergélisol peuvent augmenter le nombre de dangers naturels, car le terrain devient moins stable suite au dégel du pergélisol (Lewkowicz et Harris, 2005). En effet, le pergélisol peut être considéré comme le « ciment des Alpes » (Lambiel, 2006). En termes scientifiques, l'augmentation des températures a comme effet d'augmenter la plasticité de la glace pouvant être présente dans les parois rocheuses (Kääb et al., 2007). C'est pour cette raison que sa fonte accentue fortement l'instabilité des versants en milieu périglaciaire. D'autres dangers peuvent apparaître, comme une augmentation de chutes de pierres (Gruber et Haeberli, 2007). Les risques cités peuvent mettre en danger la population des villages alpins.

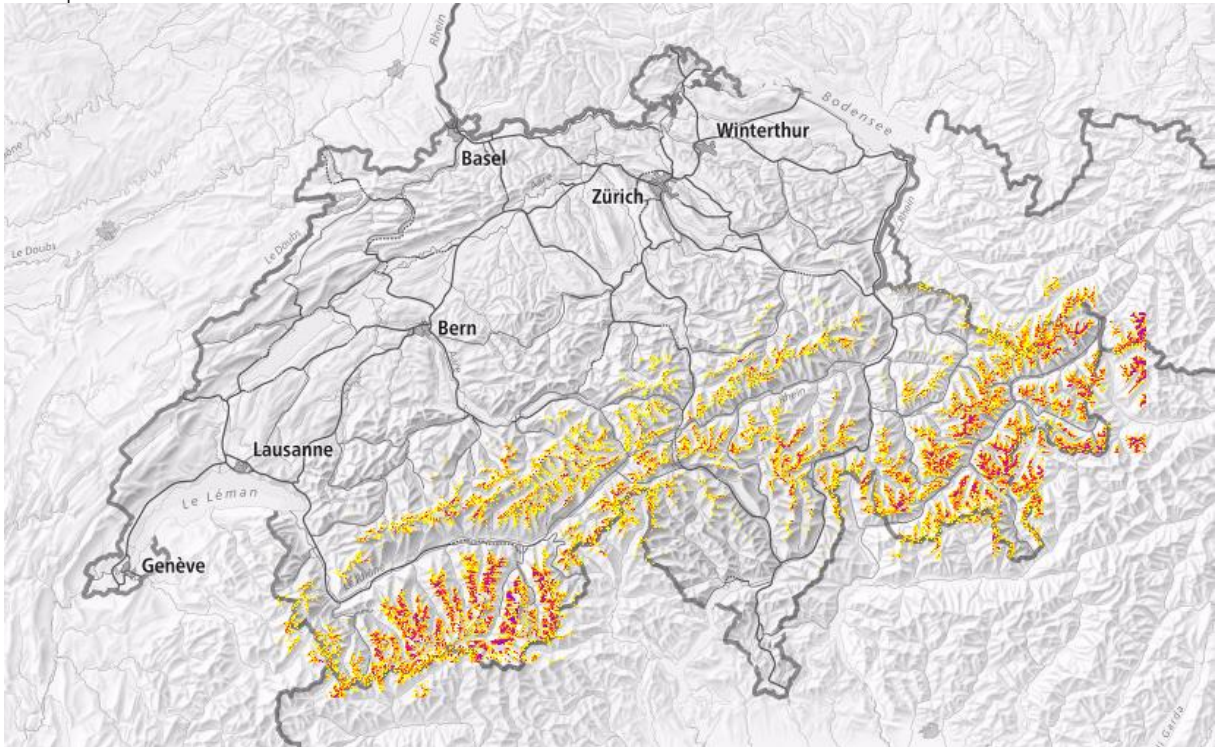


Figure 1: Carte indicative du pergélisol dans les Alpes (Swisstopo, 2020)

Quant à la neige, son importance est tout aussi primordiale en milieu alpin. L'approvisionnement en eau pour les stations hydroélectriques est essentiel pour les pays comme la Suisse (Vikhamar et Solberg, 2003) et dépend de la fonte de la neige. De ce fait, une station hydroélectrique nécessite une quantité de neige suffisante pour approvisionner la population en électricité. Cependant, l'électricité n'est pas la seule raison de l'importance de la neige. Elle permet aussi de recharger les eaux souterraines ou encore d'approvisionner en eau toute une population (Sturm et al., 2017). L'évolution de la neige au cours du temps dépend des paramètres climatiques et varie de manière continue au fil des années (Pedersen et al., 2013).

La télédétection ne permet pas de visualiser le pergélisol en milieu alpin, car sa distribution est beaucoup trop hétérogène et n'est pas visible à la surface du sol. Cependant, certains paramètres influençant la distribution du pergélisol peuvent être visibles grâce aux satellites. Certains modèles ont déjà réussi à modéliser le pergélisol en intégrant divers paramètres influençant sa répartition (Leverington et Duguay, 1997). Les indicateurs à inclure dans le modèle dépendent de leur variabilité spatiale et temporelle ainsi que de la difficulté d'obtention des données. (Gruber et Hoelzle, 2001).

L'accès à certains territoires alpins est difficile et le fait de devoir se déplacer peut devenir rapidement compliqué. Les satellites et autres outils de télédétection permettent de couvrir de vastes étendues, ce qui est impossible avec des techniques au sol. L'approche satellitaire permet d'avoir des mesures de certains paramètres sur plusieurs années. Cette composante est importante pour déterminer l'évolution d'un paramètre

et de voir si, par exemple, le changement climatique joue un rôle important sur cet indicateur (Kääb et al., 2005).

Le but de cette étude est de voir si les images satellitaires permettent de mettre en relation la répartition du pergélisol avec certaines de ses composantes comme la neige sur plusieurs années. La composante temporelle étant essentielle, cette étude permet aussi d'évaluer l'impact de certaines années aux températures extrêmes et leur impact sur l'enneigement. Des comparaisons avec d'autres données sont faites pour vérifier la concordance des résultats.

## 1.2 Questions de recherche

Les données satellitaires sont des outils d'une grande efficacité lorsqu'une étude se base sur une zone d'étude étendue et qu'une grande quantité d'images sur plusieurs années sont nécessaires. Les milieux alpins sont les premiers affectés par le réchauffement climatique. L'observation continue de la neige ou du pergélisol devient donc essentielle pour avoir un suivi en temps réel. Afin de mettre en place un modèle de répartition du pergélisol, chaque auteur a utilisé certains types de données pouvant provenir de résultats in situ, mais aussi d'images satellites. C'est pour cette raison que l'objectif est d'évaluer la possibilité d'utiliser uniquement les données satellitaires pour observer l'évolution de certains paramètres influençant la répartition du pergélisol.

Plusieurs éléments liés à la neige sont étudiés séparément puis sont mis en commun avec des données sur la probabilité d'occurrence du pergélisol ainsi qu'avec des données météorologiques. De nombreuses questions peuvent être posées concernant cette recherche.

Premièrement, la question principale est de savoir s'il est possible de mettre en relation certaines caractéristiques de la couverture neigeuse comme la durée d'enneigement et les névés permanents avec des données sur la probabilité d'occurrence du pergélisol, à partir d'images satellitaires ayant une résolution spatiale de 30 mètres. Une question liée à cette première est de savoir si les zones de névés permanents ou avec une longue durée d'enneigement correspondent aux zones où la probabilité d'occurrence du pergélisol est élevée.

Deuxièmement, d'autres questions se sont posées au fur et à mesure de l'avancement de la recherche. Pour l'identification des névés permanents, les emplacements de ces névés sont étudiés. La question est de savoir si ces névés sont identifiés de manière correcte par le modèle, et dans le cas contraire, de savoir pourquoi des erreurs apparaissent dans les résultats. Ensuite, certaines données météorologiques annuelles sont mises en commun avec les images annuelles de durée d'enneigement et de névés permanents. De ce fait, est-il possible de visualiser l'impact des années extrêmement chaudes ou froides sur la surface enneigée ou sur la surface de névés permanents à l'aide d'images satellitaires ?

Enfin, les satellites Landsat ont une résolution spatiale à 30 mètres et ont un temps de retour au même endroit de 16 jours. Cette résolution peut potentiellement poser certains problèmes lors de l'identification d'objets de petites tailles. De ce fait, la résolution spatiale influence-t-elle considérablement les résultats finaux de cette étude ? Ou en d'autres termes, malgré la faible résolution spatiale, les satellites Landsat permettent-ils d'identifier certains phénomènes très localisés dans le paysage ?

## 1.3 Cadre théorique

### 1.3.1 Le pergélisol

Le pergélisol est un état thermique d'un matériel de subsurface dont les températures se situent au-dessous de 0°C durant au minimum deux années consécutives (Harris et al., 2009). Cette définition est purement théorique. C'est pour cette raison que certains auteurs utilisent d'autres définitions du pergélisol comme Delaloye (2004) qui le définit comme : « un matériel de subsurface dont la température est inférieure à 0°C durant l'année entière ». L'implication du facteur thermique est donc d'une grande importance pour connaître sa distribution. Régionalement, certaines limites de distribution du pergélisol sont définies. Par exemple, le pergélisol apparaît théoriquement à différentes altitudes en fonction de l'orientation du versant. Ces modèles différencient le pergélisol possible ou probable en fonction de l'altitude et sont basés sur des inventaires de glaciers rocheux et d'autres indices géomorphologiques (Delaloye et Morand, 1997). Mais cette définition n'est pas entièrement correcte, car des patches discontinus de pergélisol peuvent apparaître localement, comme dans des éboulis ventilés où des advections d'air peuvent provoquer l'apparition de pergélisol largement au-dessous de la limite d'altitude proposée. Une distinction doit encore être faite entre deux types de pergélisol : le pergélisol continu et discontinu (Harris et al., 1988). Le pergélisol discontinu ne couvre pas toutes les parties du sol d'une région comme dans les Alpes. Cette forme de pergélisol se retrouve alors de manière hétérogène dans le paysage. À l'inverse, le pergélisol continu couvre une surface beaucoup plus importante comme dans certaines régions du Canada.

Vu que le pergélisol est entièrement lié aux températures, on peut lui définir différents états thermiques. La première catégorie représente un pergélisol dit « froid ». Elle définit un état du matériel dont la température annuelle moyenne se situe au-dessous de -0.5°C. Cet état nécessite aussi qu'aucune température durant l'année ne soit égale ou supérieure à 0°C. La deuxième catégorie représente un pergélisol dit « semi-tempéré ». Elle définit un matériel ayant des températures comprises entre -0.5°C et 0°C. Des valeurs supérieures à 0°C peuvent apparaître sporadiquement. Enfin, la dernière catégorie représente un pergélisol dit « tempéré ». Il est considéré comme tel lorsque les températures sont égales à 0°C de manière permanente<sup>1</sup> (Delaloye, 2004).

---

<sup>1</sup> De minimes écarts de quelques dixièmes de degrés peuvent être admis

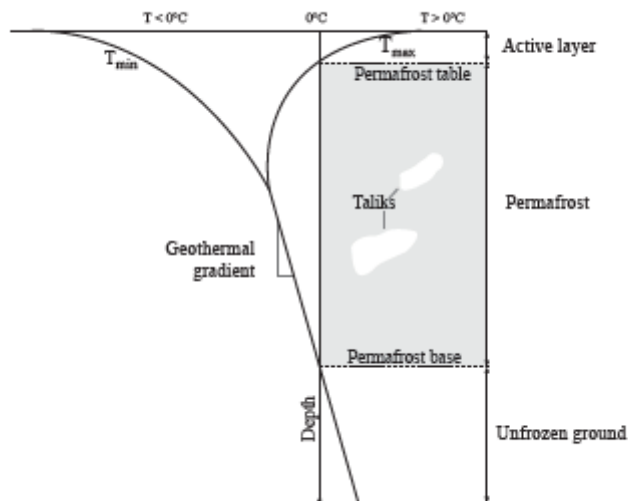


Figure 2: Stratigraphie du pergélisol (Deluigi, 2018)

La stratigraphie d'un sol contenant du pergélisol est visible sur la *Figure 2*. La couche active correspond à la partie la plus proche de la surface. Celle-ci peut avoir des températures supérieures à 0°C au cours du printemps et l'été. Cette couche active peut ainsi geler et dégeler plusieurs fois durant une année. Le gradient de température de la couche de pergélisol, se situant au-dessous de la couche active, est pour sa part inférieur à la limite décrite auparavant de 0°C. La limite entre ces deux parties s'appelle le toit du pergélisol. La *Figure 2* présente certaines parties de la couche de pergélisol pouvant être dégelées. Ces petites parties s'appellent des taliks. La limite inférieure séparant la couche de pergélisol au sol non gelé s'appelle la base du pergélisol. Comme le gradient thermique le démontre sur la *Figure 2*, les températures ont tendance à remonter en allant plus en profondeur, car l'interaction avec la surface devient limitée. L'influence du sous-sol et la chaleur géothermique deviennent plus influentes. C'est pour cette raison que le pergélisol ne peut pas apparaître à certaines profondeurs (Deluigi, 2018).

La présence du pergélisol n'inclut pas directement la présence de glace (Lambiel, 2006). De ce fait, deux types de pergélisol sont encore distinguables : le pergélisol sec et le pergélisol cimenté par la glace (Harris et al. 1988). La différence entre ces deux types de pergélisol provient de la porosité du sol. Un sol ayant une porosité très faible et n'ayant donc presque aucun interstice est défini comme un pergélisol sec, car l'eau ne peut pas s'infiltrer à l'intérieur du sol et de ce fait, le gel et l'apparition de glace sont totalement impossibles. Au contraire, si la porosité est élevée, l'eau ou même de la neige peut facilement s'y infiltrer. Dans ce cas précis, la glace peut se former à l'intérieur du sol et le pergélisol est considéré comme « cimenté par la glace ».



### 1.3.2 Facteurs influençant la répartition du pergélisol

Le pergélisol est un phénomène dont la distribution est très hétérogène dans le cas spécifique des Alpes suisses. De ce fait, de multiples paramètres affectent le pergélisol de manières distinctes. À travers le monde, ces paramètres n'ont pas tous la même importance, car les conditions climatiques, topographiques et pédologiques (du matériel de subsurface en question) peuvent totalement différer d'un endroit à l'autre. Ces trois conditions définissent les facteurs de contrôle globaux du pergélisol autour du globe (Gruber et Haeberli, 2009). Le pergélisol présent au Canada a des conditions de présence totalement différentes d'un pergélisol présent dans les Alpes.

On peut aussi différencier les facteurs en fonction de leur échelle d'implication. Quatre types d'échelles se démarquent : l'échelle continentale, régionale, locale et l'échelle de l'objet (Lambiel, 2006).

À l'échelle continentale, trois facteurs principaux influencent la distribution du pergélisol : la latitude, l'altitude et les flux énergétiques. Le pergélisol se présente principalement dans des conditions de haute altitude comme en milieu alpin. Il est aussi présent dans les régions de hautes latitudes comme au Canada où la distribution du pergélisol est beaucoup plus homogène. Ces régions sont plus susceptibles d'avoir du pergélisol, car les flux énergétiques sont plus faibles que dans d'autres régions ce qui crée des conditions plus froides permettant l'apparition du pergélisol.

À l'échelle régionale, le climat joue un rôle important. En effet, la définition du pergélisol est présentée comme un matériel dont les températures sont inférieures à 0°C. La température de l'air où MAAT (Mean Annual Air Temperature) est considérée comme un bon indice pour identifier les zones où le pergélisol peut se situer. Les températures diminuent lorsque l'altitude augmente. De ce fait, plus l'altitude est élevée, plus la probabilité d'apparition du pergélisol est importante.

À l'échelle locale, un plus grand nombre de paramètres vient s'ajouter à la liste. La topographie est l'un des facteurs principaux à cette échelle. En effet, l'orientation du versant et la pente sont des paramètres importants. Leur importance provient du fait que le rayonnement solaire est différent en fonction de l'orientation et de la pente. Les températures de l'air n'ont ainsi plus le même rôle à l'échelle locale et ce sont les températures prises à la surface du sol ou MAGST (Mean Annual Ground Surface Temperature) qui influencent la répartition du pergélisol.

Finalement, à l'échelle de l'objet, les flux thermiques entre le sous-sol et la surface sont essentiels. Comme le décrit Delaloye (2004), il y a un décalage thermique entre la MAGST et le toit du pergélisol. Ce décalage provient du fait que certains paramètres comme l'épaisseur de la couverture neigeuse ou la géologie modifient les échanges thermiques à l'intérieur du sol.



Il est tout à fait possible de définir des facteurs et des sous-facteurs influençant le pergélisol. Ceux-ci peuvent être liés entre eux. Voici une liste des paramètres les plus importants :

- L'altitude : Ce paramètre est déterminant, car en fonction de l'altitude, les conditions climatiques sont différentes. Différents seuils d'altitude théoriques existent pour confirmer la présence de pergélisol. Ces seuils sont uniquement des indicateurs sur la probabilité de présence du pergélisol.
- La latitude : Les latitudes élevées ont souvent une plus grande proportion de pergélisol comme on peut le voir au Canada qui est un pays recouvert à 50% par le pergélisol (ACGR, 1988).
- Les radiations solaires : Elles sont influencées par divers sous-paramètres locaux comme la pente ou l'orientation d'un versant de montagne. Lorsqu'un pan d'une montagne est orienté d'une certaine manière, il reçoit plus ou moins de radiations solaires ce qui a un impact significatif sur la distribution du pergélisol. Des études comme celle de Gruber et Hoelzle (2001) ont démontré que les radiations solaires peuvent être un paramètre essentiel pour modéliser la répartition du pergélisol. Les radiations solaires sont étroitement liées aux températures. Plus les radiations solaires sont fortes, plus les températures sont élevées.
- Les formes ou processus géomorphologiques : Ce sont de très bons indicateurs de présence ou absence de pergélisol. Les glaciers rocheux représentent une forme périglaciaire typique en milieu alpin (Haeberli et al., 2006). Dans un cas de glacier rocheux actif, le pergélisol est toujours présent. Le processus lié à cette forme géomorphologique est le fluage du pergélisol qui met en mouvement le glacier rocheux en question. C'est pour cette raison que des données radar, mesurant le déplacement d'objets, sont intéressantes pour déterminer la présence de pergélisol dans un sol. Les interféromètres ont la capacité de détecter et de mesurer les mouvements à l'intérieur du sol. En fonction de la vitesse du glacier rocheux et de sa forme géomorphologique, il est possible de déterminer le type de glacier rocheux en question (Barsch 1996). Lorsque les vitesses sont de l'ordre de 0.1 à 2 m par an, il s'agit probablement d'un glacier rocheux actif. Un glacier rocheux inactif s'identifie par une déformation nulle même si celui-ci peut tout de même contenir une petite proportion de glace. Quant aux glaciers rocheux fossiles, ils ne contiennent plus aucune trace de glace, et leur forme géomorphologique est différente. Ces mouvements modifient le paysage et permettent une identification assez aisée des glaciers rocheux de manière visuelle.
- Les caractéristiques du sous-sol : Celles-ci modifient considérablement la probabilité d'occurrence du pergélisol. Plusieurs facteurs peuvent être reliés au sous-sol : la porosité du sol, l'humidité et l'épaisseur de la couche active (Hoelzle et al., 2001). Ces différents facteurs sont tous étroitement liés aux flux thermiques entre le sous-sol et la surface.
- Surface du sol : Les conditions du sol ont un impact primordial sur la présence de pergélisol. La surface du sol peut être recouverte par de la végétation, de la neige ou par d'autres couvertures. Le type de surface modifie l'albédo du sol qui influence aussi l'occurrence du pergélisol. Les conditions

de présence de la végétation sont étroitement liées aux conditions de présences du pergélisol (Haeberli, 1975). En effet, la végétation diminue en fonction de l'altitude. En zones glaciaires et périglaciaires, la végétation est souvent totalement absente du terrain. Plusieurs auteurs ont déjà fait état de la relation entre la végétation et le pergélisol à la suite d'études sur la distribution de la végétation sur des formes géomorphologiques périglaciaires (Béguin et al., 2006 ; Frauenfelder et al., 1998). Pour ces deux études, le travail se focalise sur des glaciers rocheux actifs, inactifs et fossiles. La finalité est que la végétation entretient une relation inverse avec le pergélisol, ce qui signifie qu'en présence de végétation, le pergélisol est absent. Il existe certains indicateurs permettant de détecter assez aisément la végétation sur de grandes parcelles comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

Le dernier paramètre influençant la répartition du pergélisol en milieu alpin est la neige. Étant donné que ce paramètre est essentiel pour le modèle, ses caractéristiques et sa relation avec le pergélisol sont présentées dans un chapitre distinct.

### 1.3.3 Neige

#### 1.3.3.1 Définition

La neige est sans doute un des paramètres les plus importants impactant la répartition du pergélisol. Elle peut recouvrir le sol durant les trois quarts d'une année et même durant une année complète en milieu alpin. La neige est un paramètre modifiant considérablement les températures à la surface du sol. Certaines caractéristiques spécifiques de la couverture neigeuse comme la profondeur de la neige, les premières neiges ou la date de la fonte de la dernière neige changent d'année en année (Zhang et al., 1997). Des changements dans l'épaisseur de la couverture neigeuse peuvent apparaître localement à cause de facteurs comme la topographie, des vents forts ou encore des avalanches. Dans le cas d'une avalanche, l'épaisseur de la couche de neige est plus grande à son point d'arrivée, tandis qu'à son point de départ, cette couche est moins épaisse (Luetschg et al., 2004). La disparité de l'épaisseur de la couverture neigeuse à une échelle locale est donc importante. Pour avoir une bonne compréhension de la répartition de la neige, la forte variabilité spatiale doit être prise en compte. La couverture neigeuse ou parfois même l'évolution de la fonte des neiges sont corrélées avec les températures à la surface du sol. De ce fait, la neige a un impact considérable sur le pergélisol (Stocker-Mittaz et al., 2002). Le bilan radiatif est aussi affecté par la couverture neigeuse avec une augmentation de l'albédo et une émissivité plus importante (Zhang, 2005).

L'épaisseur de la couverture neigeuse modifie considérablement les conditions thermiques du sol. En effet, la neige possède une caractéristique de résistance thermique, ce qui signifie qu'à partir d'une certaine épaisseur de neige, le climat extérieur n'influence plus les conditions thermiques à la surface du sol. En d'autres mots, la neige est un isolant qui coupe les liens entre les températures de l'air et celles du sous-sol

(Bernhard et al., 1998). En augmentant, la profondeur de la neige, la résistance thermique est intensifiée. La conductivité thermique de la neige se situe aux alentours de  $0.1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  pour de la neige fraîche tandis qu'une neige plus ancienne possède une plus forte densité et a une conductivité thermique de  $0.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ . En comparaison, ces résultats de conductivité sont plus faibles que certaines roches (Zhang, 2005). Une épaisseur de 0.6 à 0.8 m est considérée comme étant la limite à laquelle les températures extérieures n'influencent pas les températures de la surface du sol (Luetschg et al., 2008 ; Zhang, 2005). Lorsque l'épaisseur de neige est inférieure à 0.6 m, les températures de l'air influencent significativement la distribution du pergélisol.

Keller (1994) présente deux cas distinguant la date d'arrivée de la première neige et son impact sur les températures à la surface du sol :

- Le premier cas correspond à des chutes de neige arrivant rapidement au début de l'automne et restant en place durant tout l'hiver. Dans cette situation, la couverture neigeuse permet d'isoler rapidement la surface du sol de l'air ambiant et ainsi conserver la chaleur emmagasinée durant l'été. Les conditions tempérées de la couche active ont alors un impact négatif sur le pergélisol.
- Le second cas est tout simplement le contraire du premier. Il s'agit de chutes de neige arrivant tard durant la saison froide. La surface du sol est donc exposée aux conditions thermiques de l'air et il en résulte un refroidissement conséquent de la couche active suite à la perte de chaleur accumulée durant l'été. Dans cette situation, l'impact sur le pergélisol est positif.

Au vu des nombreux cas possibles permettant d'avoir des conditions favorables ou non à la présence du pergélisol, des analyses annuelles doivent être faites. En effet, chaque année les conditions d'enneigement changent et le pergélisol en est fortement affecté. C'est aussi pour cette raison que le pergélisol peut potentiellement disparaître durant une voire plusieurs années, et peut réapparaître au même endroit deux ou trois ans plus tard. Par conséquent, il peut être intéressant de relier les données sur la neige avec des données climatiques.

#### 1.3.3.2 Névés permanents

Les névés permanents sont définis comme une couverture neigeuse ne fondant pas durant la période estivale et étant donc présents au minimum durant une année entière (Lewkowicz et Young, 1990 ; Church, 1943). Les caractéristiques de ces neiges « éternelles » peuvent différer des neiges disparaissant au cours de l'été. En effet, Church (1943) a par exemple mis en avant des différences de densité entre ces deux types de neige. Comme cela est expliqué précédemment, la neige a un effet de refroidissement ou de réchauffement sur les températures à la surface du sol (Deluigi, 2018). De ce fait, il semble logique que les névés permanents influencent considérablement la répartition du pergélisol en haute montagne. La probabilité d'apparition du pergélisol sous des névés permanents est élevée, car ces derniers protègent le sol. Le pergélisol est protégé

des températures estivales élevées et des radiations solaires directes (Haerberli, 1975). Certains auteurs décrivent brièvement ce phénomène : lorsqu'une couverture neigeuse demeure durant plusieurs années, la présence de pergélisol est favorisée, car les températures du sol ne peuvent pas remonter au-dessus de 0°C durant la saison chaude à cause de ce manteau neigeux. Cette couche de neige permet aussi un refroidissement lors de la saison froide (Delaloye, 2004 ; Luetschg et al., 2004). L'étude de Frauenfelder et al. (1998) confirme en partie la relation entre les névés permanents et l'occurrence du pergélisol. Cette étude définit le pourcentage de zones en commun entre les névés permanents, que les auteurs ont trouvé grâce à des méthodes de GIS, et deux modèles d'occurrence du pergélisol (Permakart et Permamap). Le pourcentage de correspondance est de 79,6% pour le modèle Permakart et de 89,4% pour le modèle Permamap. De ce fait, la probabilité de présence du pergélisol est élevée pour des zones où la neige est présente durant toute l'année.

D'autres types de névés peuvent aussi apparaître et sont appelés « snow patches ». Ils correspondent à des patches de neige qui restent plus longtemps durant l'année que la neige traditionnelle, mais ils fondent tout de même durant l'été au contraire des névés permanents (Fujita et al., 2010). Fujita et al. démontrent aussi que les paramètres topographiques comme l'exposition au vent ont plus d'influence que les paramètres climatiques (températures externes) sur les « snow patches ».

### 1.3.4 La télédétection et les images satellitaires

#### 1.3.4.1 Définition

La télédétection consiste à obtenir des informations sur la surface de la Terre à partir de moyens aériens (avions ou satellites par exemple). Les données sont obtenues grâce à un capteur utilisant les ondes électromagnétiques d'une ou plusieurs parties du spectre électromagnétique. Ces ondes peuvent être émises ou réfléchies par la surface de la Terre (Campbell et Wynne, 2011). Il n'est ainsi pas nécessaire d'avoir une interaction directe avec le lieu étudié.

Les différentes étapes de la télédétection sont montrées sur la *Figure 3*. En premier lieu, l'intérêt se porte sur l'objet de l'étude. Les connaissances préalables de l'objet en question doivent être maîtrisées. Ensuite, les données du capteur permettent d'avoir un premier aperçu de l'objet étudié dans les différentes longueurs d'onde nécessaires. Les données nécessaires à l'étude en question ne sont pas forcément dans les longueurs d'ondes du visible. De ce fait, une interprétation ou une transformation des données brutes provenant du capteur est parfois obligatoire. Finalement, le résultat obtenu peut être appliqué dans un but précis en utilisant par exemple les données des bandes du proche infrarouge et du rouge pour identifier la neige.

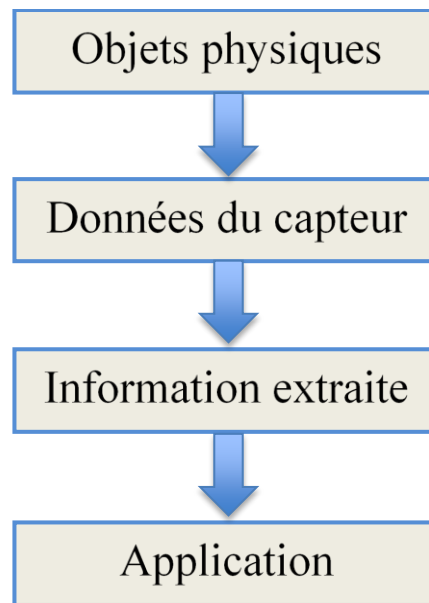


Figure 3: Processus de la télédétection (d'après Campbell et Wynne, 2011)

Chaque objet étudié a ses propres caractéristiques spectrométriques. Cela veut dire que l'absorption et la réflexion du rayonnement solaire diffèrent entre les différentes surfaces. Un objet n'étant pas directement distinguable à l'œil nu peut tout de même être visible grâce à d'autres bandes spectrales comme les bandes de l'infrarouge ou l'ultraviolet. L'information qui est transmise a souvent une résolution spectrale étendue (Campbell et Wynne, 2011).

#### 1.3.4.2 Le programme Landsat

De nombreux satellites tournent autour de la Terre et permettent d'observer chaque parcelle de notre planète. Le programme Landsat a envoyé de multiples satellites en orbite depuis 1972 et sa première mission nommée Landsat 1 (USGS, 2010). Depuis cette première étape, huit générations de satellites ont vu le jour, chacun plus performant que son prédécesseur. Landsat permet donc d'obtenir des données sur la surface de la Terre depuis maintenant plus de 40 ans en mettant librement à disposition ses images.

Il ne reste plus que deux satellites Landsat en orbite actuellement et chacun d'entre eux a des propriétés bien distinctes. Il est nécessaire d'intégrer à l'étude le satellite Landsat 5 qui n'est aujourd'hui plus en orbite, car celui-ci est également utilisé afin d'obtenir des images plus anciennes. Premièrement, tous les satellites Landsat ont les mêmes caractéristiques orbitales. L'orbite est synchrone au soleil avec une altitude d'environ 705 kilomètres et un temps de retour de 16 jours. Différents capteurs ont été utilisés. Le capteur classique est le Thematic Mapper (TM) ayant une classification et une définition des bandes spectrales conformes à la norme. L'ETM+ correspond à une version améliorée du capteur TM. Il est utilisé pour le satellite Landsat 7 (ESA 2000, 2020 a). En ce qui concerne les similarités et différences de Landsat 5 et 7, les bandes spectrales utilisées sont presque identiques. Les bandes du visible (0,45 à 0,69  $\mu\text{m}$ ) ont une résolution spatiale de 30

mètres tout comme les bandes de l'infrarouge proche (0,76 à 1,75  $\mu\text{m}$ ). Cependant, la bande spectrale de l'infrarouge thermique (10,4 -12,5  $\mu\text{m}$ ) a une résolution spatiale de 120 mètres pour Landsat 5 et 60 mètres pour Landsat 7. La différence entre ces deux satellites provient aussi de l'ajout d'une bande panchromatique pour le satellite Landsat 7 entre les longueurs d'onde de 0,5  $\mu\text{m}$  à 0,90  $\mu\text{m}$ , ayant une résolution spatiale de 15 mètres. Finalement, Landsat 8 intègre deux nouvelles bandes spectrales représentant les aérosols (0,43 à 0,45  $\mu\text{m}$ ) et les cirrus (2,1 à 2,3  $\mu\text{m}$ ) (ESA 2000, 2020 b). L'unique différence de résolution spectrale entre les satellites Landsat 7 et 8 se situe au niveau de l'infrarouge thermique avec une résolution de 100 mètres pour deux bandes au lieu d'une seule pour Landsat 7.

### 1.3.5 Les modèles de répartition du pergélisol

#### 1.3.5.1 Les prémices

Les études sur la télédétection du pergélisol sont assez récentes. En effet, durant les années 1980, cette science était encore assez méconnue. Les premières tentatives de détection du pergélisol ou d'éléments du paysage liés au pergélisol ont été réalisées par Thie (1974), mais ses moyens techniques étaient encore trop limités pour obtenir des résultats satisfaisants. La résolution spatiale et spectrale du satellite Landsat ne permet pas d'obtenir des cartes cohérentes. Par la suite, plusieurs essais ont été produits avec différents types de données satellitaires comme des images radar (SAR) (Granberg, 1994), mais aussi avec des images multispectrales, qui utilisent plusieurs longueurs d'onde (Dean et Morrissey, 1988). Les résultats ne furent pas à la hauteur des attentes pour l'étude réalisée par Granberg (1994). Effectivement, l'utilisation des images radar n'a pas été satisfaisante et les résultats ne furent pas à la hauteur des attentes. Les images radar peuvent devenir intéressantes uniquement lorsqu'elles sont mises en commun avec d'autres images avec une résolution spectrale différente. La recherche effectuée par Dean et Morrissey (1988) fut, quant à elle, couronnée de succès. Malgré une résolution relativement faible, les résultats obtenus permettent d'observer avec précision de gros éléments du paysage contenant du pergélisol. Cependant, certains objets de plus petite taille ne sont pas forcément visibles.

#### 1.3.5.2 Détection du pergélisol autour du globe

De nombreuses études ont été menées autour du globe pour estimer la répartition du pergélisol (Morrissey et al., 1986 ; Peddle et Franklin, 1993 ; Leverington et Duguay, 1997 ; Pastick et al., 2015 ; Chang et Hanssen, 2015 ; Trishchenko et al., 2016). Bien entendu, la plupart des études entremêlant télédétection et pergélisol se font à hautes latitudes, car la répartition du pergélisol est beaucoup plus homogène qu'en milieu de haute montagne ce qui facilite considérablement le travail. La plupart de ces études ont été réalisées au Canada, car la surface recouverte par le pergélisol est importante.

Les méthodes et idées mises en place sont multiples. Un réseau neural a été utilisé pour présager l'absence ou la présence de pergélisol à faible profondeur (Leverington et Duguay, 1997). Une classification de la couche active du pergélisol basée sur l'analyse de données satellitaires et de données topographiques est produite (Peddle et Franklin, 1993). Morrissey et al. (1986) mettent en place différentes catégories de pergélisol sur la base d'images satellites et d'autres cartes aidant à la détermination de présence du pergélisol. D'autres modèles plus récents incluent uniquement la présence ou l'absence du pergélisol, mais intègrent aussi une estimation de l'évolution du pergélisol au cours du temps grâce à la quantité d'images satellitaires (Pastick et al., 2015). L'étude de Trishchenko et al., (2016) détermine la distribution et les variations annuelles de l'étendue de neige ou glace minimale sur quinze années. Finalement, Chang et Hanssen (2015) étudient les instabilités de terrain liées au pergélisol grâce à des données satellitaires en milieu montagneux (Himalaya). Ces données sont liées aux mesures InSAR. Celles-ci sont basées sur une méthode faisant la différence de phase de deux images et permettant d'identifier des mouvements à l'intérieur du sol. Ces mouvements sont liés à la présence de pergélisol.

La plupart de ces études se basent sur des images provenant des satellites Landsat 5, 7 ou 8 avec une résolution spatiale à 30 mètres sauf l'étude de Trishchenko et al. (2016) se basant sur des images MODIS avec une résolution spatiale de 250 mètres. Finalement, les résultats obtenus ont été positifs en ce qui concerne les milieux où la distribution du pergélisol est presque entièrement homogène.

#### 1.3.5.3 Détection du pergélisol en Suisse

Les recherches menées sur ce sujet dans les Alpes (par exemple Gruber et Hoelzle, 2001 ; Deluigi, 2018 ; Kenner et al., 2019) ne sont pas nombreuses malgré l'omniprésence du pergélisol en milieu alpin. Le facteur principal de ce manque de recherches est l'hétérogénéité du pergélisol en haute montagne, ce qui induit une grande difficulté pour créer des cartes de ce phénomène à partir d'images satellites. De nombreux paramètres influencent la répartition du pergélisol en milieu alpin ce qui augmente l'hétérogénéité de ce phénomène. Dans cette partie, différents articles liés à la distribution du pergélisol en Suisse sont présentés, même s'ils n'intègrent pas tous l'utilisation d'images satellites.

La recherche de Gruber et Hoelzle (2001) a pour but d'identifier la distribution spatiale du pergélisol avec l'aide de diverses méthodes, dont la télédétection. Les données satellitaires ont été utilisées principalement pour avoir un aperçu de l'abondance de la végétation (avec le calcul du NDVI : normalized difference vegetation index), mais aussi pour des données sur la topographie et l'albédo. Ces caractéristiques sont issues d'images Landsat. D'autres paramètres ont été pris en compte pour déterminer l'absence ou la présence de pergélisol. Cependant, ces mesures ne sont pas obtenues par voie satellitaire. Il y a par exemple des mesures de températures directement prises sur le terrain. Concernant la zone d'étude, elle se situe dans la région de Zermatt et représente une surface d'un peu moins de 500 km<sup>2</sup>. Finalement, les auteurs proposent trois

distinctions possibles : absence de pergélisol, pergélisol possible et pergélisol probable. La carte finale obtenue est convaincante et les auteurs mettent en avant l'importance du choix des paramètres à utiliser pour créer cette carte. Certains paramètres influencent la répartition du pergélisol, mais ne doivent pas forcément être inclus dans le modèle. Par exemple, l'albédo est un bon indicateur pour le pergélisol mais Gruber et Hoelzle ne l'intègre pas dans leur carte car ce facteur pourrait augmenter le nombre d'erreurs du modèle, sans améliorer la qualité du produit final.

Deluigi (2018) a publié un article décrivant la mise en place et l'utilisation d'un modèle de distribution du pergélisol (PERMAL). Ce modèle a permis d'obtenir une carte de répartition du pergélisol sur une zone d'étude contenant trois vallées alpines différentes. Pour cette recherche, quinze paramètres sont pris en compte. Ces données contiennent des informations topoclimatiques comme l'altitude, la radiation solaire ou l'orientation. Des données recueillies sur le terrain ont été utilisées pour affiner le modèle. D'autres paramètres tels qu'un inventaire des glaciers, la marge proglaciaire, les lacs, les rivières, le NDVI ainsi que la granulométrie ont été utilisés. Ces données sont dérivées de plusieurs sources différentes. Ensuite, une valeur est assignée à chaque paramètre du modèle. Cette valeur dépend de l'importance du paramètre sur la distribution du pergélisol. L'utilisation d'un système nommé « Support Vector Machines » ou SVMs contribue à la réduction de dimensions et à la détermination de trois composantes de présence de pergélisol (présence, absence ou incertitude). Afin de créer la carte du pergélisol, cinq algorithmes de classification ont été appliqués. Ceux-ci sont : « Logistic regression », deux versions différentes de « Support Vector Machines », « Multilayer perceptrons » et « Random forest ». La pertinence de chaque algorithme a été évaluée et la carte finale de distribution du pergélisol reprend le modèle utilisant le « Random forest » car il a mené à des résultats plus cohérents. En comparaison avec d'autres modèles tels que le modèle BAFU, ses résultats sont plus précis.

Kenner et al. (2019) ont produit récemment un modèle déterminant la répartition du pergélisol sur toutes les Alpes suisses en distinguant deux types de pergélisol : le pergélisol pauvre en glace et celui riche en glace. Cette distinction est novatrice pour les cartes de distribution du pergélisol ce qui fait que ce modèle est unique en son genre. La différence notable entre ces deux types de pergélisol provient de sa contenance en glace. Un pergélisol riche en glace a la capacité de résister plus longtemps avec des conditions climatiques plus chaudes grâce à la capacité isolante de la glace (Scherler et al., 2013). Le modèle produit par Kenner et al. (2019) est basé sur une régression linéaire entre l'altitude et les radiations solaires. Cette technique permet de déterminer la température à l'intérieur de forages. De plus, elle permet aussi d'observer les températures à différentes profondeurs afin d'évaluer l'épaisseur de la couche active. Cette étude a permis d'affiner les modèles préexistants de distribution du pergélisol dans les Alpes.

Chaque nouvelle étude peut apporter de nouvelles informations sur la répartition du pergélisol. Néanmoins, il convient de préciser que les données d'un modèle ne correspondent pas forcément aux données de terrain.



Le choix d'une bonne zone d'étude est primordial pour le bon fonctionnement d'un modèle numérique. Pour cette étude, le centre d'intérêt se porte sur la répartition hétérogène du pergélisol en haute montagne ainsi que sur la neige. C'est pour cette raison que le choix des Alpes et plus spécifiquement des Alpes valaisannes est fait. De plus, diverses études sur le pergélisol ont déjà été produites pour cette région comme la thèse de Deluigi (2018) se focalisant sur la partie des Alpes au sud de la vallée principale. De manière à réexploiter certaines données de cette thèse à des fins de comparaison, la zone d'étude doit être plus ou moins identique à la sienne.

Afin de délimiter la zone d'étude, une surface est définie de manière à englober les régions de hautes montagnes à proximité du lac de Mauvoisin et du lac des Dix. Cela signifie que l'étude se situe proche des vallées de Bagnes, Nendaz, Hérémence et Moiry dans une moindre mesure. La surface totale de la zone d'étude est de 701 km<sup>2</sup>. Cependant, le travail se focalise sur les zones périglaciaires, ce qui implique que l'intérêt est mis sur certaines zones précises. C'est pour cette raison que trois zones spécifiques sont déterminées pour l'analyse. Celles-ci sont : le glacier du Mont Fort, le glacier de l'En Darrey et le sommet du Grand Tavé. L'analyse se fait à chaque fois aux alentours de ces lieux. La *Figure 4* met en avant la zone d'étude avec les différentes zones spécifiques qui sont utilisées lors de l'analyse des résultats.

En ce qui concerne la région aux alentours du Grand Tavé, celle-ci se situe à l'est du glacier des Corbassières. L'altitude du sommet est de 3158 mètres. La zone étudiée a des altitudes allant de 2600 à 3200 mètres environ. Cette zone a été choisie, car certains névés permanents identifiés par le modèle semblent correctement distingués.

Quant au Mont Fort, il se situe au nord-ouest du lac des Dix. L'altitude du sommet du glacier est de 3156 mètres tandis que dans la zone les altitudes varient entre 2600 et 3200 mètres. Des lacs glaciaires sont présents dans cette région ce qui rend la zone particulièrement intéressante, car des processus glaciaires, hydrologiques et gravitaires entrent en jeu. Ces différentes caractéristiques mettent en avant la diversité de ce paysage périglaciaire.

La troisième zone spécifique se situe au sud-ouest du lac des Dix proche du glacier du Giétro. L'altitude du sommet du glacier de l'En Darrey est de 3270 mètres tandis que les altitudes de la région vont de 2600 à 3700 mètres. Cette région a des sommets un peu plus hauts que les deux autres régions étudiées ce qui la différencie du point de vue topographique. Cette zone est entourée par plusieurs glaciers autres que celui de l'En Darrey qui correspondent au glacier du Giétro déjà mentionné, au glacier de la Lurette, au glacier du Pleureur, au glacier de la Sâle et au glacier du Liapay.

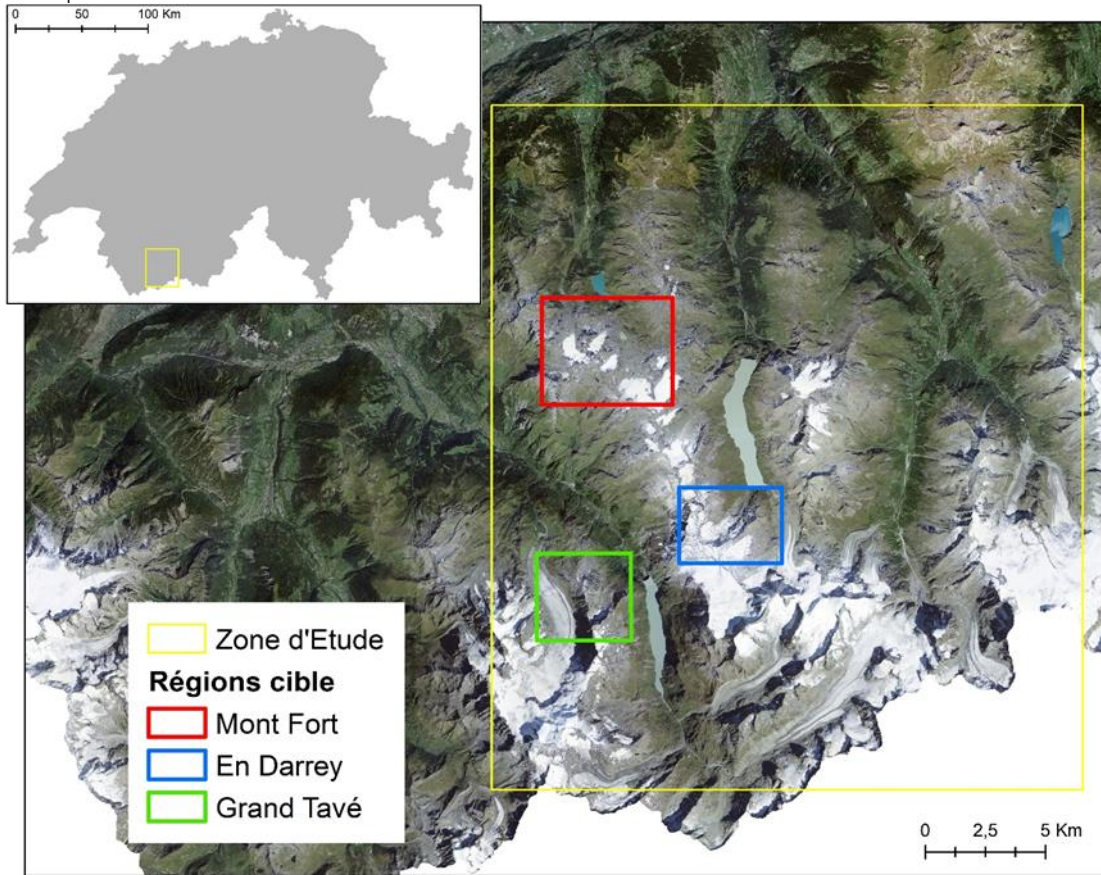


Figure 4: Zone d'étude avec les trois zones spécifiques

### 3. Méthodologie et méthodes

#### 3.1 Généralités

Le pergélisol est un phénomène qui n'est pas visible à l'œil nu. De ce fait, la télédétection a certaines difficultés à identifier ces zones en milieu alpin dont la répartition du pergélisol est très hétérogène. Les méthodes utilisées ont pour but d'évaluer la potentielle relation entre le pergélisol et des phénomènes détectables grâce aux satellites Landsat.

La neige est un paramètre influençant de manière considérable la répartition du pergélisol et la télédétection a la possibilité de la visualiser directement ou grâce à des indices normalisés. C'est pour cette raison que les deux principaux modèles étudient divers paramètres liés à la couverture neigeuse. Le premier modèle définit la répartition des névés permanents tandis que le second met en avant la durée d'enneigement pour chaque pixel.

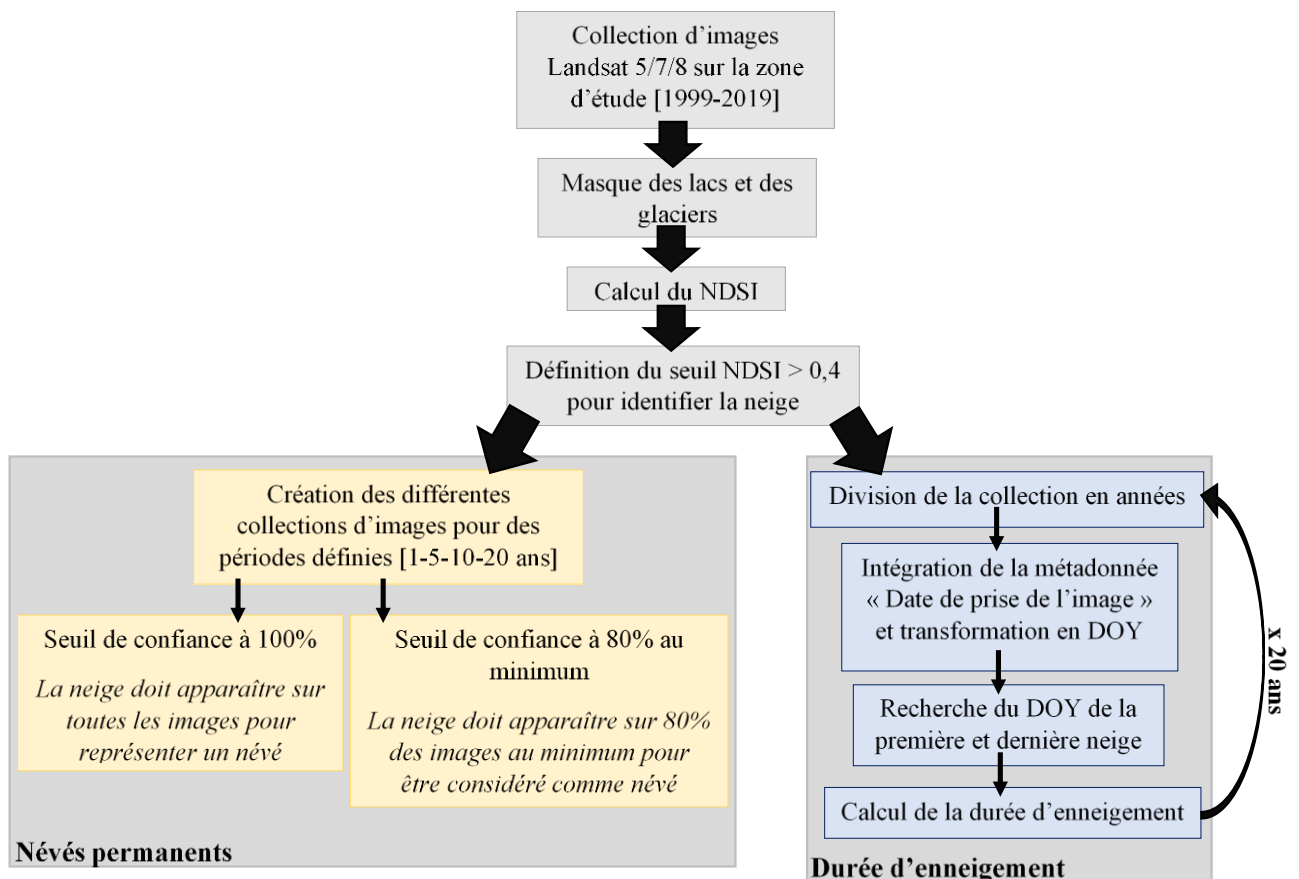


Figure 5: Méthodologie pour la détermination des névés permanents et la durée d'enneigement

Finalement, chaque paramètre utilisé est mis en commun avec une carte du pergélisol afin de voir leur potentielle relation. Dans le cas où cette relation serait existante, ces paramètres pourraient être utilisés pour déterminer la présence du pergélisol grâce aux images satellites.

La *Figure 5* présente brièvement les procédés utilisés pour obtenir la répartition des névés permanents et les données de durée d'enneigement.

## 3.2 Indices de présences de pergélisol

### 3.2.1 Normalized difference snow index (NDSI)

Le NDSI est un indice permettant d'identifier de manière simple la présence de neige en tout type de milieu. Afin d'observer la neige, les satellites utilisent normalement deux longueurs d'onde caractéristiques. Celles-ci sont à 0.66 et 1.66  $\mu\text{m}$  (EOS, 2020). La réflectance de la neige à 0.66  $\mu\text{m}$  est très élevée, tandis qu'à 1.66  $\mu\text{m}$  celle-ci est plutôt faible. Le problème majeur lié à l'identification de la neige est sa ressemblance aux nuages. En effet, dans les longueurs d'ondes du visible, il est totalement impossible de différencier les nuages de la neige. Néanmoins, les signatures spectrales complètes de ces deux paramètres sont différentes. À 1.66  $\mu\text{m}$ , la neige apparaît en effet de manière plus foncée que les nuages, car la neige absorbe plus les rayons solaires. De ce fait, la neige peut être distinguée des nuages et le masque n'est donc plus nécessaire.

Le NDSI se calcule sur la base de deux bandes spectrales : le vert et le proche infrarouge. Ces bandes correspondent à des longueurs d'onde de 0.53 à 0.61  $\mu\text{m}$  pour le vert et 1.55 à 1.75  $\mu\text{m}$  pour le proche infrarouge. L'équation finale est :

$$\text{NDSI} = \frac{G - \text{NIR}}{G + \text{NIR}} \quad (1)$$

- G = bande spectrale du vert
- NIR = bande spectrale du proche infrarouge

Les valeurs de NDSI fluctuent entre -1 et 1. Pour déterminer la présence de neige, un seuil de 0.4 a été fixé à partir de la littérature scientifique (Kulkarni et al., 2006). Lorsque la valeur des pixels est supérieure à ce seuil, il est supposé que le pixel corresponde à de la neige. Si la valeur est au contraire inférieure au seuil, la couverture du sol est différente.

### 3.2.2 Identification des névés permanents

Lors de cette étape, plusieurs logiciels sont utilisés. Google Earth Engine est le logiciel permettant d'obtenir les images satellites. Matlab a permis de créer des images booléennes ayant des valeurs de « 1 » pour les pixels supposés « névés permanents » et « 0 » pour les pixels où la neige est présente de manière discontinue dans le temps, ou n'est tout simplement pas présente.

### 3.2.2.1 Caractéristiques des filtres et des masques sur Google Earth Engine

Sur Google Earth Engine, un premier filtre est appliqué pour déterminer la période et la région d'étude. Concernant les névés permanents, une recherche d'images par année a été effectuée. Étant donné que la durée étudiée est de vingt ans, les images d'un seul satellite ne suffisent pas. C'est pour cette raison qu'un regroupement des collections de Landsat 5, 7 et 8 est produit. Pour chaque année, il est nécessaire de filtrer les images en fonction des saisons. Étant donné que les névés permanents restent durant tout l'été, les images se focalisent sur les mois de juillet à septembre.

Pour déterminer la présence de la neige sur les images satellitaires, l'indice NDSI présenté dans la partie précédente est repris et la limite de 0.4 est appliquée afin d'obtenir uniquement des pixels représentant de la neige. Tout autre élément du paysage n'étant pas de la neige est donc exclu du modèle.

Ensuite, des masques supplémentaires doivent être appliqués aux images de NDSI pour déterminer la présence de névés permanents. Deux éléments du paysage sont visualisés comme de la neige sur les images NDSI : les lacs et les glaciers.

Premièrement, les glaciers sont problématiques, car ils sont partiellement couverts de neige et ont des caractéristiques spectrométriques identiques à la neige. De ce fait, les valeurs du NDSI des glaciers sont identiques à celles de la neige. Un inventaire des glaciers disponible directement sur Google Earth Engine (GLIMS) est utilisé pour masquer totalement la surface de tous les glaciers de la zone d'étude. L'inventaire GLIMS (Global Land Ice Measurements From Space) permet d'examiner de manière continue l'étendue des glaciers depuis l'espace partout sur Terre (Raup et al., 2007 ; GLIMS et NSIDC, 2018).

Tout comme les glaciers, les valeurs de NDSI des lacs sont sensiblement identiques aux valeurs obtenues pour la neige. Pour remédier à ce problème, un inventaire des lacs a permis d'enlever certains lacs des images. Puisque les lacs de barrage ont régulièrement un niveau d'eau très fluctuant, il est nécessaire de mettre en place une zone tampon de 250 mètres autour des lacs. Cette méthode permet de réduire le nombre de pixels répertoriés comme névés permanents aux alentours des lacs. Sans cette zone tampon, beaucoup de pixels peuvent être identifiés comme névés permanents alors que leur apparition est uniquement causée par la fluctuation du niveau du lac durant l'année.

### 3.2.2.2 Détermination des névés permanents

À la suite de l'application de ces masques, les images contenant uniquement le NDSI peuvent être exportées et retravaillées sur Matlab pour déterminer la présence de névés permanents. Finalement, une cinquantaine d'images sont utilisées sur une période de vingt ans (1999-2019). Les images sont prises durant la période estivale afin de voir au mieux les névés permanents.

Plusieurs images booléennes ont été créées sur Matlab : la répartition des névés permanents sur une année, cinq ans, dix ans, ou vingt ans en prenant toutes les images disponibles. La répartition des névés permanents avec un seuil de confiance inférieur à 100% est aussi produite. Ce seuil de confiance est expliqué par la suite.

Brièvement expliqué, le code Matlab permet de rechercher dans la collection d'images sélectionnées (un an, cinq ans, dix ans ou vingt ans), tous les pixels ayant une valeur supérieure au seuil du NDSI équivalent à 0.4. Ensuite, un taux de confiance lié à la série temporelle est créé. Ce taux de confiance permet d'accepter une marge d'erreur dans le modèle. Si ce pourcentage est à 100%, les névés permanents sont définis par la présence de neige (NDSI supérieur à 0.4) pour toutes les images. Si un pixel d'une seule image a une valeur inférieure à 0.4, le pixel de l'image finale est comptabilisé comme n'étant pas un névé permanent et, par conséquent, a une valeur de 0. Il faut donc que le pixel de chaque image soit supérieur à 0.4 pour que le programme l'identifie comme névé permanent. Le névé permanent a une valeur assignée de 1. Toutefois, des erreurs d'identification peuvent apparaître à cause de la résolution spatiale du satellite Landsat. De ce fait, l'intégration de la marge d'erreur est nécessaire. En choisissant un taux de confiance lié à la série temporelle inférieur à 100%, une ou plusieurs images peuvent avoir des pixels avec une valeur inférieure à 0.4 amenant tout de même à un résultat final de pixels considérés comme névés permanents. Le taux de confiance est appliqué afin d'avoir une identification de névés permanents cohérente. Un taux de confiance inférieur à 100% ne peut pas être appliqué pour une durée d'une année, car le nombre d'images est insuffisant. Cependant, pour l'analyse sur cinq ans ou dix ans, il est possible de réduire le seuil de confiance pour identifier davantage de névés permanents. Le pourcentage obtenu correspond au nombre d'images utilisées divisé par le nombre d'images total. De manière à garder un résultat proche de la réalité, ce taux de confiance n'est jamais inférieur à 80%.

### 3.2.2.3 Méthodes d'analyse

À la suite de l'application du modèle, les premiers résultats bruts sont obtenus et reproduisent des cartes de névés permanents sur des périodes d'un, cinq, dix ou vingt ans. Une analyse qualitative des névés permanents est produite afin de voir où ils sont placés et quels sont les endroits en commun avec la carte de répartition du pergélisol. Le modèle d'occurrence du pergélisol est issu de la thèse de doctorat de Deluigi (2018). D'autres paramètres tels qu'un inventaire des glaciers rocheux ou la marge proglaciaire proviennent aussi de sa thèse.

L'analyse qualitative des névés permanents a pour but de visualiser les erreurs et d'évaluer la qualité du modèle. Pour ce faire, un zoom sur certaines zones précises est effectué afin de déterminer si les pixels identifiés comme névés permanents sont corrects ou non. Cette partie se focalise sur les névés permanents présents sur cinq années, car les résultats sont les plus exploitables. Il semble en effet qu'une plus grande disparité des résultats apparaisse sur les cartes de névés permanents annuelles, tandis que pour les résultats



sur dix ou vingt ans, très peu de névés permanents sont identifiés en raison d'une comparaison trop complexe des images.

Finalement, le nombre de pixels en commun entre deux années est calculé pour certaines années spécifiques afin de comparer directement certaines années entre elles. La base de données climatiques MétéoSuisse (2019) permet de mettre en avant certaines années avec des conditions particulières (étés chauds ou froids). Ces données permettent d'avoir un outil supplémentaire pour choisir des années spécifiques à comparer.

Quelques graphiques en nuages de points sont aussi mis en place pour l'analyse des névés permanents. Afin de pouvoir mettre en relation les névés permanents et la carte du pergélisol, une probabilité de présence de névés permanents a été créée à partir d'images de névés permanents. Après avoir regroupé toutes les images de névés annuels, une addition de toutes les valeurs des images puis une division par le nombre d'images permettent d'obtenir le pourcentage de probabilité de présence de névés permanents pour chaque pixel. Pour le cas des névés permanents, l'échantillon utilisé est stratifié afin d'avoir un maximum d'information sur le graphique. Un graphique non stratifié ne mène pas à des résultats concluants, car les points se situent majoritairement aux valeurs élevées de probabilité de présence du pergélisol et le nombre de points sur le graphique est faible. L'échantillon pris pour ces graphiques est de 1000 points.

### 3.2.3 Identification de la durée d'enneigement

#### 3.2.3.1 Données utilisées

Tout le traitement de données de durée d'enneigement se fait sur Google Earth Engine. Premièrement, au vu des données et du temps de retour des satellites, il est nécessaire de maximiser le nombre d'images utilisées pour affiner le résultat final. C'est pour cette raison que la fonction « merge » est utilisée pour prendre toutes les collections Landsat disponibles durant la période d'étude. Cela signifie que les images proviennent à nouveau des satellites Landsat 5, 7 et 8. Afin de réduire la taille de la collection et la durée de traitement de données, une diminution du nombre de bandes est produite. En effet, seules quelques bandes sont utiles pour le calcul du NDSI (le vert et le proche infrarouge).

#### 3.2.3.2 Traitement de données

La durée d'enneigement est obtenue à partir d'une fonction annuelle qui se répète vingt fois. Cette répétition correspond au nombre d'années étudiées. L'opération s'inspire des boucles qui sont fréquemment utilisées sur d'autres logiciels comme Matlab, mais le traitement est différent. À l'intérieur de cette boucle, il est nécessaire d'intégrer toute la partie permettant de calculer la durée d'enneigement de chaque pixel. Dans la fonction, les différents filtres liés aux glaciers et aux lacs sont repris afin de réduire la zone d'étude et de réduire le nombre potentiel d'erreurs. La collection est aussi modifiée afin de se focaliser uniquement sur les

bandes nécessaires à la fonction des dates d'enneigement. Premièrement, le centre d'intérêt se porte sur le NDSI à partir duquel la bande « snow » qui correspond aux pixels dont le NDSI est supérieur à 0.4 est extraite. Deuxièmement, une bande liée aux jours d'obtention des images (« DOY » ou « day of year ») est produite. Cette dernière est obtenue à partir des métadonnées des images. En effet, la propriété « system :time\_start » définit la date d'obtention de l'image. À partir de cette propriété, il est possible d'obtenir directement le jour et l'année d'une image. La bande « DOY » est utilisée pour la jointure et la transformation des dates ainsi que pour l'obtention de la durée d'enneigement.

Afin de calculer la durée d'enneigement indisponible dans les données, diverses étapes doivent être mises en place. Premièrement, un filtre temporel est appliqué pour lisser les résultats bruts. Pour chaque image, les images les plus proches temporellement (40 jours avant et 40 jours après) sont prises en compte pour évaluer la probabilité de présence de la neige. Cette opération est répétée pour chaque image sur une année entière et permet de lisser la série à partir de plusieurs images obtenues proche de la date de l'image principale. Puis l'enneigement moyen est repris à partir des « voisins » ou « neighbors » comme appelés dans le code. À partir de cet enneigement moyen, il est possible de déduire la date de première et dernière neige grâce à des réducteurs temporels sélectionnant la première image avec des valeurs non nulles d'enneigement et la dernière image avec des valeurs non nulles.

Quelques problèmes étant liés au « DOY » sont encore présents dans le modèle. En effet, le « DOY » reprend les jours du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre. La durée d'enneigement est calculée sur deux années différentes, car la première neige apparaît entre septembre et octobre et la dernière neige disparaît durant l'année suivante. De ce fait, les dates de premières neiges et dernières neiges doivent coïncider avec les dates proposées par le modèle ce qui est impossible du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre. L'utilisation de l'année hydrologique n'est pas idéale non plus, car la probabilité de premières neiges avant début octobre est élevée. Les données de MétéoSuisse (2019) prises à la station d'Arosa à environ 1800 mètres dans les Alpes montrent les dates de premières neiges depuis les années 1930 (*Figure 6*). Dans la plupart des cas, la première neige apparaît durant le mois de septembre. Étant donné que certaines zones de cette recherche ont des altitudes encore plus élevées, il est probable que la neige apparaisse en même temps voire plus tôt qu'à Arosa. De ce fait, les données de cette étude sont prises de début août jusqu'à fin juillet de l'année suivante. La période de septembre à septembre de l'année suivante ainsi que celle d'octobre à octobre ont été testées lors du traitement des données. Les résultats obtenus pour ces périodes sont totalement contradictoires par rapport aux résultats d'août à août.

À la suite de cette opération, il est possible d'estimer la durée moyenne d'enneigement en appliquant la différence entre la dernière et la première neige sur chaque pixel de la région étudiée.



**Arosa**

Frühstes Datum / première date / prima data: 03-08-1983  
 Spätestes Datum / dernière date / ultima data: 29-10-1953

--- 30 % vor / avant / prima 31-08  
 -- Mittel / moyenne / media 09-09 Referenz/référence/  
 - 30 % nach / après / dopo 25-09 riferimento: 1981-2010

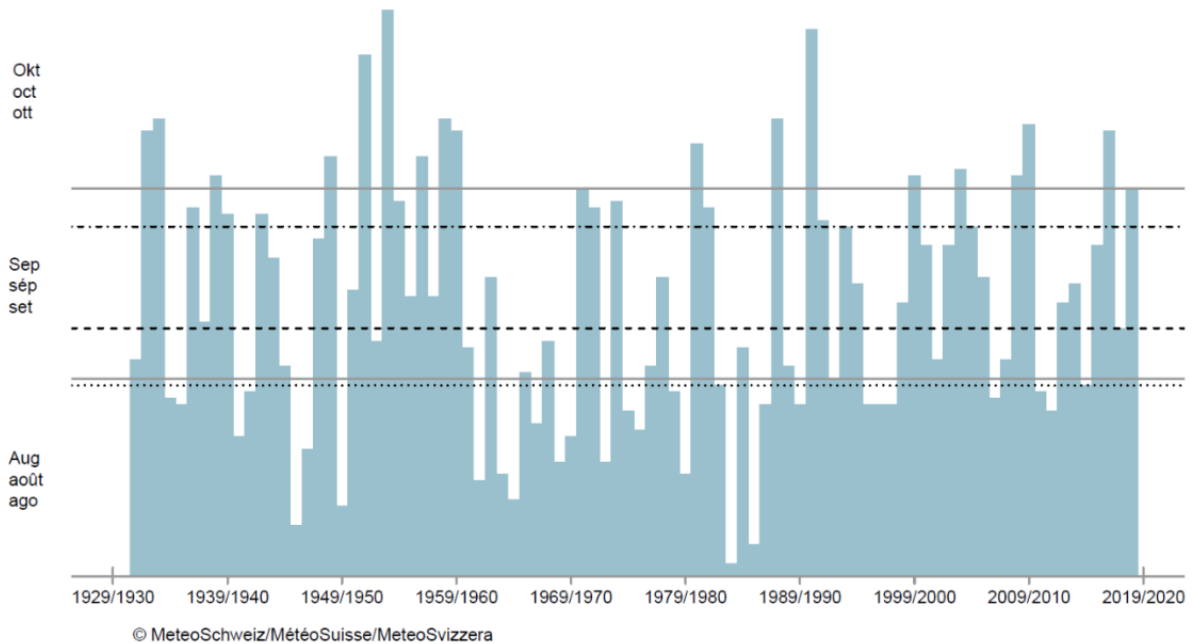


Figure 6: Dates des premières neiges à la station d'Arosa (MétéoSuisse, 2019)

Toute la partie précédente est comprise à l'intérieur d'une fonction et le traitement déjà effectué est fait sur une seule année. Étant donné que cette partie est terminée, une boucle est mise en place pour répéter l'opération vingt fois. Elle permet d'appliquer la fonction expliquée auparavant pour les vingt années à observer. Pour commencer, une liste contenant les dates (années) de 1999 à 2019 est créée correspondant aux vingt années recherchées. Ensuite, l'idée est de faire une jointure sur deux collections différentes qui sont : la liste contenant les différentes années et la fonction ayant permis d'identifier la durée d'enneigement de chaque pixel pour une année. Cette jointure a un filtre temporel de 180 jours pour aller chercher les images 180 jours avant et 180 jours après (plus ou moins une année). En d'autres termes, la jointure permet de classer les différentes images de durée d'enneigement par année. Après l'application de cette jointure, la liste contient toutes les données de durée d'enneigement.

### 3.2.3.3 Statistiques générales

Quelques méthodes statistiques comme la médiane et la moyenne sont utilisées afin d'avoir une vision générale sur les vingt années étudiées. Il est aussi possible d'observer la durée d'enneigement de pixels spécifiques sous forme de graphique, comme le démontre la Figure 7. Sur ce graphique, la durée d'enneigement d'un pixel sur toutes les années est visible.

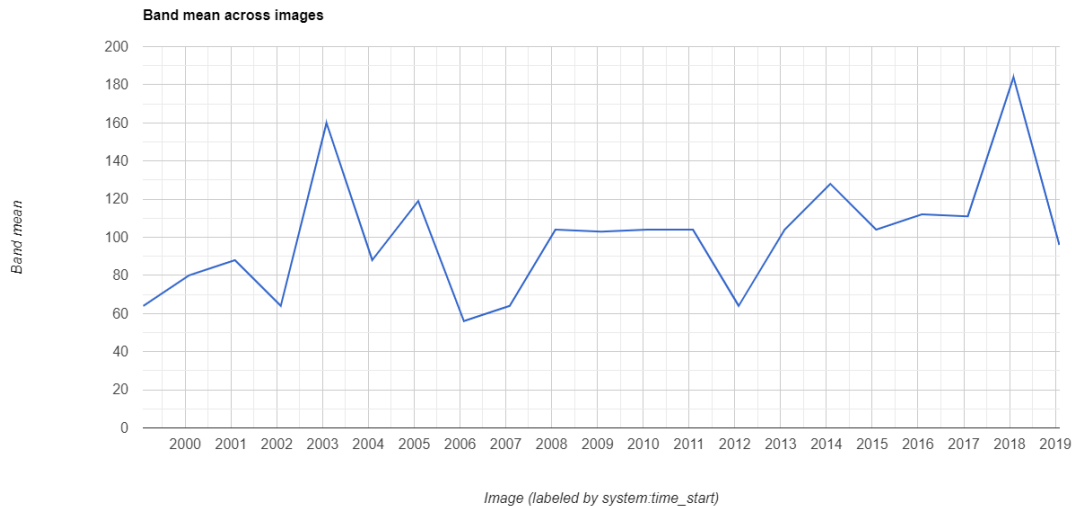


Figure 7: Durée d'enneigement d'un pixel pour chaque année étudiée

### 3.2.3.4 Méthodes d'analyse

Étant donné que le résultat brut est complexe à analyser, il est nécessaire de modifier le rendu du résultat. Premièrement, les résultats bruts correspondent à des cartes en nuance de gris, où chaque nuance correspond à une valeur de durée d'enneigement. Des changements de ton de couleur sont produits pour rendre le résultat plus explicite visuellement. Ensuite, l'analyse se fait sur chaque région d'étude et pour des années spécifiques afin d'évaluer la relation entre la durée d'enneigement et les conditions climatiques sur une année précise.

En ce qui concerne la comparaison des résultats, il est nécessaire de faire un choix sur les années sélectionnées. Les mêmes années utilisées pour les névés permanents sont reprises, car elles représentent bien les années où de grandes différences peuvent être visibles sur le terrain.

Afin de comparer les durées d'enneigement avec la carte du pergélisol de Deluigi (2018), un masque est appliqué pour obtenir les durées d'enneigement uniquement sur les zones où la probabilité d'avoir du pergélisol est supérieure à 50%.

Afin d'évaluer la surface de pixels ayant une durée d'enneigement spécifique, des catégories représentant des durées d'enneigement supérieures à 200, 250, 300 et 350 jours sont créées. Le nombre de pixels est calculé pour les années aux conditions thermiques extrêmes et pour chaque durée d'enneigement spécifique. Une transformation en surface (km<sup>2</sup>) permet ensuite d'observer les différences.

Des graphiques en nuage de points, ou aussi appelés « scatter plot », sont mis en place. Plusieurs graphiques sont présentés afin d'obtenir un maximum d'information sur le comportement de la durée d'enneigement vis-à-vis du pergélisol. Ces graphiques sont extraits à partir d'un échantillon de pixels suffisamment large. Les pixels sont choisis aléatoirement sur la zone d'étude. La taille de l'échantillon varie en fonction des besoins et des limites de calcul de Google Earth Engine. En effet, pour certains graphiques un échantillon de 5000

UNIL | Université de Lausanne

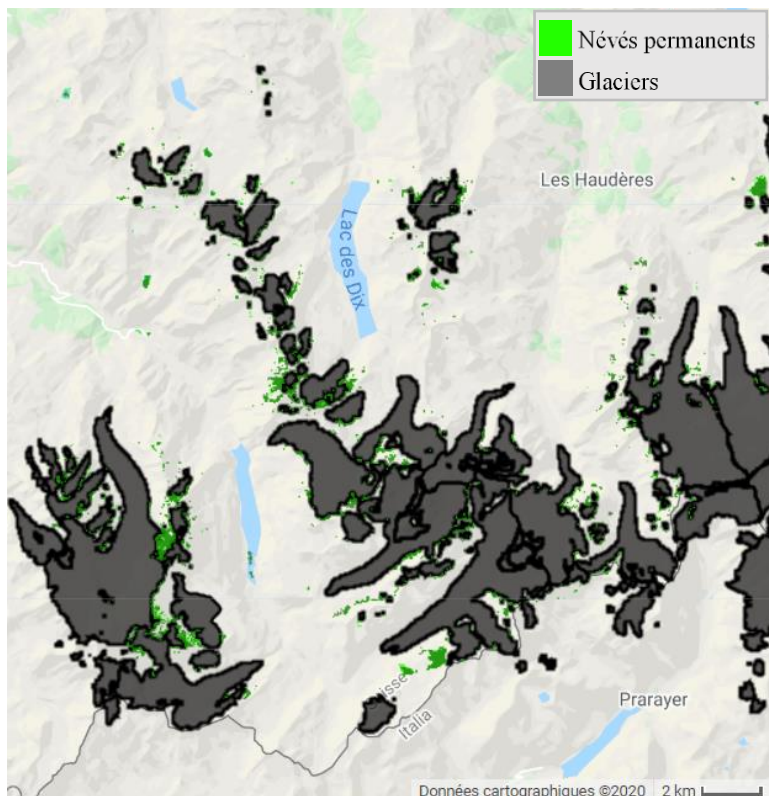
pixels est suffisant, car les pixels en commun entre la carte du pergélisol et le deuxième paramètre sont bien dispersés dans la zone. Mais pour d'autres graphiques, les pixels en communs sont rares et un échantillon de pixels plus large peut être nécessaire. Cependant, la capacité de mémoire de Google Earth Engine peut arriver à saturation si la zone d'étude est trop large et que le nombre de pixels est trop élevé.

## 4. Résultats

### 4.1 Névés permanents

#### 4.1.1 Analyse quantitative

Premièrement, la situation générale de la répartition des névés permanents quinquennaux est présentée sur la *Figure 8*. Les névés permanents identifiés en vert sur l'image se situent souvent proche des glaciers. De plus, ils semblent être regroupés à des endroits bien définis.



*Figure 8: Répartition des névés permanents quinquennaux*

Deuxièmement, pour cette partie, le but est d'étudier les névés permanents annuels afin de voir si certaines relations existent entre eux. Une méthode permettant de choisir certaines années spécifiques doit être utilisée. Les données climatiques produites par MétéoSuisse (2019) sont adéquates pour ressortir certaines années avec des conditions climatiques spéciales. Les valeurs extrêmes recherchées sont les températures estivales extrêmes impactant considérablement la fonte de la neige. D'après la *Figure 9* reproduisant les écarts de température par rapport à la période de référence 1961-1990, quelques étés chauds et froids sont identifiables. Deux années extrêmement chaudes sont répertoriées : 2003 et 2015. Deux années dont les étés ont été considérablement froids peuvent aussi être identifiées. Il s'agit de 2001 et 2011. Ces années sont utilisées pour évaluer s'il existe un rapport entre la neige et les conditions climatiques.

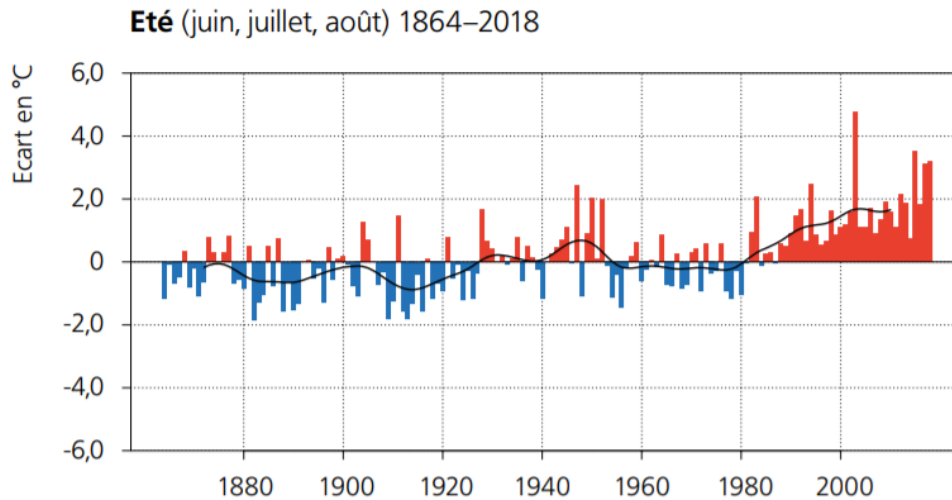


Figure 9: Écart de température en été de 1864 à 2018 (d'après MétéoSuisse, 2019)

Afin d'analyser ces années spécifiques de manière quantitative, un calcul du nombre de pixels puis de l'aire en km<sup>2</sup> est produit. De plus, les pixels de névés permanents en commun avec la carte du pergélisol sont identifiés et quantifiés. Les graphiques en nuage de points sont aussi présentés dans cette partie.

Trois échantillons sont utilisés pour présenter les graphiques en nuage de points pour les névés permanents (Figure 10). Le premier calcule la probabilité d'avoir des névés sur les vingt ans à partir des névés permanents annuels tandis que les deux autres calculent la probabilité d'avoir des névés sur vingt ans à partir des données obtenues sur cinq ans avec un taux de confiance de 80% (Figure 10 B) et 90% (Figure 10 C).

Premièrement, la distribution des points est définie par la probabilité de présence des névés. Les points se situent toujours sur une valeur fixe de probabilité de présence de névés. Par exemple, pour le graphe basé sur les névés annuels (Figure 10 A), tous les points sont séparés de 0.05, car la collection contient vingt images. De ce fait, les valeurs se distribuent entre 0 et 1.

La distribution générale du graphique des névés annuels (Figure 10 A) semble montrer que la probabilité d'avoir du pergélisol augmente lorsque la probabilité d'avoir des névés est élevée. En effet, aux valeurs de probabilité de névés élevées, la valeur de présence de pergélisol y est aussi élevée dans tous les cas. Au contraire, lorsque les valeurs de probabilité de présence de névés sont basses, la variabilité des valeurs est plus forte bien qu'un plus grand nombre de points se trouvent aux valeurs de probabilité de pergélisol élevées. Une faible probabilité d'avoir un névé n'indique pas forcément une absence de névé à cet endroit. Cette valeur indique uniquement qu'un névé est présent durant une ou deux années spécifiques. Ces faibles valeurs de pourcentage de névés peuvent être expliquées de deux manières. La première est que le modèle a déterminé de manière erronée la présence d'un névé. La seconde est que la distribution spatiale des névés peut changer au cours du temps. Les conditions climatiques ont considérablement changé au cours des vingt dernières

années ce qui a perturbé la répartition de la neige et des névés. De ce fait, les deux hypothèses sont envisageables.

Les graphiques basés sur les images faites sur cinq ans ont des intervalles de 0.25 vu que quatre images sont utilisées (*Figure 10 B et C*). Quel que soit le taux de confiance, la probabilité d'avoir du pergélisol est presque toujours supérieure à 0.5 et une accumulation de points se fait entre 0.7 et 1. Cela démontre qu'en présence de névés permanents, la probabilité d'avoir du pergélisol est souvent élevée. Très peu de différences sont visibles entre les deux derniers graphiques. La seule différence visible se situe à une valeur de probabilité de névés de 1. En effet, avec une marge d'erreur plus faible (*Figure 10 C*), très peu de névés se retrouvent sur les quatre images.

Le coefficient de détermination  $R^2$  a pour but de prédire la qualité de prédiction de deux paramètres. En statistiques, un coefficient égal à 0 signifie que la droite de régression ou ligne de tendance ne permet pas d'expliquer la distribution des points. Au contraire, un coefficient égal à 1 signifie que la ligne de tendance permet d'expliquer tous les points du graphique. En d'autres termes, plus le coefficient tend vers une valeur haute, moins les points sont dispersés autour de la ligne de tendance. Le coefficient  $R^2$  est proche de 0 pour chaque graphique ce qui signifie que la relation entre les névés permanents et le pergélisol est difficile à montrer à partir de ces données. Quant à la ligne de tendance, elle démontre que la probabilité de présence du pergélisol baisse lorsque la probabilité de présence de névés permanents est élevée. Cependant, ce résultat est fortement influencé par l'échantillon de pixels de névés permanents. En effet, lorsque la probabilité de présence de névés est faible, l'échantillon contient de nombreux pixels dont la plupart ont une valeur de probabilité de présence du pergélisol élevée. Lorsque la probabilité de présence de névés permanents est élevée, l'échantillon contient très peu de données. Ces dernières ont des valeurs de présence du pergélisol entre 0.7 et 1, mais ces « faibles » valeurs suffisent à influencer la ligne de tendance. La ligne de tendance démontre tout de même que lorsque des névés permanents sont identifiés, la probabilité de présence du pergélisol est élevée dans la plupart des cas.

Pour la seconde partie de l'analyse quantitative des névés permanents, un intérêt plus approfondi est mis sur l'aire des pixels de névés permanents. Le *Tableau 1* met en avant l'aire de névés permanents dans différentes situations. La catégorie des regroupements de cinq ou dix ans signifie que le calcul est basé sur les névés permanents faits sur cinq ans (névés de 1999 à 2004, de 2004 à 2009, de 2009 à 2014, de 2014 à 2019) et qu'ils sont regroupés afin d'avoir une vision générale sur vingt ans. Quant aux pourcentages de 80% et 90%, ils représentent le taux de confiance moyen.

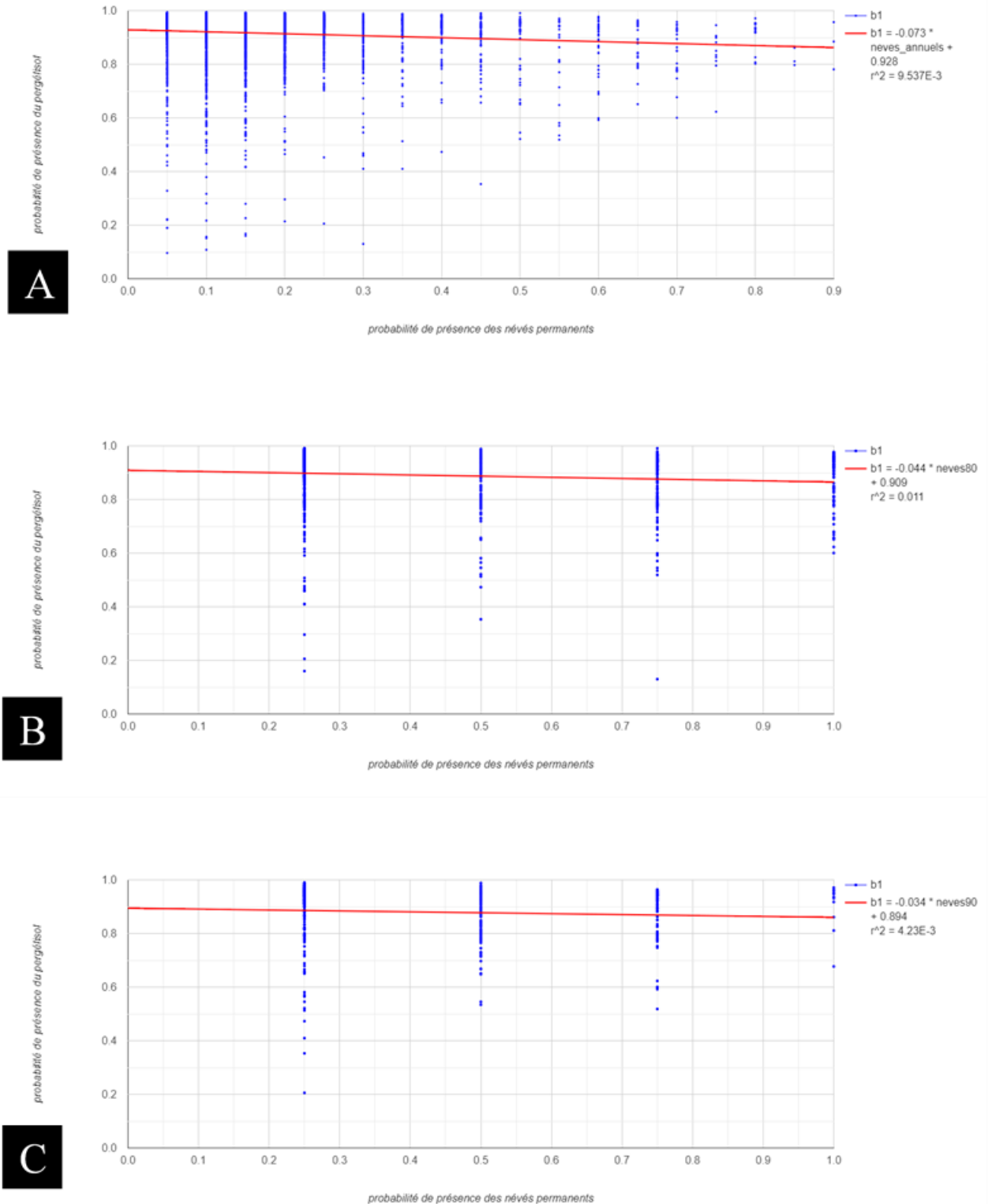


Figure 10: Relation entre névés permanents et pergélisol : A : en utilisant chaque année, B : en regroupant les névés permanents quinquennaux avec un taux de confiance supérieur à 80%, C : en regroupant les névés permanents quinquennaux avec un taux de confiance supérieur à 90%

Les résultats sont divergents entre les différentes catégories. Quand l'attention est portée sur une vision globale sur vingt ans, l'aire totale et l'aire en commun avec la carte du pergélisol sont faibles. Très peu de névés permanents se retrouvent aux zones où la probabilité d'avoir du pergélisol est supérieure à 50%. Les résultats pour les névés permanents annuels divergent considérablement de ceux des regroupements. En effet, en général, l'aire est plus grande que pour les regroupements parce que les regroupements sont construits sur la base de l'intersection entre les valeurs sur cinq ans. Le pourcentage en commun entre l'aire totale et la carte du pergélisol pour les névés annuels diverge entre les années, mais toutes les valeurs sont assez faibles. La valeur supérieure à 18% en 2003 peut être liée aux chaleurs extrêmes survenues durant cette année. En effet, durant cette année, l'aire totale de névés permanents est faible en comparaison avec les autres années. Étant donné que les névés permanents restants sont les plus résistants aux températures élevées, la probabilité de retrouver du pergélisol au-dessous des névés est plus élevée ce qui semble coïncider avec le résultat obtenu en 2003. De nombreux névés permanents sont visibles en 2001 ce qui peut potentiellement être lié à la période froide vécue durant cette année-là.

Au vu de la divergence des résultats entre eux, il est important de rappeler que les données sont issues d'images avec une résolution spatiale de 30 m. De ce fait, de nombreuses erreurs peuvent être liées à la qualité du modèle utilisé.

*Tableau 1: Aire des pixels de névés permanents et des pixels en commun avec la carte du pergélisol*

Névés permanents	Regroupement de cinq ans		Regroupement de dix ans		Névés permanents annuels			
	80%	90%	80%	90%	2001	2003	2011	2015
<b>Aire totale [km<sup>2</sup>]</b>	1.7517	0.4635	3.1501	1.025	17.9253	2.0997	4.7835	4.4055
<b>Aire en commun avec la carte du pergélisol [km<sup>2</sup>]</b>	0.0398	0.0038	0.0792	0.0113	1.7131	0.3974	0.07434	0.3634
<b>% entre l'aire totale et le pergélisol</b>	2.2721	0.8198	2.5142	1.1024	9.5569	18.9265	1.5533	8.2488

#### 4.1.2 Analyse qualitative

De nombreuses images de névés permanents ont été obtenues, mais un certain nombre d'incertitudes sont présentes dans le modèle. Afin d'analyser un maximum de données, une analyse entre les images sur une année, 5 ans ou dix ans est faite. D'autres données sont utilisées afin de comprendre la répartition des névés permanents faite par le modèle. Au premier abord, les névés permanents produits sur une durée de cinq ans sont les plus convaincants. En effet, les images annuelles surestiment les névés permanents ce qui augmente considérablement le nombre d'erreurs tandis que les images sur dix ans semblent sous-estimer la présence de



névés. C'est pour cette raison qu'un accent plus prononcé est mis sur l'analyse des images sur cinq ans. Le taux de confiance utilisé pour l'analyse des images sur cinq ans est aux alentours de 80% et dépend donc du nombre d'images. L'intérêt de l'analyse qualitative est d'analyser le résultat général du modèle et de voir où résident les problèmes.

#### 4.1.2.1 Névés permanents corrects

Premièrement, il est intéressant d'analyser les névés permanents qui semblent être correctement déterminés par le modèle. Afin de voir le plus correctement possible les différents névés permanents en fonction de la période étudiée, quelques simplifications sont faites. Au lieu d'avoir quatre groupes de névés permanents quinquennaux qui peuvent se superposer, trois groupes sont utilisés afin d'obtenir une meilleure visualisation des données. La *Figure 11* met en avant ces trois catégories pour la zone aux alentours du Grand Tavé. Les catégories de vert correspondent aux emplacements des névés permanents quinquennaux pour les périodes de 1999-2004 ou 2004-2009 (vert clair) et pour les périodes de 2009-2014 ou 2014-2019 (vert foncé). Finalement, la catégorie de pixels bleus correspond aux emplacements des névés permanents repérés durant toute la période d'étude (1999-2019). En d'autres termes, cette catégorie représente l'intersection entre chaque image quinquennale. Ces trois groupes se superposent toujours, mais le code de couleur permet de visualiser assez aisément si les pixels se superposent ou non. Par exemple, il est logique que sous les pixels bleus, des pixels vert clair et vert foncé soient présents. La seule complication provient de la superposition des névés permanents de 1999-2009 (vert clair) et 2009-2019 (vert foncé) n'étant pas catégorisés comme des névés permanents de 1999-2019 (bleu). Les névés permanents issus des années 1999-2009 correspondent à une union entre 1999-2004 et 2004-2009 ce qui implique qu'il est possible qu'un pixel soit considéré comme névé dans cette catégorie sans qu'il y en ait dans une des deux périodes. C'est pour cette raison qu'ils ne sont pas catégorisés comme névés de 1999-2019. Cette simplification a été utilisée afin d'améliorer le résultat visuel.

La *Figure 11* montre la répartition des névés permanents sur la zone du Grand Tavé. Les pixels identifiés comme névés semblent correspondre à des zones enneigées sur l'image satellite. Une partie des pixels se situent sur des marges proglaciaires. Cela veut dire qu'au Petit Âge glaciaire, un glacier était présent à cet endroit. Il est donc tout à fait envisageable que des névés permanents puissent apparaître sur ces marges, car les conditions sont adéquates pour la présence de névés permanents. Il y a aussi la présence de glaciers rocheux actifs (*Figure 11 (A)*). Comme expliqué dans la partie de description du pergélisol, la présence de glaciers rocheux indique l'existence présente ou passée de pergélisol. De ce fait, si des névés permanents se trouvent sur des glaciers rocheux, la probabilité de présence du pergélisol est très élevée. Dans le cas présent, très peu de névés permanents sont identifiés sur les glaciers rocheux. Sur cette image, les pixels sont sur des zones enneigées, mais certaines zones enneigées ne sont pas identifiées par le modèle selon l'image satellite utilisée. Ces neiges négligées par le modèle ne sont pas forcément des névés permanents, mais donnent une

indication de l'emplacement de la neige en été. Le problème lié à la l'oubli de distinction de ces névés provient d'une résolution spatiale trop faible. En effet, ces endroits enneigés avec une petite superficie ont peu de chance d'être identifiés par le modèle si d'autres types de couvertures du sol l'entourent, car la résolution spatiale est de seulement 30 mètres. Finalement, seuls 13 pixels sont identifiés comme névés permanents sur toute les années (pixels bleus). Cela indique que la répartition des névés dans l'espace a changé ou que le modèle commet quelques erreurs lors de l'interprétation de la couverture du sol.

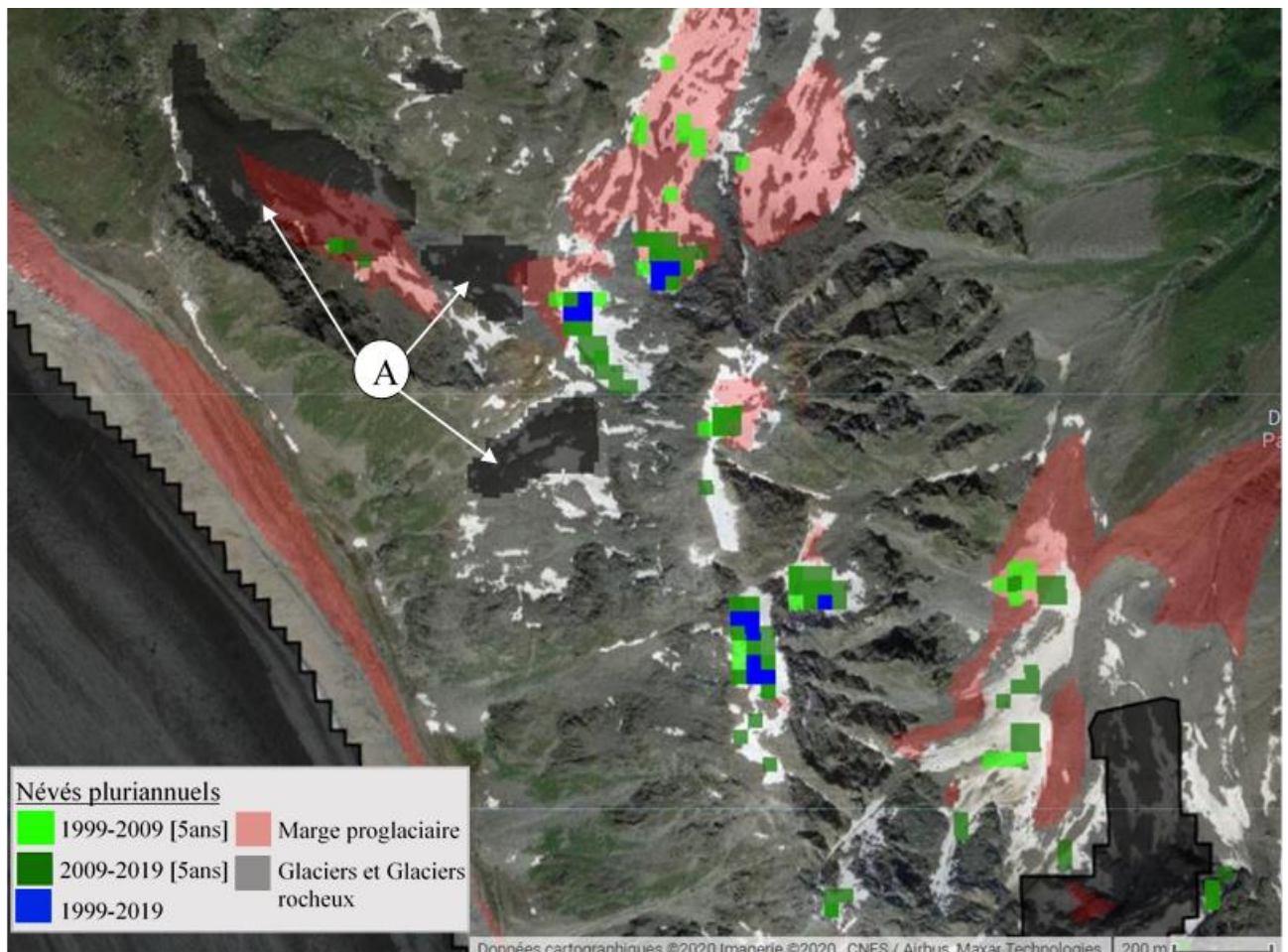


Figure 11: « Névés permanents » dans la zone à l'ouest du lac de Mauvoisin proche du sommet du Grand Tavé ; A : glaciers rocheux

La deuxième image (Figure 12) est située proche du glacier de l'En Darrey (1) et du glacier du Pleureur (2). La majorité des pixels identifiés comme névés se situent à proximité des glaciers et des marges proglaciaires (A). De ce fait, la question est de savoir si ces pixels sont réellement des névés permanents ou s'ils font partie du glacier lui-même. Cette question est subjective, car la délimitation du glacier dépend fortement du shapefile « glacier » utilisé. Le nombre de pixels identifiés comme névés est largement supérieur pour le cas du Grand Tavé (Figure 11). Toutes les zones entourant les glaciers de l'En Darrey et du Pleureur sont recouvertes de névés permanents étant présent au minimum cinq ans. À l'ouest du glacier du Pleureur (Figure 12 (B)), de nombreux névés permanents sont visibles, dont certains étant présent sur les vingt années étudiées. Selon la carte topographique de la Confédération (Swisstopo, 2020), il y a la présence d'un petit glacier à cet

endroit. La présence de ce glacier insinue que les pixels ne sont pas tous identifiés correctement. Ceux étant présents sur le glacier ne sont pas des névés permanents tandis que ceux qui sont présents sur la marge proglaciaire ou aux alentours du petit glacier peuvent correspondre à des névés permanents. Le regroupement de pixels au sud du glacier de l'En Darrey (Figure 12 (C)) se situe en amont du glacier. Cette partie correspond à une ancienne partie du glacier au vu de la présence de la marge proglaciaire. De ce fait, il est probable que des névés permanents aient pu s'installer sur cette petite zone. Finalement, les pixels étant à la limite des glaciers font probablement partie des glaciers, car la base de données GLIMS est faite pour la Terre entière et il est envisageable que certaines erreurs soient présentes. Cependant, les pixels présents à une distance respectable des glaciers et se trouvant sur une zone enneigée (Figure 11 (D)) peuvent être considérés comme des névés permanents.

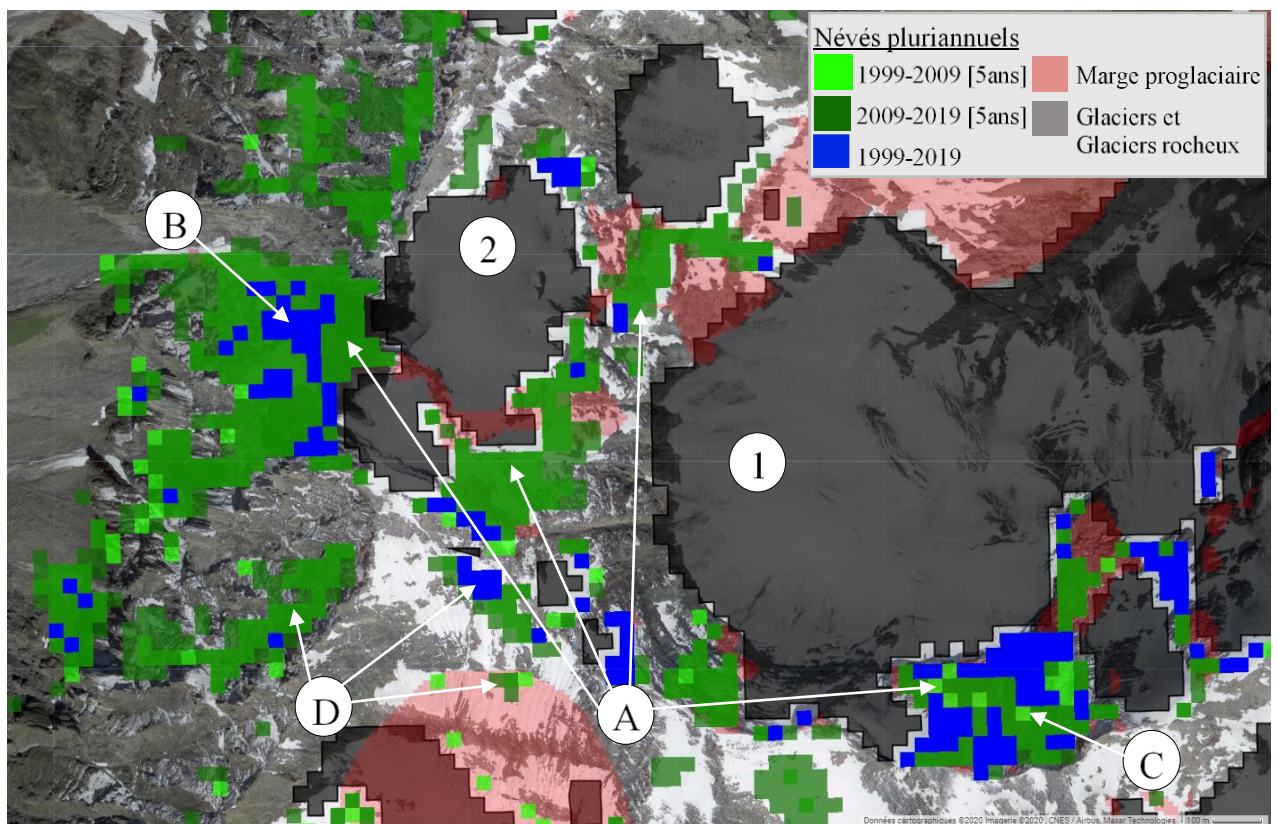


Figure 12: « Névés permanents » dans la zone aux alentours du glacier de l'En Darrey ; 1 : glacier de l'En Darrey ; 2 : glacier du Pleureur ; A : névés permanents identifiés à proximité de marges proglaciaires ; B : névés permanents identifiés à proximité d'un petit glacier non identifié par le modèle ; C : regroupement de névés permanents sur une marge proglaciaire ; D : névés permanents plus ou moins éloignés des glaciers

#### 4.1.2.2 Erreurs liées aux glaciers

Comme cela a déjà été mentionné dans le chapitre des névés permanents correctement identifiés, les glaciers posent de véritables problèmes pour l'identification des névés, car la réflectance de la surface recouvrant les glaciers est égale à celle de la neige. De ce fait, il est impossible de différencier les glaciers des névés. Pour



les séparer, la meilleure méthode consiste à enlever les glaciers du modèle. Bien qu'ils aient été masqués lors du traitement d'images, il est possible d'avoir quelques erreurs liées à leur présence.

Sur la *Figure 13*, deux regroupements de pixels sont visibles au sud de la langue glaciaire du glacier d'Otemma (*Figure 13 (A)*). Ces regroupements de pixels ont une surface assez vaste et ne ressemblent pas à des névés permanents au premier abord. L'inventaire des glaciers GLIMS ne présente aucun glacier à ces deux endroits et aucune marge proglaciaire n'est visible à ces endroits. D'autres inventaires de glaciers permettent assez facilement de voir que ces deux regroupements représentent les parties inférieures du glacier de l'Aouille (*Figure 13 (1)*). Cela signifie que certains glaciers ne sont pas répertoriés par la base de données GLIMS. Ensuite, certains pixels en amont du glacier de l'Aiguillette (*Figure 13 (B)*) semblent trop isolés pour être des névés permanents. Étant donné qu'ils suivent la limite du glacier, il est probable que ces névés fassent partie d'un glacier. La délimitation des glaciers faite par GLIMS n'est parfois pas assez précise à cause de la résolution spatiale à 30 mètres.

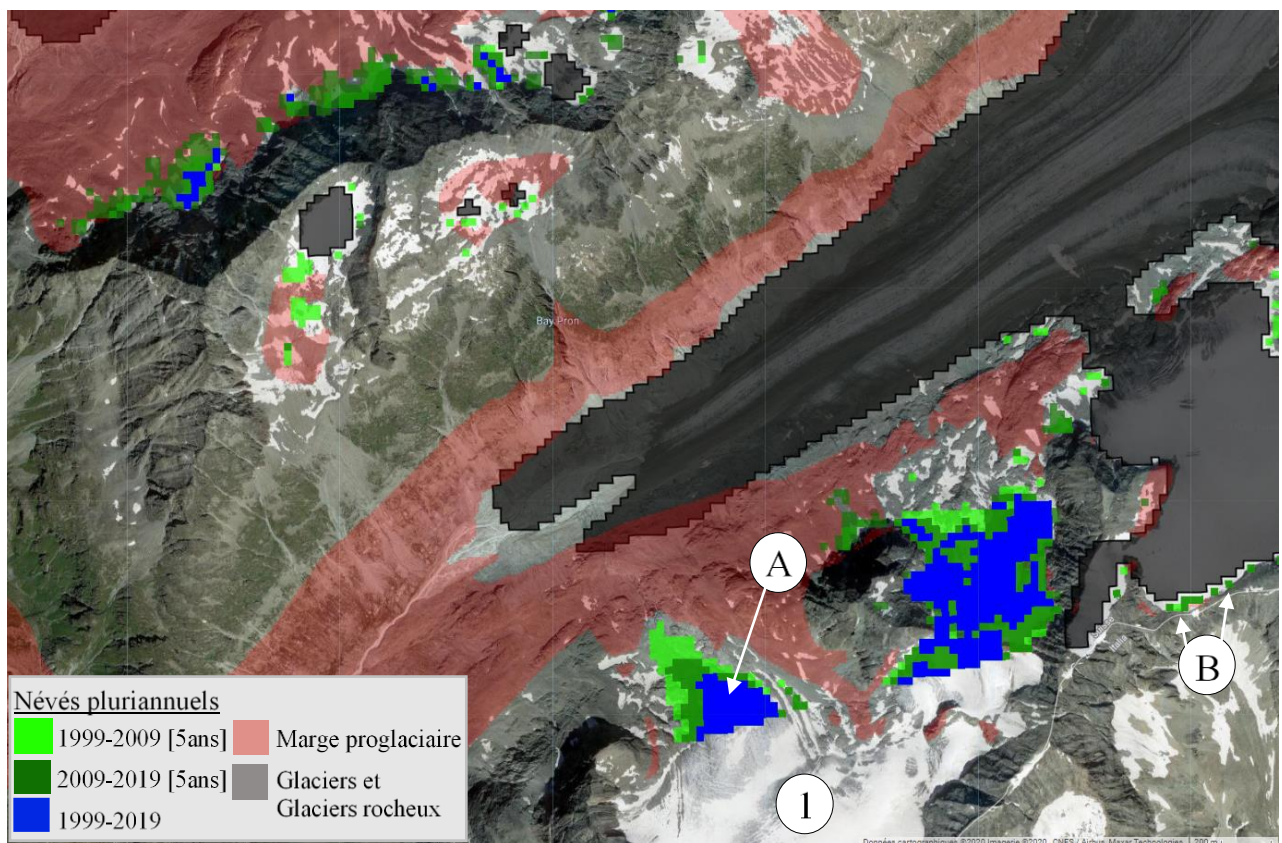


Figure 13: « Névés permanents » dans la zone adjacente au glacier d'Otemma ; 1 : glacier de l'Aouille ; A : regroupement de névés permanents correspondant à un glacier ; B : névés permanents aux limites du glacier

Ce chapitre démontre que la distinction entre les glaciers et les névés permanents sur la base d'images satellites à basse résolution peut être compliquée. En effet, un pixel identifié comme névé permanent peut se

retrouver très proche des glaciers voire sur un glacier et il devient difficile de savoir s'il correspond réellement à un névé ou s'il fait partie du glacier.

#### 4.1.2.3 Erreurs liées aux lacs

Deux cas de figure sont présents pour des névés se trouvant sur des surfaces d'eau : des pixels dans les lacs masqués ou dans des lacs qui ne sont pas masqués par le modèle. Pour rappel, un inventaire des lacs a été utilisé afin de créer un masque permettant d'enlever les lacs du modèle. Le NDSI utilisé pour déterminer la présence de neige montre que les surfaces d'eau ont une réponse spectrale identique à la neige. De ce fait, les lacs et la neige peuvent être confondus s'ils ne sont pas masqués.

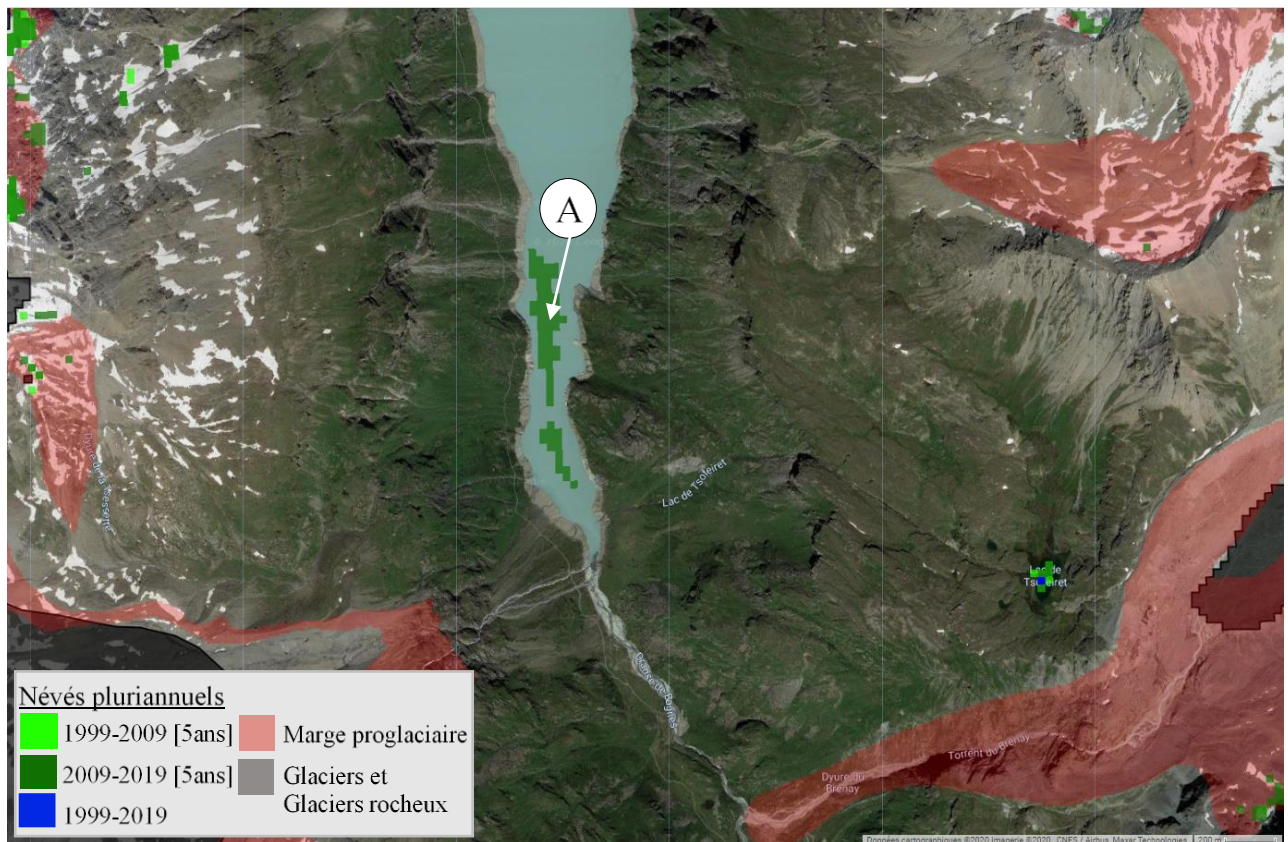


Figure 14: « Névés permanents » dans le lac de Mauvoisin ; A : névés permanents identifiés sur le lac de Mauvoisin

Pour ce premier cas de figure (Figure 14), certains pixels sont présents directement à l'intérieur du lac de Mauvoisin (Figure 14 (A)) qui a été masqué grâce au masque des lacs. Ces pixels sont identifiés ainsi, car le niveau d'un lac alpin de barrage fluctue énormément au cours de la saison et au cours des différentes années. Cela signifie que le niveau du lac utilisé pour faire l'inventaire ne correspond pas forcément au niveau du lac maximum. Bien que les névés permanents soient prédits par la présence de neige sur la quasi-totalité des images, il est possible que sur ces images le niveau d'eau soit élevé. C'est en effet le cas durant les années 2009-2019 où quelques pixels correspondant à des névés permanents se retrouvent sur la partie sud du lac de



Mauvoisin. Bien entendu, ces supposés névés permanents sont uniquement des parties du lac et en aucun cas il n'y a de la neige à cet endroit durant l'été.

Afin de minimiser ce type d'erreur, une zone tampon de 250 mètres est appliquée sur chaque lac de l'inventaire. Cette marge réduit l'impact de la fluctuation du niveau du lac tout en enlevant un minimum de parcelle pouvant correspondre à des névés permanents. Cette zone tampon de 250 mètres laisse encore apparaître quelques pixels à l'intérieur des lacs comme le démontre cet exemple, mais un compromis doit être fait entre la taille de la zone tampon et les erreurs appartenant aux lacs. Il est tout à fait possible de créer une zone tampon de 500 ou 700 mètres afin d'éliminer toutes ces erreurs, mais une telle grandeur de zone signifie aussi qu'une grande partie des zones entourant les lacs sont enlevées.

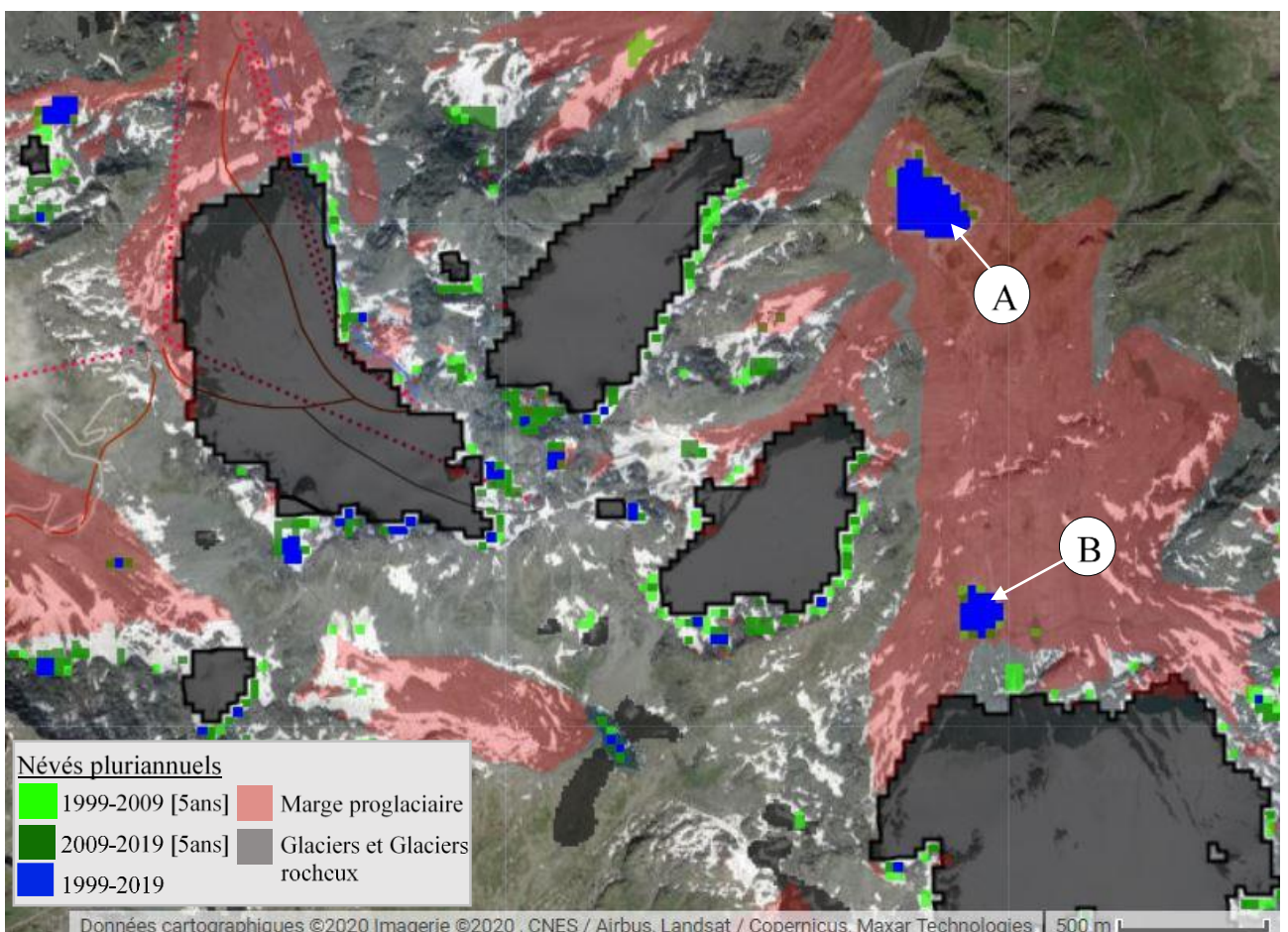


Figure 15: « Névés permanents » proche du glacier du Mont Fort et du Grand Désert ; A : névés permanents identifiés sur un lac à l'est du glacier du Mont Fort ; B : névés permanents identifiés sur un lac au sud-est du glacier du Petit Mont Fort

Sur la Figure 15, le deuxième cas de figure est présenté. Il s'agit des lacs glaciaires qui ne sont pas présents dans l'inventaire des lacs et qui ne sont donc pas masqués dans le modèle. Afin d'avoir une meilleure visualisation des lacs, la carte topographique de Swisstopo est utilisée (Figure 16).

Deux regroupements de pixels sont clairement visibles à l'est du glacier du Mont Fort (*Figure 15 (A)*) et au sud-est du glacier du Petit Mont Fort (*Figure 15 (B)*). Au vu de la carte topographique, il est clair que ce sont des petits lacs glaciaires dont leur niveau d'eau dépend de la quantité de fonte de neige (*Figure 16 (A)* et (*B*)). Il est assez probable que d'autres lacs glaciaires soient identifiés comme névés permanents par le modèle. Tous ces lacs sont présents chaque année vu qu'ils sont identifiés par le modèle comme névés permanents. Au contraire, d'autres lacs glaciaires ayant une étendue moins vaste ne sont pas identifiés par le modèle sur cette zone d'étude. Ces lacs dépendent fortement des conditions climatiques annuelles et ils ne sont donc pas présents chaque année. Cependant, il est aussi envisageable que ces lacs ne soient pas identifiés comme névés permanents, car ils sont tout simplement trop petits. En effet, la résolution spatiale à 30 mètres ne permet pas d'identifier certaines petites entités.

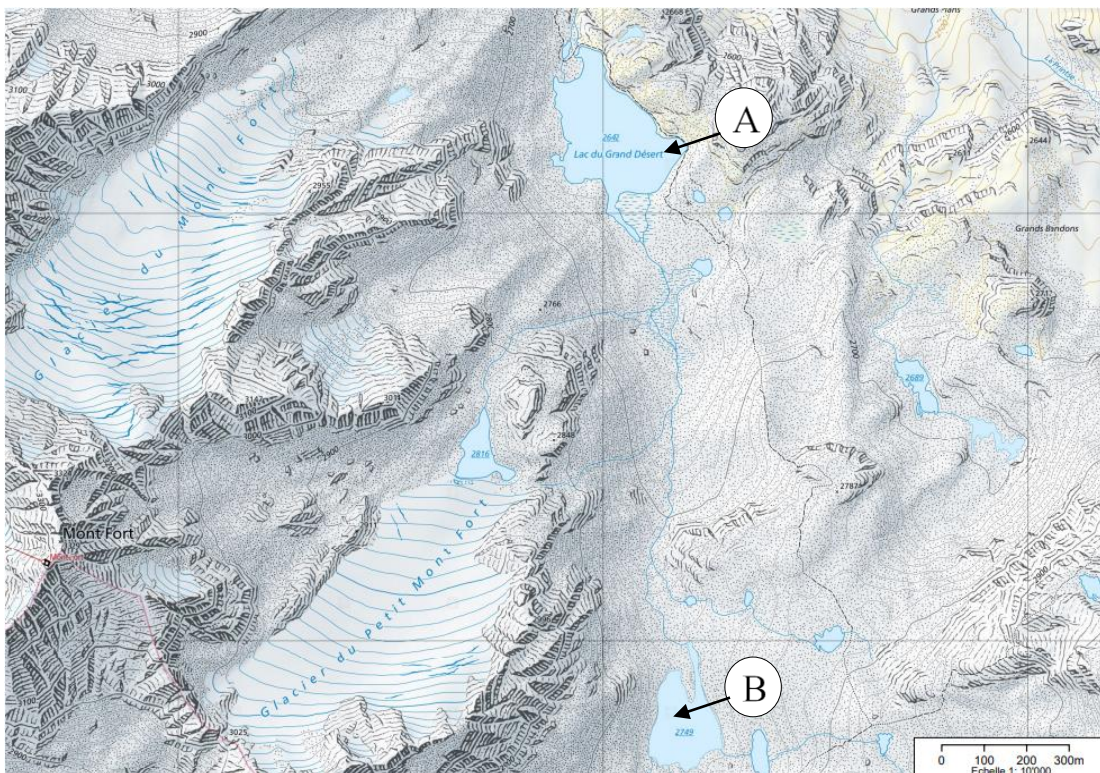


Figure 16: Carte topographique aux alentours du glacier du Mont Fort (Swisstopo, 2020) ; A : lac du Grand Désert ; B : lac au sud-est du glacier du Petit Mont Fort

#### 4.1.2.4 Névés permanents incorrects dans les parois rocheuses

L'analyse des parois rocheuses est complexe, car elle relève d'une subjectivité encore plus forte. La *Figure 17* présente le contexte au-dessus du glacier des Bouquetins (*Figure 17 (1)*) qui se situe entre 3300 et 3800 mètres. Au vu des conditions de haute altitude, il est tout à fait possible que des névés persistent plus d'une année. De plus, la carte de probabilité de pergélisol de paroi faite par Deluigi (2018) démontre que toute cette paroi peut accueillir du pergélisol. Selon le modèle de névés permanents, certains névés sont visibles directement sur la paroi au-dessus du glacier (*Figure 17 (A)*). Toutefois, une grande partie de la paroi ne



semble pas enneigée. À proximité du glacier, quelques pixels de névés sont présents sur les vingt années (Figure 17 (B)) tandis que sur la paroi, il semble que les névés soient présents que durant des périodes spécifiques.

Au vu de la résolution, le modèle a très probablement évalué de manière erronée les pixels de cette zone. Ces erreurs peuvent potentiellement provenir de la complexité des parois rocheuses à haute altitude et aux zones d'ombrages liés aux parois.

Cependant, en matière de contexte géomorphologique, toute cette zone a de fortes probabilités de présence de névés permanents. Il est possible que des névés se forment durant certaines années et qu'ils disparaissent avec le temps.

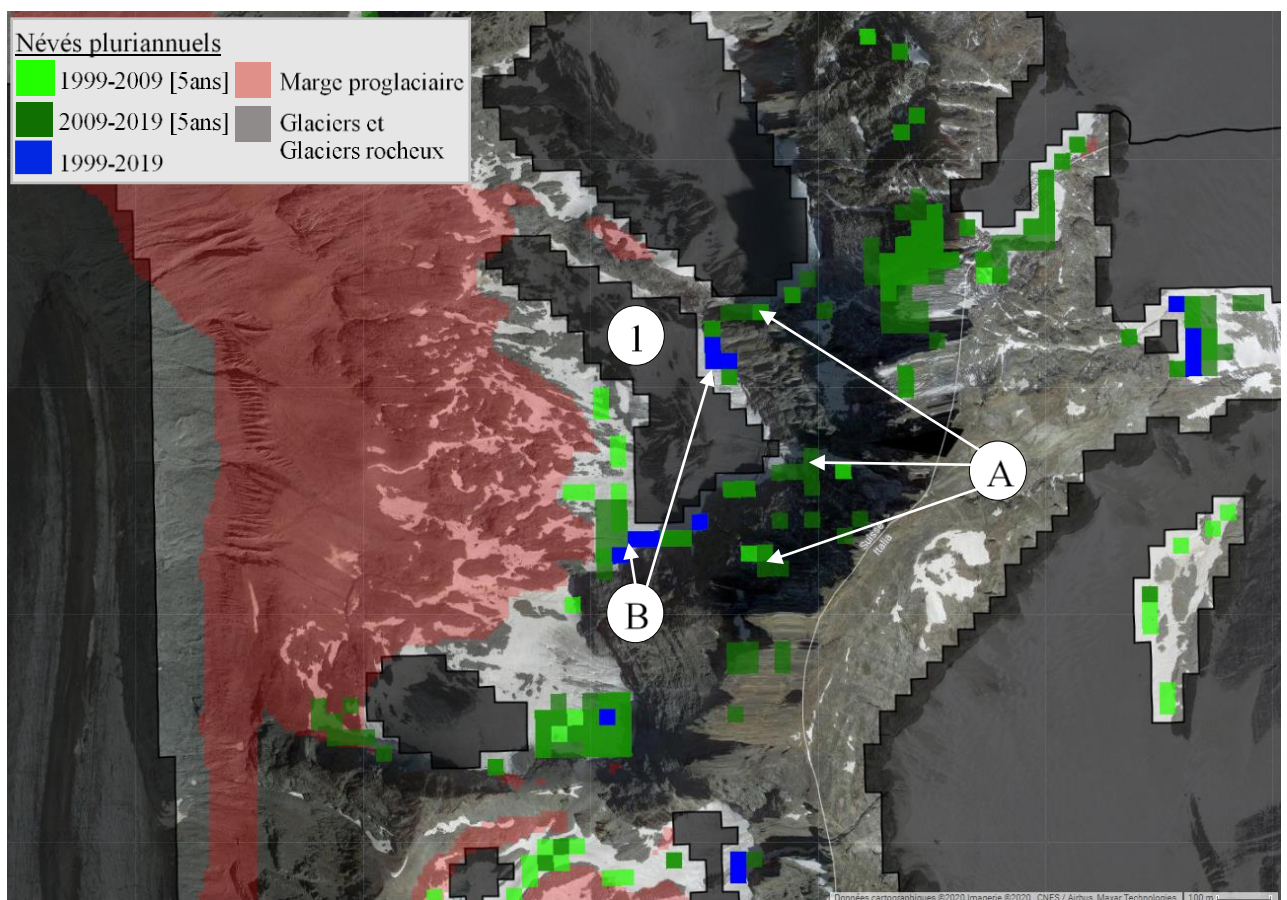


Figure 17: « Névés permanents » dans la paroi en aval du glacier des Bouquetins ; 1 : glacier des Bouquetins ; A : névés permanents identifiés sur la paroi rocheuse ; B : névés permanents identifiés à proximité du glacier

#### 4.1.2.5 Lien entre pergélisol et névés permanents

Selon la définition du pergélisol utilisée par Deluigi (2018), les glaciers et marges proglaciaires sont ôtés du modèle. Cette exclusion signifie que le pergélisol ne peut pas se retrouver en présence de ces zones. Au



contraire, le modèle utilisé lors de cette étude n'exclut pas les marges proglaciaires pour l'analyse des névés permanents et de durée d'enneigement.

La *Figure 18* met en avant les névés permanents où la probabilité d'avoir du pergélisol est supérieure à 50% aux alentours des glaciers de l'En Darrey (*Figure 18 (1)*) et du Pleureur (*Figure 18 (2)*). Comme dit auparavant (cf. chapitre 4.1.1.1), une partie des névés identifiés à l'ouest du glacier du Pleureur (*Figure 18 (A)*) font partie d'une zone glaciaire. Cependant, quelques pixels de névés permanents sont présents à proximité de la marge proglaciaire. Étant donné qu'une partie des névés se situent sur des marges proglaciaires, seuls quelques pixels de névés permanents sont en commun avec la couche de probabilité de présence du pergélisol. Certaines zones où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50% n'ont aucun névé permanent (*Figure 18 (B)*). Sur l'image de fond, ces zones contiennent pourtant quelques endroits enneigés qui pourraient correspondre à des névés permanents (*Figure 18 (B)*). Finalement, certains endroits où des patches de névés permanents sont identifiés (*Figure 12 (C)*) ne correspondent pas à une zone propice à la présence de pergélisol à cause de la présence de marges proglaciaires.

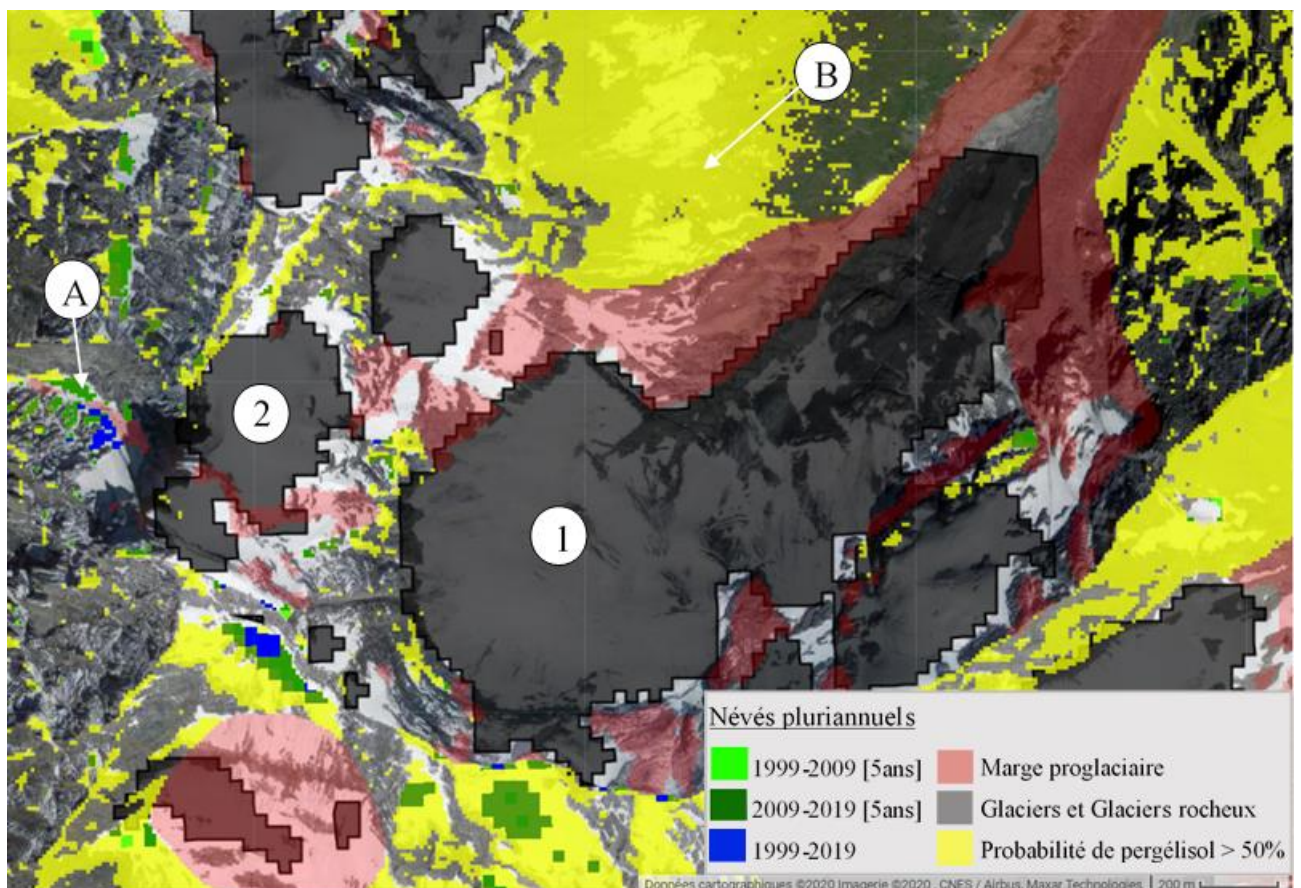
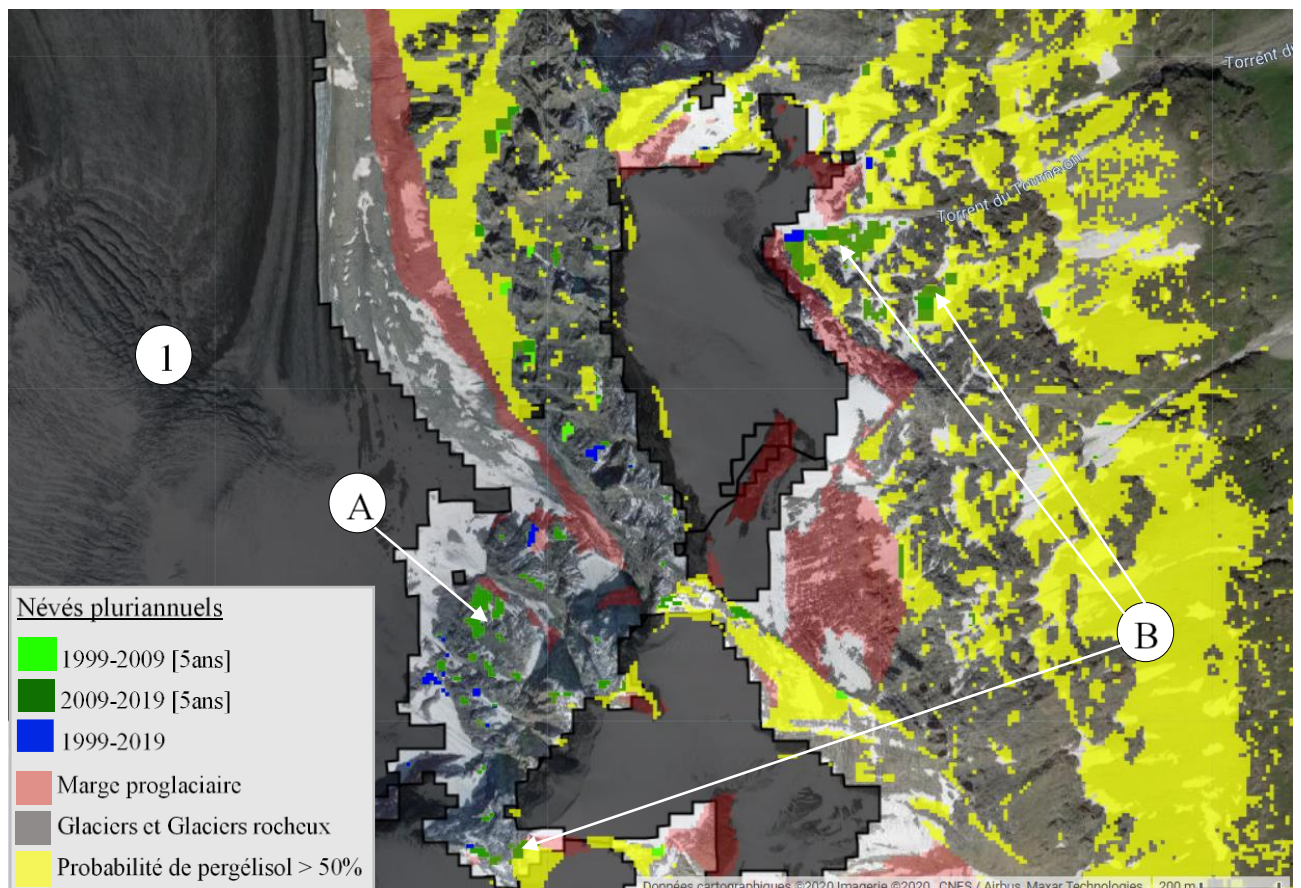


Figure 18: Carte du pergélisol et névés permanents où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50% proche du glacier de l'En Darrey et du Pleureur ; 1 ; glacier de l'En Darrey ; 2 : glacier du Pleureur ; A : névés permanents identifiés dans une zone glaciaire ; B : peu de névés permanents identifiés dans les zones où la probabilité de présence du pergélisol est élevée

Enfin, la *Figure 19* présente les névés permanents où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50% à proximité du glacier des Corbassières (*Figure 19* (1)). Quelques pixels correspondant à des névés sont identifiables entre le glacier des Corbassières et une partie du glacier du Grand Combin (*Figure 19* (A)). Étant donné que sous ces pixels, la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50%, il est tout à fait probable que du pergélisol s'y trouve. D'autres petites zones ont des névés permanents où la probabilité de présence du pergélisol est élevée (*Figure 19* (B)). En conclusion, très peu de névés permanents sont identifiés sur des zones de probable présence de pergélisol. Un lien entre le pergélisol et les névés permanents existe. Cependant, l'analyse qualitative ne permet pas de prouver cette relation à partir de ces données.

Bien que les endroits en commun entre les névés permanents et la probabilité de pergélisol supérieure à 50% soient peu nombreux, la *Figure 10* a démontré que la probabilité de présence du pergélisol est considérablement élevée en présence de névés permanents. La relation entre les névés permanents et le pergélisol peut tout de même être mise en avant même si les emplacements en commun semblent restreints.



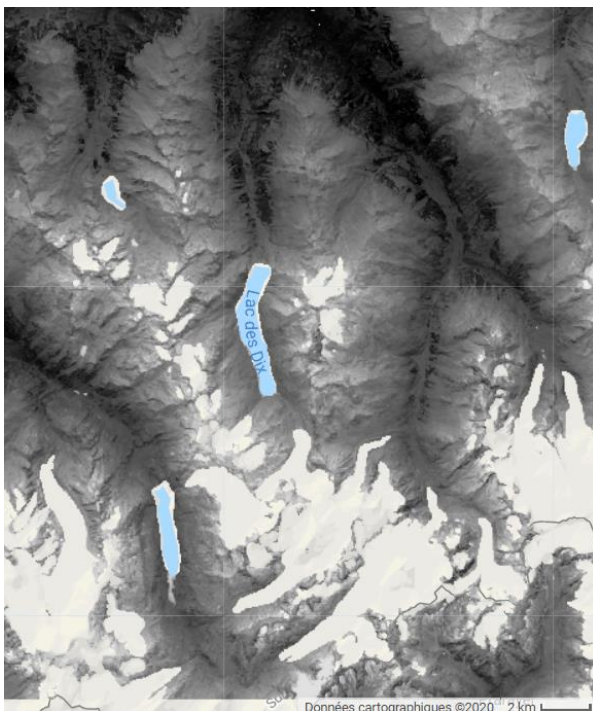
*Figure 19: Carte du pergélisol superposée avec les névés permanents proches du glacier des Corbassières à l'ouest du Tournelon Blanc ; 1 : glacier des Corbassières ; A : plusieurs regroupements de névés permanents ; B : autres zones où des névés permanents sont identifiés avec une probabilité de pergélisol élevée*



### 4.2.1 Résultats bruts

Pour cette partie, la durée d'enneigement est étudiée grâce à l'information sur la date d'obtention des images. Ces informations permettent d'estimer les dates de première et dernière neige et de calculer la durée d'enneigement avec une marge d'erreur liée au temps de retour des satellites Landsat.

Le premier résultat brut obtenu correspond à la durée d'enneigement de la zone étudiée où chaque pixel représente une durée d'enneigement spécifique sur une année. La moyenne de toutes les années est présentée sur la *Figure 20*. Plus les pixels sont clairs, plus la durée d'enneigement est élevée. Le contraste de couleur actuel ne permet pas d'avoir une bonne vision globale du phénomène de durée d'enneigement. C'est pour cette raison qu'une deuxième carte sur toute la zone est produite en changeant tout simplement les couleurs.



*Figure 20: Durée d'enneigement moyenne brute de la zone d'étude*

La *Figure 21* présente cette deuxième carte. Les pixels où la durée d'enneigement est élevée sont déjà plus facilement visibles avec cette échelle de couleur. La durée d'enneigement de manière globale est influencée par des paramètres topographiques comme l'altitude. De ce fait, les zones périglaciaires sont touchées par une plus longue durée d'enneigement. L'intérêt de ce travail se focalise principalement sur les durées d'enneigement plutôt longues qui pourraient potentiellement être corrélées avec la présence de pergélisol. Ces zones correspondent aux zones proches du bleu foncé sur la *Figure 21*. Comparé à l'étendue totale de la zone d'étude, le pourcentage de pixels de longue durée est assez faible, d'où l'intérêt de zoomer sur certaines zones spécifiques afin de voir plus en détail le résultat final.

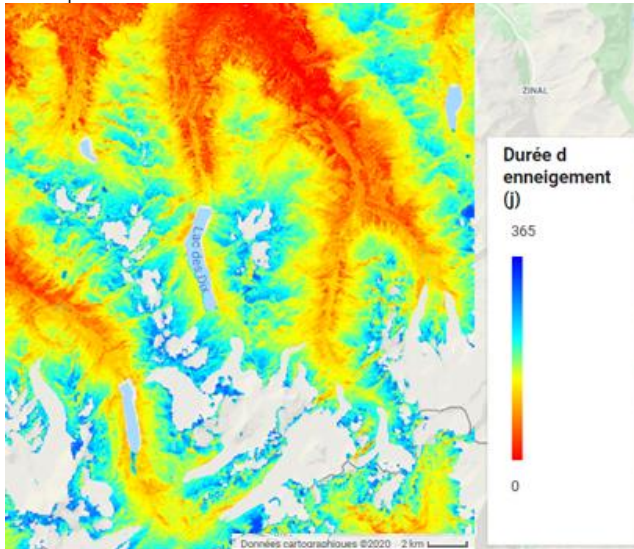


Figure 21: Durée d'enneigement moyenne colorée

#### 4.2.2 Analyse générale de durée d'enneigement avec les données climatiques

La *Figure 22* présente la durée d'enneigement sur cinq années différentes pour la zone du Mont Fort. Quatre années sont reprises pour leurs conditions extrêmes (2001, 2003, 2011 et 2015) tandis que 1999 est utilisé afin de voir les variations d'images plus anciennes. Les données présentent uniquement la durée d'enneigement. Les valeurs élevées sont représentées par le bleu tandis que des valeurs faibles de durée d'enneigement sont figurées en rouge. La *Figure 23* présente les résultats de durées d'enneigement pour la zone proche du glacier de l'En Darrey tandis que les résultats de la *Figure 24* se trouvent aux alentours du Grand Tavé.

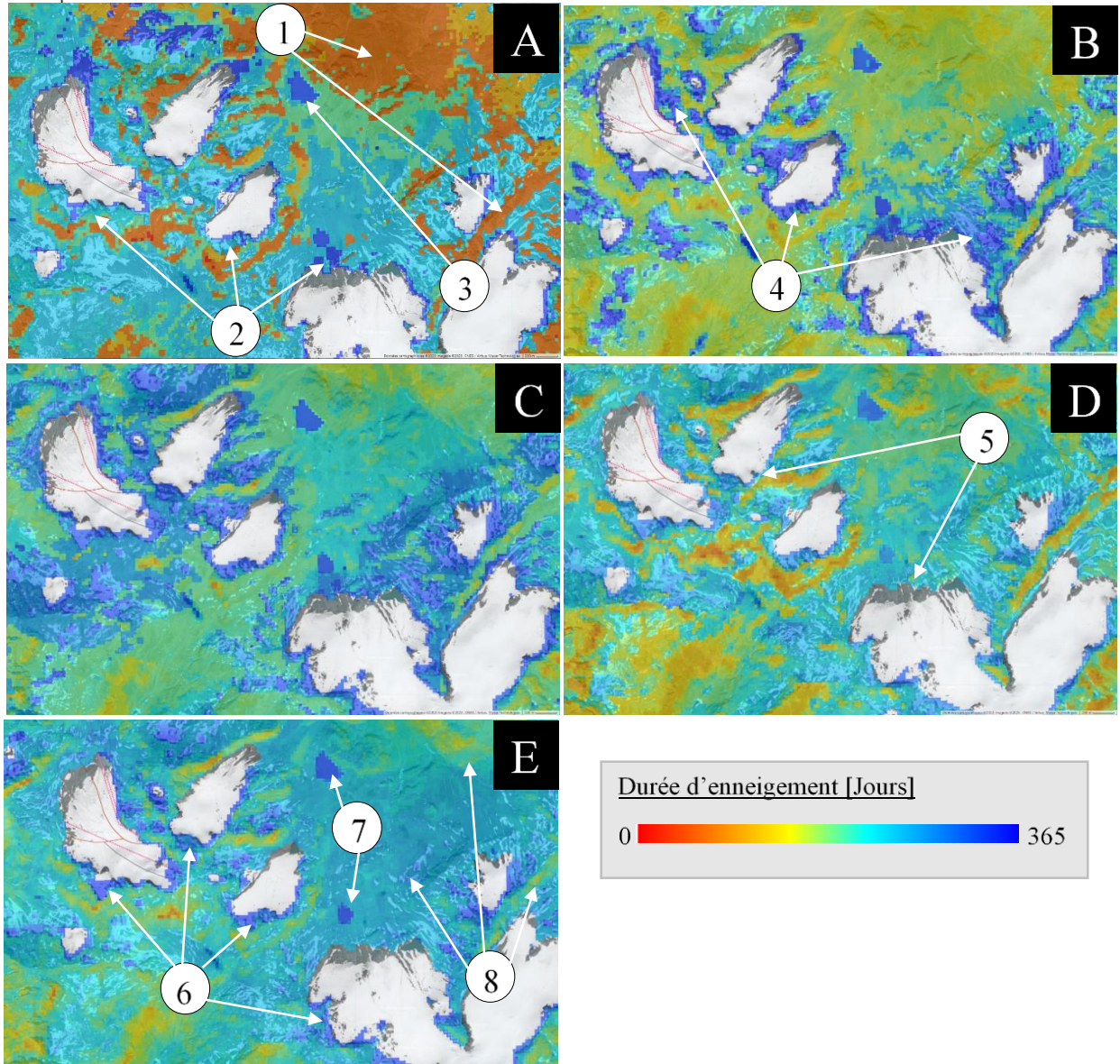


Figure 22: Durée d'enneigement aux alentours du Mont Fort. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015 ; 1 : courte durée d'enneigement ; 2 : longue durée d'enneigement proche des glaciers ; 3 : longue durée d'enneigement à cause du lac ; 4 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide ; 5 : durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide ; 6 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude ; 7 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude sur des lacs ; 8 : longue durée d'enneigement à une certaine distance des glaciers pour une année chaude

Dans le cas de 1999 (Figures 22, 23 et 24 A), de nombreux pixels ont une durée d'enneigement très faible en comparaison aux autres années (Figures 22, 23 et 24 (1)). Quelques valeurs élevées se retrouvent proches des glaciers (Figures 22, 23 et 24 (2)) ou à l'emplacement des lacs (Figure 22 (2)). Selon MétéoSuisse (2019), l'année 1999 est considérée comme un été plutôt frais, ce qui contredit totalement les données d'enneigement. La qualité des images de cette période peut être la cause de cette sous-évaluation. Ces résultats confirment les conclusions précédentes sur cette année. De nombreuses erreurs apparaissent pour cette année.



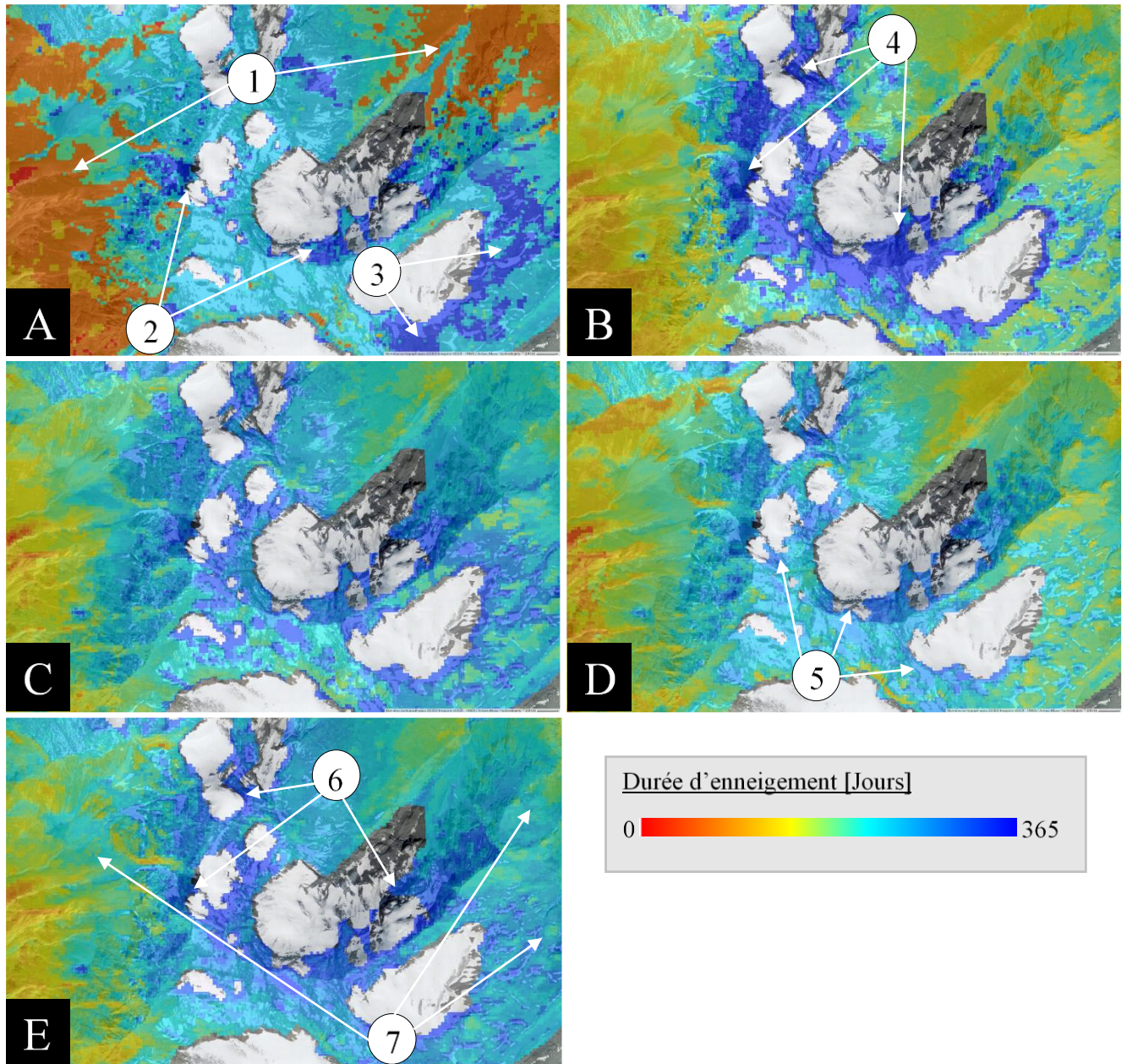


Figure 23: Durée d'enneigement aux alentours du glacier de l'En Darrey. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015 ; 1 : courte durée d'enneigement ; 2 : longue durée d'enneigement proche des glaciers ; 3 : longue durée d'enneigement au sud-est du glacier de la Luette ; 4 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide ; 5 : durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide ; 6 : longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude ; 7 : durée d'enneigement plutôt longue à une certaine distance des glaciers pour une année chaude

Quelques zones plus spécifiques peuvent être analysées. Dans la région de l'En Darrey, la durée d'enneigement en 1999 est relativement longue à l'est et au sud-est du glacier de la Luette (Figure 23 A (3)). Il est tout à fait possible que pendant cette année, cette zone soit favorable à une longue durée d'enneigement. Mis à part quelques pixels en 2003 et 2015, les autres années ne montrent pas que cette zone ait une longue



durée d'enneigement. Cela peut aussi signifier que les résultats de 1999 ne sont pas forcément corrects à cause d'un manque de bonnes images. Finalement, dans la région du Grand Tavé (Figure 24, A, B et C), quelques pixels ont une longue durée d'enneigement au nord du glacier de Bocheresse (Figure 24 (3)). Des pixels au même endroit ont déjà été identifiés comme névés permanents dans la partie 4.1.1.1. Cela démontre que plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour trouver des névés permanents ou des zones où la durée d'enneigement est plutôt longue.

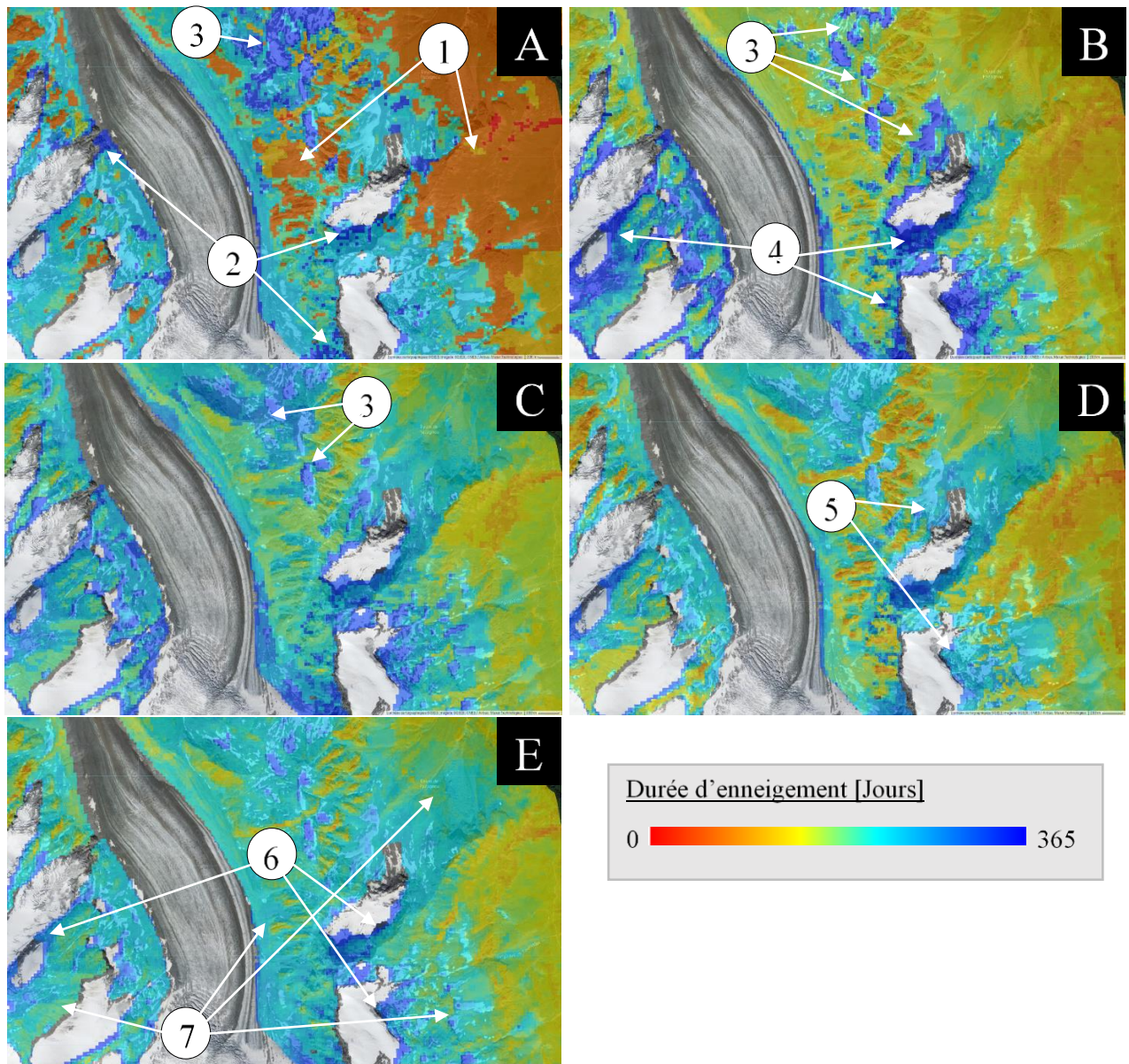


Figure 24: Durée d'enneigement aux alentours du Grand Tavé. A: durée d'enneigement en 1999; B: durée d'enneigement en 2001; C: durée d'enneigement en 2003; D: durée d'enneigement en 2011; E: durée d'enneigement en 2015; 1: courte durée d'enneigement; 2: longue durée d'enneigement proche des glaciers; 3: longue durée d'enneigement à une certaine distance des glaciers; 4: longue durée d'enneigement durant une année plutôt froide; 5: durée d'enneigement d'environ 200-250 jours proche des glaciers durant une année plutôt froide; 6: longue durée d'enneigement durant une année plutôt chaude; 7: durée d'enneigement plutôt longue à une certaine distance des glacier pour une année chaude

Ensuite, les résultats annuels de 2001, 2003, 2011 et 2015 doivent être mis en commun avec les données climatiques afin de voir si une tendance apparaît de manière visuelle. Les résultats des *Figures 22, 23 et 24 B* montrent que la durée d'enneigement est très élevée proche des glaciers, mais qu'elle diminue avec un éloignement des glaciers. Étant donné que cette figure correspond à l'année froide de 2001, les longues durées d'enneigement proche des glaciers semblent cohérentes (*Figure 22, 23 et 24, B (4)*). Cependant, la durée d'enneigement générale de la zone est plus basse comparée à l'année 2003 qui est caractérisée par une forte chaleur selon MétéoSuisse (2019). Pour cette année, les valeurs d'enneigement moyen sont aux alentours de 200-250 jours et ils augmentent à proximité des glaciers. Les résultats de 2011 sont présentés sur les *Figures 22, 23 et 24 D*. De nouveau, les résultats ne coïncident pas vraiment avec les données climatiques. En effet, proche des glaciers, la durée d'enneigement est moins longue qu'en 2003 par exemple (*Figures 22, 23 et 24 (5)*). Finalement, en 2015 (*Figures 22, 23 et 24, E*) les valeurs moyennes d'enneigement sont relativement élevées. En effet, très peu de zones ont des valeurs inférieures 150 jours. Les longues durées d'enneigement correspondent uniquement aux limites des glaciers (*Figures 22, 23 et 24 (6)*) et aux lacs glaciaires (*Figure 22 (7)*). En comparaison avec les autres années, les longues durées d'enneigement ne se situent pas autant aux limites des glaciers (*Figure 22 (8), 23 et 24 (7)*). Cela signifie que l'été chaud a pu avoir un impact sur la durée d'enneigement générale de cette année-là.

Les trois zones d'étude présentent plus ou moins les mêmes résultats en ce qui concerne la relation entre les durées d'enneigement et les caractéristiques météorologiques des années étudiées. Les années chaudes (*Figures 22, 23 et 24 C et E*) ne présentent pas de durée d'enneigement courte de manière générale. Pour les années froides, 2011 (*Figures 22, 23 et 24 D*) présente des résultats opposés à ce qui peut être attendu (durée d'enneigement longue) tandis que l'année 2001 (*Figures 22, 23 et 24 B*) présente quelques aspects pouvant être corrélés aux conditions météorologiques. En conclusion, au vu des résultats visuels, il est difficile d'établir une relation entre la durée d'enneigement et les données climatiques annuelles.

#### 4.2.3 Comparaison des durées d'enneigement avec la carte de répartition du pergélisol

La durée d'enneigement en relation avec la carte de distribution du pergélisol de Deluigi (2018) est présentée sur la *Figure 25*. La moyenne de durée d'enneigement est calculée sur la base des vingt années étudiées. Afin de faciliter l'analyse, les différentes possibilités de présence du pergélisol ont été réduites en une seule classe représentant les probabilités d'avoir du pergélisol, supérieures à 0.5. Afin de voir au mieux la relation entre le pergélisol et la durée d'enneigement, la probabilité d'avoir du pergélisol n'est pas affichée directement. Un masque est utilisé pour avoir uniquement les valeurs de durée d'enneigement aux endroits où il y a une probabilité de présence du pergélisol supérieure à 0.5. Étant donné qu'une vision globale de la zone ne donne que très peu d'informations, la *Figure 25* reprend les trois zones déjà étudiées auparavant.



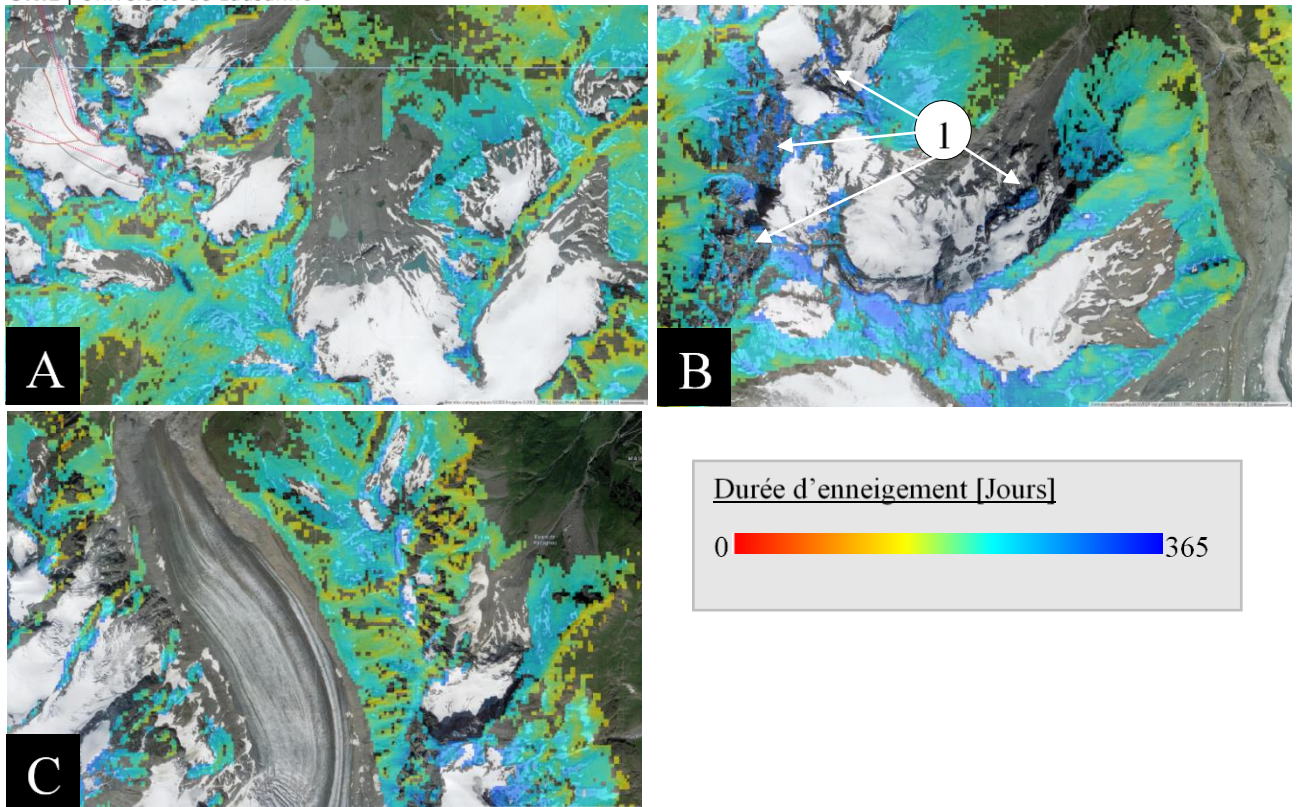


Figure 25: Durée d'enneigement où la probabilité de présence du pergélisol est supérieure à 50%. A : aux alentours du glacier du Mont-Fort ; B : aux alentours du glacier de l'En Darrey ; C : aux alentours du Grand Tavé ; 1 : longue durée d'enneigement

La Figure 25 permet de visualiser les endroits où la probabilité d'avoir du pergélisol est élevée. Premièrement, pour les trois zones étudiées, de nombreux endroits peuvent potentiellement accueillir du pergélisol. Étant donné que la durée d'enneigement est basée sur la moyenne des vingt ans, il est tout à fait normal que très peu de valeurs extrêmes apparaissent (basses ou élevées), car celles-ci sont atténuées. Cependant, lorsqu'une forte probabilité de présence du pergélisol subsiste à un endroit, la durée d'enneigement est en général dans le vert ou bleu clair ce qui correspond à des durées d'environ 200 jours. Dans la région de l'En Darrey, quelques endroits ont de plus longues durées d'enneigement (Figure 25 (1)). Pour ces zones, la probabilité de présence du pergélisol coïncide avec une durée d'enneigement entre 250 et 300 jours.

#### 4.2.4 Analyse de la surface enneigée

Le Tableau 2 présente la surface enneigée pour chaque année et pour une durée d'enneigement définie. Cela permet d'avoir un premier aperçu de données quantitatives de la région étudiée.

Les résultats obtenus divergent entre les différentes années. Premièrement, il a déjà été démontré que les résultats pour 1999 ne sont pas de très bonne qualité. C'est pour cette raison que la surface enneigée est plus petite que les autres années sauf pour une durée d'enneigement de 300 jours.

Nombre de jours	Surface enneigée (km <sup>2</sup> )				
	1999	2001	2003	2011	2015
<b>200</b>	148,8213	227,3076	608,3703	208,8244	183,7305
<b>250</b>	35,4321	102,762	54,4104	73,6038	38,9961
<b>300</b>	29,5785	63,1746	32,4459	23,5557	14,2839
<b>350</b>	0	45,5112	0	0	6,1686

Ensuite, les valeurs obtenues en 2001 sont totalement cohérentes. En effet, la surface enneigée pour 250 jours ou 300 jours est deux fois plus élevée que pour les autres années. Seule la surface enneigée en 2011 de plus à 250 jours se rapproche de la valeur de 2001. En ce qui concerne la surface enneigée en 2001 sur 350 jours, la valeur ne descend quasiment pas en comparaison avec 300 jours. On passe de 63,1746 à 45,5112 km<sup>2</sup>. Il faut tout de même noter que la valeur de durée d'enneigement pour 350 jours est supérieure aux valeurs des autres années pour une durée de 300 jours. Cette donnée coïncide totalement avec les données climatiques de MétéoSuisse (2019). La neige a pu rester à de multiples endroits plus longtemps, voire durant toute l'année en 2001.

En 2003, les valeurs devraient normalement être plus faibles. Cependant, pour une durée d'enneigement de 200 jours, les valeurs sont trois fois plus élevées en comparaison avec les autres années. Cette donnée est tout de même moins importante que les autres durées, car une durée d'enneigement de 200 jours est assez fréquente en milieu alpin. Pour des durées d'enneigement de 250 et 300 jours, les valeurs ne sont peut-être pas aussi faibles que prévu. En effet, pour une durée de 300 jours, la valeur est supérieure à 2011 qui est une année avec un été plus frais. Ces résultats sont donc assez contrastés.

En 2011, les surfaces enneigées de 200 et 250 jours suivent les traces de 2001 même si les valeurs sont plus faibles. Cependant, les valeurs pour une durée de 300 et 350 jours sont beaucoup plus faibles qu'attendu. Pour une durée de 350 jours, il n'y a aucun pixel enneigé sur toute la région tandis que pour 300 jours la valeur est plus faible que celle obtenue durant l'année 2003 dont les températures ont été relativement élevées. L'été a peut-être été moins chaud, mais la neige a tout de même fondu de manière considérable durant cette période.

Finalement, en 2015, selon les données climatiques, des valeurs de durée d'enneigement assez basses sont attendues. Pour des durées de 200, 250 et 300 jours, les résultats sont presque les plus faibles. Cependant, quelques névés avec une durée de 350 jours ou plus ont été identifiés. Cette parcelle de 6,16 km<sup>2</sup> est bien plus faible que celle obtenue en 2001 ce qui est pertinent. Etant donné que cette année est considérée comme chaude, une valeur plus faible était attendue pour une durée d'enneigement de 350 jours. Le modèle a peut-être réussi à identifier plus facilement les névés de cette région grâce à des données de meilleure qualité.

### 4.2.5 Analyse quantitative : graphiques en nuage de points

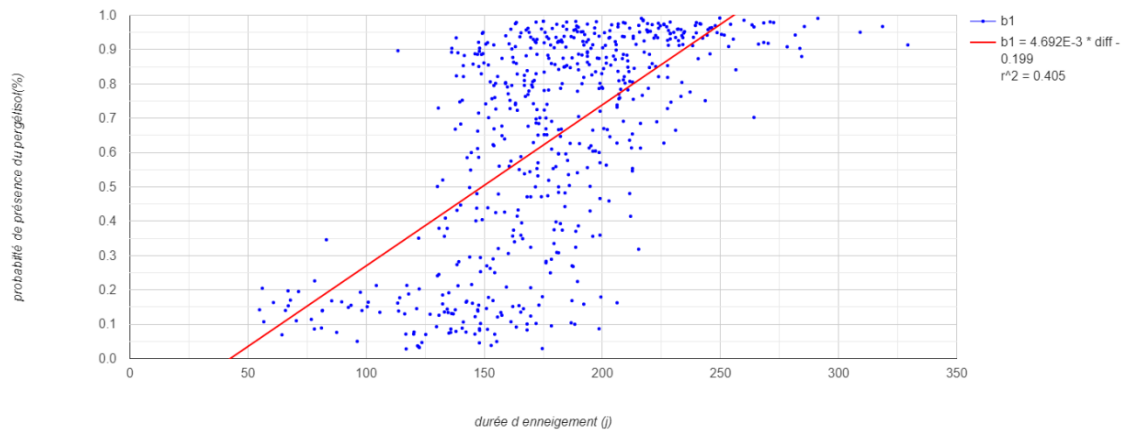


Figure 26: Relation entre la durée d’enneigement et la probabilité de présence du pergélisol

Premièrement, sur la *Figure 26*, le graphique montre la relation entre la durée d’enneigement moyenne sur les vingt années étudiées, avec la carte du pergélisol proposée par Deluigi (2018). Les points bleus représentent l’intersection entre la probabilité de présence du pergélisol en pourcentage (entre 0 et 1) et la durée d’enneigement évaluée en jours (de 0 à 365 jours). Deux outils supplémentaires sont utilisés pour mettre en évidence une relation entre deux paramètres : la ligne de tendance et le coefficient de détermination  $R^2$ . La ligne de tendance (en rouge sur le graphique) donne une vision générale de la relation entre les deux paramètres. Concernant la *Figure 26*, la tendance générale démontre que la neige reste plus longtemps aux endroits où la probabilité de présence du pergélisol est élevée. En effet, lorsque la présence de pergélisol est peu probable, la durée d’enneigement est faible. Cependant, les points s’étendent beaucoup le long de l’axe de la durée d’enneigement. Entre 0.9 et 1, la neige peut persister entre 125 et 325 jours. Pour une probabilité de présence de pergélisol faible, les valeurs de durée oscillent entre 50 à 200 jours. Cette différence de valeurs démontre une certaine disparité dans les mesures.

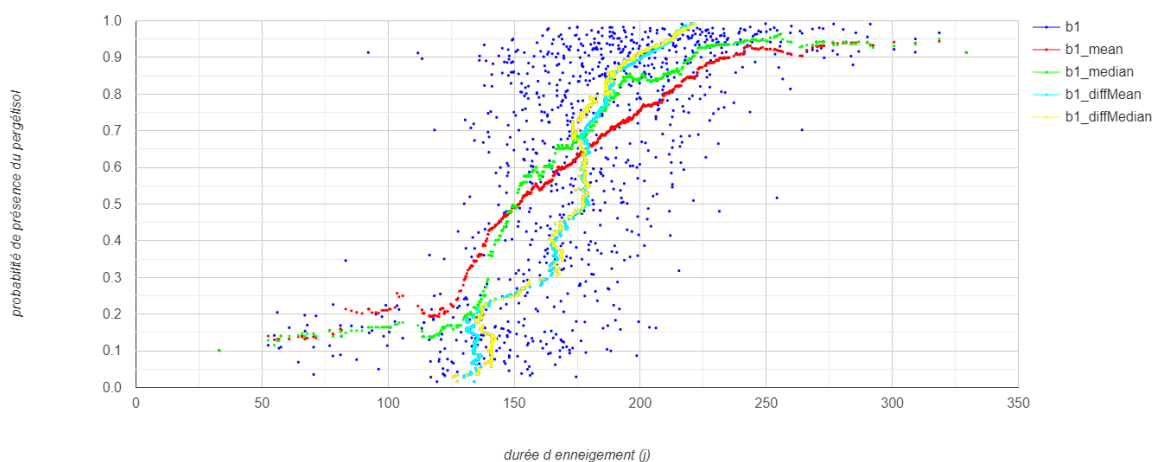


Figure 27: Relation entre la durée d’enneigement et la probabilité de présence du pergélisol avec moyenne et médiane mobile

La valeur du coefficient  $R^2$  de la *Figure 26* est égale à 0.405. Une valeur basse ne signifie pas forcément qu'il n'y a aucune relation entre les deux paramètres étudiés. Dans ce cas, la valeur n'est pas très élevée, mais elle démontre tout de même qu'il existe une relation positive entre la durée d'enneigement et la probabilité d'apparition du pergélisol sur toute la région d'étude.

Afin d'affiner le travail de recherche sur ce premier graphe, la moyenne et médiane mobile sont extraites et celles-ci peuvent être visibles sur la *Figure 27*. Les suites de points colorées en rouge et en vert sont obtenues à partir des pixels proches. En d'autres termes, pour chaque pixel, le modèle détermine quels sont les pixels ayant une durée d'enneigement plus faible de 10 jours ou plus élevé de 10 jours. A partir de ces pixels, la durée d'enneigement moyenne pour une durée spécifique est calculée. Ce calcul permet d'obtenir la moyenne ou médiane mobile à partir de chaque pixel. Enfin, les points colorés en jaune et en bleu clair représentent eux aussi la moyenne et médiane mobile, mais celles-ci sont obtenues à partir de la valeur de pergélisol. Pour chaque pixel, un seuil de 0.05 a été appliqué pour obtenir les pixels adjacents à cette valeur.

Les résultats de ce second graphique démontrent que lorsque la durée d'enneigement est inférieure à 125 jours, la probabilité de présence de pergélisol est assez faible (points rouges et points verts). Pour une durée comprise entre 125 et 225 jours la probabilité de présence du pergélisol augmente considérablement, passant de 0.2 à 0.8. Finalement, au-dessus de cette durée, la probabilité est très élevée et confirme que lorsque la neige reste longtemps durant l'année, il y a une forte probabilité d'avoir du pergélisol.

Cependant, les points bleu clair et les points jaunes démontrent que l'inverse n'est pas forcément vérifiable. En effet, la moyenne et médiane mobile provenant de la probabilité de présence du pergélisol suivent une trajectoire beaucoup plus linéaire. La durée d'enneigement de ces courbes oscille entre 125 et 225 jours. Cette courbe s'explique par le fait que les points peuvent être assez dispersés pour une valeur définie de probabilité de pergélisol. Pour une probabilité de 0.2, les valeurs de durée d'enneigement varient entre 50 et 200 ce qui signifie que la moyenne ou médiane se situe aux alentours de 125. Pour une probabilité de présence de pergélisol de 0.9, les pixels ont des valeurs de durée de 125 à 325 jours ce qui induit que la moyenne est d'environ 225 jours. De ce fait, la courbe varie très peu entre une probabilité de 0 et de 1. Cette relation insinue que, s'il y a du pergélisol à un endroit, la neige n'y reste pas forcément durant toute l'année.

#### 4.2.6 Graphiques spécifiques

Étant donné que la zone d'étude est vaste, les caractéristiques climatiques et topographiques varient considérablement. C'est pour cette raison que des graphiques en nuage de point sur des zones spécifiques et avec des caractéristiques spécifiques sont nécessaires afin de voir si les résultats concordent avec les premiers résultats obtenus. L'analyse se fait sur la moyenne mobile, la médiane mobile ainsi que sur la ligne de tendance en fonction de la durée d'enneigement, car l'intérêt est de voir comment se comporte la durée d'enneigement avec le pergélisol et non le contraire.

Pour ce faire, une distinction géographique, topographique et temporelle est produite. Premièrement, deux zones moins vastes sont étudiées : les régions du Mont-Fort et du Grand Tavé. Deuxièmement, des graphiques en nuage de point sur les zones supérieures à 2500 mètres et 3000 mètres sont produits afin de voir comment évoluent les résultats lorsque la probabilité de présence du pergélisol est plus élevée. Finalement, un graphique a été produit sur une année spécifique (2015 et 2003 et 2011) afin de voir si l'impact des conditions météorologiques annuelles est directement visible sur un tel graphique.

#### 4.2.6.1 Distinction géographique

##### 4.2.6.1.1 Mont-Fort

Comme expliqué dans la partie de la zone d'étude (cf. chapitre 2), l'altitude moyenne de cette zone se situe aux alentours de 2800-3000 mètres. Étant donné l'altitude et la présence de plusieurs glaciers, la probabilité de présence du pergélisol est relativement élevée.

L'échantillon de pixels, utilisé pour produire le graphique ci-dessous (*Figure 28*), est de 5000 pixels. Cet échantillon est suffisamment grand pour voir la tendance générale de cette zone.

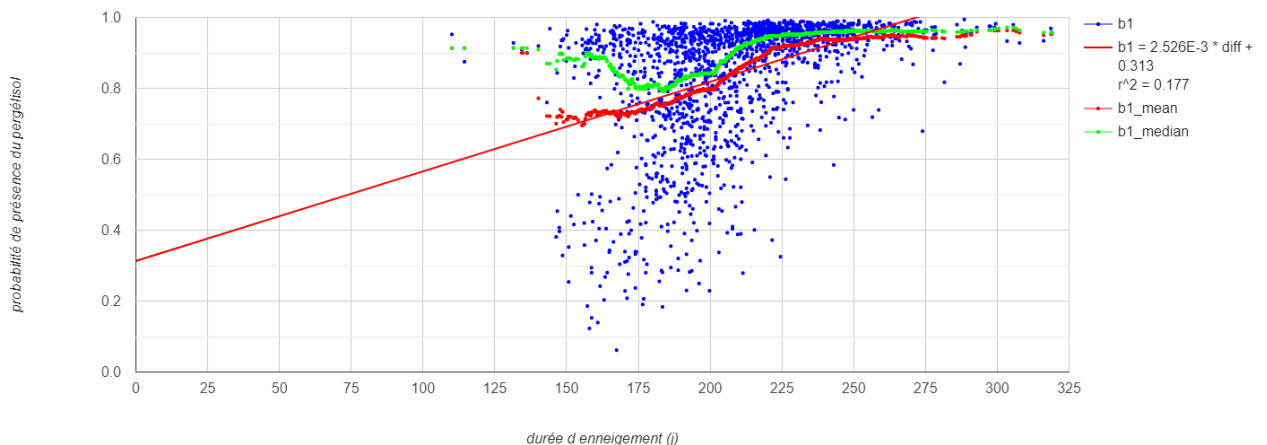


Figure 28: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol aux alentours du Mont-Fort

Premièrement, la distribution générale des pixels sur la *Figure 28* montre qu'une grande densité de points se retrouve aux endroits avec une forte probabilité de présence du pergélisol. Quelques points de l'échantillon dispersés entre 140 et 225 jours se situent au-dessous d'une probabilité de 0.5. La durée d'enneigement minimale est de 150 jours en excluant certains points anormaux à 110-120 jours. Deuxièmement, la moyenne et médiane mobile démontrent que pour la région du Mont-Fort, la probabilité de présence de pergélisol est en général supérieure à 0.7. Une légère tendance à la hausse se démarque aux alentours d'une durée de 175 jours, mais à partir de 225 jours, la courbe stagne à une valeur de probabilité de 0.9. La médiane est plus élevée que la moyenne, car cette dernière est influencée par des valeurs critiques faibles. De plus, la densité de points aux alentours de 0.9 est élevée ce qui a tendance à augmenter la valeur de la médiane. La baisse de

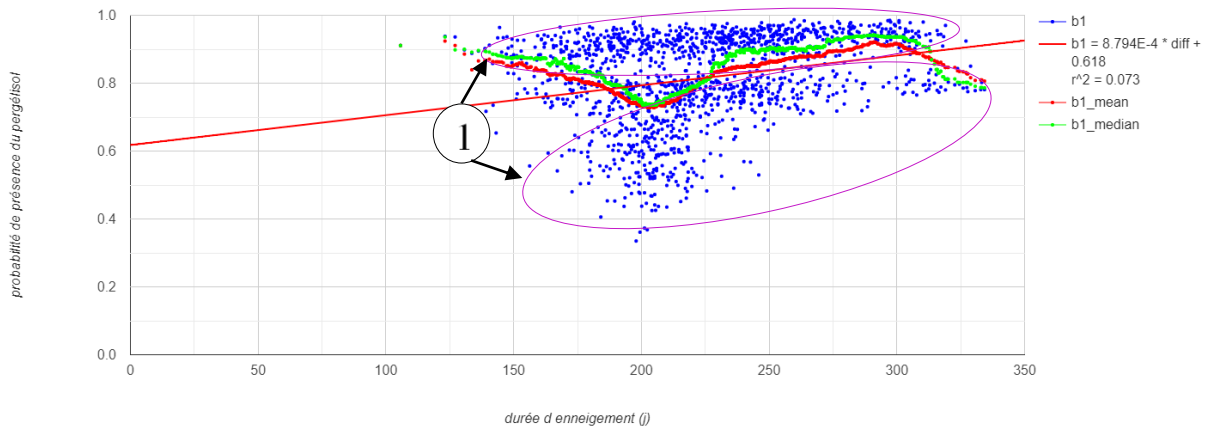


la médiane entre 160 et 190 jours est due à une diminution de la densité de points proche d'une probabilité de 0.9 et une augmentation du nombre de pixels avec une valeur assez faible. Le coefficient de  $R^2$  a une valeur de 0.177 ce qui signifie que les valeurs sont considérablement dispersées autour de la ligne de tendance. Bien que le coefficient  $R^2$  soit faible, la ligne de tendance montre clairement une hausse des valeurs de probabilité de présence du pergélisol avec une durée d'enneigement plus longue.

#### 4.2.6.1.2 Grand Tavé

La région du Grand Tavé est proche du glacier des Corbassières et d'autres glaciers plus petits (cf. Chapitre 2). L'échantillon utilisé pour cette zone est de 30'000 pixels. Un nombre de pixels plus faible diminue considérablement le nombre de points visibles sur le graphique ce qui rend la tendance générale imprécise. La *Figure 29* montre la distribution de cet échantillon.

Pour commencer, comme pour la *Figure 28*, la majorité des points se situent au-delà d'une durée d'enneigement de 150 jours et d'une probabilité de présence de pergélisol de 0.4. Pour une durée de 150 et 250 jours, quelques pixels ont une probabilité de présence de pergélisol inférieure à 0.7. Il semble y avoir deux clusters de points avec une limite à 0.8 (*Figure 29* (1)). La moyenne et médiane mobile suivent plus ou moins cette limite qui semble séparer ces deux groupes de pixels. La distribution est assez homogène au vu de la moyenne et médiane étant relativement proches. Cela signifie qu'il y a peu de valeurs extrêmes et que la densité de pixels est assez homogène.



*Figure 29: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol aux alentours du Grand Tavé ;clusters séparant les données*

Quelle que soit la durée d'enneigement, la probabilité de présence du pergélisol est en général toujours élevée. Pour une durée de 150 jours, la probabilité est directement à 0.9. Deux baisses de probabilités sont visibles. La première se situe aux alentours de 200 jours, car une grande quantité de pixels ont cette valeur de durée d'enneigement ce qui augmente l'écart de valeur pour cette durée. La deuxième baisse se situe après 300 jours. La raison est inverse à la première. Il y a très peu de pixels représentant cette durée d'enneigement ce

qui augmente potentiellement le risque d'erreurs. Le coefficient  $R^2$  a une valeur de 0.073. Les points sont donc dispersés autour de la ligne de tendance. Cette ligne démontre tout de même une tendance à la hausse.

Finalement, la relation entre la durée d'enneigement et la probabilité de présence du pergélisol est plus difficile à démontrer sur cette zone spécifique. La probabilité de présence du pergélisol varie très peu en fonction de la durée d'enneigement. Cependant, les valeurs de probabilité de présence du pergélisol sont assez élevées, car la zone se situe à haute altitude.

#### 4.2.6.2 Distinction topographique

Deux distinctions se font pour l'analyse en fonction de l'altitude : les pixels ayant une altitude supérieure à 2500 mètres et les pixels ayant une altitude supérieure à 3000 mètres. Cette méthode permet d'évaluer la relation entre la neige et le pergélisol pour des régions étant considérées comme propices à la présence de pergélisol. Les deux graphes en question sont présentés sur les *Figures 30 et 31*.

L'échantillon utilisé pour le graphique avec une altitude supérieure à 2500 mètres (*Figure 30*) est de 10'000 pixels tandis que pour les zones supérieures à 3000 mètres (*Figure 31*), le nombre de pixels est fixé à 30'000 pixels. La capacité de mémoire de Google Earth Engine ne permet tout simplement pas de calculer autant de valeurs pour une zone aussi grande que celle de la *Figure 30*. Étant donné que la superficie de la zone au-dessus de 3000 mètres est plus faible, le traitement de données est produit avec 30'000 pixels.

La distribution générale de la *Figure 30* démontre qu'au-dessus de 2500 mètres, les pixels peuvent avoir une probabilité de présence du pergélisol faible, même si une plus grande densité de pixels se retrouve au-dessus d'une probabilité de 0.6-0.7. Que la probabilité de présence du pergélisol soit faible ou forte, la durée d'enneigement est très peu affectée. En effet, de nombreux pixels se retrouvent entre 125 et 200 jours pour une faible probabilité de présence du pergélisol tout comme pour une forte probabilité.

La moyenne et médiane mobile montrent tout de même une tendance à la hausse entre 125 et 240 jours avant de s'équilibrer à une valeur de 0.9 lorsque la durée est de 250 jours. La moyenne mobile est plus basse, car elle est influencée par les pixels ayant une probabilité de présence du pergélisol faible. Au-dessus de 2500 mètres, la durée d'enneigement semble toujours avoir une relation avec la présence du pergélisol même si la dispersion des points entre 150 et 200 jours est forte. Le coefficient  $R^2$  a une valeur de 0.178, mais la ligne de tendance démontre encore une hausse des valeurs de probabilité de présence du pergélisol en fonction de la durée d'enneigement.

Le résultat du graphique au-dessus de 3000 mètres est totalement différent (*Figure 31*). La distribution de points est beaucoup plus homogène et ne se disperse que très peu autour de l'axe de la probabilité de présence du pergélisol. En effet, seuls quelques points épars sont visibles au-dessous d'une probabilité de 0.7. La

majorité des points se retrouvent avec des probabilités entre 0.9 et 1. Cependant, les valeurs de durée d'enneigement sont beaucoup plus dispersées. Les pixels ont des durées d'enneigement oscillant entre 125 et 325 jours sans que la probabilité de présence du pergélisol soit impactée.

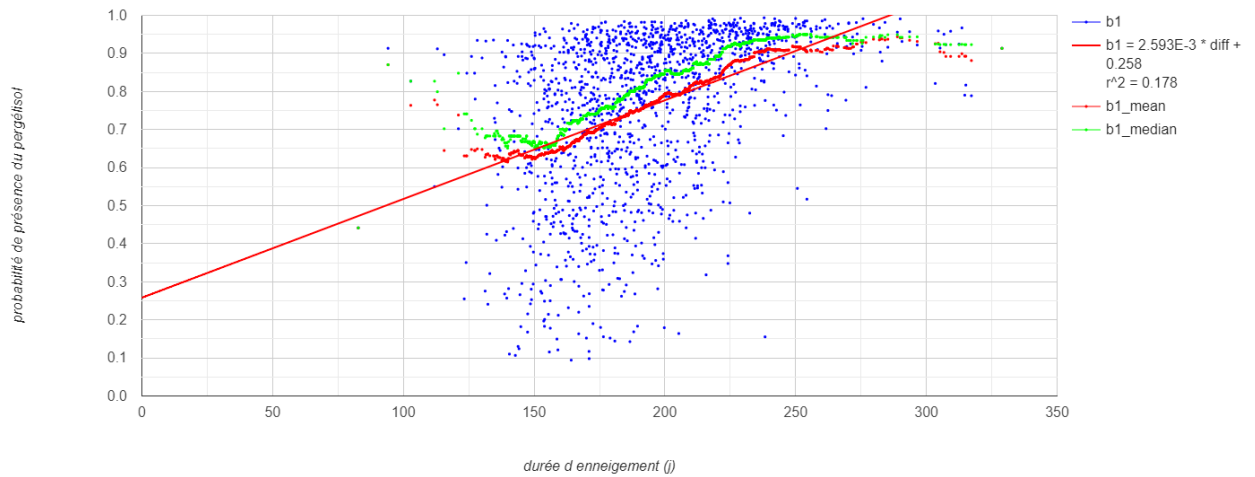


Figure 30: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol au-dessus de 2500 mètres

La moyenne et médiane mobile confirment ces propos. Elles se distribuent horizontalement aux alentours d'une probabilité de 0.9. De ce fait, aucune tendance n'est visible à partir de ce graphique comme le démontre la ligne de tendance. Au vu du coefficient  $R^2$  (0.046), les données ne suivent pas une tendance générale. Cette figure confirme uniquement que la probabilité de présence du pergélisol est élevée au-dessus de 3000 mètres

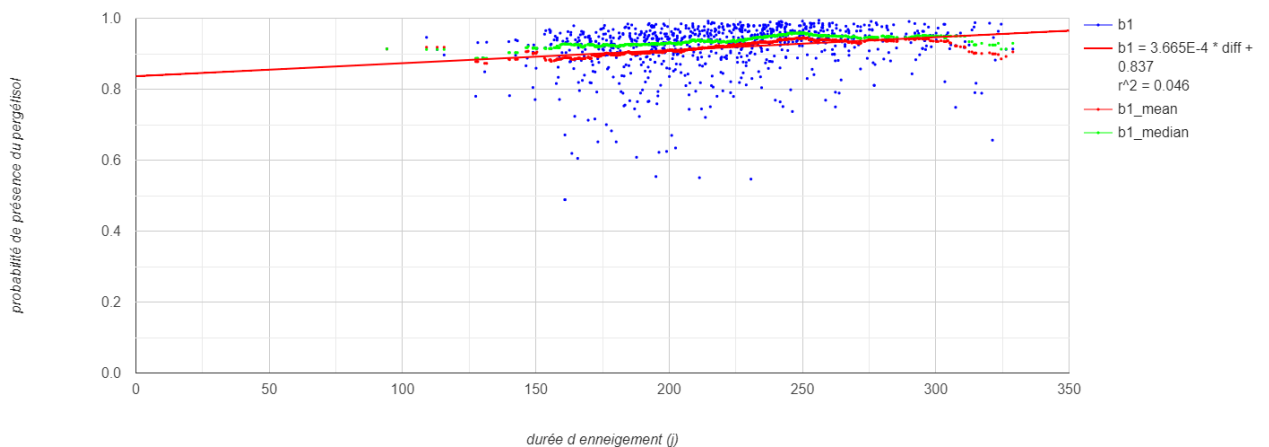


Figure 31: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol au-dessus de 3000 mètres



Le fait de visualiser un nuage de points sur une année spécifique a pour but de mettre en évidence de potentielles différences annuelles. Les années prises en compte sont celles avec des températures relativement éloignées de la norme. De ce fait, le modèle utilise les années 2003, 2011 et 2015 déjà étudiées dans le chapitre des névés permanents (cf. chapitre 4.1).

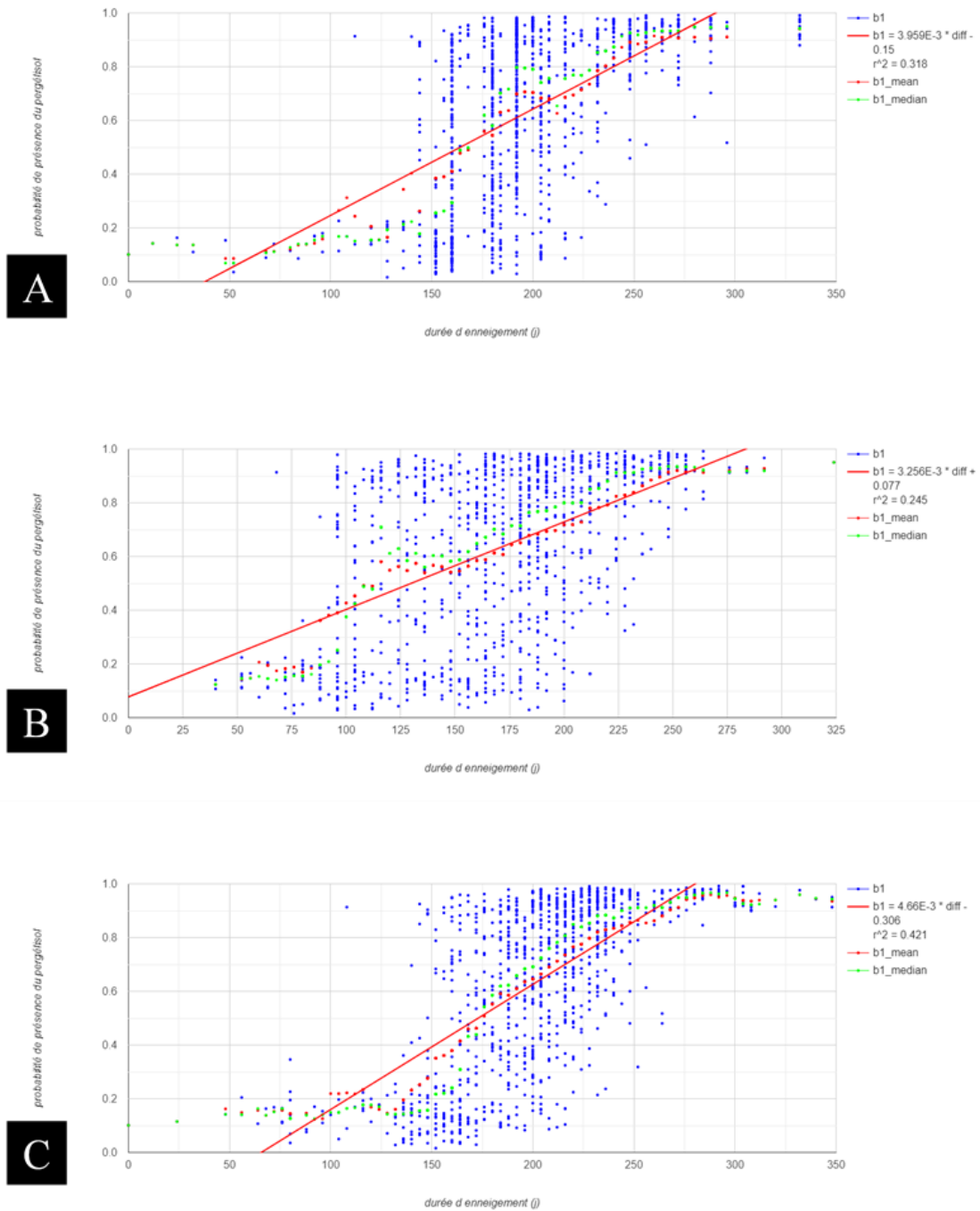


Figure 32: Relation entre durée d'enneigement et probabilité de présence du pergélisol. A: en 2003; B: en 2011; C: en 2015

La *Figure 32* présente les trois graphes pour les années 2003, 2011 et 2015. Les années 2003 et 2015 sont considérés comme des années chaudes tandis que l'année 2011 est considérée comme froide. Les trois graphes ont des similarités assez claires surtout pour les années 2003 et 2015. Pour une durée de 0 à 150 jours, la probabilité se situe entre 0.1 et 0.2 en moyenne. À partir de 150 jours, la moyenne et la médiane montrent une augmentation de la probabilité de présence du pergélisol jusqu'à 250 jours. À partir de 250 jours, la moyenne et médiane mobile stagnent aux alentours d'une probabilité de 0.9. En 2011, la tendance générale est la même. Cependant, une légère différence est observable entre 100 et 150 jours. Pour une durée de 100 jours, les pixels peuvent présenter une probabilité de présence du pergélisol plus élevée ce qui distingue ce graphe des deux autres. L'hypothèse est qu'étant donné la situation froide de cette année-là, le pergélisol a pu se développer même aux endroits où la durée d'enneigement est courte. Au contraire, durant les années chaudes, la probabilité de présence du pergélisol est faible avec une courte durée d'enneigement. Les coefficients  $R^2$  sont considérablement élevés au vu des autres valeurs observées au cours du chapitre 4.2.6. Les valeurs oscillent entre 0.245 et 0.421 en fonction des années. Les points sont tout de même dispersés le long de la ligne de tendance, mais une relation peut tout de même être observée. La ligne de tendance montre comment évoluent les valeurs de probabilité de présence du pergélisol en fonction de la durée d'enneigement.

## 5. Discussion

### 5.1 Névés permanents

La détermination des névés permanents à partir d'images satellites Landsat a montré certaines limites, principalement à cause de la résolution spatiale des images. En effet, certains névés permanents sont situés sur des zones où il est impossible d'en trouver. Par exemple, le modèle a trouvé des névés permanents à l'emplacement de lacs glaciaires ou de lacs de barrage, à la limite des glaciers ou encore sur des parois rocheuses. Cependant, certaines zones semblent tout de même être identifiées de manière correcte. Au vu des différentes données extraites des graphiques et de la surface de névés permanents, la relation entre les névés permanents et le pergélisol est difficile à prouver avec les outils utilisés lors de cette recherche.

Les graphiques démontrent que lorsque la probabilité d'avoir un névé permanent augmente, l'occurrence du pergélisol augmente aussi (*Figure 10*). Cependant, l'échantillon de pixels est minime lorsque la probabilité d'avoir des névés permanents est élevée. L'échantillon devrait contenir plus d'informations pour affirmer une quelconque relation. De plus, les résultats obtenus sur le *Tableau 1* ont montré que les zones de névés permanents ne correspondent pas aux zones de pergélisol. La correspondance la plus élevée entre les zones de névés permanents et de pergélisol est de 18% pour l'année 2003 ce qui est vraiment faible sachant que la relation entre les névés permanents et le pergélisol a déjà été prouvée dans certaines études (Delaloye, 2004 ; Luetschg et al., 2004). Frauenfelder et al. (1998) ont démontré que les zones de névés permanents correspondent à 79,6% et 89,4% au modèle de pergélisol Permakart et Permamap. Les raisons d'une si grande disparité entre les résultats de Frauenfelder et al. (1998) et cette étude proviennent premièrement de la faible résolution spatiale ne permettant pas facilement de déterminer les petits névés permanents. Deuxièmement, de nombreux névés permanents sont identifiés sur des zones où il est totalement impossible d'avoir du pergélisol (glaciers, lacs). Troisièmement, le modèle de pergélisol de Deluigi (2018) élimine les marges proglaciaires où une partie des névés permanents identifiés par le modèle apparaissent.

Les emplacements de névés permanents varient assez fortement entre les différentes années ce qui ne correspond pas aux résultats obtenus par Eveland et al. (2013). Cette recherche a prouvé que les « snow patches » se situent dans l'ensemble au même endroit chaque année. Pour toutes ces raisons, la méthode utilisée pour déterminer les névés permanents n'est pas concluante et ne permet pas de mettre en relation le pergélisol avec les névés.

### 5.2 Durée d'enneigement

Bien que l'influence de la neige sur le régime thermique du sol soit complexe, son impact sur le pergélisol n'est pas négligeable (Bernhard et al., 1998 ; Hoelzle et al., 2001 ; Scherrer et al., 2013). Les résultats de cette recherche ont démontré que la relation entre la durée d'enneigement et l'occurrence du pergélisol est

observable même en utilisant les images satellites de Landsat. Cela est possible, car la résolution spatiale joue un rôle moins important pour la durée d'enneigement que pour les névés permanents. Cette partie ne se focalise pas sur des formes périglaciaires pouvant être de petite taille, mais sur une durée temporelle. La marge d'erreur de durée correspond au temps de retour du satellite en question.

Pour démontrer l'impact de la neige sur le pergélisol, plusieurs études se focalisent sur l'épaisseur du manteau neigeux (Bernhard et al., 1998 ; Hoelzle et al., 2001). Les images satellites ne permettent pas de déterminer l'épaisseur de la couche neigeuse. Cependant, il est possible de supposer qu'une durée d'enneigement longue coïncide avec une bonne épaisseur de couche neigeuse. Comme le souligne la recherche de Bernhard et al. (1998), lorsque la couche est suffisamment épaisse, elle permet d'isoler le pergélisol des conditions externes. Comme le mentionne cette recherche, la neige conditionne les températures de la couche du pergélisol de différentes manières. Ces résultats coïncident avec les données de durée d'enneigement, affirmant que lorsque la durée d'enneigement est longue, la probabilité d'avoir du pergélisol est plus élevée. Cependant, Zhang et al. (2001) et Ling et Zhang (2003) expliquent que la durée d'enneigement joue un rôle sur l'occurrence du pergélisol, mais que l'épaisseur du manteau neigeux et la date de la première neige sont encore plus importantes.

Cette recherche mentionne aussi que la relation entre la durée d'enneigement et l'occurrence du pergélisol n'est pas réciproque (*Figure 27*). En effet, lorsque la durée d'enneigement est longue, la probabilité d'avoir du pergélisol est forte. En revanche, lorsque la probabilité de présence du pergélisol est forte, la durée d'enneigement est plus variable.

Finalement, en se focalisant sur certaines zones spécifiques (*Figures 28 et 29*) ou avec des conditions spécifiques (*Figures 30 et 31*), la relation entre la durée d'enneigement et l'occurrence du pergélisol devient plus difficile à démontrer. D'autres paramètres ont un impact considérable sur l'occurrence du pergélisol (Haeberli, 1975 ; Haeberli et al., 2006 ; Gruber et Haeberli, 2009). Par exemple, l'occurrence du pergélisol au-dessus de 3000 mètres est presque toujours élevée à cause des conditions topographiques et climatiques. De ce fait, la durée d'enneigement joue un rôle moins important et la relation ne peut pas être prouvée. Cela suit l'idée générale des différentes recherches affirmant que l'influence de la durée d'enneigement sur le pergélisol existe, mais est limitée (Zhang et al., 2001 ; Ling et Zhang, 2003).

### 5.3 Relation entre la neige et les conditions climatiques annuelles

Une analyse spécifique est produite sur des années où les conditions météorologiques sont extrêmes. L'impact du réchauffement climatique sur les régions de haute montagne n'est plus à prouver. Les zones glaciaires ont perdu 30 à 40% de leur volume total entre 1950 et 1998 et la limite d'occurrence du pergélisol pourrait remonter de plusieurs centaines de mètres dans un cas de réchauffement climatique prononcé (Haeberli et Beniston, 1998).

Les résultats annuels provenant des névés permanents ont prouvé que la surface totale de névés permanents durant les années chaudes est plus faible que durant les années froides tandis que pour la durée d'enneigement les résultats sont plus divergents. L'analyse de la surface annuelle pour une durée d'enneigement spécifique montre qu'en général, les années froides ont une aire plus grande que les années chaudes (*Tableau 2*). Cependant, les images annuelles de durée d'enneigement sur différentes zones ne démontrent pas que les années chaudes ou froides ont une durée d'enneigement plus faible ou plus élevée. Les recherches de Beniston (2012) et Fujita et al. (2010) peuvent donner une explication à ce phénomène. L'étude de Beniston (2012) explique que la longueur de la période d'enneigement pourrait être réduite de 100 jours entre 1500 et 2500 mètres avec une augmentation des minima hivernaux de 4°C. Cependant, au-dessus de 2500 mètres une augmentation de la quantité de neige a été aperçue depuis 1970. Cela signifie que les impacts sur la durée d'enneigement au-dessus de 2500 mètres sont plus faibles. Fujita et al. (2010) démontre que certains paramètres comme le vent ont plus d'influence que les températures extérieures sur la fonte des « snow patches ». La relation entre la fonte de la neige et les températures de l'air est difficile à prouver avec cette étude. La durée d'enneigement est donc influencée par d'autres paramètres ce qui explique le fait qu'il est difficile de voir l'impact annuel des fortes températures sur la durée d'enneigement.

#### 5.4 Améliorations et perspectives

Étant donné que les résultats de cette étude sont assez contrastés, certaines améliorations peuvent être faites afin de rendre le modèle plus cohérent. Premièrement, les images satellites de Landsat sont problématiques, car leur résolution spatiale est seulement de 30 mètres. Les névés permanents ou l'occurrence du pergélisol sont des phénomènes apparaissant localement dans le cas des Alpes. D'autres images disponibles gratuitement ont une meilleure résolution spatiale comme Sentinel avec une résolution spatiale à 10 mètres et un temps de retour de 7 jours. Cependant, le lancement du satellite a été fait en 2015 ce qui ne permet pas d'avoir une couverture temporelle assez grande. Dans une dizaine d'années, des études sur une longue période et avec une meilleure résolution pourront être produites avec ce genre de satellite.

Deuxièmement, l'inventaire de glaciers utilisé provient aussi de données satellitaires. L'inventaire GLIMS produit des données sur la Terre entière ce qui signifie que des erreurs peuvent apparaître à certains endroits. Le but étant d'utiliser un maximum de données satellitaires, cet inventaire est utilisé. Cependant, pour affiner le résultat et réduire considérablement le nombre d'erreurs liées aux glaciers, des données sur les glaciers suisses pourraient être reprises. En effet, l'inventaire national est beaucoup plus précis qu'un inventaire mondial.

Troisièmement, d'autres données sur la neige pourraient être utilisées afin d'évaluer la relation avec le pergélisol et les conditions météorologiques annuelles. L'impact de la temporalité des premières et dernières neiges sur les températures du sol est démontré dans l'étude de Ling et Zhang (2003). Le fait de retarder de

dix jours la première et la dernière neige réchauffe les températures du sol. À partir de cette affirmation, il est envisageable de faire un modèle ressortant uniquement les dates de premières et dernières neiges et d'évaluer leur relation avec le pergélisol et les températures de l'air. De plus, il est aussi envisageable de produire un modèle des températures pour les comparer avec les valeurs de névés permanents et de durée d'enneigement pour voir si une relation existe.

Finalement, il est important de mettre en avant que cette étude se base sur l'analyse de modèles autant pour la durée d'enneigement que pour les névés permanents. Les données utilisées pour la répartition du pergélisol proviennent aussi d'un modèle qui peut comporter une certaine marge d'erreur. Afin de produire un modèle informatique, certains choix doivent être faits. Par exemple, les articles scientifiques définissent la valeur de NDSI de 0.4 pour la présence de neige. Cette valeur moyenne pourrait très bien être modifiée en fonction du milieu d'étude. En ce qui concerne le modèle produit par Deluigi (2018), certains choix ont aussi été faits comme par exemple celui de ne pas incorporer les marges proglaciaires dans la répartition du pergélisol. Que ce soit le modèle produit lors de cette étude ou le modèle élaboré par Deluigi (2018), ils ne correspondent pas à une vérité pure ce qui implique que les résultats ne correspondent pas à la réalité du terrain.

Cette étude a pour but d'identifier la durée d'enneigement ainsi que les névés permanents à partir d'images obtenues par voie satellitaire sur une partie des Alpes valaisannes. La relation entre ces deux paramètres avec la probabilité de présence du pergélisol ainsi qu'avec des données climatiques annuelles est étudiée. La difficulté de cette recherche provient de la résolution spatiale du satellite utilisé. En effet, les images provenant des satellites Landsat 5, 7 et 8 ont une résolution de 30 mètres. En milieu alpin, l'hétérogénéité du paysage affecte la répartition du pergélisol et de la neige. De nombreux facteurs jouent un rôle sur la distribution de ces paramètres. De ce fait, il est probable que la résolution soit problématique, car le pergélisol peut se retrouver à certains endroits très spécifiques à cause des multiples facteurs influençant sa répartition.

Les résultats obtenus sont variés. D'une part, la distinction des névés permanents est fortement affectée par la résolution du modèle. De nombreuses erreurs apparaissent, telles que des névés permanents identifiés à l'emplacement de lacs ou de glaciers. De plus, très peu de pixels identifiés comme névés permanents correspondent à des zones où le pergélisol peut être présent. Cependant, le nombre de névés permanents identifiés durant une année chaude est plus faible que durant une année froide, ce qui signifie qu'il est possible d'identifier une relation entre les névés permanents et les caractéristiques météorologiques.

D'autre part, la relation entre la durée d'enneigement et les conditions météorologiques annuelles est difficile à établir, car les résultats annuels divergent entre eux. Cependant, la relation entre la durée d'enneigement et les données sur le pergélisol a pu être établie. Plus la durée d'enneigement est longue, plus la probabilité de présence de pergélisol est élevée.

Pour finir, les images satellites permettent d'obtenir de nombreuses informations temporelles sur l'entier de la planète. Cependant, lors d'une étude où l'échelle locale est d'une grande importance, de nombreuses erreurs peuvent apparaître. La complexité du milieu étudié fait que les données de terrains ainsi que des mesures ayant une meilleure résolution spatiale doivent être favorisées pour ce genre d'étude même si l'échelle temporelle peut être perdue.

## 7. Bibliographie

- Associate Committee on Geotechnical Research (ACGR) (1988). Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms. *Permafrost Subcommittee, National Research Council of Canada, Ottawa, Technical Memorandum 142-156.*
- Barsch, D. (1996). *Rockglaciers, Indicators for the present and former geocology in high mountain environments.* Berlin/Heidelberg, Springer, 331 pp.
- Béguin, C., Sonney, M. P., & Vonlanthen, M. (2006). La végétation des sols polygonaux aux étages alpin supérieur et subnival en Valais (Alpes centro-occidentales, Suisse). *Botanica Helvetica (116)*, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00035-006-0737-z>
- Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology, 412-413*, 291-296.
- Bernhard, L., Sutter, F., Haeberli, W. & Keller, F. (1998). Processes of snow/permafrost-interactions at a high-mountain site, Murtèl/Corvatsch, eastern swiss Alps. *PERMAFROST- Seventh International Conference, Collection Nordicana (55)*, 35-41.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition.* New York: The Guilford Press.
- Chang, L., & Hanssen, R. F. (2015). Detection of permafrost sensitivity of the Qinghai–Tibet railway using satellite radar interferometry. *International Journal of Remote Sensing, 36(3)*, 691-700. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.999886>
- Church, J. E. (1943). Perennial Snow and Glaciers. *The Scientific Monthly, 56(3)*, 211-231. [https://www.jstor.org/stable/17823?seq=1&cid=pdf-reference#references\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/17823?seq=1&cid=pdf-reference#references_tab_contents)
- Dean, K. G., & Morissey, L. A., (1988). Detection and identification of Artic landforms: An assessment of remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54*, 363-371.
- Delaloye, R. (2004). *Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale* (thèse de doctorat). Université de Fribourg Faculté des Sciences, Fribourg, Suisse. Repéré à <https://doc.rero.ch/record/5309/files/DelaloyeR.pdf>



- Delaloye, R. & Morand, S. (1997). Du Val Ferret au Grand-Combin (Alpes Valaisannes): *Inventaire des glaciers rocheux et analyse spatiale du pergélisol à l'aide d'un système d'information géographique (Idrisi)* (thèse de diplôme non publiée). Université de Fribourg, Institut de Géographie, Suisse.
- Deluigi, N. (2018). *Data-driven analysis and mapping of the potential distribution of mountain permafrost* (these de doctorat). Université de Lausanne, Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Lausanne, Suisse. Repéré à [https://serval.unil.ch/notice/serval:BIB\\_F417FD0D4407](https://serval.unil.ch/notice/serval:BIB_F417FD0D4407)
- ESA 2000 (2020) a. Landsat-7. *EO Sharing Earth Observation Ressources*. Repéré à : <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7>
- ESA 2000 (2020) b. Landsat-8 / LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *EO Sharing Earth Observation Ressources*. Repéré à: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-8-ldcm>
- EOS (2020). NDSI. *Earth Observing System*. Repéré à : <https://eos.com/ndsi/> (consulté le 21.04.2020).
- Eveland, J. W., Gooseff, M. N., Lampkin, D. J., Barret, J. E. & Takacs-Vesbach, C. D. (2013). Seasonal controls on snow distribution and aerial ablation at the snow-patch and landscape scales, McMurdo Dry Valley, Antarctica. *The Cryosphere*, 7, 917-931.
- Frauenfelder, R., Allgöwer, B., Haeberli, W. & Hoelzle, M. (1998). Permafrost investigations with GIS- A case study in the Fletschhorn area, Wallis, swiss Alps. *Seventh Internation Conference, Collection Nordicana* (55), 291-295.
- Fujita, K., Hiyama, K., Iida, H. & Ageta, Y. (2010). Self-regulated fluctuations in the ablation of a snow patch over four decades, *Water Ressources Research*, 46, W11541, doi:10.1029/2009WE008383
- GLIMS and NSIDC (2018): Global Land Ice Measurements from Space glacier database. Compiled and made available by the international GLIMS community and the National Snow and Ice Data Center, Boulder CO, U.S.A. DOI:10.7265/N5V98602
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps – a review. *Science of The Total Environment* 493, 1138-1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Granberg, H. B. (1994). Mapping heat loss zones for permafrost prediction at the northern/alpine limit of the boreal forest using high-resolution C-band SAR. *Remote Sensing Environment*, 50(3), 280-294. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90077-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90077-9)

- Gruber, S., & Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112(F2). <https://doi.org/10.1029/2006JF000547>
- Gruber S., & Hoelzle M. (2001). Statistical modelling of mountain permafrost distribution: local calibration and incorporation of remotely sensed data. *Permafrost and periglacial processes*, 12(1), 69-77. <https://doi.org/10.1002/ppp.374>
- Gruber, S., & Haeberli, W. (2009). Mountain permafrost. *Permafrost soils*, 33-44.
- Haeberli, W., Hallet, B., Harensen, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääh, A., ..., Vonder Mühl, D. (2006). Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(3), 184-214. <https://doi.org/10.1002/ppp.561>
- Haeberli, W. (1975). Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich*, 221(17).
- Haeberli, W. & Beniston, M. (1998). Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27 (4), 258-265.
- Harris, S. A., French, H. M., Heginbottom, J. A., Johnston G. H., Ladanyi B., Sego, D. C., & Van Everdingen, R. O. (1988). La terminologie du pergélisol et notions connexes. Ottawa, Conseil National de Recherches du Canada, Note de service technique, 142-154.
- Harris, C., Haeberli, W., Vonder Mühl, D., & King, L. (2001). Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE Project in its global context. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 3–11. DOI: 10.1002/ppp 377
- Harris, C., Arenson, L., Christiansen, H. H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., ... Vonder Muehll, D. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92(3), 117–171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>
- Hoelzle, M., Mittaz, C., Etzelmüller, B., & Haeberli, W. (2001) (1). Surface energy fluxes and distribution models of permafrost in European mountain areas: first experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1), 53-68. <https://doi.org/10.1002/ppp.385>

- Jorgenson, M.T., Shur, Y. L., & Pullman, E.R. (2006). Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 33(2), L02503. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024960>
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., ... Weidmann, Y. (2005). Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 527-554. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-527-2005>
- Kääb, A., Frauenfelder, R., & Roer, I. (2007). On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56, 172-187. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.005>
- Keller, F. (1994). Interaktionen zwischen Schnee und Permafrost – Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 127, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Keller, F., Frauenfelder, R., Gardaz, J.M., Hölzle, M., Kneisel, C., Lugon, R., Philips, M., Reynard, E., & Wenker, L. (1998). Permafrost map of Switzerland. Dans: A.G. Lewkowicz et M. Allard (éds.), *Proceedings, 7th International Conference on Permafrost* (pp. 557-562). Quebec: Yellowknife, Collection Nordicana.
- Kenner, R., Noetzi, J., Hoelzle, M., Raetzo, H. & Phillips, M. (2019). Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps, *The cryosphere*, 13, 1925-1941. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1925-2019>
- Kulkarni, A. V., Singh, S. K., Mathur, P. & Mishra, V. D. (2006) Algorithm to monitor snow cover using AWiFS data of RESOURCESAT-1 for the Himalayan region. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2449–2457.
- Lambiel, C. (2006). *Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité : distribution, régime thermique et instabilités* (thèse de doctorat). Université de Lausanne, Faculté des Géosciences et de l'Environnement, Lausanne, Suisse. Repéré à [https://doc.rero.ch/record/6234/files/These\\_LambielC.pdf](https://doc.rero.ch/record/6234/files/These_LambielC.pdf)
- Leverington, D. W., & Duguay, C. R. (1997). A Neural Network Method to Determine the Presence or Absence of Permafrost near Mayo, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8(2), 205-215. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199732\)8:2<205::AID-PPP252>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199732)8:2<205::AID-PPP252>3.0.CO;2-5)

Lewkowicz, A. G., & Young, K. L. (1990). Hydrology of a perennial snowbank in the continuous permafrost zone, Melville Island, Canada. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 72 (1), 13-21. DOI: 10.2307/521234

Lewkowicz, A. G., & Harris, C. (2005). Morphology and geotechnique of active-layer detachment failures in discontinuous and continuous permafrost, northern Canada. *Geomorphology*, (69), 275–297. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.01.011>

Ling, F. & Zhang, T. (2003). Impact of the Timing and Duration of Seasonal Snow Cover on the Active Layer and Permafrost in the Alaskan Arctic. *Permafrost and Periglacial Processes*, 14, 141-150. DOI: 10.1002/ppp.445

Luetsch, M., Stoeckli, V., Lehning, M., Haeberli, W., & Ammann, W. (2004). Temperatures in two boreholes at Flüela Pass, Eastern Swiss Alps: The Effect of Snow Redistribution on Permafrost Distribution Patterns in High Mountain Areas. *Permafrost and Periglacial Processes*, (15), 283-297. <https://doi.org/10.1002/ppp.500>

Luetsch, M., Lehning, M., & Haeberli, W. (2008). A sensitivity study of factors influencing warm/thin permafrost in the Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 54(187), 696-704. <https://doi.org/10.3189/002214308786570881>

MétéoSuisse (2019). Rapport climatologique 2018. *Office fédéral de météorologie et de climatologie*. MétéoSuisse, Zurich. 94 p.

Morrissey, L. A., Strong, L. L., & Card, D. H. (1986). Mapping permafrost in the boreal forest with thematic mapper satellite data. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 52(9), 1513-1520.

NCCS (2018). CH2018 – scénarios climatiques pour la Suisse. Zurich : National Centre for Climate Services.

Pastick, N. J., Jorgenson, M. T., Wylie, B. K., Nield, S. J., Johnson, K. D., & Finley, A. O. (2015). Distribution of near-surface permafrost in Alaska: Estimates of present and future conditions. *Remote Sensing of Environment*, 168, 301-315. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.019>

Paul, F., Maisch, M., Rothenbühler, C., Hoelzle, M. & Haeberli, W. (2007). Calculation and visualisation of future glacier extent in the Swiss Alps by means of hypsographic modelling. *Global and Planetary Change*, 55 (4), 343-357. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.08.003>

- Pedersen, A. Ø., Speed, J. D. M., and Tombre, I. M. (2013). Prevalence of grubbing in the arctic tundra increases with the pink-footed goose population expansion. *Polar Biol.* 36, 1569–1575. doi: 10.1007/s00300-013-1374-9
- Peddle, D. R., & Franklin, S. E. (1993). Classification of permafrost active layer depth from remotely sensed and topographic evidence. *Remote Sensing of Environment*, 44(1), 67-80. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90103-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90103-5)
- Raup, B. H., Racoviteanu, A., Khalsa, S. J. S., Helm, C., Armstrong, R. & Arnaud, Y. (2007). The GLIMS Geospatial Glacier Database: a New Tool for Studying Glacier Change. *Global and Planetary Change*, 56, 101-110. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.07.018
- Scherrer, S. C., Wüthrich, C., Croci-Maspoli, M., Weingartner, R. & Appenzeller, C. (2013). Snow variability in the Swiss Alps 1864-2009. *International Journal of Climatology*, 33, 3162-3173.
- Scherler, M., Hauck, C., Hoelzle, M., and Salzmann, N. (2013). Modeled sensitivity of two alpine permafrost sites to RCMbased climate scenarios. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 780–794. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20069>, 2013.
- Stocker-Mittaz, C., Hoelzle, M., & Haeberli, W. (2002). Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data: a first step. *Permafrost and Periglacial Processes*, (13), 271-282. <https://doi.org/10.1002/ppp.426>
- Sturm, M., Goldstein, M. A., and Parr, C. (2017). Water and life from snow: a trillion dollar science question. *Water Resources Research* 53, 3534–3544. doi: 10.1002/2017WR020840
- Swisstopo (2020). Carte de la Suisse. Repéré à: <https://map.geo.admin.ch/>
- Thie, J. (1974). Distribution and Thawing of Permafrost in the Southern Part of the Discontinuous Permafrost Zone in Manitoba. *Arctic Institute of North America*, 27(3), 189-200.
- Trishchenko, A. P., Leblanc, S. G., Wang, S., Li, J., Ungureanu, C., Luo, Y., ... Fontana, F. (2016). Variations of Annual Minimum Snow and Ice Extent over Canada and Neighboring Landmass Derived from MODIS 250-m Imagery for 2000–2014. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(3), 214-242. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1166043>



<https://pubs.usgs.gov/fs/2010/3026/pdf/FS2010-3026.pdf>

Vikhamar, D. & Solberg, R. (2003). Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 88, 309-323.

Zhang, T., Osterkamp, T. E., & Stamnes, K. (1997). Effects of climate on the active layer and permafrost on the North Slope of Alaska, USA. *Permafrost Periglacial Processes*, 8(1), 45-67.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199701\)8:1<45::AID-PPP240>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199701)8:1<45::AID-PPP240>3.0.CO;2-K)

Zhang, T., Barry, R. G., Haeberli, W. (2001). Numerical simulations of the influence of the seasonal snow cover on the occurrence of permafrost at high latitudes. *Nowegian Journal of Geography*, 55 (4), 261-266.

Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regim: An overview. *Reviews of Geophysics*, 43(4), 1-23. DOI: 10.1029/2004RG000157

## 8. Annexes

### 8.1 Code principal pour la durée d'enneigement

Lien vers le code principal: <https://code.earthengine.google.com/0e7f2408aafbbe880e833229def53d5a>

```
Map.centerObject ( area, 11)

//filtres des différents satellites landsat
//l'application du filtre date s'appliquera par la suite dans une liste !
//land8
var filteredland8 = SR_landsat8
.select(['B3','B4','B5','B6'], ['G', 'R', 'NIR', 'SWIR']);

//land7
var filteredland7 = SR_landsat7
.select(['B2','B3','B4','B5'], ['G', 'R', 'NIR', 'SWIR']);

//land5
var filteredland5 = SR_landsat5
.select(['B2','B3','B4','B5'], ['G', 'R', 'NIR', 'SWIR']);

//regroupement des différentes collections grâce à la fonction merge
var mergedcoll = filteredland8;
mergedcoll = ee.ImageCollection(mergedcoll.merge(filteredland7));
mergedcoll = ee.ImageCollection(mergedcoll.merge(filteredland5));
mergedcoll = mergedcoll
.filterBounds(points)
.map(function(image){return image.clip(area2)}); //cette fonction sert à couper les
images sur l'area
print(mergedcoll, 'merged collection');

//visualisation du masque des glaciers
var area_glacier = currentglaciers
.filterBounds(area2)
.filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

Map.addLayer(area_glacier, {}, 'surface des glaciers', false);
var maskGlaciers =
ee.Image.constant(1).clipToCollection(area_glacier).mask().not();
Map.addLayer(maskGlaciers, [], 'maskGlaciers', false);

//fonction qui répétera le traitement des images pour le nombre d'années qu'on
définit (20 ans)
function maFonction(mergedcoll, deltaD){

  //inventaire des glaciers
  var area_glacier = currentglaciers
  .filterBounds(area2)
  .filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

  //masque et display des lacs et des glaciers
  //masque du glacier
  var maskGlaciers =
ee.Image.constant(1).clipToCollection(area_glacier).mask().not();

  //masque des lacs
  var lacs = ee.FeatureCollection('users/gravey_mathieu/HydroLAKES');
  var mask_lac = ee.Image.constant(1).clipToCollection(lacs).mask().not();
```

```

//création des images avec NDSI
var allimages = mergedcoll.map(function(image) {
  var tmp= image;
  tmp =
tmp.addBands(ee.Image.constant(ee.Number(image.get('system:time_start')).divide(100
0*3600*24*365)).toFloat().rename('time'));
  tmp =
tmp.set('doy', ee.Date(image.get('system:time_start')).getRelative('day', 'year'));
// permet d'avoir le nombre de jours
  tmp =
tmp.addBands(ee.Image.constant(ee.Date(image.get('system:time_start')).getRelative(
'day', 'year')).toFloat().rename('doy'));
  tmp = tmp.addBands(image.normalizedDifference(['G', 'SWIR']).rename('ndsi'));
  tmp = tmp.addBands(tmp.select('ndsi').gt(0.4).rename('snow')); // nouvelle
bande où on retrouve la neige
  tmp = tmp.updateMask(maskGlaciers).updateMask(mask_lac.focal_min({radius:250,
units:'meters'}));
  // le focal_min crée un buffer de x mètres autour du lac à ne pas prendre

return tmp;
});

// Différence de temps qui va être prise dans le filtre
var delta = 40;

// Définition du filtre temporel
var timeFilter = ee.Filter.maxDifference({
  difference: delta,
  leftField: 'doy',
  rightField: 'doy'
});
// on prend les images 40 jours avant et 40 jours après

//Définition des caractéristiques du join
var saveAllJoin = ee.Join.saveAll({
  matchesKey: 'neighbors',
  ordering: 'doy',
  ascending: true
});

// application de la jointure avec le filtre temporel
var matches = ee.ImageCollection(saveAllJoin.apply(allimages, allimages,
timeFilter));

// Résultats

matches=matches.map(function(image) {
  var neighborsCollection=ee.ImageCollection.fromImages(image.get('neighbors'));

  return
image.addBands(neighborsCollection.select('snow').mean().gt(0.5).rename('snowInAver
age'));
})

//moyenne date première neige
var averageDateFirstSnow=matches.map(function(im)
{
  return im.updateMask(im.select('snowInAverage'));
}).reduce(ee.Reducer.firstNonNull());

```

UNIL | Université de Lausanne

```

.rename(matches.first().bandNames());

//moyenne date dernière neige
var averageDateLastSnow = matches.map(function(im)
{
  return im.updateMask(im.select('snowInAverage'));
}).reduce(ee.Reducer.lastNonNull());
.rename(matches.first().bandNames());

// Correction temporelle

averageDateFirstSnow=averageDateFirstSnow.addBands(averageDateFirstSnow.select('doy')
.add(ee.Number(180).subtract(deltaD)).mod(365).rename('correctedDoy first
snow'));
averageDateFirstSnow= averageDateFirstSnow.select('correctedDoy first snow');
averageDateLastSnow =
averageDateLastSnow.addBands(averageDateLastSnow.select('doy').add(ee.Number(180).s
ubtract(deltaD)).mod(365).rename('correctedDoy last snow'));
averageDateLastSnow= averageDateLastSnow.select('correctedDoy last snow');

//différence entre les deux moyennes pour obtenir la durée
var averageDiff =
averageDateLastSnow.subtract(averageDateFirstSnow).rename('diff');

return averageDiff;
}

//Création du filtre temporel
var timeFilter = ee.Filter.maxDifference({
  difference: 1000 * 3600 * 24 *180,
  leftField: 'system:time_start',
  rightField: 'system:time_start'
});

// définition de la jointure qui permettra de relier les différentes années avec la
différence moyenne
var saveAllJoin = ee.Join.saveAll({
  matchesKey: 'ImageOfTheYear',
  ordering: 'system:time_start',
  ascending: true
});

//Création d'une liste contenant chaque année de 1999 à 2019 avec les données
temporelles system:time_start
var yearsList=ee.FeatureCollection(ee.List.sequence(1999, 2020, 1)
.map(function(y){return ee.Feature(null,
ee.Dictionary.fromLists(['system:time_start'],[ee.Date.fromYMD(y,2,1).millis()])}
));

print(yearsList);

// Application de la jointure sur la liste et la fonction mergedcoll
var collectionOfDiff = saveAllJoin.apply(yearsList, mergedcoll, timeFilter);

//finalisation
collectionOfDiff=ee.ImageCollection(collectionOfDiff.map(function(yearFeature){

```

```
var imCol=ee.ImageCollection(ee.List(yearFeature.get('ImageOfTheYear')));

return
maFonction(imCol,ee.Date(yearFeature.get('system:time_start')).getRelative('day',
'year')).set('system:time_start',yearFeature.get('system:time_start'));
});

//moyenne et médiane
Map.addLayer(collectionOfDiff.mean(),{min:0, max: 365}, "moyenne sur toutes les
années",false);
Map.addLayer(collectionOfDiff.median(),{min:0, max:365}, "médiane sur toutes les
années",false);

//graphique pour toutes les années d'un point spécifique
var TimeSeries = ui.Chart.image.series(collectionOfDiff.select('diff'),
point_test,ee.Reducer.mean(), 100);
print(TimeSeries, 'histogramme d un pixel basse altitude')
var TimeSeries2 = ui.Chart.image.series(collectionOfDiff.select('diff'),
point_high_altitude_test, ee.Reducer.mean(), 100);
print(TimeSeries2, 'histogramme d un pixel haute altitude');

//Export to asset -> si besoin d'exporter une image
Export.image.toAsset({
  image: ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(8)),
  description: 'diff_neige_2018_2019',
  scale: 30,
  assetId: 'users/demierrethierry/TM/diff_neige_2018-2019',
  region: area2
});

//durée d'enneigement visualisation de différentes manières

Map.addLayer(ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(4)),{min
:0, max: 365}, 'durée d enneigement 2003-2004', false);
Map.addLayer(ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(4)),{min
:0, max: 365, palette: ['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] },
'durée d enneigement 2003-2004 color', false);
Map.addLayer(collectionOfDiff.mean(),{min:0, max: 365}, 'durée d enneigement brut',
false);
Map.addLayer(ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(14)),
{min:0, max:365}, 'durée d enneigement avec valeurs négatives de 2013',false);
Map.addLayer(collectionOfDiff.mean(), {min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF']}, 'moyenne de durée d
enneigement', false);

//LEGENDE
var viz = {min: 0, max:365, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF']};
// position du panel
var legend = ui.Panel({
  style: {
    height: '400px',
    width: '150px',
    position: 'bottom-left',
    padding: '6px 15px'
  }
});
```



```
// titre de la légende
var legendTitle = ui.Label({
  value: 'Durée d enneigement (j)',
  style: {
    fontWeight: 'bold',
    fontSize: '18px',
    margin: '0 0 4px 0',
    padding: '0'
  }
});

legend.add(legendTitle);

// image de la légende
var lon = ee.Image.pixelLonLat().select('latitude');
var gradient = lon.multiply((viz.max-viz.min)/100.0).add(viz.min);
var legendImage = gradient.visualize(viz);

// texte au-dessus de la légende
var panel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label(viz['max'])
  ],
});

legend.add(panel);

// thumbnail
var thumbnail = ui.Thumbnail({
  image: legendImage,
  params: {bbox:'0,0,10,100', dimensions:'10x200'},
  style: {padding: '1px', position: 'bottom-center'}
});

// ajout du thumbnail
legend.add(thumbnail);

// texte pour minimum
var panel = ui.Panel({
  widgets: [
    ui.Label(viz['min'])
  ],
});

legend.add(panel);

Map.add(legend);

// Statistiques via scatter plot

//combiner les deux images à plot
var img_date_permal_entier = permal.addBands
(collectionOfDiff.mean().select('diff'));

// échantillon utilisé
```

UNIL | Université de Lausanne

```

var values = img_date_permal_entier.sample({ region: area2, scale: 30, numPixels:
5000})

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart = ui.Chart.feature.byFeature(values, 'diff', ['b1'])
  .setChartType('ScatterChart')

  .setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF'], width: 300, height: 300, titleX:
'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence du pergélisol',
trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true, visibleInLegend:
true}} })

print('scatter plot avec ligne de tendance pour la moyenne de durée d
enneigement:',chart)

//ajout de la moyenne glissante à l'aide d'un join intégrant la moyenne et la
médiane à l'intérieur de la collection "values"
var originalValues=values;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues,originalValues,ee.Filter.
maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
  .map(function(ft) {
    var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
    return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
  });

values=values.merge(ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues,originalValu
es,ee.Filter.maxDifference({difference:0.05, leftField:'b1', rightField:'b1'}))
  .map(function(ft) {
    var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
    return
ft.set('diff',neig.aggregate_mean('diff'),'b1_diffMean',ft.get('b1'))
  }));

values=values.merge(ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues,originalValu
es,ee.Filter.maxDifference({difference:0.05, leftField:'b1', rightField:'b1'}))
  .map(function(ft) {
    var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
    return
ft.set('diff',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['diff']).get('median'),'b1_di
ffMedian',ft.get('b1'));
  }));

print(values)

var chart = ui.Chart.feature.byFeature(values, 'diff',
['b1','b1_mean','b1_median','b1_diffMean','b1_diffMedian'])
  .setChartType('ScatterChart')
  .setOptions({ pointSize: 1, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00','00FFFF',
'FFFF00'], width: 300, height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: '
probabilité de présence du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear',
color:'FF0000', showR2: true, visibleInLegend: true}}})

print('scatter plot avec ligne de tendance pour la moyenne de durée d
enneigement:',chart)

```

```

//trend en fonction de l'altitude
//trend 2500
var srtmgt2500 = srtm.gt(2500);
var srtm2500 = srtm.updateMask(srtmgt2500);
var srtm2500b = srtm2500.clip(area2);
Map.addLayer(srtm2500b, {bands: ['elevation'], min:2500, max: 4800}, 'altitude >
2500 area', false)

var duree_2500 = collectionOfDiff.mean().updateMask(srtm2500b);
Map.addLayer(duree_2500, {min: 0, max:365, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF']}, 'enneigement altitude
2500 +', false)

var img_date2500m_permal = permal.addBands(duree_2500.select('diff'));

// échantillon utilisé
var values2500m = img_date2500m_permal.sample({ region: area2, scale: 30,
numPixels: 10000})

var originalValues2500m=values2500m;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values2500m=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues2500m,originalValues2
500m,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
.map(function(ft){
var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
});
// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart2500m = ui.Chart.feature.byFeature(values2500m, 'diff', ['b1', 'b1_mean',
'b1_median'])
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({ pointSize: 1, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300,
height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}} })

print('scatter plot au-dessus de 2500m:',chart2500m)

//trend 3000 m
var srtmgt3000 = srtm.gt(3000);
var srtm3000 = srtm.updateMask(srtmgt3000);
var srtm3000b = srtm3000.clip(area2);
var duree_3000 = collectionOfDiff.mean().updateMask(srtm3000b);
Map.addLayer(duree_3000, {min: 0, max:365, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF']}, 'enneigement altitude
3000 +', false)

var img_date3000m_permal = permal.addBands(duree_3000.select('diff'));

// échantillon utilisé
var values3000m = img_date3000m_permal.sample({ region: area2, scale: 30,
numPixels: 30000})

//moyenne mobile
var originalValues3000m=values3000m;

```

```

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values3000m=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues3000m,originalValues3000m,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
    .map(function(ft) {
        var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
        return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
    });
// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart3000m = ui.Chart.feature.byFeature(values3000m, 'diff', ['b1','b1_mean', 'b1_median'])
    .setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({ pointSize: 1, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300, height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true, visibleInLegend: true}}});

print('scatter plot au-dessus de 3000m:',chart3000m)

//trend en fonction d'une zone spécifique
//ouest lac mauvoisin
var img_date_perma_mauv =
perma.addBands(collectionOfDiff.mean().select('diff'));

// échantillon utilisé
var values_mauv = img_date_perma_mauv.sample({ region: area_mauvoisin, scale: 30, numPixels: 30000})

//moyenne mobile
var originalValuesmauv=values_mauv;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values_mauv=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValuesmauv,originalValuesmauv,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
    .map(function(ft) {
        var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
        return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
    });
// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart_mauv = ui.Chart.feature.byFeature(values_mauv, 'diff', ['b1', 'b1_mean', 'b1_median'])
    .setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300, height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true, visibleInLegend: true}}});

print('scatter plot à l ouest du lac de mauvoisin:',chart_mauv)

//mont fort
var img_date_perma_mont_fort =
perma.addBands(collectionOfDiff.mean().select('diff'));

// échantillon utilisé
var values_mont_fort = img_date_perma_mont_fort.sample({ region: area_montfort, scale: 30, numPixels: 5000})

```

```

//moyenne mobile
var originalValuesmf=values_mont_fort;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values_mont_fort=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValuesmf,originalValue
smf,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
    .map(function(ft){
        var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
        return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
    });
// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart_mont_fort = ui.Chart.feature.byFeature(values_mont_fort, 'diff', ['b1',
'b1_mean', 'b1_median'])
    .setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300,
height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}} });

print('scatter plot proche du mont-fort:',chart_mont_fort)

//une année -> 2015 -> on prend de août 2014 Ã août 2016 pour obtenir l'entier de
2015
var coll_2014_2016 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(1
5)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(16))]);
var mean_2014_2016 = coll_2014_2016.mean();

var img_2015_perma1 = perma1.addBands(mean_2014_2016.select('diff'));

// échantillon utilisé
var values2015 = img_2015_perma1.sample({ region: area2, scale: 30, numPixels:
5000})
//moyenne mobile
var originalValues2015=values2015;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values2015=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues2015,originalValues201
5,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
    .map(function(ft){
        var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
        return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
    });

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart2015 = ui.Chart.feature.byFeature(values2015, 'diff', ['b1', 'b1_mean',
'b1_median'])
    .setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300,
height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}}})

print('scatter plot pour l année 2015:',chart2015)

```



UNIL | Université de Lausanne

```
//une année -> 2011
var coll_2010_2012 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(1
1)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(12))]);
var mean_2010_2012 = coll_2010_2012.mean();

var img_2011_perma1 = perma1.addBands(mean_2010_2012.select('diff'));

// échantillon utilisé
var values2011 = img_2011_perma1.sample({ region: area2, scale: 30, numPixels:
5000})
//moyenne mobile
var originalValues2011=values2011;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values2011=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues2011,originalValues201
1,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
.map(function(ft) {
var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
});

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart2011 = ui.Chart.feature.byFeature(values2011, 'diff', ['b1','b1_mean',
'b1_median'])
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF', 'FF0000', '00FF00'], width: 300,
height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}} })

print('scatter plot pour 1 année 2011:',chart2011)

//2003
var coll_2002_2004 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(3
)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(4))]);
var mean_2002_2004 = coll_2002_2004.mean();

var img_2003_perma1 = perma1.addBands(mean_2002_2004.select('diff'));

// échantillon utilisé
var values2003 = img_2003_perma1.sample({ region: area2, scale: 30, numPixels:
5000})
//moyenne mobile
var originalValues2003=values2003;

//on prend une différence de 10 jours de chaque côté pour la moyenne -> 20 jours
values2003=ee.Join.saveAll('neighbours').apply(originalValues2003,originalValues200
3,ee.Filter.maxDifference({difference:10, leftField:'diff', rightField:'diff'}))
.map(function(ft) {
var neig=ee.FeatureCollection(ee.List(ft.get('neighbours')));
return ft.set('b1_mean',neig.aggregate_mean('b1'),

'b1_median',neig.reduceColumns(ee.Reducer.median(),['b1']).get('median'));
});

// scatter plot de l'échantillon utilisé
```

UNIL | Université de Lausanne

```

var chart2003 = ui.Chart.feature.byFeature(values2003, 'diff', ['b1','b1_mean',
'b1_median'])
  .setChartType('ScatterChart')
  .setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF','FF0000', '00FF00'], width: 300,
height: 300, titleX: 'durée d enneigement (j)', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol' , trendlines: {0 :{:type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}}})

print('scatter plot pour l année 2003:',chart2003)

//affichage de chaque année importante colorée
var duree_2001 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(1
)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(2))]).mean();
Map.addLayer(duree_2001,{min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] }, 'durée d enneigement
2001 color', false);
var duree_2003 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(3
)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(4))]).mean();
Map.addLayer(duree_2003,{min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] }, 'durée d enneigement
2003 color', false);
var duree_2011 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(11
)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(12))]).mean();
Map.addLayer(duree_2011,{min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] }, 'durée d enneigement
2011 color', false);
var duree_2015 =
ee.ImageCollection([ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(15
)), ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(16))]).mean();
Map.addLayer(duree_2015,{min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] }, 'durée d enneigement
2015 color', false);

Map.addLayer(ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(0)),{min
:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:
['FF0000','FF8000','FFFF00','00FFFF','0080FF','0000FF'] }, 'durée d enneigement
1999 color', false);

var permalgt50= permal.gt(0.5);
permalgt50 = permalgt50.updateMask(permalgt50);
//transformation de la resolution afin de comparer les pixels
//information de l'image landsat
var nevesProjection = srtm.projection();
print('Neves projection:', nevesProjection);

//reduction de la resolution
var reducedpermal = permalgt50
  //reduction de permal.
  .reduceResolution({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    maxPixels: 64
  })
  // reprojexion sur les caractéristiques des images de neves
  .reproject({
    crs: nevesProjection
  });

```

```
Map.addLayer (reducedpermal, {min : 0, max:1, palette:['FF00E0'], opacity: 0.75},  
'carte permafrost 50%+', false);
```

```
//lien entre duree d'enneigement et pergélisol de manière visuelle  
var perge_duree = collectionOfDiff.mean().updateMask(reducedpermal);  
Map.addLayer(perge_duree, {min:0, max: 365, opacity: 0.55, palette:  
['FF0000', 'FF8000', 'FFFF00', '00FFFF', '0080FF', '0000FF']}, 'duree d enneigement où  
il y a du pergélisol');
```

```
//NEIGE POUR UNE CERTAINE DUREE
```

```
var dur1999 = ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(0));  
var dur2001 = ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(2));  
var dur2003 = ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(4));  
var dur2011 = ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(12));  
var dur2015 = ee.Image(collectionOfDiff.toList(collectionOfDiff.size()).get(16));
```

```
Map.addLayer(dur2013, {min:0, max:365}, 'enneigement 2013', true);
```

```
//200 JOURS
```

```
var dur1999_200 = dur1999.select("diff").gt(200);  
var dur2001_200 = dur2001.select("diff").gt(200);  
var dur2003_200 = dur2003.select("diff").gt(200);  
var dur2011_200 = dur2011.select("diff").gt(200);  
var dur2015_200 = dur2015.select("diff").gt(200);
```

```
//MASQUE 200 JOURS
```

```
dur1999_200 = dur1999_200.updateMask(dur1999_200);  
dur2001_200 = dur2001_200.updateMask(dur2001_200);  
dur2003_200 = dur2003_200.updateMask(dur2003_200);  
dur2011_200 = dur2011_200.updateMask(dur2011_200);  
dur2015_200 = dur2015_200.updateMask(dur2015_200);
```

```
Map.addLayer(dur1999_200, {palette:['FF0000']}, 'durée 1999 200j', false);  
Map.addLayer(dur2001_200, {palette:['0000FF']}, 'durée 2001 200j', false);  
Map.addLayer(dur2003_200, {palette:['FFFF00']}, 'durée 2003 200j', false);  
Map.addLayer(dur2011_200, {palette:['00FFFF']}, 'durée 2011 200j', false);  
Map.addLayer(dur2015_200, {palette:['0080FF']}, 'durée 2015 200j', false);
```

```
//250 JOURS
```

```
var dur1999_250 = dur1999.select("diff").gt(250);  
var dur2001_250 = dur2001.select("diff").gt(250);  
var dur2003_250 = dur2003.select("diff").gt(250);  
var dur2011_250 = dur2011.select("diff").gt(250);  
var dur2015_250 = dur2015.select("diff").gt(250);
```

```
//MASQUE 250 JOURS
```

```
dur1999_250 = dur1999_250.updateMask(dur1999_250);  
dur2001_250 = dur2001_250.updateMask(dur2001_250);  
dur2003_250 = dur2003_250.updateMask(dur2003_250);  
dur2011_250 = dur2011_250.updateMask(dur2011_250);  
dur2015_250 = dur2015_250.updateMask(dur2015_250);
```

```
//ajout
```

```
Map.addLayer(dur1999_250, {palette:['0000FF']}, 'durée 1999 250j', false);  
Map.addLayer(dur2001_250, {palette:['0000FF']}, 'durée 2001 250j', false);  
Map.addLayer(dur2003_250, {palette:['0000FF']}, 'durée 2003 250j', false);
```

UNIL | Université de Lausanne

```
Map.addLayer(dur2011_250, {palette:['0000FF']}, 'durée 2011 250j', false);
Map.addLayer(dur2015_250, {palette:['0000FF']}, 'durée 2015 250j', false);
```

```
// 300 JOURS
```

```
var dur1999_300 = dur1999.select("diff").gt(300);
var dur2001_300 = dur2001.select("diff").gt(300);
var dur2003_300 = dur2003.select("diff").gt(300);
var dur2011_300 = dur2011.select("diff").gt(300);
var dur2015_300 = dur2015.select("diff").gt(300);
```

```
//MASQUE 300 JOURS
```

```
dur1999_300 = dur1999_300.updateMask(dur1999_300);
dur2001_300 = dur2001_300.updateMask(dur2001_300);
dur2003_300 = dur2003_300.updateMask(dur2003_300);
dur2011_300 = dur2011_300.updateMask(dur2011_300);
dur2015_300 = dur2015_300.updateMask(dur2015_300);
```

```
//AJOUT
```

```
Map.addLayer(dur1999_300, {palette:['FF0000']}, 'durée 1999 300j', false);
Map.addLayer(dur2001_300, {palette:['FF0000']}, 'durée 2001 300j', false);
Map.addLayer(dur2003_300, {palette:['FF0000']}, 'durée 2003 300j', false);
Map.addLayer(dur2011_300, {palette:['FF0000']}, 'durée 2011 300j', false);
Map.addLayer(dur2015_300, {palette:['FF0000']}, 'durée 2015 300j', false);
```

```
//350 JOURS
```

```
var dur1999_350 = dur1999.select("diff").gt(350);
var dur2001_350 = dur2001.select("diff").gt(350);
var dur2003_350 = dur2003.select("diff").gt(350);
var dur2011_350 = dur2011.select("diff").gt(350);
var dur2015_350 = dur2015.select("diff").gt(350);
```

```
//MASQUE 350 JOURS
```

```
dur1999_350 = dur1999_350.updateMask(dur1999_350);
dur2001_350 = dur2001_350.updateMask(dur2001_350);
dur2003_350 = dur2003_350.updateMask(dur2003_350);
dur2011_350 = dur2011_350.updateMask(dur2011_350);
dur2015_350 = dur2015_350.updateMask(dur2015_350);
```

```
//ajout
```

```
Map.addLayer(dur1999_350, {palette:['FFFF00']}, 'durée 1999 350j', false);
Map.addLayer(dur2001_350, {palette:['FFFF00']}, 'durée 2001 350j', false);
Map.addLayer(dur2003_350, {palette:['FFFF00']}, 'durée 2003 350j', false);
Map.addLayer(dur2011_350, {palette:['FFFF00']}, 'durée 2011 350j', false);
Map.addLayer(dur2015_350, {palette:['FFFF00']}, 'durée 2015 350j', false);
```

```
print(dur2001_350);
```

```
//nombre de pixels -> CHANGER LA VARIABLE POUR OBTENIR D'AUTRES VALEURS
```

```
var nb_pixel_350 = dur2015_300.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.count(),
  geometry: square_area,
```

```
});  
print(ee.Number(nb_pixel_350.getNumber("diff").multiply(900).divide(1e6)));
```

## 8.2 Code d'identification des névés permanents sur Matlab

```
clear  
close all  
clc  
  
%% Paramètres à définir  
  
ndsi = 0.4; % les valeurs supérieurs auront de la neige et inférieurs non  
tiffille = dir('*.tif'); % cherche les fichiers tif dans le current folder  
nz = length(tiffille); % nombre d'images  
ne = nz-2; %nombre d'images erronées acceptées / le nombre doit être changé en  
fonction du pourcentage en question  
mydata = cell( 1, nz); %création d'une cellule pour insérer les fichiers tif  
%% import de la collection d'images satellites  
  
for k = 1: nz  
    [mydata{k},R] = geotiffread(tiffille(k).name);  
end  
  
[nx,ny] = size(mydata{1,1});  
collection = zeros(nx, ny, nz);  
  
%% mise en place dans une collection  
for k = 1: nz  
    collection(:,:,k) = mydata{1,k};  
    k  
end  
  
%%LIRE UNE SEULE IMAGE POUR AVOIR L'INFORMATION LORS DE L'EXPORT  
%%A CHANGER A CHAQUE RUN  
[image0,R] = geotiffread('2009_0720.tif');  
  
%% création de graphes analysant chaque pixel de NDSI des images sur une année  
  
%%imshow(image0)  
  
mapshow(collection(:,:,1),R)  
figure, mapshow(collection(:,:,2),R)  
%figure, mapshow(collection(:,:,3),R)  
%figure, mapshow(collection(:,:,4),R)  
%figure, mapshow(collection(:,:,5),R)  
  
%%map des pixels ayant une valeur supérieure à 0.4 sur une année entière,  
%%puis sur plusieurs années -> névés permanents  
  
B=collection;  
B_v = zeros(nz,nx*ny);  
  
for i=1:nz  
    B(:, :, i) = double(collection(:, :, i)>0.4); %1: >0.4; 0:<0.4; double pour  
convertir logic en double  
end
```



UNIL | Université de Lausanne

```
sum_B = sum(B,3); %somme en z-dimension
bool= sum_B; %copier
bool (bool<ne)=0;
bool (bool>ne)=1;

figure (); mapshow(bool,R)
axis image off

%L'INFO DOIT ETRE CHANGEE SI LE NOM DU FICHER CHANGE
info= geotiffinfo('2009_0720.tif');
geotiffwrite('bool0409_87.tif', bool, R,'GeoKeyDirectoryTag',
info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);
```

## 8.3 Analyse des névés permanents sur Google Earth Engine

### 8.3.1 Données quantitatives pour les névés permanents annuels

```
Map.centerObject(area2, 11)

//masque
neves9900 = neves9900.updateMask(neves9900);
neves0001 = neves0001.updateMask(neves0001);
neves0102 = neves0102.updateMask(neves0102);
neves0203 = neves0203.updateMask(neves0203);
neves0304 = neves0304.updateMask(neves0304);
neves0405 = neves0405.updateMask(neves0405);
neves0506 = neves0506.updateMask(neves0506);
neves0607 = neves0607.updateMask(neves0607);
neves0708 = neves0708.updateMask(neves0708);
neves0809 = neves0809.updateMask(neves0809);
neves0910 = neves0910.updateMask(neves0910);
neves1011 = neves1011.updateMask(neves1011);
neves1112 = neves1112.updateMask(neves1112);
neves1213 = neves1213.updateMask(neves1213);
neves1314 = neves1314.updateMask(neves1314);
neves1415 = neves1415.updateMask(neves1415);
neves1516 = neves1516.updateMask(neves1516);
neves1617 = neves1617.updateMask(neves1617);
neves1718 = neves1718.updateMask(neves1718);
neves1819 = neves1819.updateMask(neves1819);

//masque glacier
var area_glacier = currentglaciers
.filterBounds(area2)
.filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

//affichage

Map.addLayer(srtm.clip(area2),{bands:['elevation'], min: 500, max: 4800},
'srtm',false);
Map.addLayer(neves9900, {palette:'FF0000'},'neves9900',false);
Map.addLayer(neves0001,{palette: 'FF0000'},'neves0001',false);
Map.addLayer(neves0102,{palette: 'FF0000'},'neves0102',false);
Map.addLayer(neves0203,{palette: 'FF0000'},'neves0203',false);
Map.addLayer(neves0304,{palette: 'FF0000'},'neves0304',false);
Map.addLayer(neves0405,{palette: 'FF0000'},'neves0405',false);
```

UNIL | Université de Lausanne

```
Map.addLayer(neves0506,{palette: 'FF0000'},'neves0506',false);
Map.addLayer(neves0607,{palette: 'FF0000'},'neves0607',false);
Map.addLayer(neves0708,{palette: 'FF0000'},'neves0708',false);
Map.addLayer(neves0809,{palette: 'FF0000'},'neves0809',false);
Map.addLayer(neves0910,{palette: 'FF0000'},'neves0910',false);
Map.addLayer(neves1011,{palette: 'FF0000'},'neves1011',false);
Map.addLayer(neves1112,{palette: 'FF0000'},'neves1112',false);
Map.addLayer(neves1213,{palette: 'FF0000'},'neves1213',false);
Map.addLayer(neves1314,{palette: 'FF0000'},'neves1314',false);
Map.addLayer(neves1415,{palette: 'FF0000'},'neves1415',false);
Map.addLayer(neves1516,{palette: 'FF0000'},'neves1516',false);
Map.addLayer(neves1617,{palette: 'FF0000'},'neves1617',false);
Map.addLayer(neves1718,{palette: 'FF0000'},'neves1718',false);
Map.addLayer(neves1819,{palette: 'FF0000'},'neves1819',false);
Map.addLayer(area_glacier);

// la différence permet de voir où il y a des zones communes entre les deux années
var diff1517 = neves0102.subtract(neves1819);
Map.addLayer(diff1517, {palette: '00FFFF'}, 'différence 15 17', true);

print(diff1517);
//nombre de pixel

var nb_pixel_diff = diff1517.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.count(),
  geometry: area
});

print(nb_pixel_diff.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000), 'aire des pixels
durant 2015 et 2017');

var nb_pixel_15 = neves0102.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.count(),
  geometry: area
});
print('aire en 2015:',nb_pixel_15.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000));
var nb_pixel_17 = neves1819.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.count(),
  geometry: area
});
print('aire en 2017:',nb_pixel_17.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000));

var pixel1517 =
nb_pixel_15.getNumber('b1').add(nb_pixel_17.getNumber('b1')).subtract(nb_pixel_diff
.getNumber('b1'));
print(pixel1517, 'nb de pixels totaux 2015-2017');

var permalgt50= permal.gt(0.5);
permalgt50 = permalgt50.updateMask(permalgt50);
//transformation de la resolution afin de comparer les pixels
//information de l'image landsat
var nevesProjection = neves9900.projection();
print('Neves projection:', nevesProjection);

//reduction de la resolution
var reducedpermal = permalgt50
  //reduction de permal.
  .reduceResolution({
```

UNIL | Université de Lausanne

```

    reducer: ee.Reducer.mean(),
    maxPixels: 64
  })
  // reprojexion sur les caractéristiques des images de neves
  .reproject({
    crs: nevesProjection
  });
  //2001
  var coll2001 = ee.ImageCollection([neves0001, neves0102]).mean();
  var cross_permal_2001 = reducedpermal.and(coll2001);
  var aire_permal_2001 = cross_permal_2001.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: area,
    scale: 30
  });
  print('aire en commun entre 2001 et permal:',
  aire_permal_2001.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000))

  //2003
  var coll2003 = ee.ImageCollection([neves0203, neves0304]).mean();
  var cross_permal_2003 = reducedpermal.and(coll2003);
  var aire_permal_2003 = cross_permal_2003.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: area,
    scale: 30
  });
  print('aire en commun entre 2003 et permal:',
  aire_permal_2003.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000))
  //2011
  var coll2011 = ee.ImageCollection([neves1011, neves1112]).mean();
  var cross_permal_2011 = reducedpermal.and(coll2011);
  var aire_permal_2011 = cross_permal_2011.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: area,
    scale: 30
  });
  print('aire en commun entre 2011 et permal:',
  aire_permal_2011.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000))
  //2015
  var coll2015 = ee.ImageCollection([neves1415, neves1516]).mean();
  var cross_permal_2015 = reducedpermal.and(coll2015);
  var aire_permal_2015 = cross_permal_2015.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: area,
    scale: 30
  });
  print('aire en commun entre 2015 et permal:',
  aire_permal_2015.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000))

```

### 8.3.2 Graphique en nuage de points pour les névés permanents annuels

```

Map.centerObject(area2, 11)

//masque
var image1 = ee.Image.constant(1);
neves9900 = neves9900.updateMask(neves9900);

```

UNIL | Université de Lausanne

```
neves9900 = image1.updateMask(neves9900).rename('b1');
neves0001 = neves0001.updateMask(neves0001);
neves0001 = image1.updateMask(neves0001).rename('b1');
neves0102 = neves0102.updateMask(neves0102);
neves0102 = image1.updateMask(neves0102).rename('b1');
neves0203 = neves0203.updateMask(neves0203);
neves0203 = image1.updateMask(neves0203).rename('b1');
neves0304 = neves0304.updateMask(neves0304);
neves0304 = image1.updateMask(neves0304).rename('b1');
neves0405 = neves0405.updateMask(neves0405);
neves0405 = image1.updateMask(neves0405).rename('b1');
neves0506 = neves0506.updateMask(neves0506);
neves0506 = image1.updateMask(neves0506).rename('b1');
neves0607 = neves0607.updateMask(neves0607);
neves0607 = image1.updateMask(neves0607).rename('b1');
neves0708 = neves0708.updateMask(neves0708);
neves0708 = image1.updateMask(neves0708).rename('b1');
neves0809 = neves0809.updateMask(neves0809);
neves0809 = image1.updateMask(neves0809).rename('b1');
neves0910 = neves0910.updateMask(neves0910);
neves0910 = image1.updateMask(neves0910).rename('b1');
neves1011 = neves1011.updateMask(neves1011);
neves1011 = image1.updateMask(neves1011).rename('b1');
neves1112 = neves1112.updateMask(neves1112);
neves1112 = image1.updateMask(neves1112).rename('b1');
neves1213 = neves1213.updateMask(neves1213);
neves1213 = image1.updateMask(neves1213).rename('b1');
neves1314 = neves1314.updateMask(neves1314);
neves1314 = image1.updateMask(neves1314).rename('b1');
neves1415 = neves1415.updateMask(neves1415);
neves1415 = image1.updateMask(neves1415).rename('b1');
neves1516 = neves1516.updateMask(neves1516);
neves1516 = image1.updateMask(neves1516).rename('b1');
neves1617 = neves1617.updateMask(neves1617);
neves1617 = image1.updateMask(neves1617).rename('b1');
neves1718 = neves1718.updateMask(neves1718);
neves1718 = image1.updateMask(neves1718).rename('b1');
neves1819 = neves1819.updateMask(neves1819);
neves1819 = image1.updateMask(neves1819).rename('b1');

//masque glacier

var area_glacier = currentglaciers
.filterBounds(area2)
.filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

//scatter plot
//collection avec chaque image
var imColl = ee.ImageCollection ([neves9900, neves0001, neves0102, neves0203,
neves0304, neves0405, neves0506, neves0607, neves0708, neves0809, neves0910,
neves1011, neves1112, neves1213, neves1314, neves1415, neves1516, neves1617,
neves1718, neves1819]);
//somme et division pour avoir des pourcentages de névés permanents

var sum_imColl = imColl.sum().rename('neves_annuels');
Map.addLayer(sum_imColl, {}, 'image collection');
//combiner les deux images à plot
var img_nevesan_permaal =
permaal.addBands([sum_imColl.select('neves_annuels').toInt().rename('classToSample'),
sum_imColl.select('neves_annuels').divide(20)]);
```

```

print(imColl)
// échantillon utilisé
var values = img_nevesan_permal.stratifiedSample({ region: area, scale: 30,
numPoints: 1000, classBand: 'classToSample'});
var originalValues=values;

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart = ui.Chart.feature.byFeature(values, 'neves_annuels', ['b1'])
    .setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({ pointSize: 1, colors:['0000FF'], width: 300, height: 300, titleX:
'probabilité de présence des névés permanents', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}} });

print('scatter plot avec ligne de tendance pour les névés permanents:',chart)

```

### 8.3.3 Données quantitatives des névés permanents sur plusieurs années

```

Map.centerObject(area, 11)

//MASK POUR AVOIR JUSTE LES POINTS
var image1 = ee.Image.constant(1);
neves0409_87 = neves0409_87.updateMask(neves0409_87);
neves0409_93 = neves0409_93.updateMask(neves0409_93);
neves0914_83 = neves0914_83.updateMask(neves0914_83);
neves0914_92 = neves0914_92.updateMask(neves0914_92);
neves0919_86 = neves0919_86.updateMask(neves0919_86);
neves0919_93 = neves0919_93.updateMask(neves0919_93);
neves1419_89 = neves1419_89.updateMask(neves1419_89);
neves1419_94 = neves1419_94.updateMask(neves1419_94);
neves9904_83 = neves9904_83.updateMask(neves9904_83);
neves9904_92 = neves9904_92.updateMask(neves9904_92);
neves9909_83 = neves9909_83.updateMask(neves9909_83);
neves9909_92 = neves9909_92.updateMask(neves9909_92);
neves9919_84 = neves9919_84.updateMask(neves9919_84);
neves9919_92 = neves9919_92.updateMask(neves9919_92);

//mask glacier

var area_glacier = currentglaciers
    .filterBounds(area2)
    .filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

var im9909 = ee.ImageCollection([neves9904_83, neves0409_87]);
im9909 = im9909.filterBounds(area2)
    .map(function(image) {return image.clip(area2)});
var im0919 = ee.ImageCollection([neves0914_83, neves1419_89]);
im0919 = im0919.filterBounds(area2)
    .map(function(image) {return image.clip(area2)});

//affichage
Map.addLayer(srtm.clip(area2),{bands:['elevation'], min: 500, max: 4800}, 'srtm',
false);
Map.addLayer(neves0409_87, {palette: '23FF00', opacity: 0.5},
'neves0409_87',false);
Map.addLayer(neves0409_93, {palette: '0000FF'}, 'neves0409_93',false);
Map.addLayer(neves0914_83, {palette: '117002', opacity: 0.5},
'neves0914_83',false);

```



UNIL | Université de Lausanne

```

Map.addLayer(neves0914_92, {palette: 'FF0000'}, 'neves0914_92',false);
Map.addLayer(neves0919_86, {palette: '0000FF'}, 'neves0919_86',false);
Map.addLayer(neves0919_93, {palette: '0000FF'}, 'neves0919_93',false);
Map.addLayer(neves1419_89, {palette: '117002', opacity: 0.5},
'neves1419_89',false);
Map.addLayer(neves1419_94, {palette: '00FFFF'}, 'neves1419_94',false);
Map.addLayer(neves9904_83, {palette: '23FF00', opacity: 0.5},
'neves9904_83',false);
Map.addLayer(neves9904_92, {palette: 'E8B8FF'}, 'neves9904_92',false);
Map.addLayer(neves9909_83, {palette: '0000FF'}, 'neves9909_83',false);
Map.addLayer(neves9909_92, {palette: '0000FF'}, 'neves9909_92',false);
Map.addLayer(neves9919_84, {palette: '0000FF'}, 'neves9919_84',false);
Map.addLayer(neves9919_92, {palette: '0000FF'}, 'neves9919_92',false);
Map.addLayer(area_glacier, {}, 'glaciers',true );
Map.addLayer(intact_rg, {}, 'glaciers rocheux actifs', true);
Map.addLayer(relict_rg, {}, 'glaciers rocheux inactifs', true);
Map.addLayer(permal.clip(area2), {palette: ['E0E0E0', 'FF8000', '00FF00',
'0080FF']}, 'carte permafrost Deluigi', false);
Map.addLayer(glacier_forefield.updateMask(glacier_forefield), {opacity: 0.25,
palette: 'FF0000'}, 'marge proglaciaire', true);
//regroupement des pixels pour voir quelles zones sont touchées sur 20 ans à 80%+
(low) et 90%+ (high)
var neves_20y_low =
neves9904_83.and(neves0409_87).and(neves0914_83).and(neves1419_89).clip(area2);
var neves_20y_high=
neves9904_92.and(neves0409_93).and(neves0914_92).and(neves1419_94).clip(area2);

//regroupement des décanats
var neves20y_10_low = neves9909_83.and(neves0919_86).clip(area2);
var neves20y_10_high = neves9909_92.and(neves0919_93).clip(area2);

//nombre de pixels identifiés sur vingt ans -> quinquennats
var nb_pixel_low = neves_20y_low.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels sur vingt ans 80%+ en km2:',
nb_pixel_low.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))

var nb_pixel_high = neves_20y_high. reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale:30
});
print ('aire des pixels sur vingt ans 90%+ en km2:',
nb_pixel_high.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))

//nombre de pixels identifiés sur vingt ans -> décennats
var nb_pixel_10_low = neves20y_10_low.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels pour les regroupements de dix ans 80%+ en
km2:',nb_pixel_10_low.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))

var nb_pixel_10_high = neves20y_10_high. reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,

```

```
scale:30
});
print ('aire des pixels pour les regroupements de dix ans 90%+ en
km2:',nb_pixel_10_high.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))

//permal pour avoir que les valeurs > 50% CHANGER POUR AVOIR UN BON PERMAL

var permalgt75= permal.gt(0.75);
permalgt75 = permalgt75.updateMask(permalgt75);

var permalgt50 = permal.gt(0.5);
permalgt50 = permalgt50.updateMask(permalgt50);

//affichage

Map.addLayer(permalgt75, {min: 0, max:1, palette: '0000FF'}, 'carte permafrost
75%+', false);
Map.addLayer (permalgt50, {min : 0, max:1, palette:['F0FF00'], opacity: 0.75},
'carte permafrost 50%+', false);

//transformation de la resolution afin de comparer les pixels
//information de l'image landsat
var nevesProjection = neves0409_87.projection();
print('Neves projection:', nevesProjection);

//reduction de la resolution
var reducedpermal = permalgt50
  //reduction de permal.
  .reduceResolution({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    maxPixels: 64
  })
  // reprojction sur les caractéristiques des images de neves
  .reproject({
    crs: nevesProjection
  });

Map.addLayer(reducedpermal, {palette: '0000FF'}, 'permal 75% réduit', false);

//comparaison permal / neves
//cinq ans 80%
var cross_perma_neve_20y_low = reducedpermal.and(neves_20y_low);
Map.addLayer(cross_perma_neve_20y_low, {palette: '00FF00'}, 'comparaison
permafrost/neves 80%+', false );

//cinq ans 90%
var cross_perma_neve_20y_high = reducedpermal.and(neves_20y_high);
Map.addLayer(cross_perma_neve_20y_high, {palette: '00FF00'}, 'comparaison
permafrost/neves 90%+', false );

//10 ans 80%
var cross_perma_neve20y_10_low = reducedpermal.and(neves20y_10_low);
Map.addLayer(cross_perma_neve20y_10_low, {palette: '00FF00'}, 'comparaison
permafrost/neves 10 ans 80%+', false );

//10 ans 90%
var cross_perma_neve20y_10_high = reducedpermal.and(neves20y_10_high);
Map.addLayer(cross_perma_neve20y_10_high, {palette: '00FF00'}, 'comparaison
permafrost/ neves 10 ans 90%+', false );
```

```

//Nombre de pixels en commun permal / neves
//cinq ans 80%
var nb_pixelcom_low = cross_perma_neve_20y_low.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels en commun entre permal et le regroupement sur cinq ans 80%
en km2:', nb_pixelcom_low.getNumber('b1').multiply(900).divide(1000000))
print ('nombre de pixels en commun cinq ans 80%:',nb_pixelcom_low. getNumber('b1'))

//cinq ans 90%
var nb_pixelcom_high = cross_perma_neve_20y_high.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels en commun entre permal et le regroupement sur cinq ans 90%
en km2:', nb_pixelcom_high.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))
print ('nombre de pixels en commun cinq ans 90%:',nb_pixelcom_high.
getNumber('b1'))

//10 ans 80%
var nb_pixelcom10_low = cross_perma_neve20y_10_low.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels en commun entre permal et le regroupement sur dix ans 80% en
km2:', nb_pixelcom10_low.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))
print ('nombre de pixels en commun dix ans 80%:',nb_pixelcom10_low.
getNumber('b1'))

//10 ans 90%
var nb_pixelcom10_high = cross_perma_neve20y_10_high.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.sum(),
  geometry: area2,
  scale: 30
});
print('aire des pixels en commun entre permal et le regroupement sur dix ans 90% en
km2:', nb_pixelcom10_high.getNumber('b1').multiply (900).divide(1000000))
print ('nombre de pixels en commun dix ans 90%:',nb_pixelcom10_high.
getNumber('b1'))

Map.addLayer(im9909, {palette: '23FF00', opacity: 0.7}, 'neves 99 09', true);
Map.addLayer(im0919, {palette: '117002', opacity: 0.7}, 'neves 09 19', true);

Map.addLayer(neves_20y_low,{ palette: '0000FF'}, 'regroupement des 4 groupes de
cinq ans 80%', false);
Map.addLayer(neves_20y_high, {palette:'FF0000'}, 'regroupement des 4 groupes de
cinq ans 90%', false);

```

### 8.3.4 Graphiques en nuage de points pour les névés permanents sur plusieurs années

```
Map.centerObject (area, 11)
```

```
//MASK POUR AVOIR JUSTE LES POINTS
```

```

var image1 = ee.Image.constant(1);
neves0409_87 = neves0409_87.updateMask(neves0409_87);
neves0409_87 = image1.updateMask(neves0409_87).rename('b1');
neves0409_93 = neves0409_93.updateMask(neves0409_93);
neves0409_93 = image1.updateMask(neves0409_93).rename('b1');
neves0914_83 = neves0914_83.updateMask(neves0914_83);
neves0914_83 = image1.updateMask(neves0914_83).rename('b1');
neves0914_92 = neves0914_92.updateMask(neves0914_92);
neves0914_92 = image1.updateMask(neves0914_92).rename('b1');
neves0919_86 = neves0919_86.updateMask(neves0919_86);
neves0919_86 = image1.updateMask(neves0919_86).rename('b1');
neves0919_93 = neves0919_93.updateMask(neves0919_93);
neves0919_93 = image1.updateMask(neves0919_93).rename('b1');
neves1419_89 = neves1419_89.updateMask(neves1419_89);
neves1419_89 = image1.updateMask(neves1419_89).rename('b1');
neves1419_94 = neves1419_94.updateMask(neves1419_94);
neves1419_94 = image1.updateMask(neves1419_94).rename('b1');
neves9904_83 = neves9904_83.updateMask(neves9904_83);
neves9904_83 = image1.updateMask(neves9904_83).rename('b1');
neves9904_92 = neves9904_92.updateMask(neves9904_92);
neves9904_92 = image1.updateMask(neves9904_92).rename('b1');
neves9909_83 = neves9909_83.updateMask(neves9909_83);
neves9909_83 = image1.updateMask(neves9909_83).rename('b1');
neves9909_92 = neves9909_92.updateMask(neves9909_92);
neves9909_92 = image1.updateMask(neves9909_92).rename('b1');
neves9919_84 = neves9919_84.updateMask(neves9919_84);
neves9919_84 = image1.updateMask(neves9919_84).rename('b1');
neves9919_92 = neves9919_92.updateMask(neves9919_92);
neves9919_92 = image1.updateMask(neves9919_92).rename('b1');

//mask glacier

var area_glacier = currentglaciers
.filterBounds(area2)
.filterMetadata('anlys_time', 'equals', '2010-06-01T00:00:00');

//affichage
Map.addLayer(srtm.clip(area2),{bands:['elevation'], min: 500, max: 4800}, 'srtm',
false);
Map.addLayer(neves0409_87, {palette: '0000FF'}, 'neves0409_87',false);
Map.addLayer(neves0409_93, {palette: '0000FF'}, 'neves0409_93',false);
Map.addLayer(neves0914_83, {palette: 'FF0000'}, 'neves0914_83',false);
Map.addLayer(neves0914_92, {palette: 'FF0000'}, 'neves0914_92',false);
Map.addLayer(neves0919_86, {palette: '0000FF'}, 'neves0919_86',false);
Map.addLayer(neves0919_93, {palette: '0000FF'}, 'neves0919_93',false);
Map.addLayer(neves1419_89, {palette: '00FFFF'}, 'neves1419_89',false);
Map.addLayer(neves1419_94, {palette: '00FFFF'}, 'neves1419_94',false);
Map.addLayer(neves9904_83, {palette: 'FFFF00'}, 'neves9904_83',false);
Map.addLayer(neves9904_92, {palette: 'FFFF00'}, 'neves9904_92',false);
Map.addLayer(neves9909_83, {palette: '0000FF'}, 'neves9909_83',false);
Map.addLayer(neves9909_92, {palette: '0000FF'}, 'neves9909_92',false);
Map.addLayer(neves9919_84, {palette: '0000FF'}, 'neves9919_84',false);
Map.addLayer(neves9919_92, {palette: '0000FF'}, 'neves9919_92',false);
Map.addLayer(area_glacier, {}, 'glaciers',false);
Map.addLayer(permal.clip(area2), {palette: ['E0E0E0', 'FF8000', '00FF00',
'0080FF']}, 'carte permafrost Deluigi', false);

//regroupement des images

```

UNIL | Université de Lausanne

```
var im_coll80 = ee.ImageCollection([neves9904_83, neves0409_87, neves0914_83,
neves1419_89]);
var im_coll90 = ee.ImageCollection([neves9904_92, neves0409_93, neves0914_92,
neves1419_94]);
print(im_coll80)

//somme de l'image collection pour avoir des résultats de 0 4 où 4 représente un
endroit où il y a de la neige pour chaque période
var sum_im_coll80 = im_coll80.sum().rename('neves80');

Map.addLayer(sum_im_coll80, {min:0.25, max: 1, palette: ['0000FF','00FF00',
'FFFF00', 'FF0000']}, 'somme des images a 80%', false);

var sum_im_coll90 = im_coll90.sum().rename('neves90');
Map.addLayer(sum_im_coll90, {min:0.25, max: 1, palette: ['0000FF','00FF00',
'FFFF00', 'FF0000']}, 'somme des images a 90%', false);

//La moyenne n'est pas faisable, car il y a uniquement des valeurs de 1 -> les 0
sont masqués donc la moyenne sera toujours de 1

//scatter plot permafrost /neves permanents

//combiner les deux images à plot
var img_neves90_permal =
permal.addBands([sum_im_coll90.select('neves90').toInt().rename('classToSample'),su
m_im_coll90.select('neves90').divide(4)]);

// échantillon utilisé
var values90 = img_neves90_permal.stratifiedSample({ region: area2, scale: 30,
numPoints: 1000, classBand: 'classToSample'});

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart90 = ui.Chart.feature.byFeature(values90, 'neves90', ["b1"])
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF'], width: 300, height: 300, titleX:
'probabilité de présence des névés permanents', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol' , trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}}})

print('scatter plot pour les névés permanents 90%+ :',chart90)

//scatter plot échantillon 80% +
var img_neves80_permal =
permal.addBands([sum_im_coll80.select('neves80').toInt().rename('classToSample'),su
m_im_coll80.select('neves80').divide(4)]);

// échantillon utilisé
var values80 = img_neves80_permal.stratifiedSample({ region: area2, scale: 30,
numPoints: 1000, classBand: 'classToSample'});

// scatter plot de l'échantillon utilisé
var chart80 = ui.Chart.feature.byFeature(values80, 'neves80', ["b1"])
.setChartType('ScatterChart')
.setOptions({ pointSize: 2, colors:['0000FF'], width: 300, height: 300, titleX:
'probabilité de présence des névés permanents', titleY: ' probabilité de présence
du pergélisol', trendlines: {0 :{type: 'linear', color:'FF0000', showR2: true,
visibleInLegend: true}}})

print('scatter plot pour les névés permanents 80%+:',chart80)
```