



*« 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. À 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.»*

# Remerciements

En commençant cette liste de remerciements, je tiens à remercier le Prof. Grégoire Mariéthoz. En dépit du temps compté dont nous disposions, il m'a donné des conseils et astuces utiles. Je le remercie pour sa compréhension et pour sa disponibilité.

Mes remerciements s'adressent également au Dr. Christophe Lambiel qui, malgré le court préavis et le bref délai, a accepté de faire partie du jury.

Un merci particulier à ma copine, Mara. Malgré tous les hauts et les bas et les moments difficiles, elle a toujours été à mes côtés et continue de l'être, me supportant et me soutenant, toujours prête à me guider ou à me montrer le meilleur chemin.

Je tiens à saluer Alex, mon camarade dans cette fin effrénée, marquée par des nuits éveillées et du stress commun. Merci pour les rires et le soutien mutuel.

Un chaleureux remerciement à mes camarades de classe et aux amis fidèles qui ont partagé ces années universitaires avec moi, enrichissant cette expérience avec des moments inoubliables.

Enfin, mais certainement non des moindres, je tiens à remercier tous mes amis et ma famille. Votre amour inconditionnel et votre soutien constant sont la base sur laquelle je m'appuie.

# Résumé

Au cours des dernières décennies, la détection et la cartographie des avalanches étaient généralement limitées à des observations isolées à l'échelle locale. En effet, bon nombre de ces phénomènes restaient non documentés en raison de l'inaccessibilité d'une grande partie de la zone alpine, sauf lorsqu'ils provoquaient des dégâts ou faisaient des victimes. Cette réalité soulignait la complexité de l'établissement d'une cartographie exhaustive des avalanches, malgré leur impact significatif sur les personnes et les infrastructures.

Face à ces enjeux, les avancées technologiques récentes en matière de télédétection ont offert de nouvelles perspectives. Elles ont permis le développement de méthodes et techniques innovantes pour recueillir des informations sur des zones auparavant difficiles d'accès. Dans le cadre de cette étude, ces méthodes ont été appliquées à la région du Val Bedretto afin d'identifier les zones les plus susceptibles de connaître des déclenchements d'avalanches. En utilisant des images satellitaires d'une résolution de 3 mètres par pixel, l'étude a tenté de détecter et de cartographier les dépôts d'avalanche, s'étendant sur les saisons de 2019/20 à 2020/21.

Un des principaux enseignements est la nécessité d'événements avalancheux extrêmes pour obtenir une compréhension réelle du danger potentiel. Cependant, durant la période d'étude, de tels événements n'ont pas été observés, limitant ainsi la portée des conclusions. Par ailleurs, cette approche a également révélé certaines contraintes, notamment en ce qui concerne la détection dans les zones ombragées et la dépendance vis-à-vis des fenêtres météorologiques favorables. Malgré ces défis, les résultats obtenus ont offert des éclairages précieux sur la fréquence et la localisation des avalanches dans la région, soulignant le potentiel et les limites de la télédétection dans ce domaine d'étude.

**Mots clés** : détection des avalanches, télédétection, danger d'avalanche, cartographie des dangers, PlanetScope Imagery, Val Bedretto

## Summary

In recent decades, avalanche detection and mapping were typically limited to isolated observations on a local scale. Indeed, many of these phenomena remained undocumented due to the inaccessibility of much of the alpine region, except when they caused damage or casualties. This highlighted the difficulty of establishing a comprehensive mapping of avalanches, despite their significant impact on people and infrastructure.

Faced with these challenges, recent technological advancements in remote sensing have opened new horizons. They have led to the development of innovative methods and techniques to gather information from previously hard-to-reach areas. In this study, these methods were applied to the Val Bedretto region to identify areas most likely to experience avalanche triggers. Using satellite imagery with a resolution of 3 meters per pixel, the study attempted to detect and map avalanche deposits for the 2019/20 to 2020/21 seasons.

One of the main takeaways is the necessity for extreme avalanche events to obtain a true understanding of potential danger. However, during the study period, such events were not observed, thus limiting the scope of the conclusions. Furthermore, this approach also revealed certain constraints, notably concerning detection in shaded areas and reliance on favorable weather windows. Despite these challenges, the results provided valuable insights into the frequency and localization of avalanches in the region, underscoring the potential and limits of remote sensing in this field of study.

**Key words:** avalanche detection, remote sensing, avalanche danger, hazard mapping, PlanetScope Imagery, Bedretto Valley

# Table des Matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Téledétection du danger d’avalanche</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>Zone d’étude</b>	<b>12</b>
3.1	Contexte climatique . . . . .	13
3.2	Danger d’avalanche dans le Val Bedretto . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>20</b>
4.1	Sélection de la méthodologie et source des images satellitaires . . . . .	20
4.2	Données et matériel . . . . .	21
4.3	Pré-traitement et préparation des données . . . . .	24
4.4	Post-traitement et analyse avec QGIS . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Résultats</b>	<b>29</b>
5.1	Bulletins de danger d’avalanche . . . . .	29
5.2	Cartographie manuelle des avalanches . . . . .	31
5.3	Classification supervisée . . . . .	34
5.4	Analyse de la fréquence et de l’intensité des avalanches . . . . .	35
5.5	Évaluation du danger relatif d’avalanche . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Discussion</b>	<b>39</b>
6.1	Téledétection des avalanches: relation avec les événements historiques, le climat et le niveaux de danger . . . . .	39
6.2	Techniques de détection supplémentaires . . . . .	44
6.3	Analyse comparative des cartographies du danger . . . . .	45
6.4	Limites du travail . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Annexes</b>	<b>53</b>

# Table des Figures

1	<i>Localisation de la zone d'étude du Val Bedretto, Ticino (Fond de carte: Swisstopo).</i> . . . . .	12
2	<i>Evolution de la somme (en centimètres) de la nouvelle neige au cours de l'année hydrologique depuis l'hiver 1961-1962 à Locarno-Monti, Airolo et Bosco Gurin. Tableau des variations décennales (cm/10 ans), des variations relatives et de la Significativité de toutes les stations analysées.(Source: MeteoSvizzera, 2012)</i> . . . . .	14
3	<i>Nombre de jours avec neige au sol (au moins 5 cm) au cours de l'année hydrologique depuis l'hiver 1961-1962 à Locarno-Monti, Airolo et Bosco Gurin. Tableau des variations décennales (jours/10 ans), des variations relatives et de significativité de toutes les stations analysées.(Source: MeteoSvizzera, 2012)</i> . . . . .	15
4	<i>Carte de danger d'avalanche du Val Bedretto (Source: map.geo.ti.ch)</i> . . . . .	17
5	<i>Carte de zones potentiellement susceptibles de déclenchement d'avalanches du Val Bedretto (Source: map.geo.ti.ch)</i> . . . . .	18
6	<i>Exemple d'une PlanetScope Scene et l'entier de la bande capturée du satellite (source: Planet Labs PBC, 2022)</i> . . . . .	22
7	<i>Relief ombragé superposé des régions exclues sur la base de la suppression des pentes supérieures à 35° et du seuil spectral (Source du DEM: Swisstopo).</i>	25
8	<i>Illustration des histogrammes de fréquence des valeurs des pixels pour la bande 4 dans la zone ombragée (a) et dans la zone ensoleillée (b).</i> . . . . .	26
9	<i>Extrait de l'image satellite avec une fausse composition des bandes spectrales (G – R – NIR) du 12.03.2020 avec cartographie manuelle des avalanches présentes.</i> . . . . .	31
10	<i>Relief ombragé superposé des contours des toutes les avalanches cartographiées pour la période d'étude (Source du DEM: Swisstopo).</i> . . . . .	32
11	<i>Proportion d'apparition des différents types (gauche) et tailles (droite) d'avalanches cartographiées.</i> . . . . .	33
12	<i>Extrait de la classification supervisée appartenant à l'image satellite du 24.02.2021 avec cartographie manuelle des avalanches présentes (a) et graphique des signatures spectrales simplifiées de trois macro-classes (b).</i> . . . . .	34

13	<i>Relief ombragé superposé de la cartographie par pixel du taux d'occurrence des avalanches pour la période d'étude (Source du DEM: Swisstopo). . . .</i>	36
14	<i>Relief ombragé superposé de la cartographie par pixel de l'intensité des phénomènes avalancheux en fonction de leur taille (Source du DEM: Swisstopo). . . . .</i>	37
15	<i>Représentation cartographique du danger relatif pour la zone d'étude (Fond de carte: Swisstopo). . . . .</i>	38
16	<i>Comparaison entre la cartographie effectuée pour les données des extensions des avalanches anciennes obtenues du cadastre du canton Tessin (StorMe, n.d.) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo).</i>	41
17	<i>Comparaison entre la cartographie du danger indicatif obtenue du géoportail du canton Tessin (map.geo.ti) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo). . . . .</i>	45
18	<i>Comparaison entre la cartographie du danger obtenue du géoportail du canton Tessin (map.geo.ti) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo). . . . .</i>	46

## Index des tableaux

1	<i>Paramètres principaux et dates des 12 images satellites retenues. . . . .</i>	23
2	<i>Tableau récapitulatif des bulletins d'avalanche pour les dates sélectionnées avec le niveau de danger ; la neige fraîche accumulée dans les 3 jours précédents ; le type d'avalanche (P - plaque, G - glissement et M - mouillée) ; la taille maximale ; la plage d'altitude susceptible de déclenchement ; et les pentes particulièrement exposées au danger (à lire dans le sens des aiguilles d'une montre si elles sont séparées par un trait d'union " - "). . . . .</i>	30

# 1 Introduction

Les dangers naturels comme les avalanches sont une menace concrète pour les hommes et les infrastructures dans les régions de montagne, surtout dans des régions très densément peuplées comme la Suisse (Kronholm, 2004 ; Leinss et al., 2020). Chaque année en fait, environ 100 amateurs des sports d’hivers perdent leur vie à cause des avalanches dans les Alpes et plusieurs routes et voies de communication doivent être fermées pendant les périodes plus dangereuses (Techel et al., 2016 ; Leinss et al., 2020). Pendant la saison 2020-2021, ont été signalé en total de 318 avalanches avec des dommages aux biens ou aux personnes (Rapport d’hiver 2020/2021 WSL, 2021). Parmi ceux 215 avalanches ont touché un total de 296 personnes, et 103 ont causé des dégâts matériels. Ces chiffres sont selon les statistiques du SLF (Institut pour l’étude de la neige et des avalanches) beaucoup en dessus de la moyenne des dernières 20 ans, avec 177 personnes touchées et 86 cas avec des dégâts matériels par an (Rapport d’hiver 2020/2021 WSL, 2021). En tout cas ces données reflètent seulement une petite partie de l’activité avalancheuse et s’agissent que d’avalanches qu’ont généré des dommages (Bühler et al., 2009 ; Rapport d’hiver 2020/2021 WSL, 2021).

Les avalanches de neige peuvent être divisées en avalanches de plaque, avalanches de neige meuble, avalanches de glissement, avalanches de poudreuse et avalanches de neige mouillée. Les avalanches de neige meuble n’impliquent normalement que la partie supérieure de la couverture de neige et sont généralement moins dangereuses que les avalanches en plaque (Genèse des Avalanches WSL, n.d.). Les avalanches de glissement se manifestent comme les avalanches de plaque par une cassure, entraînant le glissement de l’ensemble du manteau neigeux et peuvent donc être un problème pour les voies de communication mais sont généralement moins dangereuses pour les hommes. Les avalanches de poudreuse sont formées dans la plupart des cas par des avalanches de plaque tandis que les avalanches de neige mouillée peuvent se manifester sous différentes formes dont le facteur déterminant du déclenchement est la présence d’eau liquide (Types d’avalanche WSL, n.d.). Enfin les avalanches de plaque, qui sont généralement beaucoup plus dangereuses pour les personnes et les biens que les avalanches de neige libre, impliquent la libération de blocs de neige cohésive par des fractures et concernent normalement une grande partie de la profondeur de la couverture de neige (Kronholm, 2004 ; Genèse des Avalanches WSL, n.d.). Les avalanches peuvent ensuite être subdivisées en fonction de leur taille selon la classification standardisée de l’European Avalanche Warning Services (EAWS) qui les classifie en fonction de leur potentiel destructeur, de leur longueur de coulée et de leurs dimensions (Bühler et al., 2019). Dans cette étude, l’accent est mis sur leur taille en tant que extension de l’avalanche. En se sens on distingue cinq groupes : 1) les petites avalanches qui ne sont pas susceptibles d’ensevelir une personne, sauf

dans les zones de coulée défavorables sont comprises entre  $10 \text{ m}^2$  et  $500 \text{ m}^2$  ; 2) les avalanches moyennes pouvant ensevelir, blesser ou tuer des personnes se situent entre  $501 \text{ m}^2$  à  $10\,000 \text{ m}^2$  ; 3) les grandes avalanches de  $10\,001 \text{ m}^2$  à  $80\,000 \text{ m}^2$  peuvent enterrer et détruire des voitures, détruire de petits bâtiments et briser des arbres ; 4) les très grandes avalanches de  $80\,001 \text{ m}^2$  à  $500\,000 \text{ m}^2$ , typiques des hauts niveaux de danger, peuvent détruire des bâtiments assez importants et des petites zones de forêt, et enfin les avalanches extrêmement grandes ou catastrophiques 5) dépassent  $500\,000 \text{ m}^2$  peuvent dévaster le paysage et ont un réel potentiel de destruction (Bühler et al., 2019 ; WSL, n.d.).

Afin de protéger les infrastructures et les personnes des dangers d'avalanches plusieurs prévisions, œuvres et simulations sont mises en place. Celles-ci sont par contre souvent des tâches difficiles à effectuer en raison de la grande variabilité spatiale et temporelle des propriétés du manteau neigeux et des complexes interactions avec les facteurs météorologiques ainsi qu'aux interactions entre les couches du manteau lui-même (Schweizer et al., 2003a ; Bühler et al., 2009). Dans les dernières décennies, la détection et la cartographie des avalanches reposaient généralement sur des observations isolées à l'échelle locale. Encore aujourd'hui comme dans le passé, souvent elles sont enregistrées, comme mentionnée avant, seulement lorsque l'avalanche génère des dégâts ou des victimes, par conséquent la couverture obtenue est plutôt faible (Bühler et al., 2013 ; Bühler et al., 2019). De plus, des grandes parties de la région alpine sont inaccessibles aux observateurs, surtout lorsque le danger d'avalanche est élevé, ce qui empêche la cartographie et la détection systématiques des avalanches sur des grandes surfaces (Bühler et al., 2009). En outre, encore actuellement, les informations sur les niveaux de danger d'avalanche courants sont publiées par l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) dans un bulletin deux fois par jour (Bulletin d'avalanches et situation nivologique WSL, n.d). Ce bulletin est en fait rédigé par des observateurs de la neige qui analysent les données des stations météorologiques, les conditions d'enneigement locales, les informations météorologiques détaillées et les cas d'avalanches signalés. Donc en cas de situations météorologiques critiques, comme tempêtes, basse visibilité ou encore fermeture de voies de communications ou des stations de ski, les informations sur l'occurrence d'avalanches peuvent survenir incomplètes et/ou manquantes (Leinss et al., 2020). Enfin les avalanches enregistrées, restant notoirement sous-déclarées dans les grandes régions, sont cartographiées par des experts. Par contre souvent la cartographie implique seulement la localisation des coordonnées principales de l'avalanche sans comprendre, sauf que dans des cas assez rares, aucune information détaillée sur leur géométrie (Korzeniowska et al., 2017).

Plus récemment, avec le développement de la technologie, plusieurs méthodes et techniques ont été développées et ont ouvert la possibilité d'effectuer des relèves et d'obtenir des informations à travers la télédétection. En effet les instruments de la

téledétection, qu'ils soient d'origine satellitaire ou aéroportée, sont capables d'acquérir des données sur des larges surfaces sans les restrictions attribuables à l'inaccessibilité des endroits et offrent donc une couverture plus systématique (Bühler et al., 2009 ; Korzeniowska et al., 2017). « *Remote sensing enables objective, safe, and spatial continuous observations of snow avalanches at different spatial scales. Today's abundance of sensor platforms and their sensitivity to a broad range of wavelengths allows for detection of avalanches and associated snowpack processes.* » (Eckerstorfer et al., 2016). Différents travaux ont été menés afin de détecter et cartographier les avalanches en Suisse comme par exemple pour la zone de Davos (Bühler et al., 2009 ; Lato et al., 2012 ; Korzeniowska et al., 2017) mais également ailleurs et sur des surfaces plus étendues (Harvey et al., 2018 ; Bühler et al., 2019 ; Leinss et al., 2020). Toutefois, peu d'efforts ont été consacrés à l'étude de la zone du Val Bedretto, malgré son exposition élevée au danger d'avalanche. En dehors de la cartographie réalisée par Bühler et al. (2019), qui couvrait l'ensemble de l'arc alpin, aucune autre étude n'a été entreprise dans cette région en utilisant des images aériennes ou satellitaires. D'un autre côté, lors de la recherche dans les ouvrages disponibles sur les sites de la confédération ainsi que du canton Tessin, différentes cartographies ont été identifiées. D'une part, une cartographie du danger d'avalanche focalisée sur les avalanches de petite à moyenne taille déclenchées typiquement par des skieurs, avec des tailles inférieures à 3 (Harvey et al., 2018) ; et d'autre part, une cartographie du danger d'avalanche ainsi que des zones potentiellement sujettes aux avalanches datant de 2006 repérée sur le portail géographique du canton Tessin (Cantone Ticino, n.d.) qui, à l'inverse, se concentre sur les événements extrêmes. Cependant, il est important de noter que aucune de ces données n'a été produite par téledétection.

Au regard des déclarations faites jusqu'à présent, ce qui nous intéresse est d'identifier et mapper les zones susceptibles au déclenchement des avalanches à partir de données satellitaires. Les buts du travail sont donc de définir : i) Quelles sont les endroits les plus susceptibles au déclenchement des avalanches ? ii) Avec quelle fréquence avalanches avec intensités différentes se produisent aux mêmes endroits ? iii) Est-ce que les endroits retenus sensibles après l'analyse des images satellitaires reflètent les cartes existantes ?

Plus précisément l'objectif de cette étude est de générer un enregistrement des événements d'avalanche sur une période s'étendant de la saison 2019/2020 à la saison 2021/2022 dans la région du Val Bedretto à travers le repère des dépôts d'avalanche. Pour ce faire, des images satellitaires d'une résolution relativement élevée de 3 mètres par pixel ont été analysées afin de détecter et de cartographier ces dépôts. En définitive, l'objectif est de vérifier si il est possible d'utiliser des telles images satellite pour repérer les avalanches, déterminer si certaines zones présentent une fréquence élevée d'événements d'avalanche, indiquant ainsi un niveau de danger d'avalanche élevé, et de déterminer si ces zones correspondent aux cartes de danger développées précédemment.

## 2 Télédétection du danger d'avalanche

Il a été souligné précédemment que la cartographie et le relevé systématique des avalanches est une tâche extrêmement ardue dans les zones montagneuses difficilement accessibles, notamment en cas de danger extrême et de mauvaise visibilité (Bühler et al., 2009 ; Eckerstorfer et al., 2017). En revanche, il est impératif d'obtenir des informations temporelles et spatiales aussi détaillées que possible concernant leur déclenchement, leur fréquence et leur intensité, afin de renforcer les moyens de prévention et de mieux protéger les biens et les personnes. Dans cette optique, le recours à la télédétection, en tant que méthode de collecte d'information à distance sur les caractéristiques spécifiques de la surface terrestre, apparaît comme une option singulièrement appropriée (Eckerstorfer et al., 2016). Ces dernières années, des progrès significatifs ont été réalisés dans le domaine des techniques de télédétection appliquées à la localisation et à l'évaluation du danger d'avalanche. Ces technologies s'appuient sur différents capteurs et plates-formes pour collecter des données précieuses, permettant de prédire, de surveiller et d'atténuer avec plus de précision les risques liés aux avalanches. En effet, d'après une étude menée par Bühler et al. (2014), qui a mis en perspective des informations provenant de caméras optiques, d'observations d'avalanches et de stations météorologiques automatiques, avec des données fournies par des satellites optiques et radars, il a été démontré que les données satellitaires possèdent un potentiel considérable pour la détection des déclenchements d'avalanches à grande échelle, pouvant ainsi améliorer les services opérationnels d'alerte aux avalanches.

Un nombre considérable d'études ont été menées récemment sur la détection et la cartographie des avalanches à travers l'utilisation de la télédétection optique et radar. Les études les plus basiques se sont limitées à la détection et à la cartographie des dépôts d'avalanche par le simple repérage visuel des dépôts d'avalanche à partir d'images satellites suivies d'une représentation cartographique manuelle. En utilisant des images satellites à haute résolution provenant de SPOT6 et SPOT7, Bühler et al. (2019) ont entrepris la cartographie manuelle des contours de 18'737 événements d'avalanche individuels sur une grande partie de l'arc alpin suisse, lors d'une période avalancheuse exceptionnelle en janvier 2018. Cette étude a mis en évidence que l'application de techniques d'amélioration d'image pour une localisation plus précise des dépôts d'avalanche confère à cette méthode de détection et de cartographie une capacité à générer des résultats fiables, précis et exhaustifs. Cependant, elle a aussi souligné que la cartographie manuelle nécessite un investissement considérable en temps et engendre des coûts élevés liés à l'acquisition d'images satellitaires dans des délais restreints.

Une grande majorité d'autres recherches s'est concentrée sur la délimitation précise des zones de dépôts d'avalanches en exploitant des approches basées sur l'analyse d'images par objet (Object-Based Image Analysis – OBIA), pour en diminuer le temps de détection, en conjonction avec les informations spectrales issues d'images satellitaires (Lato et al., 2012). Certaines de ces études ont également intégré des données sur la topographie, obtenues à partir de modèles numériques de terrain (DEM), ainsi que des modèles de simulation (RAMMS), afin d'affiner la délimitation des zones de dépôt, et encore une fois de économiser du temps en évitant la recherche dans des zones non susceptibles de présenter des dépôts d'avalanches.(Bühler et al., 2009).

L'élaboration de cartes manuellement, même à l'aide de l'approche OBIA semi-automatique, exige un investissement de temps considérable, ce qui a incité plusieurs chercheurs à explorer des méthodes visant à automatiser l'entier du processus soit en utilisant une approche OBIA automatique, soit en appliquant du deep learning pour la détection des avalanches dans les données satellitaires optiques.(Korzeniowska et al., 2017 ; Hafner et al., 2022). D'autres études ont tenté d'automatiser la détection des avalanches en utilisant une méthode de détection des changements (change detection) entre deux images satellites (Eckerstorfer et al., 2019 ; Leinss et al., 2020). De nombreuses de ces initiatives ont démontré la faisabilité de la cartographie automatisée d'avalanches de moyenne à grande échelle en utilisant des images aériennes à haute résolution, qu'elles soient d'origine satellitaire ou aéroportée, bien que ces approches puissent générer des coûts substantiels (Leinss et al., 2020). En parallèle, d'autres travaux ont mis en évidence la possibilité de réaliser des objectifs similaires en exploitant des images satellitaires à résolution plus basse, disponibles gratuitement (Eckerstorfer et al., 2019 ; Leinss et al., 2020). Ces études ont ainsi soulevé la question de l'équilibre entre la résolution des images et les coûts associés, offrant ainsi des pistes pour une utilisation plus efficiente des données disponibles dans le domaine de la télédétection des avalanches.

### 3 Zone d'étude

La région du Val Bedretto (figure 1), qui est la partie terminale vers l'ouest de la Valle Leventina, se situe au nord du canton Tessin sur la frontière cantonale avec le canton Valais à la limite de la crête principale méridionale des Alpes et s'étend de ouest à est du col de la Nufenen jusqu'à Airolo. Elle est enclavée entre deux chaînes de montagnes dont les sommets atteignent 3'000 mètres d'altitude et elle est connue pour être la région qui reçoit les plus fortes chutes de neige de tout le canton, grâce à son emplacement qui se trouve sur la route principale des grandes perturbations du nord-ouest qui, surtout en hiver, sont généralement froides et humides. La vallée est connue des skieurs alpinistes pour sa conformation qui présente une grande série de vallées latérales avec des pentes assez raides qui font d'elle un terrain idéal pour le ski alpinisme. Par contre il est bien connu qu'elle est l'une des régions de Suisse les plus touchées par les avalanches (Bettosini et al, 2007). En fait d'après des études précédentes on peut affirmer que le Val Bedretto présente généralement des profils de neige plus instables attribuables à des précipitations plus intenses, et de conséquence des situations plus favorables au déclenchement d'avalanches, par rapport aux vallées voisines avec caractéristiques similaires (Foglia, 2020). Pour simplicité les limites de la commune de Bedretto ont été retenus pour les limites de la zone d'étude qui s'étend sur une surface de 75.18 km<sup>2</sup>.

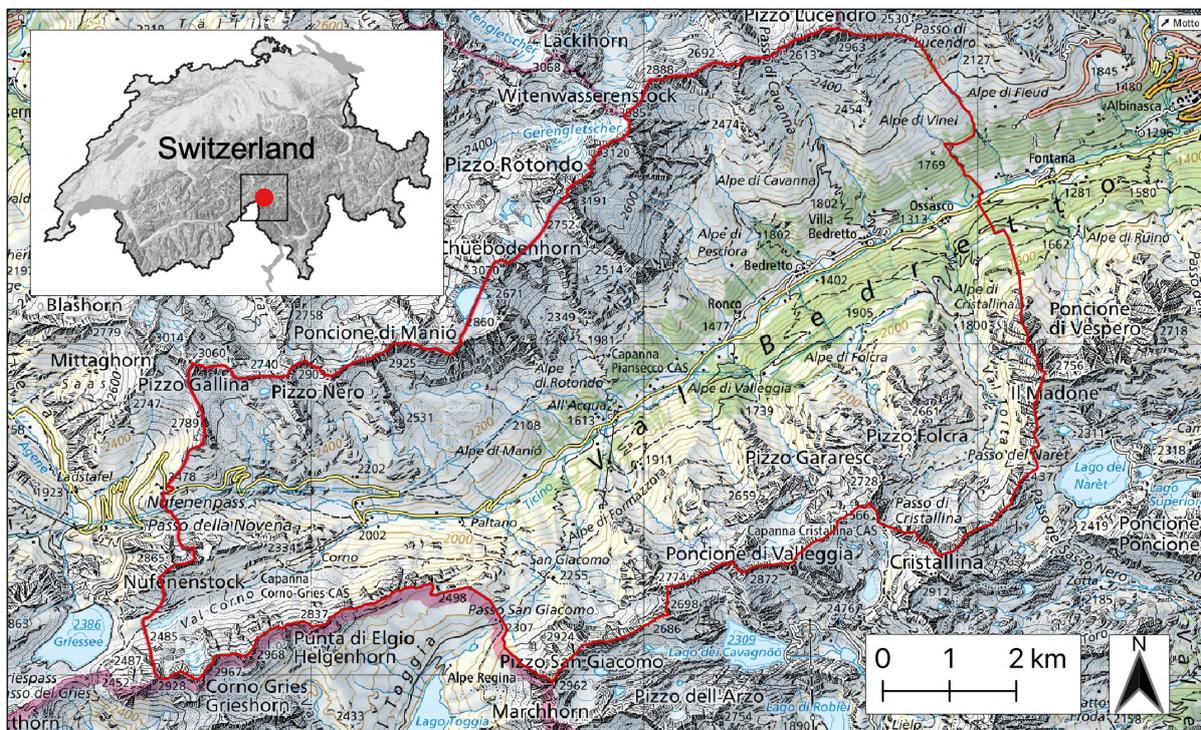


Figure 1: Localisation de la zone d'étude du Val Bedretto, Ticino (Fond de carte: Swisstopo).

### 3.1 Contexte climatique

En ce qui concerne le climat de la région, il est bien connu que la présence de la chaîne alpine influence de manière significative tous les processus météorologiques et climatiques, en atténuant ou renforçant les effets résultants. Les vents soufflent depuis toutes les directions en apportant des situations de tout genre dans la région : les masses d'air polaire provenant du nord sont transformées en courant foehnique sec après avoir franchi les Alpes, les masses d'air chaudes et humides provenant du sud subissent une forte déstabilisation par soulèvement orographique et apportent en conséquence les principales précipitations, les courants d'est plutôt secs apportent généralement de l'air froid en hiver et de l'air chaud en été (MeteoSvizzera, 2012). Ces phénomènes à grande échelle se mêlent avec les effets de la circulation locale provoquée par la topographie qui entraîne des brises et des brouillards assez réguliers. Le climat hivernal Tessinois est généralement caractérisé par des conditions sèches et ensoleillées à cause de la présence normalement prolongée de situations anticycloniques, même avec souvent des fortes chutes de neige, tandis que la majorité des précipitations se concentre dans les saisons transitoires avec des valeurs annuelles d'environ 1700 mm à la station de mesure de Airolo et atteignant 2500 mm dans la région d'étude (Meteosvizzera, n.d.).

Les températures peuvent rejoindre des valeurs extrêmes de  $-10/-18$  °C à basse altitude et le gradient thermique adiabatique est généralement de  $-0.5$  °C chaque 100m. Le nombre de jours de gel par an varie, en particulier, en fonction de l'altitude et de la localisation, ils peuvent dépasser les 150 jours dans les localités de montagne. Par contre aussi au Tessin on remarque une tendance au réchauffement dans les températures. Même si celle-ci est plus marquée en été et au printemps qu'en hiver, le nombre de jours de gel a subi une réduction visible dans toute la région pour atteindre une diminution d'un minimum de  $-2.80$  jours par décennie à Piotta (Valle Leventina) à un maximum de  $-6.28$  jours par décennie à San Bernardino (GR) et un pourcentage de variation minimal de  $-12.0\%$  à Piotta (990 m) et maximal de  $-73.3\%$  par décennie à Lugano, montrant que dans les régions de basse altitude, la diminution est plus importante en proportion que dans les régions de montagne même si la perte majeure de jours se manifeste dans une localité située à 1693 m d'altitude. Cette tendance est conforme au trend général à la hausse des températures au cours des 50 dernières années qui ont vu l'isotherme de zéro degrés augmenter d'environ 250 m en hiver et donc aussi la limite des chutes de neige qui a également augmenté d'une quantité similaire, entraînant une forte diminution de la durée et de l'épaisseur de la couverture neigeuse dans les montagnes, en particulier à moyenne altitude (MeteoSvizzera, 2012 ; Meteosvizzera, n.d.). La station de mesure qui, en plus que Piotta, se rapproche le plus des caractéristiques de la zone d'étude se situant à Robieci (Valle Maggia, 1895 m), parle d'une perte de  $-1.21$  jours de gel par décennie ( $-1.5\%$ ) se

traduisant par une variation minimale à plus haute altitude. Ceci tout en gardant à l'esprit que les valeurs de cette dernière mesure ne sont pas significatives en raison de la courte période de suivi, mais qu'elles peuvent néanmoins fournir une idée de la situation à des altitudes plus élevées (MeteoSvizzera, 2012).

En ce qui concerne la couverture neigeuse en soi on peut constater que le retard dans la formation du manteau neigeux ainsi que la fonte précoce ont des conséquences considérables sur la durée des périodes d'enneigement. On observe en fait que lorsque l'isotherme de zéro degré se trouve à une altitude plus élevée, les précipitations au début et à la fin de l'hiver tombent principalement sous forme de pluie et moins fréquemment sous forme de neige (Meteosvizzera, n.d.). L'indicateur de la somme de l'épaisseur de la neige fraîche (figure 2), obtenue en additionnant la valeur de la neige fraîche mesurée quotidiennement pour le mois, respectivement pour la saison hivernale, nous permet de se faire une idée de la quantité totale de neige tombée au cours d'une saison hivernale.

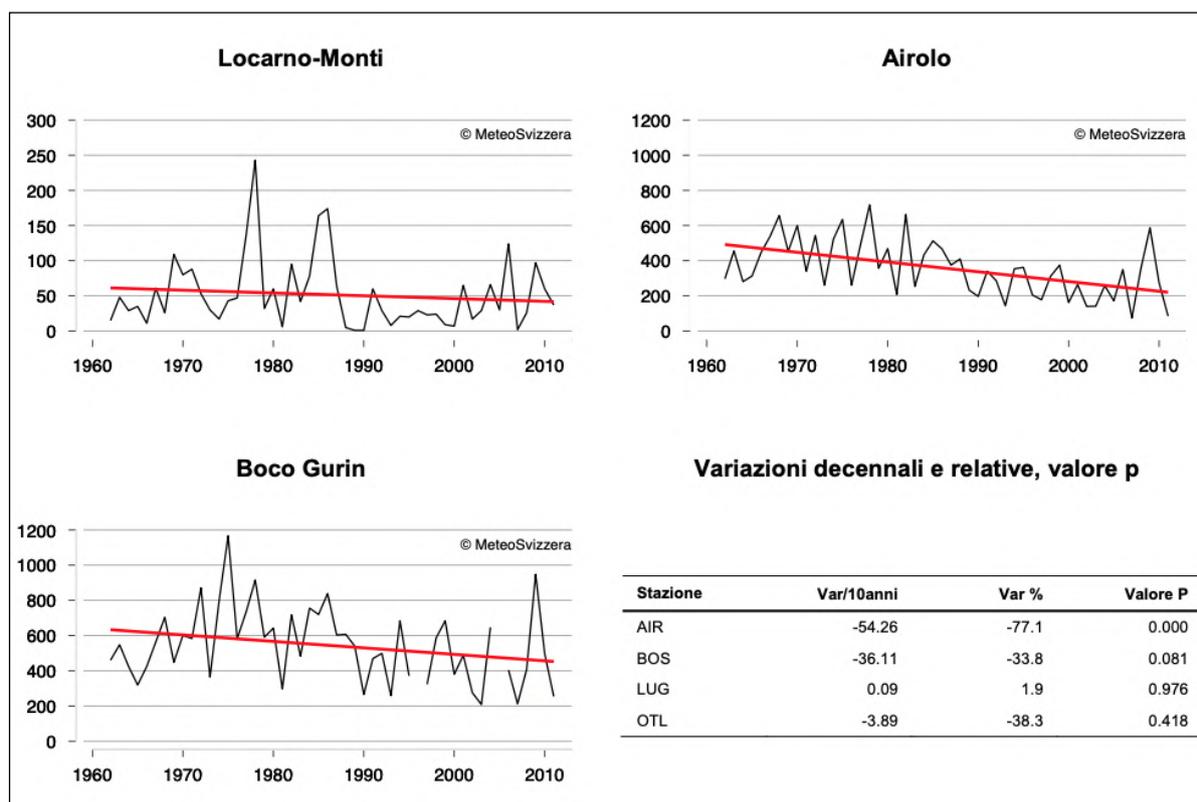


Figure 2: Evolution de la somme (en centimètres) de la nouvelle neige au cours de l'année hydrologique depuis l'hiver 1961-1962 à Locarno-Monti, Airolo et Bosco Gurin. Tableau des variations décennales (cm/10 ans), des variations relatives et de la Significativité de toutes les stations analysées. (Source: MeteoSvizzera, 2012)

On peut ainsi observer que pour les stations d'Airolo (1139 m) et de Bosco Gurin (Valle Maggia, 1505 m), qui sont les plus représentatives de la zone d'étude, on note une diminution substantielle de la somme de nouvelle neige au cours des 50 ans précédant

2010. On remarque une diminution de -54 cm/décennie aux plus basses altitudes d'Airolo, soit un changement relatif de -77.1%, et une diminution de -36 cm/décennie, soit 33.8%, à Bosco Gurin pour les plus hautes altitudes (MeteoSvizzera, 2012).

La figure 3 montre le nombre de jours avec au moins 5 cm de la neige au sol au cours de l'année hydrologique depuis les années 1960. On constate immédiatement que la tendance qui ressort des stations de mesure d'Airolo et de Bosco Gurin, et qui est surtout importante pour l'activité des stations de ski, se traduit par un raccourcissement de la durée de la période d'enneigement et donc un raccourcissement de la saison hivernale (MeteoSvizzera, 2012). En fait, il ressort qu'à Airolo, dans les années 1960, il y avait de la neige au sol pendant un peu moins de 150 jours par saison (environ 5 mois). Avec une diminution de -7.97 jours/décennie (-33.5%), on observe qu'en 2010, une moyenne d'environ 100 jours par saison (un peu plus de 3 mois) est mesurée. Actuellement, si la tendance était restée constante, on observerait environ 90 jours par saison. Même constat pour Bosco Gurin, où le nombre de jours par saison est passé de 180 jours (environ 6 mois) à environ 140 jours en 2010 (environ 4.5 mois), soit une réduction de -7.7 jours/décennie (-24.5%).

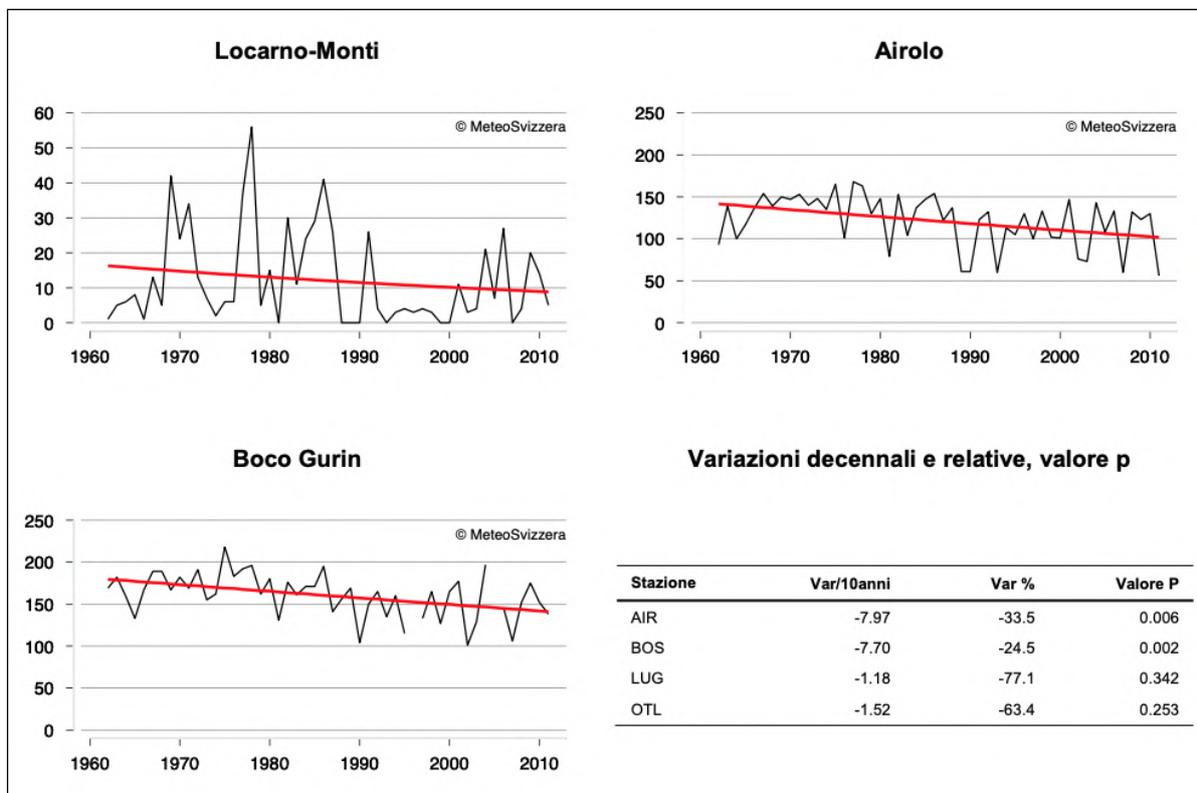


Figure 3: Nombre de jours avec neige au sol (au moins 5 cm) au cours de l'année hydrologique depuis l'hiver 1961-1962 à Locarno-Monti, Airolo et Bosco Gurin. Tableau des variations décennales (jours/10 ans), des variations relatives et de significativité de toutes les stations analysées. (Source: MeteoSvizzera, 2012)

## 3.2 Danger d’avalanche dans le Val Bedretto

Une recherche dans le cadastre des événements naturels enregistrés pour le canton du Tessin a révélé la présence de 67 avalanches enregistrées pour la région du Val Bedretto entre 1970 et 2018 (Catasto eventi naturali - StorMe, n.d.). Le registre contient des informations sur les événements naturels de chutes de pierres, de laves torrentielles, de glissements de terrain et d’avalanches qui se sont produits au Tessin et constitue un document indispensable pour l’élaboration des plans des zones de danger (Piano delle Zone di Pericolo - PZP), pour l’aménagement du territoire local et pour la gestion des situations d’urgence. En ce qui concerne les avalanches, même dans le canton du Tessin, elles ne sont enregistrées que lors d’événements météorologiques importants qui affectent une grande zone et/ou causent des dommages aux biens et aux personnes. Les rapports d’événements sont compilés dans un rapport de synthèse, qui comprend une description générale de l’événement (date, lieu, périmètre, cause, surface de glissement, volume du dépôt, épaisseur maximale du dépôt), des évaluations statistiques et des estimations des coûts générés. Toutefois, même avec une documentation méthodique des événements, il demeure une tendance à la sous-déclaration de ces incidents et fréquemment à une incomplétude des informations susmentionnées. Ce phénomène est particulièrement prévalent pour les événements plus anciens et pour les données concernant le volume et la profondeur du dépôts, qui sont souvent imprécises ou absentes, étant souvent basées sur des estimations approximatives.

Suite à une observation minutieuse des périmètres d’avalanche enregistré dans le portail géographique du canton du Tessin, il est possible d’observer une tendance à une diminution de la taille des avalanches au fil du temps. Plus précisément, après extraction et traitement des données géoréférencées des contours d’avalanche issues du portail, il est observable que les avalanches plus anciennes ont tendance à présenter des dimensions plus considérables. Cependant, il convient de noter des exceptions, notamment dans le cas des événements exceptionnels, tels que celui du 4 janvier 2018, où plusieurs avalanches (12), dont une de taille 5, ont été déclenchées au cours d’une journée caractérisée par un niveau de danger élevé (4) et par la fermeture de la route cantonale à partir de Bedretto (Catasto eventi naturali - StorMe, n.d.). En outre, parmi les 67 avalanches répertoriées, 26 sont de taille 5 et, parmi ces dernières, seulement une s’est produite après l’an 2000. Il est également notable qu’avant 2000, les avalanches enregistrées étaient principalement de grandeur 3, 4 ou 5. En revanche, celles postérieures à 2000 se caractérisent majoritairement par des tailles plus modestes, avec uniquement deux d’entre elles appartenant à la catégorie de taille 4 et une à la taille 5. Ces constatations suggèrent d’une part la concrétisation de ce qui a été décrit précédemment, à savoir un raccourcissement de la durée de la saison, accompagné d’une diminution consécutive des épisodes neigeux et par extension du nombre ainsi que de la taille des déclenchements d’avalanches. D’autre part, elles laissent

supposer que, dans le passé, les enregistrements ont vraisemblablement été effectués uniquement pour les avalanches ayant déjà atteint un certain seuil d'ampleur, compte tenu également de la difficulté de repérer systématiquement les avalanches avec des moyens plus rudimentaires que ceux disponibles aujourd'hui.

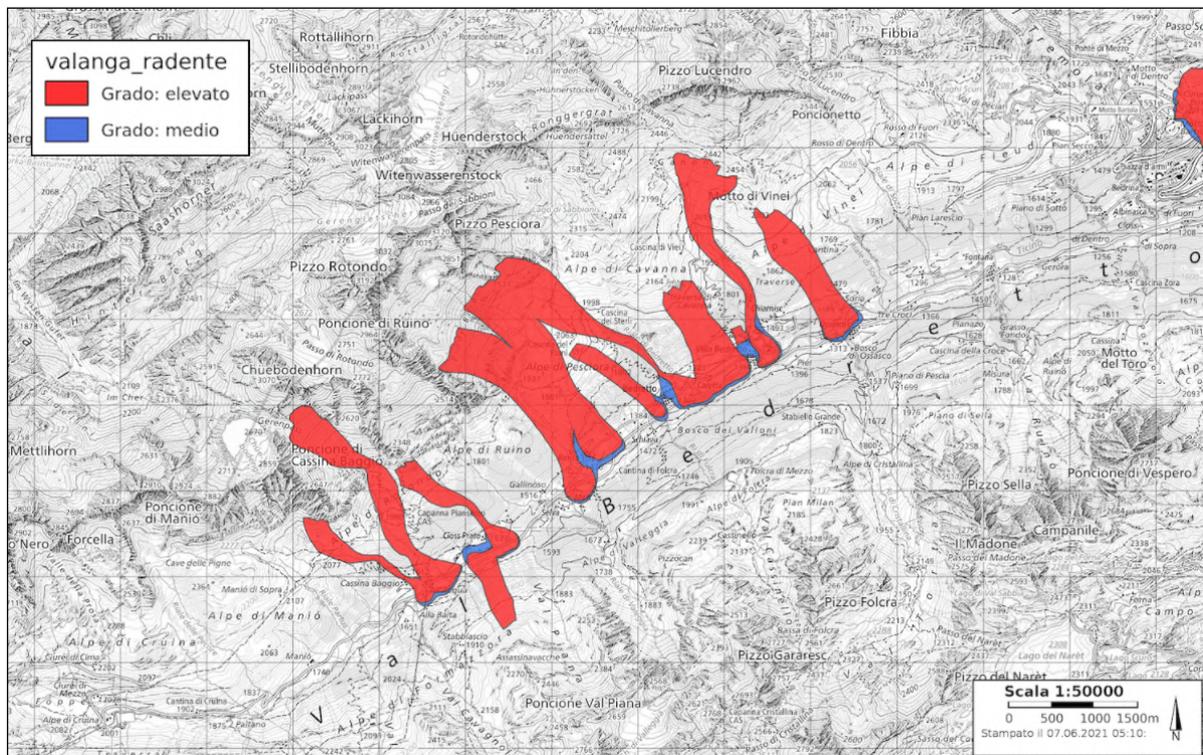


Figure 4: Carte de danger d'avalanche du Val Bedretto (Source: map.geo.ti.ch)

Dans le cadre du secteur d'étude du Val Bedretto, des cartographies relatives aux dangers d'avalanches (figure 4) ainsi qu'à l'extension du danger indicatif des zones potentiellement exposées à des déclenchements d'avalanches (figure 5) ont été identifiées (Cantone Ticino, n.d.). Ces cartographies ont été élaborées lors d'une étude menée par une agence d'ingénierie, effectuée et acceptée en 2006, avant de la survenance de l'utilisation dans la pratique d'outils plus technologiques, tels que les images satellitaires à haute résolution. Par conséquent on suppose sur la base du registre des événements historiques. Effectivement, même après des recherches plus approfondies, aucune information complémentaire n'a pu être recueillie quant au compte-rendu relatif à l'élaboration de la carte de danger et de la carte de danger indicatif. Néanmoins, il est connu que cette étude a été mandatée à la suite d'un hiver exceptionnellement enneigé, caractérisé par des intenses chutes de neiges persistantes jusqu'à une période avancée de la saison qui ont maintenu un manteau neigeux épais et durable (Delaloye et al., 2009 ; Cantone Ticino, n.d.). Cette situation a suscité des interrogations sur la pertinence des stratégies préventives passives mises en place précédemment.

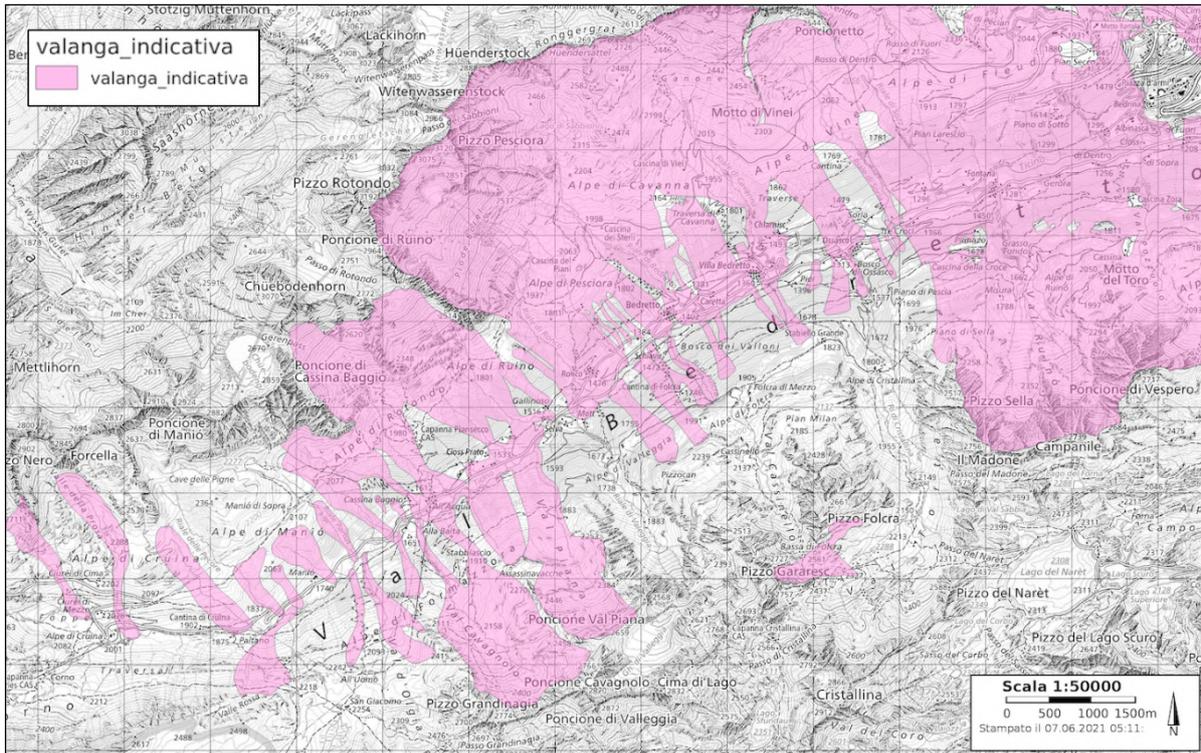


Figure 5: Carte de zones potentiellement susceptibles de déclenchement d'avalanches du Val Bedretto (Source: map.geo.ti.ch)

Les figures montrent que la carte des dangers et la carte indicative des dangers sont considérablement différentes. Cette différence peut être attribuée au fait que les cartes de dangers montrent les zones où les habitations ou les voies de communication sont menacées, alors que les cartes de dangers indicatives montrent, avec un degré de précision moindre, les zones potentiellement dangereuses, mettant en évidence les zones de danger les plus touchées en cas d'événement extrême (UFAM, 2021). À cet égard, il convient de noter que la carte des dangers présente des zones dangereuses principalement sur le versant nord de la vallée, versant au pied duquel se trouvent les principales agglomérations et sur lequel ont été enregistrées la plupart des avalanches répertoriées dans le cadastre (Catasto eventi naturali - StorMe, n.d.). D'autre part, la carte de danger indicatif, malgré encore une présence plus prononcée sur le versant nord de la vallée, révèle néanmoins une concentration plus élevée de zones de danger potentiel sur le versant sud par rapport à la carte des dangers. L'utilisation de ces cartes est d'une importance considérable pour ce travail, car elles fournissent une vision des endroits où des événements majeurs peuvent se produire dans la zone d'étude, et offrent également la possibilité de tester leur fiabilité.

Les constatations faites jusqu'à présent nous ont amenés à nous interroger sur la faisabilité de la reproduction de ces ouvrages à travers des méthodes plus modernes et novatrices. En effet selon une étude de Harvey et al. (2018), la comparaison des résultats obtenus avec les nouvelles méthodes et les cartes de danger existantes, malgré déjà une

bonne concordance, montre que ces dernières ont le potentiel d'apporter des améliorations. En outre aucune étude de la zone d'intérêt avec les méthodes citées a été repéré dans la littérature scientifique, ce qui nous a donc motivé dans la poursuite de ce travail. En conséquence, on suppose que si des images satellitaires de bonne qualité sont disponibles, conjuguées à des conditions météorologiques favorables et à une situation propice de danger d'avalanche, il est envisageable d'améliorer les cartographies du danger actuellement en vigueur.

## 4 Méthodologie

Dans cette section, la méthodologie employée pour parvenir à ces résultats est détaillée. Ce volet s'avère essentiel pour garantir la reproductibilité de l'étude et offrir un aperçu clair et transparent des démarches entreprises. Initialement, il sera question de la sélection de la méthodologie, mettant en lumière les raisons qui ont guidé ces choix. Ensuite, la source des images satellitaires sera approfondie, détaillant les critères de sélection, les dates d'acquisition et les caractéristiques techniques des images retenues. Les procédures de traitement et d'analyse des images seront ensuite décrites, y compris les techniques de classification et de cartographie.

### 4.1 Sélection de la méthodologie et source des images satellitaires

Dans le cadre de la détection et cartographie des avalanches à partir des images satellitaires la première étape était de déterminer la période d'étude afin de récolter les images nécessaires. Pour accomplir cette tâche, il a été essentiel de prendre en compte la disponibilité des images et l'orbite des satellites. Deux principales sources ont été retenues parmi différentes possibilités : les images provenant de Sentinel 2 et de la plateforme Planet. Le premier fournit des images depuis 2015 avec une résolution de 10 m pour les bandes de longueur d'onde visible (RGB) et proche infrarouge (NIR). D'autre part, la plateforme Planet dispose d'une archive d'images remontant à 2014 avec une haute résolution de 3 m pour les mêmes bandes spectrales (RGB et NIR) (Eckerstorfer et al., 2016 ; Wesseling et al., 2017 ; Planet, n.d.).

Afin de sélectionner les images appropriées pour cette étude, on a pris en considération les tailles possibles des avalanches, telles que mentionnées précédemment en tenant compte que la taille la plus fréquente des avalanches est la taille 2 (Schweizer et al., 2018). Ensuite, nous avons considéré la topographie raide et complexe de la région, ce qui rend les images satellitaires à faible résolution moins appropriées pour cette étude. De plus Selon les résultats de l'étude menée par Leinss et al. (2020), les images produites par Sentinel 2 permettent de repérer des avalanches d'une taille minimale d'environ 2000 m<sup>2</sup>. Cela implique qu'un grand nombre d'avalanches de taille inférieure pourraient ne pas être détectées avec cette résolution. Compte tenu de ces considérations et étant donné que les conditions d'enneigement ont été en dessous de la moyenne pour ce qui concerne la saison 2019/2020, et que cela peut impliquer la formation d'avalanches de taille inférieure à la moyenne, nous avons choisi d'utiliser les images provenant de la constellation de satellites de la plateforme Planet pour cette étude (Trachsel et al., 2021).

Pour atteindre les objectifs prédéfinis de l'étude, il a été décidé dans un premier temps d'adopter la méthodologie de Bühler et al. (2009) en suite révisée et affinée par Lato et al. (2012), Korzeniowska et al. (2017), Eckerstorfer et al. (2019) et Leinss et al. (2020). Cette approche consiste à utiliser le modèle RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation), un modèle automatique multicritères développé par le SLF, pour identifier les zones susceptibles de déclencher des avalanches et les zones de départ potentielles (Bühler et al., 2009). Les étapes suivantes consistent à exclure les zones dont la pente est supérieure à  $35^\circ$  ainsi que les zones qui ne sont pas recouvertes de neige. Ensuite, les dépôts d'avalanche sont identifiés dans ces zones à l'aide d'une méthode semi-automatique basée sur l'analyse d'images à partir d'objets (Object-Based Image Analysis OBIA). La fréquence des différentes avalanches sur plusieurs années est ensuite analysée pour déterminer les zones les plus touchées. Cependant, cette approche a finalement été abandonnée en raison de plusieurs difficultés. L'une des principales difficultés était le manque de données, ainsi que d'objets (avalanches repérables sur les images), qui empêchait l'entraînement de la classification par objet pour la détection automatique des avalanches; et une l'absence de données de contrôle. De plus, les limites temporelles de la licence gratuite provisoire d'essai du RAMMS ont conduit à opter pour une méthodologie différente, n'incluant pas l'utilisation de ce logiciel.

À la lumière de ces constatations, nous avons décidé d'adopter une approche plus efficace et réalisable. Ainsi, nous avons opté pour une méthodologie similaire à celle décrite précédemment, tout en éliminant les éléments contraignants, s'inspirant de celle utilisée par Bühler et al. (2019). On a donc privilégié une analyse basée sur l'interprétation visuelle et une cartographie manuelle, permettant l'identification et la numération des avalanches sous forme de polygones sur l'ensemble de la zone d'étude tout en gardant l'emploi de couches de masque dans le but de réduire la zone à analyser.

## 4.2 Données et matériel

Tout d'abord, les images satellitaires ont été obtenues à partir du site PlanetScope, qui s'agit d'une constellation d'environ 130 satellites avec une capacité de collecte quotidienne de 200 millions de  $\text{km}^2/\text{jour}$ . Depuis le premier lancement en 2014, trois types d'instruments PlanetScope ont été lancés : Dove Classic, Dove-R et Superdove. Tous les trois sont capables de capturer les bandes RGB et NIR (à l'exception de SuperDove, qui est également capable de capturer les nouveaux canaux Red Edge, Green I, Coastal Blue, et Yellow) et produisent des images d'une résolution de  $3 \times 3$  mètres par pixel. Le produit des satellites est une « PlanetScope Scene » (PSS) (figure 6) qui consiste en une scène individuelle encadrée dans une bande, capturée par le satellite lors de son balayage linéaire continu de la Terre, qui se chevauche avec un overlap avec les scènes voisines et qui fait une taille

comprise entre 280 et 630 kilomètres carrés environ, selon le type d'instrument qui les a capturés (Planet Data, n.d.).



Figure 6: *Exemple d'une PlanetScope Scene et l'entier de la bande capturée du satellite (source: Planet Labs PBC, 2022)*

Le choix des images a été effectué en appliquant des filtres de recherche pour identifier les images couvrant au moins 95% de la surface de la zone d'étude, avec un recouvrement de nuages ne dépassant pas 5% pour une visibilité optimale à la surface de la zone. Après une première recherche focalisé sur les saison de 2017/18 à 2020/21 une image par mois considéré comme hivernal (décembre, janvier, février et mars) à été sélectionnée en fonction de la qualité. Ce premier processus a révélé que les images provenant des satellites Dove Classic et SuperDove possédaient une qualité médiocre qui empêchait une bonne analyse de la surface enneigée de la zone d'étude. Pour cette raison, la recherche s'est limitée aux images produites par le satellite Dove R, qui était en service de mars 2019 à avril 2022 (Planet Labs PBC, 2022). Par conséquent, la période d'étude a été modifiée et il a été choisi de n'analyser que les saisons 2019/20 et 2020/21. Cette limitation ultérieure dans la recherche d'images satellites a produit un total de 27 images pour autant de jours différents. Parmi celles-ci, 12 ont été sélectionnées, une par mois, celle dont la qualité est la meilleure et, dans certains cas, une deuxième par mois dont le degré de danger d'avalanche était plus important, dans le but de pouvoir détecter un plus grand nombre d'avalanches (pour décembre 2019, février 2020 et décembre 2020). Une image supplémentaire datée du 3.3.2019 de la saison précédente a également été prise en compte puisqu'elle était disponible. Ces dernières ont été téléchargées en tant que « Surface Reflectance Assets » et s'agissent d'images orthorectifiées et corrigées radiométriquement pour assurer la consistance des conditions atmosphériques localisées et pour minimiser l'incertitude dans la réponse spectrale à travers le temps et l'emplacement. Ces produits sont conçus pour des applications qui nécessitent des images avec une géolocalisation précise et une projection cartographique (Planet Data, n.d.). Le tableau 1 résume les principaux paramètres des images retenues ainsi que leur date du relevé.

PlanetScope Scenes				
Heure du relevé		09:35 – 10:38		
Nébulosité		0% – 3%		
Résolution des pixels		3 m		
Distance d'échantillonnage au sol		3.7 m – 4.6 m		
Off-nadir angle		1.1° – 5°		
Élévation du soleil		18° – 35°		
Azimut du soleil		142.6° – 169.5°		
Dates des relevés				
Saison	Décembre	Janvier	Février	Mars
2018/19	–	–	–	3
2019/20	6 ; 15	21	17 ; 28	12
2020/21	10 ; 18	7	24	10

Table 1: *Paramètres principaux et dates des 12 images satellites retenues.*

En même temps, les informations nivologiques de référence pour ces dates ont été recueillies à partir du bulletin d'avalanche (Bulletin d'avalanches et situation nivologique, n.d.). Le bulletin régional des avalanches a été choisi pour toutes les dates d'images afin d'obtenir des informations plus spécifiques à la zone d'étude tout en omettant les informations superflues concernant d'autres régions (annexe 9.1). Ce dernier comprend le degré de danger d'avalanche, le type et la taille des avalanches possibles, ainsi que la taille maximale des avalanches pouvant se développer, le tout en fonction de l'altitude et des versants retenus dangereux. Le niveau de danger d'avalanche est le principal moyen de communication lorsqu'il s'agit de décrire la situation d'avalanche et d'avertir le public (Schweizer et al., 2003b ; Schweizer et al., 2018). Le degré de danger se base sur l'échelle européenne de danger d'avalanches qui est divisée en cinq degrés : 1 faible (le manteau neigeux est bien stabilisé), 2 moyen (le manteau neigeux n'est pas bien stabilisé dans certaines pentes raides), 3 marqué (le manteau neigeux n'est que faiblement stabilisé en nombreuses pentes raides), 4 fort (le manteau neigeux est faiblement stabilisé dans la majorité des pentes raides), 5 très fort (l'instabilité du manteau est généralisée) (WSL, 2016). Selon un étude de Schweizer et al. (2018) la fréquence des avalanches naturelles augmente fortement avec le niveau de danger, ce qui confirme que non seulement la probabilité de déclenchement, mais aussi le nombre de déclenchements augmentent, et constitue donc un élément clé pour avoir une idée du nombre et de la taille des avalanches pouvant être détectées à partir d'une image satellite d'un jour donné.

En complément du bulletin d'avalanche, des cartes d'épaisseur de neige fraîche ont également été recueillies. Elles donnent des informations sur la quantité de neige tombée dans une région au cours des trois jours précédant la création de la carte (annexe 9.1).

Les cartes de neige fraîche reposent sur les calculs effectués par le Service opérationnel d'hydrologie nivale (OSHD) du SLF, qui utilise une combinaison de données de mesure des précipitations et de modèles météorologiques opérationnels fournis par MétéoSuisse, ainsi que les relevés issus des stations météorologiques automatiques et des observateurs, pour produire une modélisation des données s'appliquant à l'ensemble de la Suisse avec une résolution d'environ  $250 \times 250$  mètres. Les calculs intègrent divers facteurs, tels que le tassement de la neige fraîche ou sa fonte en cas de réchauffement important ou de précipitations sous forme de pluie, ainsi que la prise en compte des chutes de neige sur des sols nus, plus chauds et donc plus propices à la fonte des neiges (WSL, n.d.).

### 4.3 Pré-traitement et préparation des données

En ce qui concerne le pré-traitement, les images sélectionnées ont été découpées en fonction de la zone d'étude et ensuite aussi en fonction de leur exposition au soleil en le divisant en un secteur comprenant le versant ensoleillé et un comprenant le versant à l'ombre. Cette procédure a été mise en œuvre principalement parce que la luminosité et le contraste optimaux varient en fonction du type d'éclairage de la surface d'intérêt (Bühler et al., 2019). En ce sens, des réglages de luminosité et de contraste ont été appliqués pour améliorer la visibilité des caractéristiques de la surface terrestre. En outre, étant donné la faible réflectance de la neige dans le spectre infrarouge par rapport au spectre du visible, une fausse composition des bandes spectrales (vert, rouge et infrarouge) a été appliquée, ce qui permet une meilleure visualisation des dépôts d'avalanche par rapport à la composition RGB standard (Eckerstorfer et al., 2015 ; Bühler et al., 2019). En effet la principale difficulté de la détection des avalanches à l'aide des propriétés électromagnétiques de la neige réside dans le fait que les dépôts d'avalanche et leur environnement sont généralement composés du même matériau, et sont donc difficiles à distinguer les uns des autres (Eckerstorfer et al., 2015).

Ensuite, pour réduire la zone de recherche des avalanches visuellement, des masques ont été appliqués, éliminant les pentes supérieures à  $35^\circ$  qui ne sont pas susceptibles de présenter des dépôts d'avalanche, ainsi qu'un masque pour éliminer les zones qui ne sont pas de la neige en appliquant un seuil de classification (Bühler et al., 2009 ; Leinss et al., 2020). Comme mentionné ci-dessus, la haute réflectance de la neige, ainsi que la pénétration des ondes électromagnétiques dans le manteau dans le domaine visible, diminuent considérablement dans le spectre NIR (Eckerstorfer et al., 2015). Grâce à cette propriété, il est alors possible de fixer un seuil pour ne mettre en évidence que les surfaces enneigées et masquer celles qui ne le sont pas, comme les zones rocheuses ou boisées.

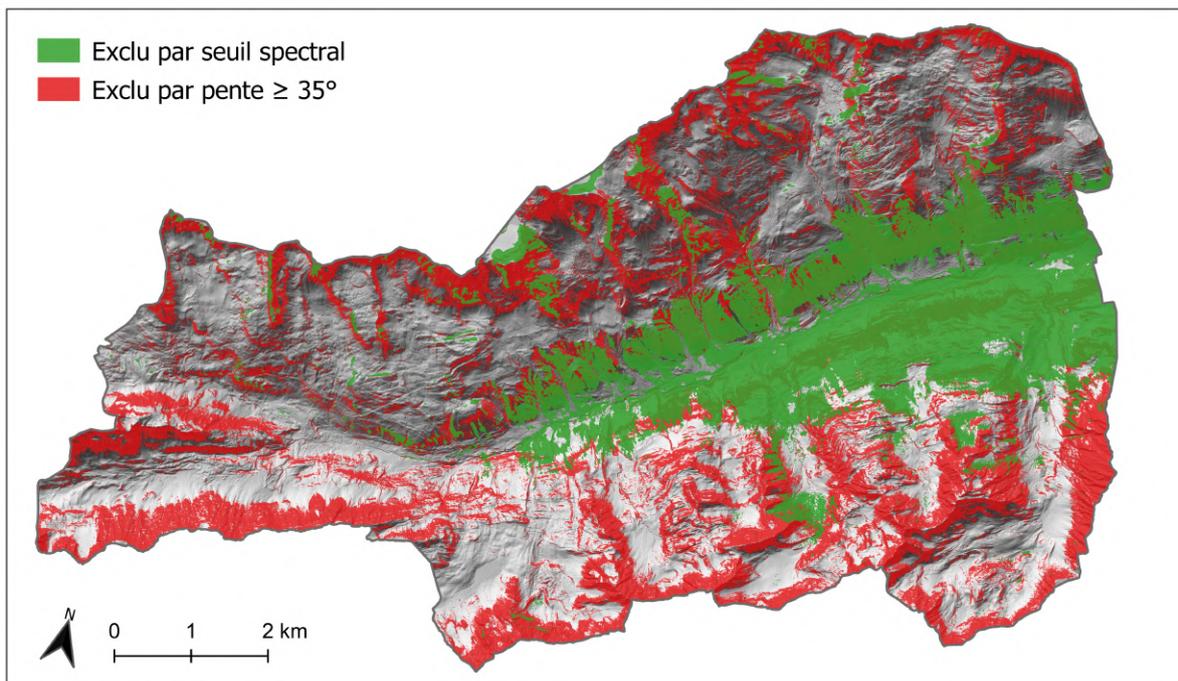


Figure 7: Relief ombragé superposé des régions exclues sur la base de la suppression des pentes supérieures à  $35^\circ$  et du seuil spectral (Source du DEM: Swisstopo).

La figure 7 montre le DEM de la zone d'étude avec les masques pour les pentes supérieures à  $35^\circ$  et des zones non enneigées. Le masque pour les pentes supérieures à  $35^\circ$  a été obtenu en calculant la pente à partir du DEM de haute qualité swissALTI3D, avec une résolution spatiale de 2 m par pixel fournit par Swisstopo, disponible pour l'ensemble de la Suisse (Swisstopo, 2022), et en appliquant une transparence de 100% aux valeurs inférieures. De plus à travers une démarche de vectorisation les entités dont la surface était inférieure à  $20 \text{ m}^2$  ont été effacées. En ce qui concerne le masque basé sur le seuil spectral une approche basée sur l'analyse de l'histogramme des valeurs de pixel de la bande infrarouge (bande 4) a été suivie. Tout d'abord, on a tracé l'histogramme pour représenter la distribution des niveaux de réflectance dans cette bande. En se basant sur cet histogramme, on a procédé à l'identification d'un seuil initial qui permettrait de séparer visuellement la neige du reste du paysage. Étant donné que la zone d'étude présente une zone ombragée et une zone ensoleillée on a effectué la classification sur la base de deux conditions distinctes simultanément, en spécifiant deux seuils d'inclusion. La figure 8 illustre les histogrammes pour la partie ombragée (a) et pour la partie ensoleillée (b) du décompte des pixels en fonction de leur valeur de réflectance. Par conséquent, il a été décidé d'inclure les valeurs de réflectance supérieures à 1500 pour la bande 4 dans le secteur ombragé, et d'inclure les valeurs supérieures à 6000 pour le secteur ensoleillé, considérant que le groupe de pixels appartenant à la catégorie de la neige sont les plus fréquemment présents dans l'image satellitaire et suite à un contrôle en repérant les valeurs des pixels contenant de la neige de manière aléatoire dans l'image. Le résultat

de cette opération est un raster binaire, où les pixels répondant aux conditions définies se voient attribuer une valeur de 1 (neige), tandis que tous les autres pixels reçoivent une valeur de 0 (non-neige); pour le masque, une transparence de 100% a été attribuée aux valeurs de 1. Le fait qu'une partie de la zone soit dans l'ombre implique une plus grande difficulté à définir le seuil et donc une moindre fiabilité du masque. Il convient en fait de noter que, pour la partie ombragée, certaines zones extrêmement sombres ont pu être considérées comme dépourvues de neige, alors qu'elles pourraient effectivement en être recouvertes. Enfin, une vectorisation de l'image a été effectuée, afin de supprimer les zones avec superficie inférieure à 20 m<sup>2</sup> et dans le but de polir le masque.

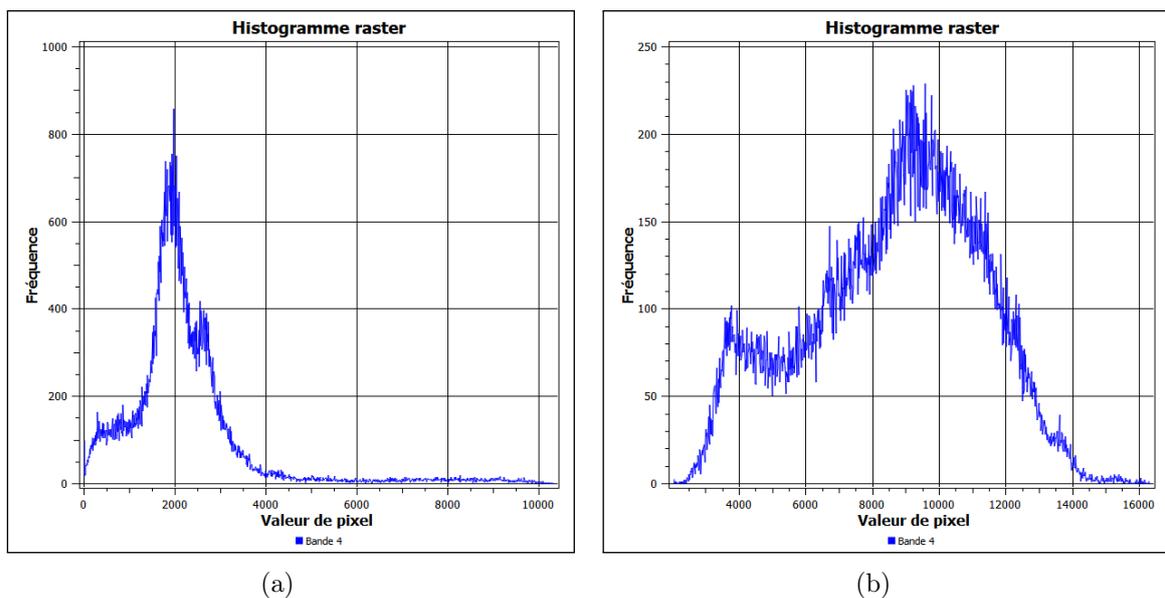


Figure 8: Illustration des histogrammes de fréquence des valeurs des pixels pour la bande 4 dans la zone ombragée (a) et dans la zone ensoleillée (b).

#### 4.4 Post-traitement et analyse avec QGIS

Dans le cadre de l'analyse et du post-traitement, les images préalablement préparées ont été soumises à une analyse visuelle à l'aide du logiciel QGIS afin d'identifier les dépôts d'avalanche dans les zones non masquées. Lorsque ces dépôts étaient localisés, une cartographie manuelle a été réalisée. Si la limite de l'avalanche n'était pas clairement discernable, l'image aérienne estivale ainsi que le DEM étaient consultés pour évaluer la plausibilité de la forme de l'avalanche non directement perceptible sur l'image satellite. Ainsi, le contour complet de l'avalanche a été tracé, même s'il n'était pas entièrement visible, en s'appuyant sur la compréhension de son mouvement en relation avec la topographie. Suite à cette démarche, chaque polygone s'est vu attribuer le type d'avalanche qu'il représentait. Le type d'avalanche a été déterminé uniquement sur la base de la forme, afin de distinguer entre avalanches de plaque et avalanches de neige meuble (présentant

normalement une forme lobée partant d'un point unique), et en fonction de la présence de sol nu dans la zone de départ pour les avalanches de glissement qui sont très visibles en raison du contraste entre le sol exposé et la neige environnante (Bühler et al., 2019 ; WSL Types d'avalanches, n.d.). Il convient de préciser que les avalanches de neige mouillée n'ont pas fait l'objet d'aucune distinction particulière. Après cette étape, l'aire de chaque polygone a été calculée et, en fonction de cette dernière, une classe de taille lui a été attribuée selon la classification proposée par Bühler et al (2019), extrapolée à partir de la classification de l'European Avalanche Warning Services (EAWS).

Dans l'objectif de détecter des dépôts d'avalanche non visibles à l'œil nu grâce à la fausse composition des bandes spectrales, une classification supervisée a été mise en œuvre. Cette dernière avait pour but de classer les pixels en trois catégories : neige, neige d'avalanche et non-neige. L'ambition était de parvenir à identifier les avalanches non cartographiées via l'approche visuelle. Ainsi, des zones d'entraînement pour les trois catégories ont été établies, choisies de manière à représenter le mieux possible l'ensemble de chaque catégorie.

Après la cartographie définitive des avalanches détectées, on a effectué un processus de post-traitement afin de quantifier la fréquence d'occurrence de ces phénomènes. Pour cela, chaque couche vectorielle contenant les avalanches identifiées pour chaque image a été transformée en une couche raster binaire avec des pixels de taille  $3 \times 3$  m. Dans cette représentation, une valeur "1" a été attribuée aux pixels présentant une avalanche, tandis qu'une valeur "0" a été donnée aux zones dépourvues d'événements avalancheux. Ensuite, en superposant et en additionnant ces couches raster, nous avons obtenu un produit raster cumulatif. Ce dernier indique le nombre de fois qu'une avalanche a été observée pour chaque pixel spécifique, fournissant ainsi une image détaillée de la fréquence spatiale des avalanches sur l'ensemble des images analysées. Cette couche cumulée a ensuite été normalisée, en la divisant par le nombre d'images où des avalanches ont été identifiées, pour obtenir une fréquence relative allant de 0 à 1. Concernant la modalité pour représenter la fréquence, après une réflexion approfondie, on a opté pour l'utilisation uniquement des images où des avalanches avaient effectivement été observées comme dénominateur. Cette décision a permis de centrer l'analyse sur la fréquence d'apparition des avalanches dans les situations où elles sont effectivement présentes, fournissant ainsi une mesure plus directe et pertinente de leur occurrence. Cependant, il convient de souligner que cette approche pourrait conduire à une surestimation de la fréquence, en omettant les images où aucune avalanche n'est présente. Néanmoins, cette démarche a été jugée pertinente, car dans le contexte de l'analyse des risques, une surestimation est généralement considérée comme préférable à une sous-estimation. Suite à la quantification de la fréquence d'occurrence des avalanches, une démarche a été mise en place pour incorporer l'intensité des avalanches.

La détermination de l'intensité s'est basée sur la taille des avalanches cartographiées. Pour chaque pixel de la carte raster des intensités, la valeur attribuée a été déterminée en se basant sur l'intensité de la plus grande avalanche observée dans ce pixel. Afin d'obtenir une représentation complète du danger, les informations de fréquence et d'intensité ont été combinées par une multiplication point par point. Le produit résultant offre une évaluation du « danger relatif » associé à chaque pixel. Cette représentation prend en compte à la fois la probabilité d'occurrence d'un événement (fréquence) et la gravité potentielle de cet événement lorsqu'il se produit (intensité). Sur la base de ce produit combiné, une classification a été établie en différentes catégories: danger élevé, danger moyen, danger faible, et absence de danger ou danger négligeable. Bien que cette classification se soit basée uniquement sur les données de fréquence et d'intensité, il est à noter que, dans une approche plus exhaustive, d'autres facteurs territoriaux, tels que la densité de population ou la proximité d'infrastructures, devraient également être pris en compte.

La représentation du danger a été confrontée à des défis liés à la perception non linéaire de celui-ci. Dans ce contexte, une classification basée sur une échelle logarithmique ou exponentielle a été adoptée pour mieux mettre en relief les zones où le danger est le plus élevé. En utilisant une telle échelle, il a été possible d'accentuer, de manière plus marquée, l'écart entre les valeurs faibles et les valeurs élevées. Se basant sur une échelle logarithmique de base 10, les tranches suivantes ont été définies : une valeur de 0 a été représentée de manière transparente, les valeurs entre 0.25 et 0.5 ont été classées dans la catégorie de "faible danger" et visualisées en jaune, celles oscillant entre 0.51 et 1.0 ont été attribuées à un "danger moyen" et affichées en bleu, et enfin, les valeurs entre 1.01 et 2.25 ont été rangées dans la catégorie de "danger élevé", colorées en rouge. Cette démarche a permis de souligner le danger croissant, notamment pour les valeurs supérieures.

## 5 Résultats

Dans cette section consacrée aux résultats, nous aborderons les diverses étapes d'analyse selon l'ordre chronologique adopté dans la méthodologie. Par conséquent, nous commencerons par l'analyse des bulletins d'avalanche, suivie de la cartographie manuelle des avalanches incluant une description de leur type et de leur taille. Ensuite, nous évoquerons la classification supervisée, l'analyse de fréquence et d'intensité et, enfin, l'évaluation du danger relatif fondé sur la combinaison de la fréquence et de l'intensité.

### 5.1 Bulletins de danger d'avalanche

Démarrant par l'examen des bulletins, il est indispensable de souligner leur importance pour la recherche. En effet, ces bulletins fournissent des informations essentielles pour comprendre tous les paramètres à considérer lors de l'analyse des images. Ces données revêtent une importance majeure pour se représenter la situation nivologique au moment de la prise de l'image satellite. Les informations issues des bulletins, étant les premières à être collectées, ont eu une double fonction. D'une part, elles ont guidé la sélection des images satellites où le niveau de danger était plus élevé, optimisant ainsi les chances de repérer des conditions propices à la cartographie des avalanches de grande taille. D'autre part, elles offrent une indication sur l'emplacement, la taille et le type d'avalanches potentiellement rencontrées. Ces précieuses données, directement extraites du bulletin, renseignent sur le type d'avalanche auquel on peut s'attendre au cours de la journée considérée. Elles indiquent, en fonction des données nivologiques et des chutes de neige récentes, la taille potentielle qu'une avalanche pourrait atteindre. Elles fournissent également des informations sur l'altitude à laquelle on peut anticiper un type d'avalanche donné et précisent le versant le plus susceptible d'être touché. Si nécessaire, le bulletin apporte des informations complémentaires, par exemple concernant les avalanches de neige mouillée ou de glissement, par rapport à un éventuel réchauffement favorisant leur déclenchement au fil de la journée, ou encore sur les inclinaisons spécifiques où la probabilité qu'une avalanche se déclenche est plus élevée.

La table 2 synthétise toutes les données recueillies depuis les bulletins quotidiens (annexe 9.1), ainsi que la quantité de neige fraîche tombée au cours des trois derniers jours repéré depuis les cartes de neige, pour les 12 images satellites retenues pour l'identification et la cartographie des avalanches. Tout d'abord, il est à noter que le niveau de danger d'avalanches ne dépasse jamais le degré 3, qualifié de « marqué » et que sur quatre jours distincts, on observe un niveau de danger évalué à 1, soit « faible ». Cette classification laisse entendre, en soi, une faible probabilité de survenue d'avalanches.

Le second indicateur extrait de la table est celui de la neige fraîche tombée au cours des trois jours précédents. Il ressort que, mis à part pour les images datant du 15.12.2019, 28.02.2020, 12.03.2020 et 10.12.2020, où l'on constate la présence d'une couche de 25 à 50 cm de neige fraîche au sol ; les précipitations neigeuses sont relativement modérées, se situant généralement en dessous de 10 cm. Ce constat suggère que l'accumulation de neige fraîche, susceptible de se déplacer, atteint rarement des épaisseurs considérables.

Date	Danger	N. fr. [cm]	Type	Taille	Alt. [m]	Versant
03.03.2019	1	0 - 1	G (isolée)	1	2600 -	E - W
06.12.2019	2	0 - 1	G	2	2400 -	NE - SE *
			P	1	2400 +	—
15.12.2019	3	25 - 50	P	—	2000 +	X ****
21.01.2020	1	0 - 1	G (isolée)	2	2000 - 2600	—
17.02.2020	2	0 - 1	P	2	2200 +	SE - W
28.02.2020	3	25 - 50	P	3	2000 +	X ****
12.03.2020	3	1 - 25	M ***	3	2800 -	SE - SW
			G (isolée)	3	—	—
			P (isolée)	3	2400 +	SW - SE
10.12.2020	3	25 - 50	G (isolée)	3	—	S
			P	2	2000 +	X ****
18.12.2020	2	0 - 1	G (isolée)	2	2200 -	SE - SW *
			P (isolée)	2	2200 +	W - E
07.01.2021	3	1 - 10	P	3	2200 +	X ****
24.02.2021	1 3	0 - 1 0 - 1	P (bcp isolée)	1	2400 +	W - E **
			M + G ***	3	2600 -	S *
					2000 -	E + W
10.03.2021	1	1 - 10	P (isolée)	1	2800 +	— **

\* seulement sur pentes très raides (>35°)  
\*\* seulement sur pentes extrêmement raides (>40°)  
\*\*\* seulement en cours de journée à cause du réchauffement diurne et du rayonnement solaire  
\*\*\*\* sur tous les versants

Table 2: *Tableau récapitulatif des bulletins d'avalanche pour les dates sélectionnées avec le niveau de danger ; la neige fraîche accumulée dans les 3 jours précédents ; le type d'avalanche (P - plaque, G - glissement et M - mouillée) ; la taille maximale ; la plage d'altitude susceptible de déclenchement ; et les pentes particulièrement exposées au danger (à lire dans le sens des aiguilles d'une montre si elles sont séparées par un trait d'union " - ").*

En ce qui concerne la taille des avalanches, critère qui nous a particulièrement intéressés pour identifier les avalanches dans la zone d'étude et qui est intrinsèquement lié aux autres variables mentionnées, on observe que pour toutes les dates où des images ont été récupérées, aucune ne laisse présager des avalanches dépassant la taille 3, c'est-à-dire

de grande taille. Cette observation révèle qu'il n'était pas anticipé de rencontrer des avalanches de dimensions très grande ou catastrophiques. Par conséquent, des avalanches d'une superficie maximale de 80 000 m<sup>2</sup> étaient attendues.

## 5.2 Cartographie manuelle des avalanches

En ce qui concerne la cartographie manuelle des avalanches, la figure 9 offre un extrait de l'image satellite du 12 mars 2019, mettant en évidence l'identification des dépôts. Dans cette représentation avec une fausse composition des bandes spectrales, les dépôts d'avalanches se distinguent nettement par leur coloration, contrastant avec la neige non impactée environnante. Il est manifeste que, dans bien des cas, seul le dépôt d'avalanche est mis en évidence, sans inclure l'intégralité de la surface impactée par le phénomène, qui englobe la zone de départ et la zone de transition. La détection de ces zones peut parfois s'avérer complexe, comme le soulignent Leinss et al. (2020).

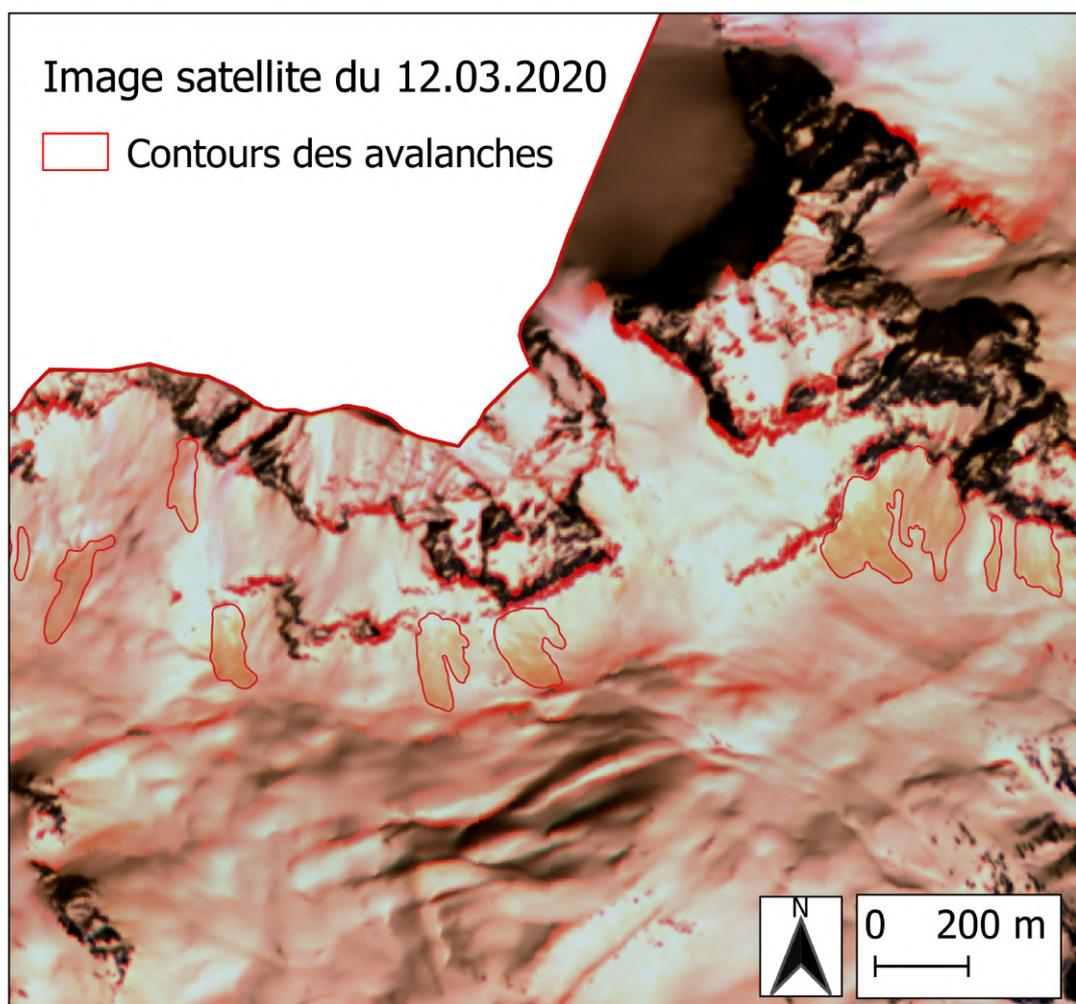


Figure 9: Extrait de l'image satellite avec une fausse composition des bandes spectrales (G – R – NIR) du 12.03.2020 avec cartographie manuelle des avalanches présentes.

La figure 10 présente la cartographie complète des avalanches identifiées durant la période d'étude à partir des 12 images. Il convient de souligner qu'en réalité, des avalanches ont été repérées uniquement sur 8 d'entre elles. En fait, les relevés satellitaires du 15.12.2019, 28.02.2020, 10.12.2020 et 07.01.2021 ne montraient aucun signe visible de dépôts d'avalanche.

Tout d'abord, il est remarquable qu'aucune avalanche n'ait été détectée sur le versant sud du Val Bedretto, exposé au nord et par conséquent principalement à l'ombre. Ce secteur n'est donc pas représenté dans les résultats et n'a pas été considéré pour les analyses ultérieures. De plus, il est également possible d'extrapoler que toutes les avalanches détectées sont situées sur des versants dont l'exposition varie entre E-S-E et W-S-W, en considérant une rotation dans le sens horaire.

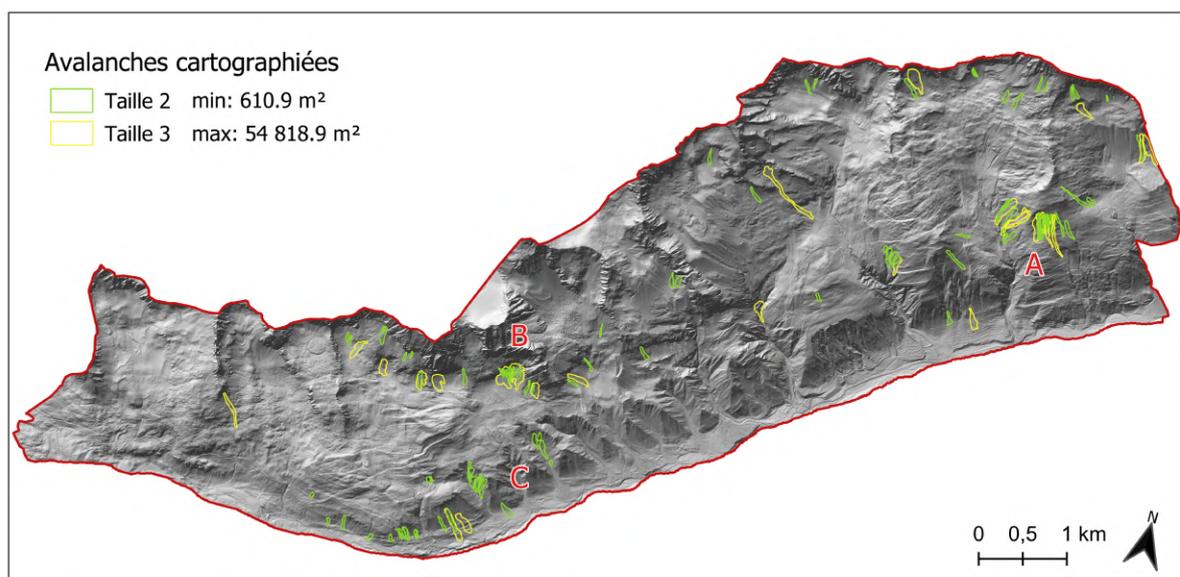


Figure 10: Relief ombragé superposé des contours des toutes les avalanches cartographiées pour la période d'étude (Source du DEM: Swisstopo).

En poursuivant l'analyse de cette cartographie il est possible de constater que, comme anticipé par l'analyse des bulletins, aucune avalanche ne dépasse la taille 3. Il est également manifeste que ces avalanches ne sont pas réparties uniformément sur la zone d'étude : les secteurs A, B et C, indiqués sur la figure 10, concentrent majoritairement l'activité avalancheuse. La plus petite avalanche, classifiée dans la catégorie des avalanches de glissement, couvrait une surface de  $610.9 \text{ m}^2$  et était localisée dans le secteur A. Quant à la plus grande, couvrant une surface de  $54\,818.9 \text{ m}^2$  et relevant de la catégorie des avalanches de plaque, elle se situait dans le secteur B. À noter que la plus petite avalanche était presque entièrement couverte par le masque des pentes de  $35^\circ$ . En ce qui concerne le secteur A, la zone de départ des avalanches y étant situées est caractérisée par une pente supérieure à  $35^\circ$ . Pour le secteur B, bien qu'en grande partie en dehors de la classe de pente de  $35^\circ$  sauf que pour la partie la plus en amont, il est surplombé par une grande

zone très raide. Enfin, les secteurs A et C présentaient principalement des avalanches de glissement.

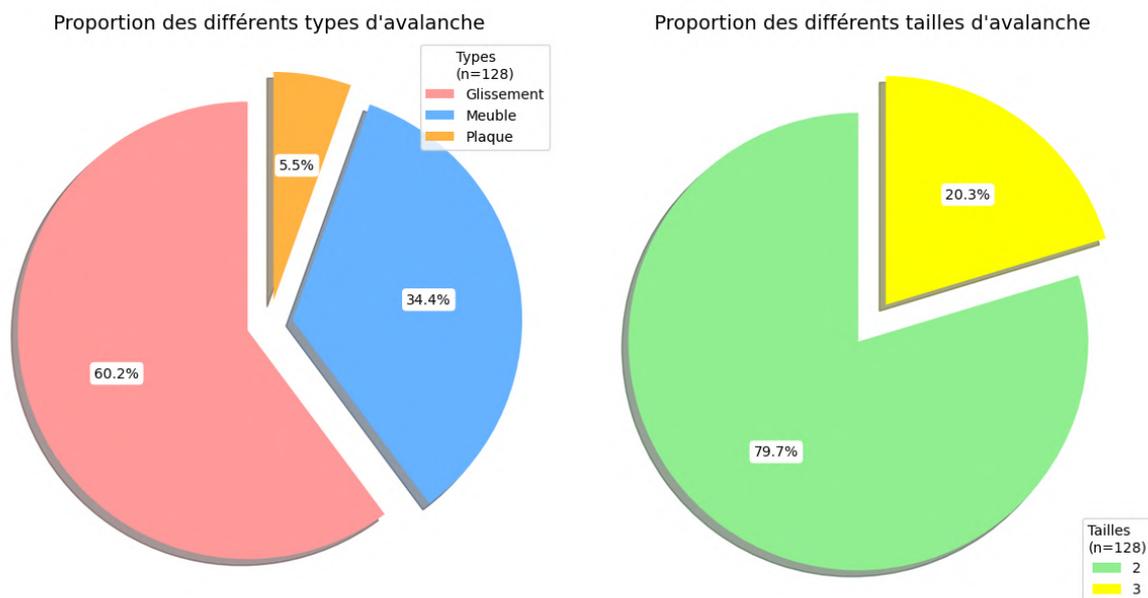


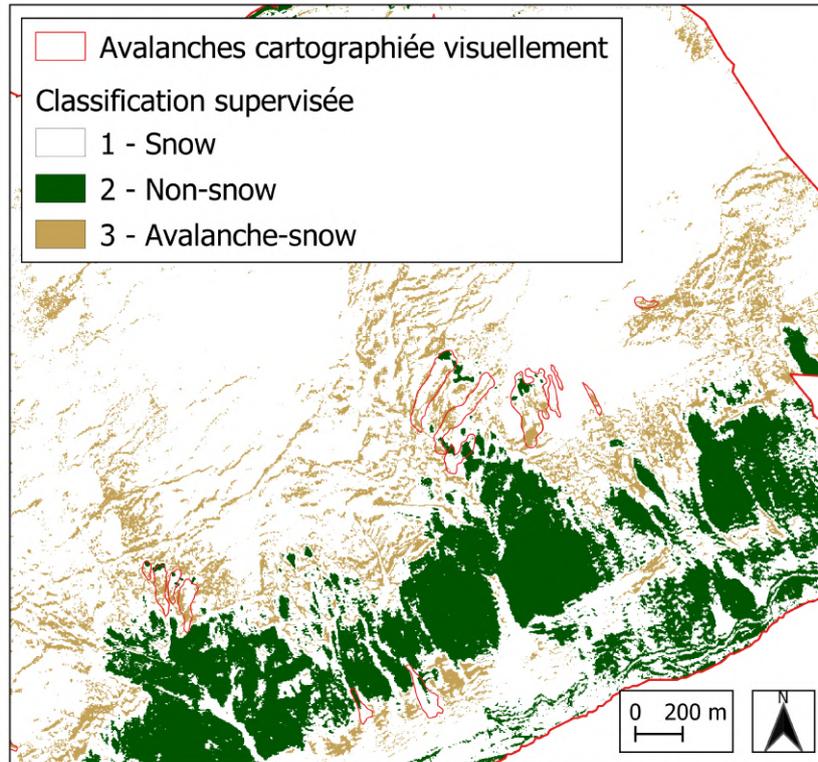
Figure 11: *Proportion d'apparition des différents types (gauche) et tailles (droite) d'avalanches cartographiées.*

La figure 11 illustre ensuite la répartition des types et des tailles de l'ensemble des avalanches cartographiées. D'emblée, il est manifeste que, sur la période d'étude, 128 avalanches ont été recensées, avec des pics d'observations le 24.02.2021, où 39 avalanches ont été cartographiées, soit 30.5% du total, et le 12.03.2020, avec 32 avalanches cartographiées, soit 25% du total. Il est donc clairement établi que l'ensemble des événements est essentiellement concentré sur deux jours caractérisés par une activité avalancheuse significative. On note également que lors de ces deux journées, le niveau du danger d'avalanche était fixé au degré 3.

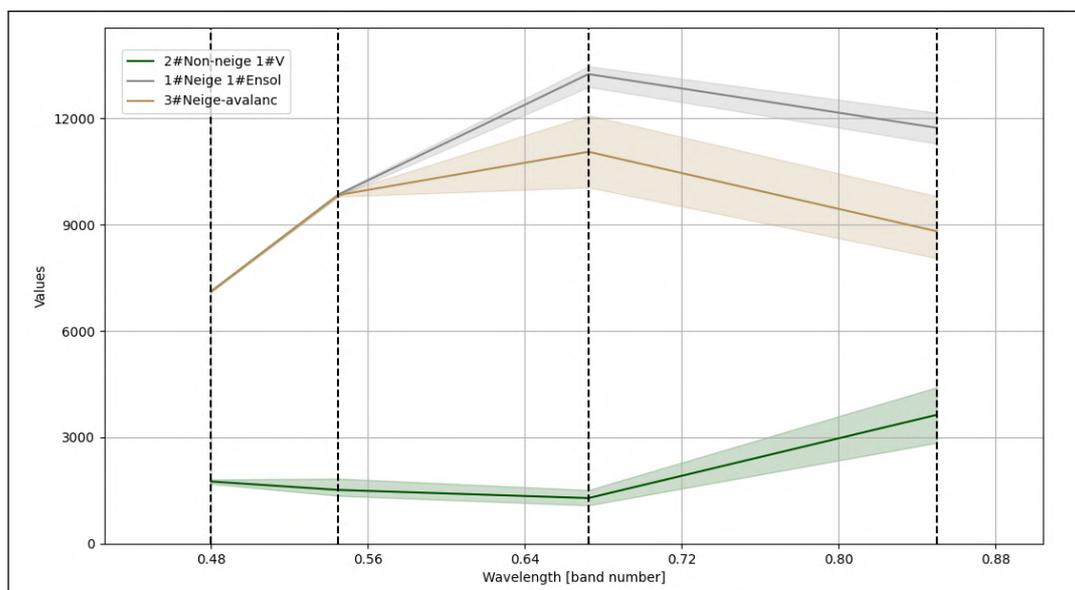
Le graphique de gauche indique ensuite que les avalanches de glissement sont prédominantes, représentant 60.2% des occurrences, suivies par celles classées comme étant de neige meuble (34.4%). Les avalanches de plaque sont nettement moins fréquentes, ne constituant que 5.5% du total. En ce qui concerne leur taille, 79.7% des avalanches recensées ne dépassaient pas 10 000 m<sup>2</sup>, relevant ainsi de la taille 2, tandis que seulement 20.3% appartenaient à la taille 3.

### 5.3 Classification supervisée

En abordant la classification supervisée, la figure 12 (a) présente le résultat de cette dernière sur un extrait du secteur A de l'image satellite datée du 24.02.2021.



(a)



(b)

Figure 12: Extrait de la classification supervisée appartenant à l'image satellite du 24.02.2021 avec cartographie manuelle des avalanches présentes (a) et graphique des signatures spectrales simplifiées de trois macro-classes (b).

Concernant cette classification, il est d’abord remarqué que celle-ci prédit principalement avec précision et sans difficulté la classe des surfaces non couvertes de neige, car elles présentent une signature spectrale distinctement différente des autres classes, à savoir la neige et la neige de dépôt d’avalanches. En effet, pour ces deux dernières catégories, la classification se montre moins efficace, en raison de la similitude très marquée de leur signature spectrale (figure 12b). En outre, on remarque que la classe associée au dépôt d’avalanche présente une homogénéité moindre par rapport à la classe de la neige, ce qui peut la rendre fréquemment considérée comme de la neige dans une zone ombragée.

Poursuivant l’analyse, il est observable que, souvent, à l’intérieur des polygones d’avalanches cartographiées visuellement et manuellement, diverses classifications sont présentes. Cette particularité est en partie attribuable au fait que certaines de ces avalanches appartiennent à la catégorie des avalanches de glissement, présentant ainsi une section où le sol est découvert, relevant donc justement de la classe « non-neige ». Néanmoins, il est constaté qu’en dépit de plusieurs échantillons de diverses natures utilisés pour les points d’entraînement, la classification supervisée éprouve de grandes difficultés à distinguer entre un dépôt d’avalanche et de la neige à l’ombre comme juste mentionné. Enfin, dans d’autres cas, comme pour les avalanches situées au fond de la vallée dans l’image, vers le sud, la classification ne reconnaît pas même partiellement le dépôt de l’avalanche, les considérant ainsi comme de la neige ordinaire.

Pour conclure la présentation des résultats de la classification supervisée, il convient de souligner que cette procédure a été répétée à de multiples reprises pour chaque image avec différents points d’entraînement. Cette démarche a été entreprise à cause des variations non négligeables d’une image à l’autre, et parfois même au sein d’une même image satellitaire. Malgré toutes les tentatives effectuées en ce sens, aucun résultat satisfaisant n’a été obtenu. La figure 12 (a) illustre d’ailleurs l’un des meilleurs essais réalisés.

## 5.4 Analyse de la fréquence et de l’intensité des avalanches

Afin de poursuivre l’analyse, la carte représentant la fréquence d’apparition des phénomènes avalancheux est présentée (figure 13). Celle-ci illustre le taux d’occurrence d’une avalanche à chaque pixel. L’examen initial révèle que les points névralgiques précédemment identifiés dans la section 5.2 présentent des situations distinctes. En effet, bien que ces zones montrent une concentration des phénomènes avalancheux comme anticipé, il convient de mettre en relief les variations de fréquence entre elles. Dans le secteur A, on observe les fréquences d’apparition les plus élevées, tandis que les secteurs B et C présentent une fréquence d’apparition plus modérée, ne dépassant pas 0.4, avec une prédominance notable dans le secteur B de cette classe de valeurs. Concernant le secteur C, et plus

précisément les avalanches repérées dans la petite vallée latérale située au nord-est du repère du secteur, une accumulation d'événements est observée. Cependant, une analyse plus approfondie révèle que ces derniers se sont produits le même jour, d'où l'importance de l'examen des fréquences.

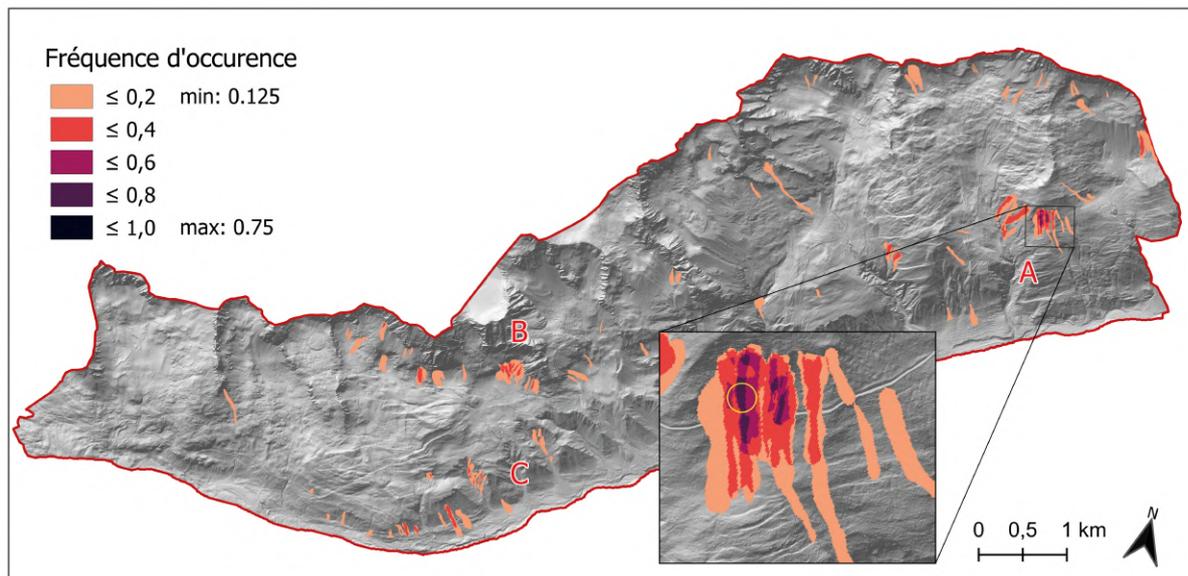


Figure 13: Relief ombragé superposé de la cartographie par pixel du taux d'occurrence des avalanches pour la période d'étude (Source du DEM: Swisstopo).

L'échelle de fréquence observée s'étend d'une valeur minimale de 0.125, attestée dans divers endroits où un unique phénomène d'avalanche s'est produit pendant la période d'étude, jusqu'à un maximum de 0.75, détectable au sein du secteur A, spécifiquement à l'intérieur du cercle jaune ajouté pour différencier la fréquence de 0.625 appartenant à cette même classe. Rétrospectivement, une segmentation plus raffinée des classes aurait été judicieuse.

En examinant plus attentivement, on peut distinguer, au sein du secteur A, la présence de six fréquences d'occurrence distinctes, allant de l'apparition d'une seule avalanche jusqu'à six apparitions sur huit relevés par pixel. Concernant le secteur B, on identifie trois fréquences distinctes avec un maximum de trois apparitions sur huit relevés. Quant au secteur C, il présente uniquement deux fréquences d'occurrence avec le maximum de deux apparitions sur la période d'étude.

La figure 14 illustre la cartographie de l'intensité maximale enregistrée durant la période d'étude pour un pixel spécifique. Il convient de rappeler que cette détermination de l'intensité s'est basée exclusivement sur le critère de la taille de la plus grande avalanche qui s'est manifesté dans un endroit donné, sans prendre en compte d'autres paramètres tels que la vitesse de déplacement, le volume déposé ou la pression exercée. Ces éléments étant inaccessibles par le simple biais d'images aériennes. Par conséquent, compte tenu

du fait que seulement deux tailles d'avalanche ont été observées, seules deux échelles d'intensité ont été identifiées, oscillant entre une valeur minimale de 2 et une maximale de 3.

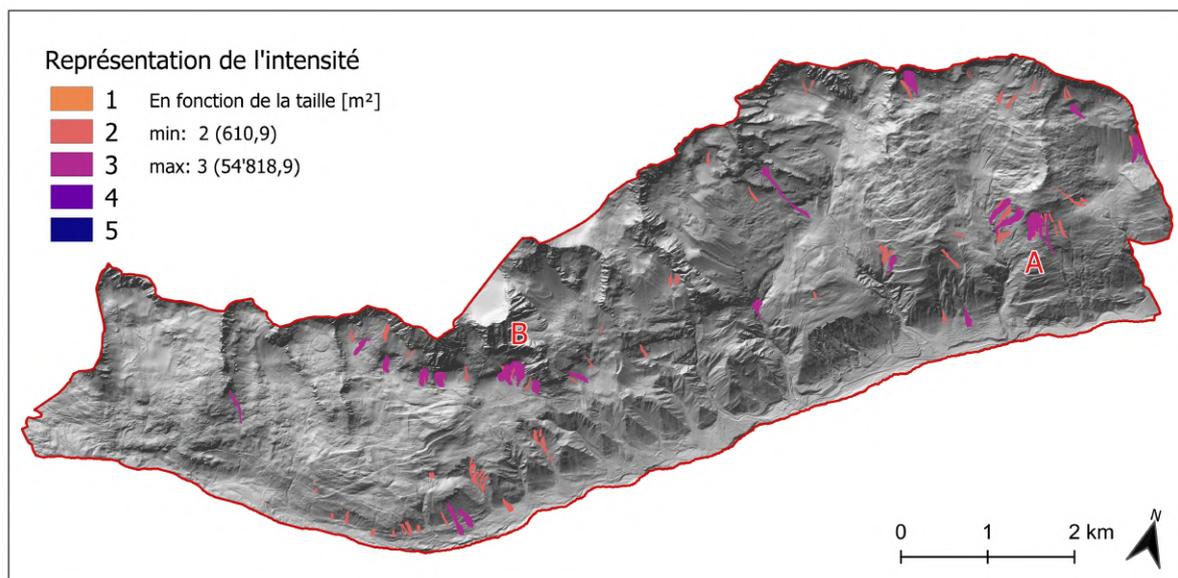


Figure 14: *Relief ombragé superposé de la cartographie par pixel de l'intensité des phénomènes avalancheux en fonction de leur taille (Source du DEM: Swisstopo).*

Sur le plan spatial, on peut distinguer que les secteurs névralgiques précédemment mentionnés, A et B, présentent une concentration particulière d'avalanches d'une intensité de 3. Cette concentration est toutefois moins prononcée dans le secteur C. De plus, une répartition hétérogène de l'intensité maximale est observable au sein de la zone d'étude, avec des apparitions ponctuelles de cette dernière dans des zones plus isolées, situées en dehors des secteurs initialement identifiés comme étant les plus remarquables.

## 5.5 Évaluation du danger relatif d'avalanche

En clôturant la section dédiée aux résultats, la figure 15 présente la cartographie du danger relatif d'avalanche pour la zone d'étude en question. Il convient de rappeler que les coefficients déployés pour élaborer cette représentation découlent de la multiplication, pixel par pixel, des valeurs respectives de fréquence et d'intensité. Par ailleurs, cette cartographie se fonde exclusivement sur le rapport entre fréquence et intensité, négligeant ainsi des éléments potentiellement exposés au danger tels que la présence d'infrastructures, de voies de communication ou la densité de la population.

La représentation du danger s'est également fondée exclusivement sur l'attribution d'une classe selon une échelle logarithmique, visant à mettre en évidence les zones à danger élevé. Il convient de souligner que cette approche diffère des directives pour la

cartographie du danger d'avalanche émises par l'Office Fédéral des Forêts (BFF, 1984), qui les classifie aussi en tenant compte du type d'avalanche, des périodes de retour, de la pression exercée, et de la direction du phénomène avalancheux.

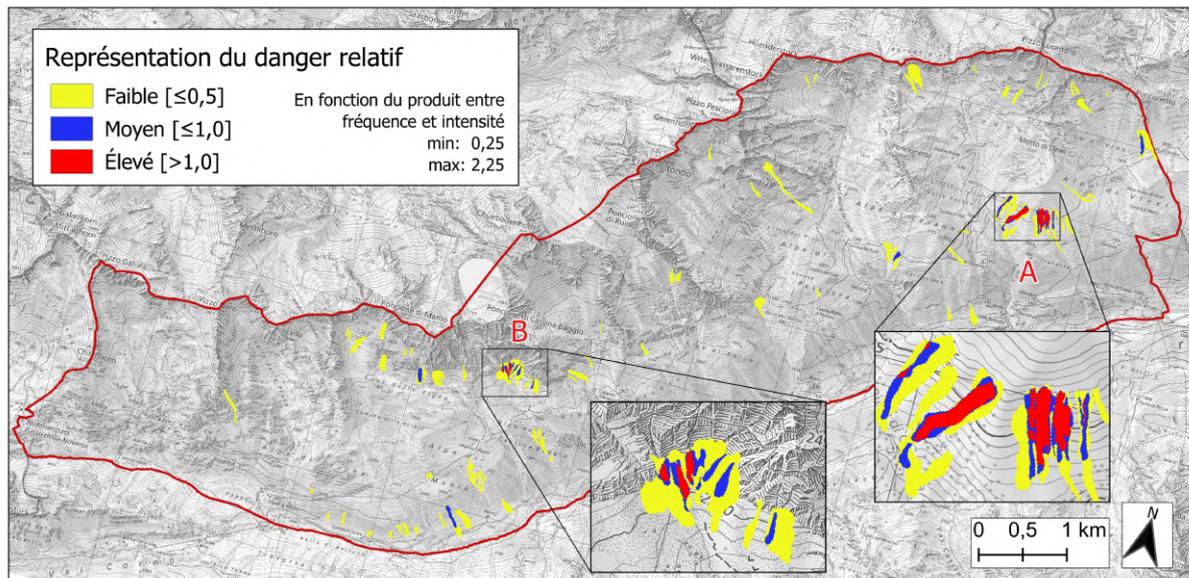


Figure 15: Représentation cartographique du danger relatif pour la zone d'étude (Fond de carte: Swisstopo).

En se penchant plus précisément sur la représentation du danger relatif, il est observable que principalement deux zones à danger élevé se manifestent, coïncidant, une fois de plus, avec les secteurs A et B déjà mentionnés. Le secteur A se distingue par une plus grande importance en termes d'étendue et de nombre de zones de danger. C'est également dans ce secteur que l'on trouve le coefficient de danger le plus élevé, s'élevant à 2.25. En ce qui concerne le danger moyen, les zones y correspondant se trouvent également principalement dans les secteurs A et B. Néanmoins, des zones à danger intermédiaire peuvent également être identifiées de manière isolée, résultant de la présence d'au moins une avalanche de catégorie 3 et d'une fréquence minimale de 0.25, soit au moins deux phénomènes observés au cours de la période d'étude. Enfin, les zones à faible danger correspondent aux régions exemptes d'avalanches de catégorie 3 et où aucune récurrence d'événements avalancheux n'a été notée.

## 6 Discussion

L'analyse des résultats obtenus, proposée ci-après, adopte une structure chronologique suivant à la fois l'obtention et la présentation des dits résultats.

### 6.1 Télédétection des avalanches: relation avec les événements historiques, le climat et le niveaux de danger

Premièrement, il est essentiel d'aborder la question de l'exclusion systématique du versant sud de la vallée, soit le versant orienté vers le nord. Pendant la période hivernale, du fait de la faible inclinaison solaire, ce versant demeure constamment à l'ombre, avec des variations d'intensité selon l'avancement de la saison, atteignant un minimum au mois de mars. À ce sujet, on a noté l'absence d'avalanches identifiables, malgré l'utilisation d'une fausse composition des bandes spectrales et une modification des paramètres de luminosité et contraste. Cette difficulté dans la détection des avalanches est certifiée par plusieurs études antérieures. Les études menées par Bühler et al. (2019) indiquent que près de 30% des tracés des avalanches cartographiées durant leur recherche sur les versants exposés au nord étaient catégorisés comme « créés ». En d'autres termes, ces tracés étaient élaborés en s'appuyant principalement sur l'expertise de spécialistes des phénomènes avalancheux, sans identification visuelle distincte, à l'exception de quelques indices sporadiques attestant de leur présence. En outre un supplémentaire 60% reposaient seulement sur des estimations cartographiques. Par conséquent, seulement 10% étaient des cartographies confirmées visuellement. Une étude ultérieure menée par Hafner et al. (2022) a montré qu'alors que pour les versants ensoleillés, il existe une concordance entre les experts sur la cartographie des avalanches avec un F-score<sup>1</sup> variant de 0.617 à 0.786, pour les zones ombragées, ce coefficient varie seulement entre 0.123 et 0.401. Il est donc manifeste que la cartographie des événements avalancheux sur le versant exposé au nord présente une complexité significative, dépassant l'étendue des compétences envisagé dans le cadre de cette recherche.

Concernant le versant ensoleillé, les résultats obtenus au cours de cette étude offrent une perspective encourageante sur l'utilisation des technologies satellitaires pour la cartographie des avalanches. Lorsqu'il s'agit de l'identification des avalanches, on observe, en se basant également sur les pourcentages indiquant le type d'avalanche détecté, que les avalanches de glissement sont les plus aisément identifiables. Cela s'explique par le contraste généré par l'exposition du sol nu au niveau de la zone de rupture (Bühler et al., 2019). Ensuite

---

<sup>1</sup>L'F-score, ou score F, est une mesure statistique utilisée pour évaluer la précision et le rappel d'un test, offrant une moyenne harmonique entre ces deux valeurs pour obtenir une seule métrique d'évaluation de performance (Sasaki, 2007).

viennent les avalanches de neige meuble, reconnaissables grâce à leur forme lobée étirée. La détection se complique pour les avalanches de plaque. En effet, durant cette étude, elles ont été identifiées uniquement sur la base de leur forme, car la résolution des images satellites ne permettait pas de repérer le décrochement linéaire à partir duquel la coulée se développe. De plus, bien que non prises en compte car appartenant à une classe englobant divers types d'avalanches, les avalanches de neige mouillées sont plus aisément détectables que les avalanches de neige sèche, en raison de leur meilleur contraste avec la neige environnante grâce à la présence d'eau à l'état liquide qui les caractérise (Leinss et al., 2020 ; WSL, n.d.). Cette particularité est clairement observable pour les deux dates enregistrant le plus grand nombre de détections d'avalanches, à savoir le 12.03.2020 et le 24.02.2021, pour lesquelles la survenue d'avalanches mouillées était anticipée (tableau 2).

En élargissant l'analyse à la taille des avalanches détectées, on peut confirmer, comme l'avaient déjà avancé Schweizer et al. (2018), que dans notre cas également, la classe de taille d'avalanche la plus fréquemment observée est la classe 2. Cela démontre que l'approche adoptée a permis la détection d'avalanches jusqu'à cette taille, performance qui mérite d'être soulignée. Elle met également en avant le potentiel des images d'une résolution similaire à celle utilisée dans cette étude. À l'inverse, on souligne la difficulté de détection des avalanches de taille 1, qui en réalité n'ont pas été identifiées au cours de cette étude, en raison de la résolution des images satellitaires. Cette observation est soutenue par les travaux de Leinss et al. (2020) et Bühler et al., (2019). Comme précédemment mentionné, le premier affirme qu'avec une résolution de 10 m par pixel pour une image provenant du satellite Sentinel, il n'est pas possible de détecter une avalanche de moins de 2000 m<sup>2</sup>. Le second, quant à lui, rapporte que dans leur étude, la plus petite avalanche de plaque détectée avait une superficie de 415 m<sup>2</sup>, se traitant donc de taille 1 mais étant relativement grande (on rappelle que la limite de classe est située à 500 m<sup>2</sup>). Ainsi, ils soutiennent que leur résolution de 1.5 m par pixel est déjà à la limite pour la détection des petites avalanches. Il convient toutefois de noter que les avalanches de taille 1 présentent un intérêt moindre lors d'une analyse du danger d'avalanche, dont l'objectif premier est d'identifier et essayer de prévoir des phénomènes plus extrêmes, non représentés par des avalanches de petite taille.

Considérant le thème de la taille et des phénomènes plus extrêmes, la figure 16 présente une comparaison entre les avalanches identifiées au cours de cette recherche et la cartographie des avalanches issues du cadastre des événements naturels du canton du Tessin (Catasto eventi naturali - StorMe, n.d.). Il est manifeste qu'une différence notable existe entre les tailles enregistrées d'une part et de l'autre. Dans la cartographie issue du registre des événements, dominant majoritairement des avalanches de très grande taille, voire catastrophiques, représentant près de 64% des observations, avec une taille maximale atteignant 430.87 ha. Il convient de rappeler que, historiquement comme actuellement,

les avalanches sont généralement enregistrées que lorsqu'elles engendrent des dommages matériels ou des pertes humaines (Bühler et al., 2013). Cette prédominance des avalanches de grande taille s'explique donc par leur caractère destructeur, tandis que les avalanches généralement plus petites, à l'instar de celles identifiées durant cette étude, sont moins susceptibles de causer des dommages ou des victimes. D'ailleurs, aucune avalanche de taille 1 n'apparaît aussi dans cette cartographie.

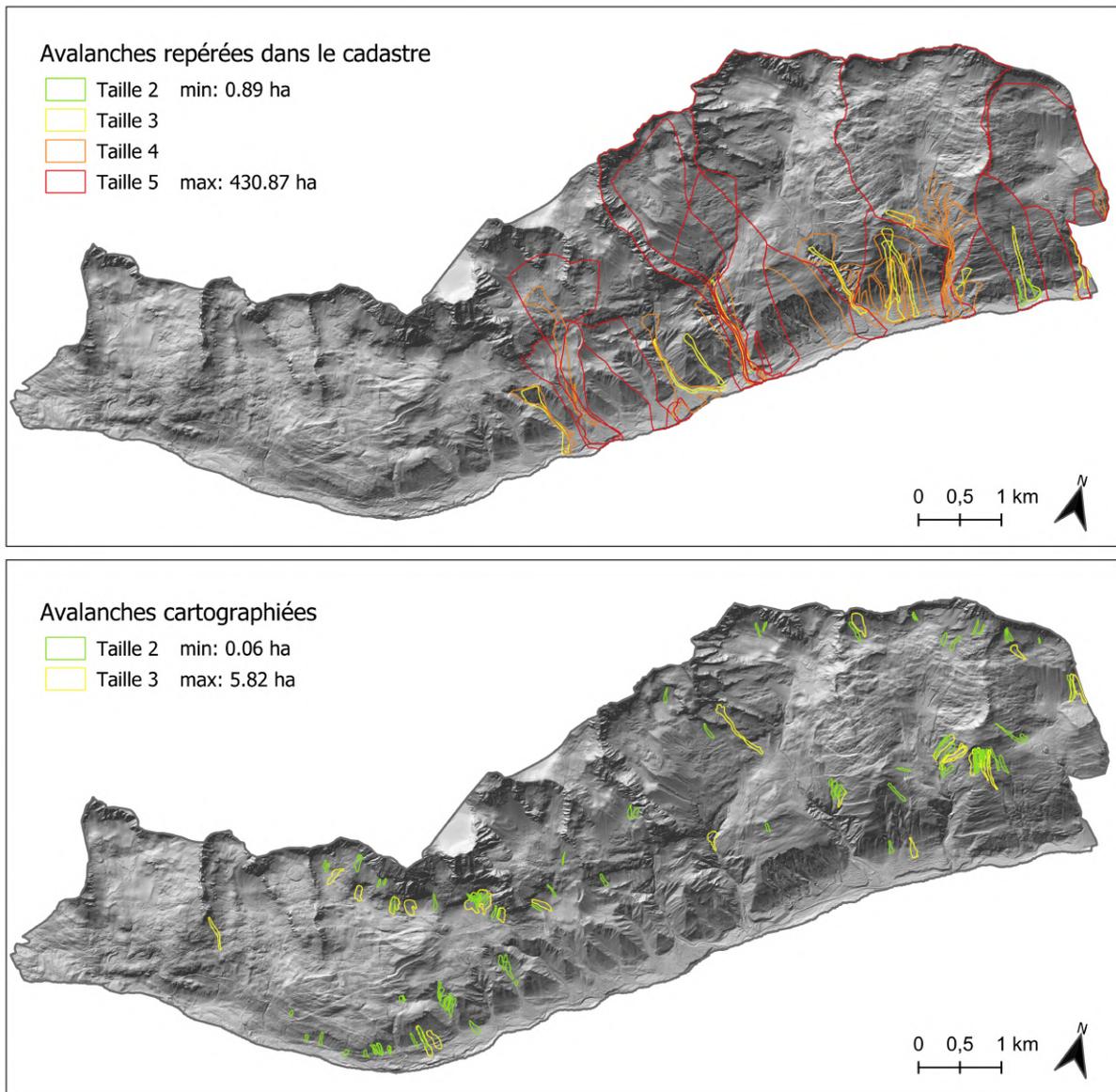


Figure 16: Comparaison entre la cartographie effectuée pour les données des extensions des avalanches anciennes obtenues du cadastre du canton Tessin (StorMe, n.d.) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo).

Concernant ce point, on constate l'absence d'avalanches dans la partie la plus occidentale, en raison de la localisation des établissements plus en aval dans la vallée et donc absence de dégâts lorsqu'une avalanche se déclenche à cet endroit. Par ailleurs, compte tenu de leur ancienneté et des technologies alors disponibles, la précision de ces

cartographies ne reflète pas nécessairement la réalité complète des contours avalanches. En périodes de danger extrême, la collecte d'informations précises était et demeure complexe en raison de l'inaccessibilité des terrains escarpés, aboutissant souvent à des représentations potentiellement incomplètes ou imprécises (Bühler et al., 2009 ; Leinss et al., 2020). Pour ce qui est des avalanches de taille catastrophiques (taille 5) recensées, ces contours englobent quasiment l'ensemble du sous-bassin versant, avec des zones de rupture touchant même les crêtes et les sommets définissant la limite de la commune et de la zone d'étude au nord. Dans cette perspective, il serait pertinent de réviser ces polygones pour mieux refléter la réalité des contours d'avalanche en tenant compte de la topographie. Bien que cela puisse sembler négligeable à une si grande échelle, l'emploi de technologies plus avancées permettrait une cartographie plus précise. Il est manifeste que la cartographie obtenue au cours de cette étude ne reflète pas le potentiel danger d'avalanches présent dans la région. Dans cette optique, on souligne qu'il est impératif d'observer des événements extrêmes pour appréhender l'ampleur possible des phénomènes, afin d'avoir une vision exhaustive du danger réel et pouvoir s'en protéger, perspective que les données actuelles ne permettent pas d'élaborer.

En ce sens, pour que des événements extrêmes de taille 4 ou 5 se manifestent, il est impératif que le degré de danger d'avalanche soit également élevé, c'est-à-dire de grade 4 ou 5 (Schweizer et al., 2018). Dans le cadre de notre étude, l'analyse des bulletins d'avalanches n'a jamais révélé la présence d'un degré de danger qualifié de « fort », rendant ainsi prévisible l'absence de détection d'avalanches de taille très grande ou catastrophiques. En fait les données exploitées pour cette étude ont été recueillies lors de jours où le niveau de danger d'avalanche ne dépassait pas le degré 3. Bien que ce niveau indique une certaine menace, il n'égale pas les conditions extrêmes qui sont souvent les plus informatives pour les études de danger. Ces situations d'extrême danger sont précisément celles qui peuvent entraîner des avalanches de grande envergure, et ainsi fournir des informations cruciales pour l'évaluation du danger.

L'objectif lors de la recherche d'images était d'obtenir celles-ci lors d'une période marquée par un fort degré de danger, espérant ainsi augmenter les chances de documenter des phénomènes extrêmes. Cependant, pour ce qui est de la saison 2019/20, elle s'est avérée moins dangereuse en termes d'avalanches que la moyenne observée au cours des dix dernières années (Trachsel et al., 2021). Durant cette année, aucun degré d'alerte 4 n'a été pronostiqué pour la région étudiée, à l'exception du 21 décembre. Pour cette date, un tel degré de danger avait été anticipé la veille, mais il fut rétrogradé au degré 3 dès le matin (Trachsel et al., 2021). Concernant la saison 2020/21, bien qu'elle ait été globalement plus dangereuse par rapport à la moyenne décennale pour l'ensemble du territoire suisse, un danger de niveau 4 n'a été signalé que rarement pour la région du Val Bedretto : pour les jours du 5, 6 et 7 décembre – suite à une situation de barrage météorologique sur le

versant méridional apportant entre 100 et 150 cm de neige fraîche sur la crête principale des Alpes – et pour les jours du 14 et 28 janvier (Zweifel et al., 2022). Malheureusement, pour ces dates précises, malgré des recherches minutieuses, aucune image satellitaire de qualité, qui couvrirait la majorité de la zone d'étude ou exempte de couverture nuageuse n'était disponible, rendant impossible l'identification de la présence de dépôts d'avalanche. À cet égard, il est notoire que les fenêtres de beau temps, essentielles pour la télédétection des avalanches via les images satellitaires optiques, coïncident rarement avec des situations de forte ou extrême dangerosité avalancheuse (Wesselink et al., 2017 ; Bühler et al., 2019). Ce qui, par conséquent, a empêché la détection d'avalanches significatives au cours de cette étude.

De ce point de vue, on peut postuler que l'absence d'avalanches de grande envergure durant la période d'étude est partiellement attribuable, notamment pour la saison 2019/20, à ce qui a été énoncé dans le contexte climatique (section 3.1). En effet, suivant la tendance à la réduction de la durée de l'hiver ainsi qu'à la diminution des précipitations sous forme de neige – et donc un développement moindre du manteau neigeux – on peut envisager que cela ait un impact sur la survenue d'avalanches de plus grande magnitude (MeteoSvizzera, 2012 ; Bühler et al., 2019). On peut dès lors déduire qu'avec cette tendance, on observera probablement dans le futur une baisse de la fréquence et de l'intensité des phénomènes avalancheux extrêmes, qui, supposons-le, deviendront du coup de moins en moins extrêmes. En appui de cette déclaration, on peut mentionner qu'entre février 1999 et le 5 janvier 2018, le niveau de danger 5 n'a jamais été déclaré en dehors de ces deux dates (Bühler et al., 2019).<sup>2</sup> Cette observation nous amène à nous interroger sur la pertinence de la carte des dangers actuellement en vigueur et à se demander si elle ne nécessite pas une mise à jour, étant donné qu'elle pourrait surestimer considérablement le danger réel dans la région. Nous reviendrons sur cette question un peu plus loin dans la section 6.3.

Revenant sur l'hiver relativement doux de la saison 2019/20, il convient de souligner que, malgré cela, le deuxième jour avec le plus grand nombre d'avalanches détectées pendant cette étude appartient précisément à cette saison, à savoir le 12 mars 2020 avec 32 avalanches cartographiées. Cette date s'avère d'autant plus intéressante qu'il a été observé que la veille (11 mars 2020) correspondait à la journée d'activité avalancheuse la plus importante de l'hiver en Suisse (Trachsel et al., 2021). D'une part, cela explique le nombre élevé d'avalanches détectées durant cette période, d'autre part, cela suscite des interrogations quant à la « qualité » des futures saisons hivernales. Comment se fait-il que le jour avec la plus forte concentration et intensité d'avalanches se situe en mars, à la fin de la saison ? Il est également important de noter que, durant ces journées, suite à d'importantes chutes de neige et à une fluctuation constante de l'altitude de la

---

<sup>2</sup>En fait, bien qu'il ait été émis une fois en 2008, il n'a pas été confirmé rétrospectivement (Bühler et al., 2019).

limite pluie-neige, les avalanches qui se sont produites ont été majoritairement classées (en dehors de cette recherche) comme avalanches de neige mouillée (Trachsel et al., 2021). Toutefois, cela ne dissipe pas les incertitudes concernant la continuation de cette tendance caractérisée par une diminution de la couverture neigeuse effective au sol pendant l’hiver et, par conséquent, du danger d’avalanche.

## 6.2 Techniques de détection supplémentaires

Dans le dessein de détecter un nombre plus conséquent d’avalanches et également d’identifier sur des images où aucune n’avait été repérée visuellement, la technique de la classification supervisée a été mobilisée. Cette démarche a été mise en œuvre, avec la conception de points d’entraînement aussi détaillés que possible pour assurer une représentation optimale des différentes classes, de manière spécifique pour chaque image satellite. Pour les images satellitaires ne montrant visuellement aucun dépôt d’avalanche, les points d’entraînement de l’image la plus analogue ont été utilisés (par exemple, une image de décembre pour en analyser une autre du même mois). Malgré ces efforts, les résultats obtenus ne se sont pas avérés satisfaisants.

En effet, on a constaté que la classification supervisée peinait à différencier efficacement un dépôt d’avalanche d’une zone neigeuse à l’ombre, et vice-versa, surclassant ainsi un nombre excessif de pixels au sein de la zone d’étude. D’après les travaux de Lato et al. (2012), afin que la classification des dépôts d’avalanches soit efficace, il a fallu tester, filtrer et réorganiser une centaine de variables indépendantes. De plus, il est souligné dans cette étude que pour qu’une classification puisse attribuer adéquatement une classe à un pixel, elle doit aussi pouvoir interpréter l’image en tenant compte des pixels adjacents et non pas uniquement du pixel en soi de façon isolée (Lato et al., 2012). Ce travail de Lato et al. (2012) a mis en avant la nécessité d’utiliser une classification hiérarchique orientée vers l’objet, faisant appel à une méthodologie de segmentation pour classifier l’image dans son ensemble, tout en prenant en compte la proximité des pixels. On a donc constaté des difficultés à cet égard et la nécessité d’investir beaucoup de temps pour parvenir à une classification de haute qualité. En conséquence, en raison de contraintes temporelles et d’un manque d’expertise à ce sujet, il n’a pas été possible d’approfondir cette technique. Elle a donc été mise de côté et n’a produit aucun résultat ultérieur.

Dans la même optique, des images satellitaires de printemps et du début de l’été ont été exploitées afin d’identifier d’importants dépôts d’avalanches qui n’avaient pas encore totalement fondu. L’objectif était de retracer leur origine tant temporelle que spatiale à partir des images satellitaires hivernales. Toutefois, cette démarche n’a pas été fructueuse. Dans les images analysées, soit la neige était encore trop abondante pour distinguer ces

dépôts, soit elle était insuffisante. En lien avec la discussion précédente, il est plausible aussi que des avalanches d'une telle envergure ne se soient pas produites, rendant leurs dépôts moins persistants dans le temps.

### 6.3 Analyse comparative des cartographies du danger

En ce qui concerne la comparaison entre les cartographies obtenues dans le cadre de cette étude et celles déjà existantes, disponibles sur le géoportail du canton du Tessin, le premier point de comparaison porte sur la cartographie du danger indicatif des avalanches (figure 17). On remarque, comme lors de la comparaison avec les contours des avalanches répertoriées dans le registre et celles obtenues (section 6.1), une divergence notable quant à l'étendue du danger indicatif. Cependant, on observe que les zones clés répertoriées dans cette recherche sont largement reflétées, ou plutôt intégrées, dans la représentation du risque indicatif, à l'exception de la zone sous le Poncione di Maniό. Il est à noter que cette région n'a pas été prise en compte lors de l'élaboration de la carte du danger indicatif. En analysant le DEM, on peut supposer que les avalanches provenant de cette zone n'ont pas été jugées dangereuses pour les infrastructures et les voies de communication, étant donné une baisse significative de la pente en aval de cet endroit qui forme une sorte de zone en terrasse relativement plate, jugée capable d'arrêter la progression d'une avalanche potentielle.

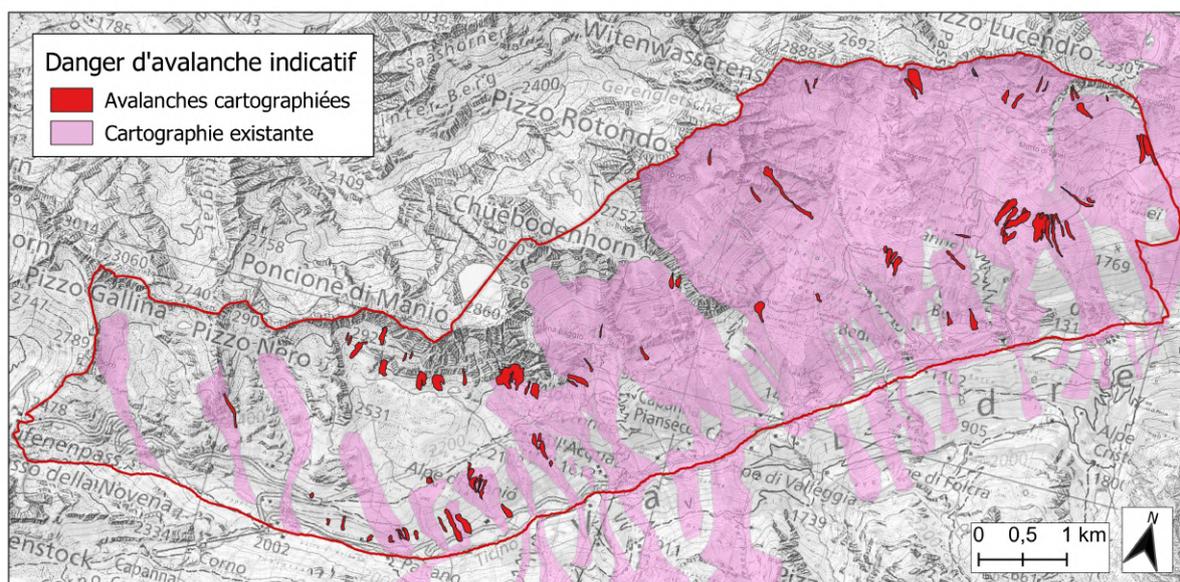


Figure 17: Comparaison entre la cartographie du danger indicatif obtenue du géoportail du canton Tessin (*map.geo.ti*) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo).

La figure 18 illustre la comparaison entre la carte des dangers actuellement en vigueur et celle du danger relatif élaborée en fonction de la fréquence et de l'intensité des phénomènes

avalancheux observés durant cette étude. Il convient de rappeler qu'en élaborant cette carte du danger relatif, les directives pour la création de telles cartes (BFF, 1984) n'ont pas été suivies. Dans un premier moment on remarque ainsi l'absence du danger faible dans la cartographie actuellement appliquée. L'écart dans la délimitation des zones à risque est également substantiel.

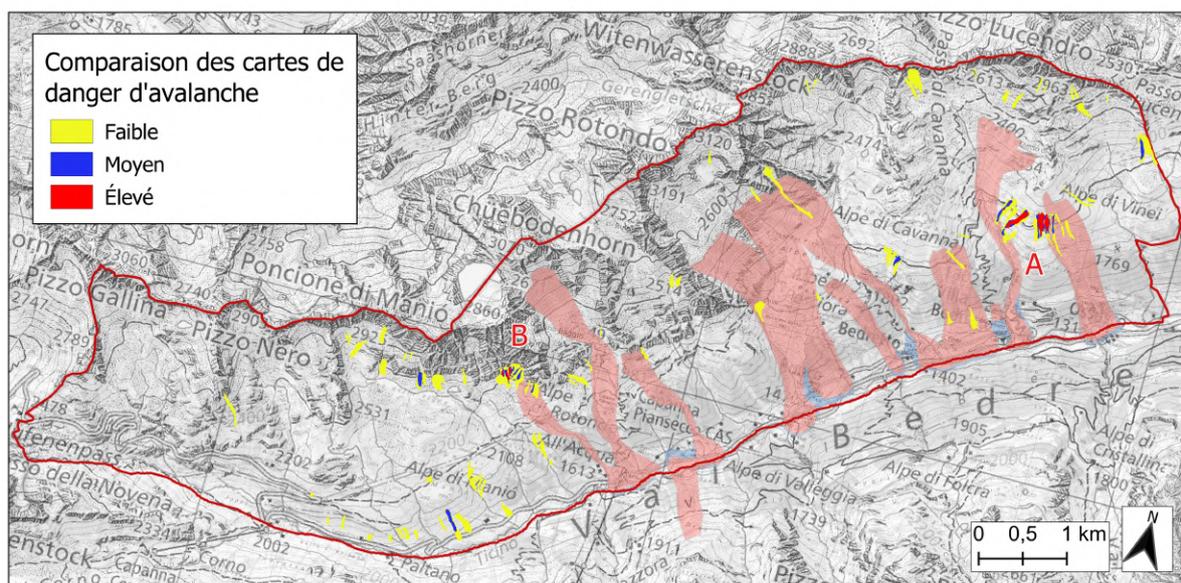


Figure 18: Comparaison entre la cartographie du danger obtenue du géoportail du canton Tessin (*map.geo.ti*) et la cartographie effectuée lors de cette étude (Fond de carte: Swisstopo).

Les cartes de dangers élaborées en 2006 se fondent en effet sur l'étendue des avalanches enregistrées, offrant par conséquent une vision exhaustive des zones à risque, car elles considèrent des événements d'une envergure nettement supérieure. Par la suite, sachant que la carte officielle tient compte de l'exposition aux dangers des infrastructures et des voies de communication, elle apparaît comme étant plus réaliste comparée à celle basée uniquement sur la fréquence et l'intensité. Pour cette raison, et du fait qu'aucune avalanche d'envergure notable n'a été détectée pendant notre période d'étude, aucune proposition d'amélioration de la carte actuelle ne peut être formulée. Néanmoins, en considérant les tendances climatiques actuelles qui se poursuivront probablement dans les années futures, une réévaluation et un ajustement de la carte de danger peuvent être envisagés. Quant aux améliorations possibles, les zones des secteurs A et B, jugées critiques suite à cette étude, ne sont pas incluses dans les zones de danger actuellement en vigueur, bien qu'elles soient à proximité immédiate. Dans cette optique, une extension des zones à risque adjacentes aux régions jugées ayant un degré élevé de danger par cette analyse pourrait être proposée, étant donné qu'elles pourraient contribuer à l'augmentation de l'envergure d'une avalanche potentielle à ces endroits.

Ainsi, bien que notre cartographie des avalanches soit techniquement assez solide et montre des résultats prometteurs, elle ne représente pas, en l'état actuel, une image ex-

haustive du danger d’avalanches dans la zone étudiée. Pour obtenir une vue représentative et complète, il serait essentiel d’inclure des données issues de conditions météorologiques et de danger plus variées, couvrant tout le spectre des menaces potentielles.

## 6.4 Limites du travail

L’étude des avalanches à partir d’images satellitaires, malgré un potentiel manifeste, a été confrontée à de nombreuses contraintes. La qualité et la disponibilité des images se sont avérées être des obstacles majeurs. Le satellite Dove R n’a été opérationnel que pour une période restreinte, limitant de ce fait la durée de l’analyse. Par ailleurs, les images issues des satellites Dove Classic et Superdove étaient de qualité inférieure, rendant la détection des traces d’avalanches impossible. D’un point de vue technique, différentes approches ont été envisagées pour optimiser la résolution des images, dont le pansharpening. Cependant, cette technique s’est révélée non viable, principalement en raison de l’absence d’images à plus haute résolution : en réalité, la résolution des images panchromatiques disponibles était identique à celle des images multibandes. Bien que les solutions offertes par SPOT 6/7, avec leur résolution de 1.5 m et déjà utilisées dans plusieurs études (Bühler et al., 2019 ; Hafner et al., 2022), étaient idéales, elles entraînaient des coûts considérables. Pour illustrer, l’acquisition d’images de SPOT 6 couvrant une grande partie de la crête principale des Alpes suisses pour le jour suivant, dans l’étude de Bühler et al. (2019), a engendré des dépenses d’environ 80 000 EUR.

Il est également important de réitérer le défi posé par l’importante superficie de la zone ombragée. Le Val Bedretto, orienté selon un axe est-ouest, laisse son versant au sud constamment dans l’ombre pendant les mois d’hiver. Comme déjà évoqué, la complexité de détecter des avalanches dans ces zones ombragées est reconnue, même parmi les experts (Hafner et al., 2022). À cet égard, on peut estimer que les compétences déployées n’étaient pas à la hauteur de l’exigence de réaliser une cartographie exhaustive des avalanches, y compris sur le versant ombragé. Cette complexité, combinée à des inégalités dans la qualité des images d’un survol satellite à l’autre et à la présence de divers artefacts, a rendu la détection des traces d’avalanche extrêmement difficile, même sur le versant exposé au soleil.

Finalement, la dépendance vis-à-vis de fenêtres météorologiques clémentes réduit les opportunités de détecter des avalanches d’une intensité notable. Même face à une fenêtre de beau temps, l’accès à une image pertinente n’est pas assuré. Dans cette perspective, il faut aussi parfois compter sur la chance, sauf si l’on parvient à missionner un satellite pour une surveillance ciblée de la zone, une démarche induisant, bien sûr, des frais parfois considérables.

## 7 Conclusion et perspectives

Au terme de cette étude axée sur le repérage des dépôts d'avalanches dans le Val Bedretto au moyen de la télédétection, on peut confirmer que des zones plus propices au déclenchement d'avalanches ont été identifiées en fonction de données à disposition, en particulier dans les secteurs A et B. En ce qui concerne la fréquence et l'intensité, on observe que ces secteurs sont plus régulièrement touchés par des avalanches présentant également une intensité plus élevée. De manière générale, une variabilité spatiale de ces indicateurs est notée.

Bien que ces relevés coïncident partiellement avec les cartographies actuellement en vigueur, des divergences notables ont été identifiées, principalement en termes d'étendue des zones de danger. Cette disparité pourrait être majoritairement imputée à l'absence de détection d'événements extrêmes essentiels pour effectuer une évaluation complète et approfondie du danger d'avalanche réel. En l'absence de données relatives à ces situations, notre capacité à remettre en question ou à valider des cartes de danger préexistantes demeure limitée. Les cartographies conçues en 2006, s'appuyant sur le cadastre et ayant incorporé des événements extrêmes, s'affirment donc comme des outils précieux et fiables pour évaluer les risques d'avalanche jusqu'à une nouvelle réévaluation.

L'utilisation de la technologie satellitaire, et en particulier du satellite Planet Dove R, pour la détection et la cartographie des avalanches est prometteuse et offre une méthodologie assez robuste pour surveiller et analyser les avalanches jusqu'à une certaine taille. Toutefois, diverses contraintes, telles que la nécessité de bénéficier de fenêtres météorologiques favorables, ont rendu la collecte d'informations des endroits les plus dangereux plus difficile.

En fin de compte, cette étude jette les bases pour des recherches ultérieures qui pourraient combiner des méthodes satellitaires avancées avec des observations lors de conditions extrêmes, offrant ainsi une image plus complète et plus précise du danger d'avalanche. La combinaison des technologies actuelles avec des données plus exhaustives pourrait ouvrir la voie à des cartographies du danger encore plus précises et plus représentatives à l'avenir. Tout cela en gardant à l'esprit la tendance à la diminution de la durée de l'hiver et des chutes de neige, ce qui pourrait entraîner une diminution du danger d'avalanche.

## Bibliographie

- [1] Bettosini, L., Pagnutti, D., & De Franco, L. (2007). La meravigliosa Valle Bedretto. *Vivere la montagna*, 49(187).
- [2] BFF, EISLF. (1984). Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen (BFF), Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (EISLF).
- [3] Bühler, Y., Hafner, E. D., Zweifel, B., Zesiger, M., & Heisig, H. (2019). Where are the avalanches? Rapid SPOT6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13(12), 3225–3238. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3225-2019>
- [4] Bühler, Y., Bieler, C., Pielmeier, C., Frauenfelder, R., Jaedicke, C., Bippus, G., ... & Caduff, R. (2014). Improved Alpine Avalanche Forecast Service AAF. Final Report, European Space Agency ESA.
- [5] Bühler, Y., Hüni, A., Christen, M., Meister, R., & Kellenberger, T. (2009). Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 57(2–3), 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.02.007>
- [6] Bühler, Y., & Kuhne, R. (2018a). Linking modelled potential release areas with avalanche dynamic simulations: an automated approach for efficient avalanche hazard indication mapping.
- [7] Bühler, Y., Kumar, S., Veitinger, J., Christen, M., Stoffel, A., & Snehmani. (2013). Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5), 1321–1335. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1321-2013>
- [8] Bühler, Y., Von Rickenbach, D., Stoffel, A., Margreth, S., Stoffel, L., & Christen, M. (2018b). Automated snow avalanche release area delineation – validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(12), 3235–3251. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3235-2018>
- [9] Cantone Ticino (éditeur). (n.d.) Geoportale Ticino – Mappa dinamica. Repéré à [map.geo.ti.ch](http://map.geo.ti.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 20.07.2023).
- [10] Delaloye, R., Frei, C., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Hauck, C., Hilbich, C., ... & Naegeli, B. (2009). Permafrost in Switzerland 2004/2005 and 2005/2006. *Glaciological Report (Permafrost)*, 6.
- [11] Eckerstorfer, M., Bühler, Y., Frauenfelder, R., & Malnes, E. (2016). Remote sensing of snow avalanches: Recent advances, potential, and limitations. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.11.001>
- [12] Eckerstorfer, M., Malnes, E., & Müller, K. (2017). A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data. *Cold Regions Science and Technology*, 144, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.004>

- [13] Eckerstorfer, M., Vickers, H., Malnes, E., & Grahn, J. (2019). Near-Real Time Automatic Snow Avalanche Activity Monitoring System Using Sentinel-1 SAR Data in Norway. *Remote Sensing*, 11(23), 2863. <https://doi.org/10.3390/rs11232863>
- [14] Foglia, A. (2020). La stabilité du manteau neigeux en deux régions du Tessin. [Travail de Bachelor non publié]. UNIL – Université de Lausanne.
- [15] Hafner, E. D., Barton, P., Daudt, R. C., Wegner, J. D., Schindler, K., & Bühler, Y. (2022). Automated avalanche mapping from SPOT 6/7 satellite imagery with deep learning: Results, evaluation, potential and limitations. *The Cryosphere*, 16(9), 3517–3530. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3517-2022>
- [16] Harvey, S., Schmudlach, G., Bühler, Y., Dürr, L., Stoffel, A., & Christen, M. (2018). Avalanche terrain maps for backcountry skiing in Switzerland. In *Proceedings ISSW* (pp. 1625-1631).
- [17] Korzeniowska, K., Bühler, Y., Marty, M., & Korup, O. (2017). Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(10), 1823–1836. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1823-2017>
- [18] Kronholm, K. (2004). Spatial variability of snow mechanical properties with regard to avalanche formation. Doctoral dissertation, Universität Zürich.
- [19] Lato, M. J., Frauenfelder, R., & Bühler, Y. (2012). Automated detection of snow avalanche deposits: Segmentation and classification of optical remote sensing imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(9), 2893–2906. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2893-2012>
- [20] Leinss, S., Wicki, R., Holenstein, S., Baffelli, S., & Bühler, Y. (2020). Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from TerraSAR-X and Sentinel-1. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1783–1803. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1783-2020>
- [21] MeteoSvizzera (éditeur). (2012). Rapporto sul clima – Cantone Ticino 2012. Rapporto di lavoro MeteoSvizzera, p. 63.
- [22] MeteoSvizzera (éditeur). (n.d.). Il clima della Svizzera. Repéré à [meteosvizzera.admin.ch](https://meteosvizzera.admin.ch) (Consulté périodiquement jusqu’au 20.07.2023).
- [23] Planet Labs PBC (éditeur). (2022). Planet imagery product specification.
- [24] Planet (éditeur). (n.d.). Planet Data. Repéré à [planet.com](https://planet.com) (Consulté périodiquement jusqu’au 20.07.2023).
- [25] Planet (éditeur). (n.d.). Real-Time Satellite Monitoring with Planet. Repéré à [planet.com](https://planet.com) (Consulté périodiquement jusqu’au 20.07.2023).
- [26] Sasaki, Y. (2007). The truth of the F-measure. *Teach tutor mater*, 1(5), 1-5.
- [27] Schweizer, J., Jamieson, J. B. & Schneebeli, M. (2003a). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 1016. <https://doi.org/10.1029/2002RG000123>

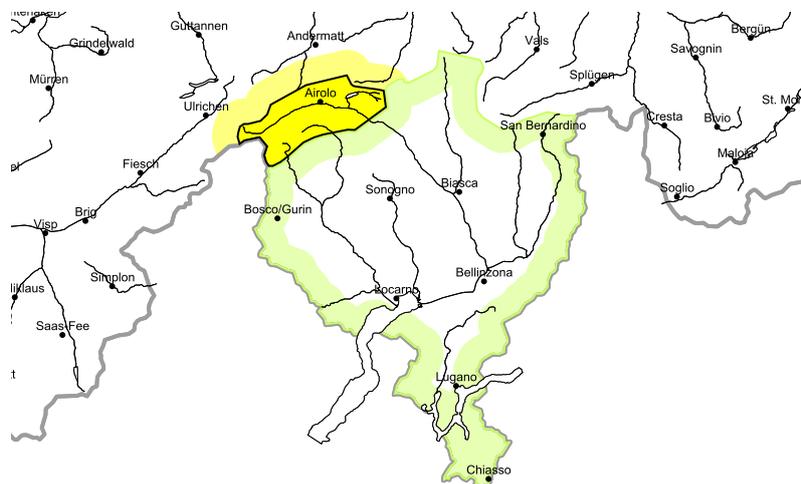
- [28] Schweizer, J., Kronholm, K., & Wiesinger, T. (2003b). Verification of regional snowpack stability and avalanche danger. *Cold Regions Science and Technology*, 37(3), 277–288. [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(03)00070-3)
- [29] Schweizer, J., Mitterer, C., Techel, F., Stoffel, A., & Reuter, B. (2018). Quantifying the obvious: the avalanche danger level.
- [30] Sezione Forestale (éditeur). (n.d.). StorMe - Catasto eventi naturali. Bellinzona, Dipartimento del Territorio: Datenbank - Auszug. Repéré à [www4.ti.ch](http://www4.ti.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 10.08.2023).
- [31] Steinkogler, W., Sovilla, B., & Lehning, M. (2014). Influence of snow cover properties on avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.10.002>
- [32] Swisstopo. (2022). swissALTI3D: le modèle de terrain à haute résolution de la Suisse.
- [33] Techel, F., Jarry, F., Kronthaler, G., Mitterer, S., Nairz, P., Pavšek, M., ... & Darms, G. (2016). Avalanche fatalities in the European Alps: long-term trends and statistics. *Geographica Helvetica*, 71(2), 147-159.
- [34] Trachsel, J., Zweifel, B., Techel, F., Marty, C., Stucki, T., 2021: Météo, manteau neigeux et danger d'avalanche dans les Alpes suisses. *L'année hydrologique 2019/20*. WSL Berichte, 112. 39 p.
- [35] Ufficio Federale dell'Ambiente - UFAM. (2021). Carte dei pericoli, carte d'intensità e carte indicative dei pericoli. Repéré à [bafu.admin.ch](http://bafu.admin.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 10.08.2023)
- [36] Wesselink, D. S., Malnes, E., Eckerstorfer, M., & Lindenbergh, R. C. (2017). Automatic detection of snow avalanche debris in central Svalbard using C-band SAR data. *Polar Research*, 36(1), 1333236. <https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1333236>
- [37] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (2016). Manuel d'observation du SLF. Davos, WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF. 60 p.
- [38] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (n.d.). Genèse des avalanches. Repéré à [slf.ch](http://slf.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 20.07.2023).
- [39] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (n.d.). Types d'avalanches. Repéré à [slf.ch](http://slf.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 20.07.2023).
- [40] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (n.d.). Bulletin d'avalanches et situation nivologique. Repéré à [slf.ch](http://slf.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 20.07.2023).
- [41] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (2021). Rapport d'hiver 2020/2021. Repéré à [slf.ch](http://slf.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 20.07.2023).
- [42] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (éditeur). (n.d.). RAMMS – Rapid Mass Movement Simulation. Two-dimensional dynamics modeling of rapid mass movements in 3D alpine terrain - A valuable tool for research and practice. Repéré à [ramms.slf.ch](http://ramms.slf.ch) (Consulté périodiquement jusqu'au 16.08.2022).

[43] Zweifel, B. ; Pielmeier, C. ; Techel, F. ; Marty, C.; Stucki, T., 2022 : Neige et avalanches dans les Alpes suisses. Année hydrologique 2020/21. WSL Ber. 118 : 41 p.



## Situation avalancheuse majoritairement favorable. Neige récemment soufflée à surveiller

Édition: 6.12.2019, 17:00 / Prochaine mise à jour: 7.12.2019, 17:00



### Limité, degré 2

#### Neige soufflée

##### Endroits dangereux

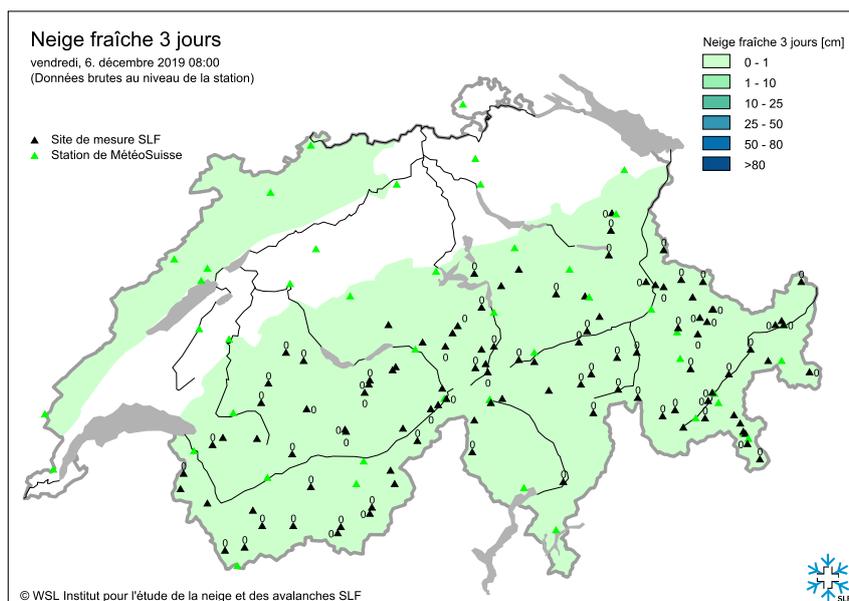


##### Description des dangers

Des accumulations de neige soufflée se forment avec le vent d'ouest partiellement fort en cours de nuit. Celles-ci constituent le danger principal. Des avalanches peuvent être déjà déclenchées par un seul amateur de sports d'hiver, mais sont en général plutôt petites. Les accumulations de neige soufflée devraient être contournées spécialement en terrain très raide.

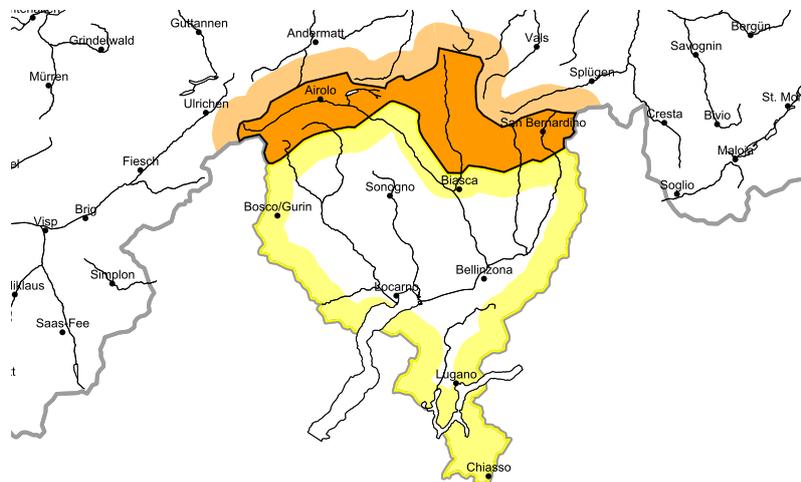
#### Avalanches de glissement

Des avalanches de glissement de petite à moyenne taille sont possibles sur les pentes raides herbeuses en dessous d'environ 2400 m. Prudence en présence de fissures de glissement.



### Au nord danger d'avalanches marqué. Neige soufflée à surveiller

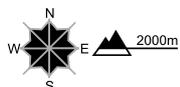
Édition: 15.12.2019, 08:00 / Prochaine mise à jour: 15.12.2019, 17:00



#### Marqué, degré 3

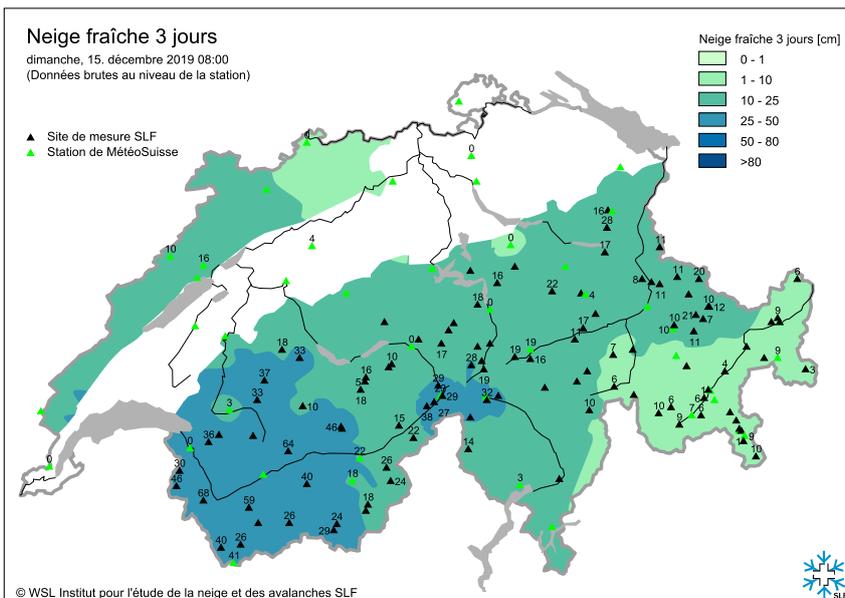
#### Neige soufflée

##### Endroits dangereux



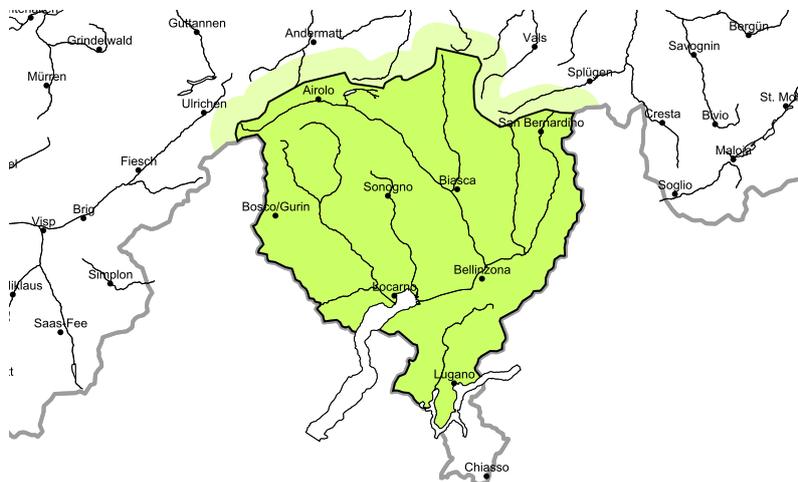
##### Description des dangers

Des accumulations récentes et déjà plus anciennes de neige soufflée peuvent être parfois déclenchées par un seul amateur de sports d'hiver. Prudence surtout à leur périphérie. Les randonnées et descentes hors-piste demandent de l'expérience dans l'évaluation du danger d'avalanche et un choix prudent des itinéraires.



### Danger d'avalanches faible

Édition: 21.1.2020, 08:00 / Prochaine mise à jour: 21.1.2020, 17:00



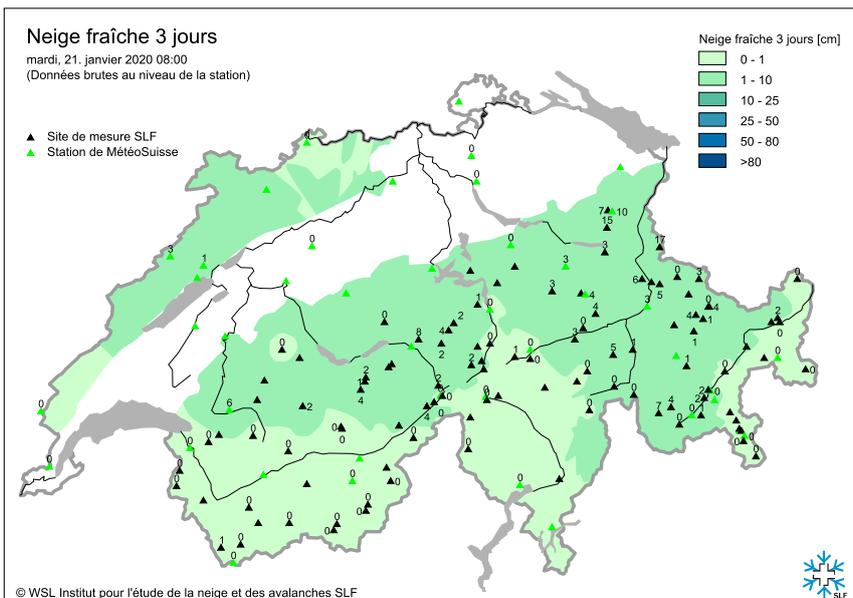
#### Faible, degré 1

##### Neige soufflée

De petites accumulations de neige soufflée se sont formées avec le vent de direction variable localement. Celles-ci devraient être évitées spécialement en terrain extrêmement raide. A côté du danger d'ensevelissement, il faut surtout penser au danger d'être emporté et de chuter.

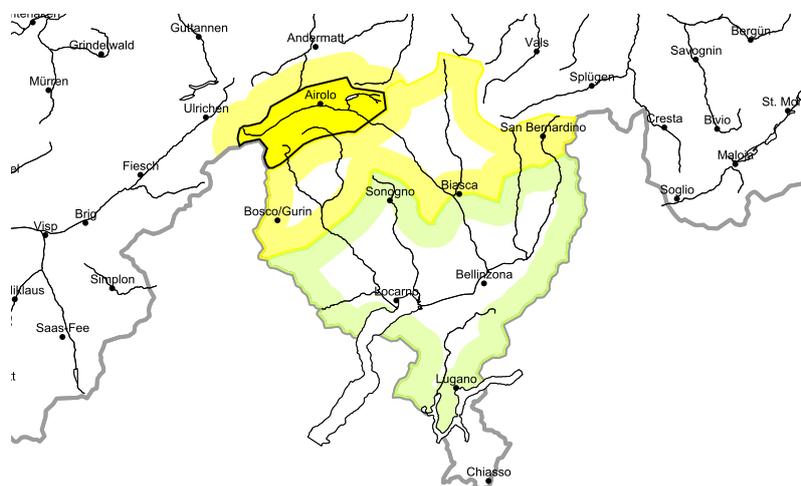
##### Avalanches de glissement

Entre environ 2000 et 2600 m des avalanches de glissement isolées sont possibles, surtout de taille moyenne. Elles peuvent se déclencher à tout moment du jour et de la nuit. Les zones présentant des fissures de glissement doivent être évitées dans la mesure du possible.



## Situation avalancheuse majoritairement favorable. Neige soufflée à surveiller

Édition: 17.2.2020, 08:00 / Prochaine mise à jour: 17.2.2020, 17:00



### Limité, degré 2

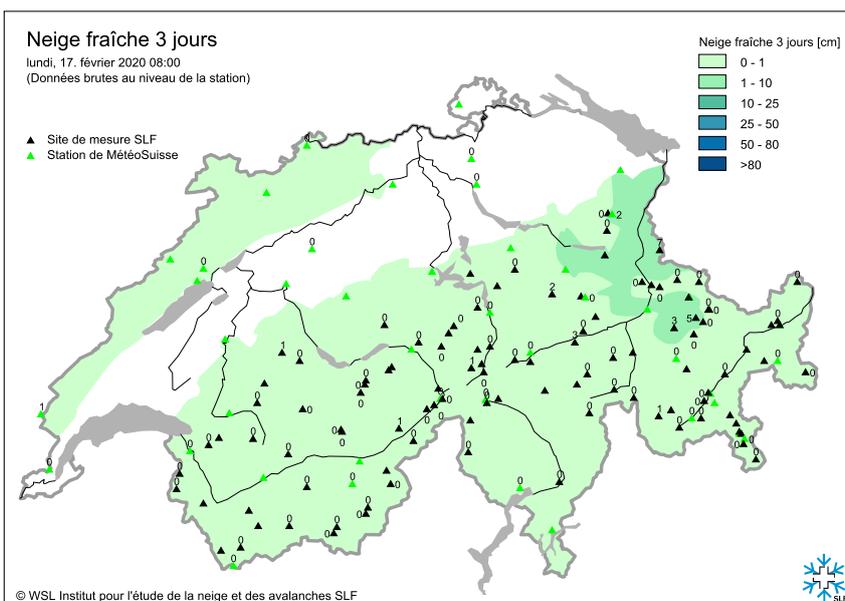
#### Neige soufflée

##### Endroits dangereux



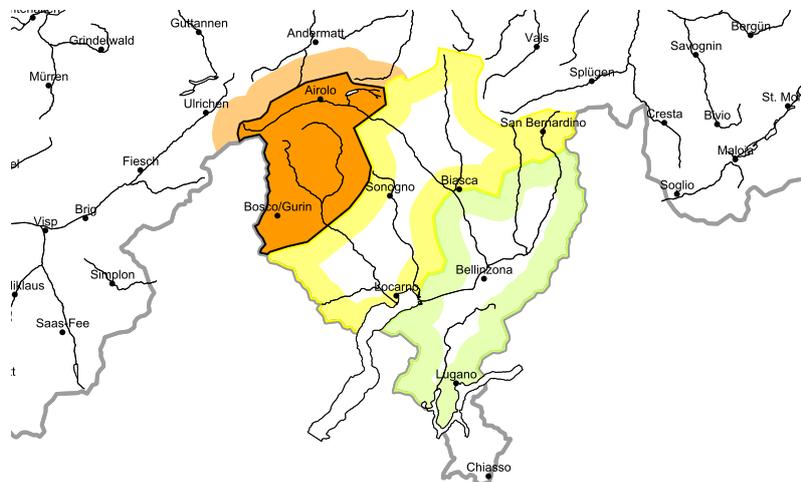
##### Description des dangers

Des accumulations de neige soufflée en partie fragiles se sont formées avec le vent de sud-ouest partiellement fort sur les pentes exposées au nord et à l'est principalement. Elles sont facilement reconnaissables pour un œil exercé. Elles devraient être évaluées avec prudence en terrain raide. Des avalanches peuvent par endroits être déclenchées par un seul amateur de sports d'hiver et atteindre une taille moyenne. Les randonnées et descentes hors-piste demandent un choix prudent des itinéraires.



## Danger d'avalanches marqué dans certaines régions

Édition: 28.2.2020, 08:00 / Prochaine mise à jour: 28.2.2020, 17:00



### Marqué, degré 3

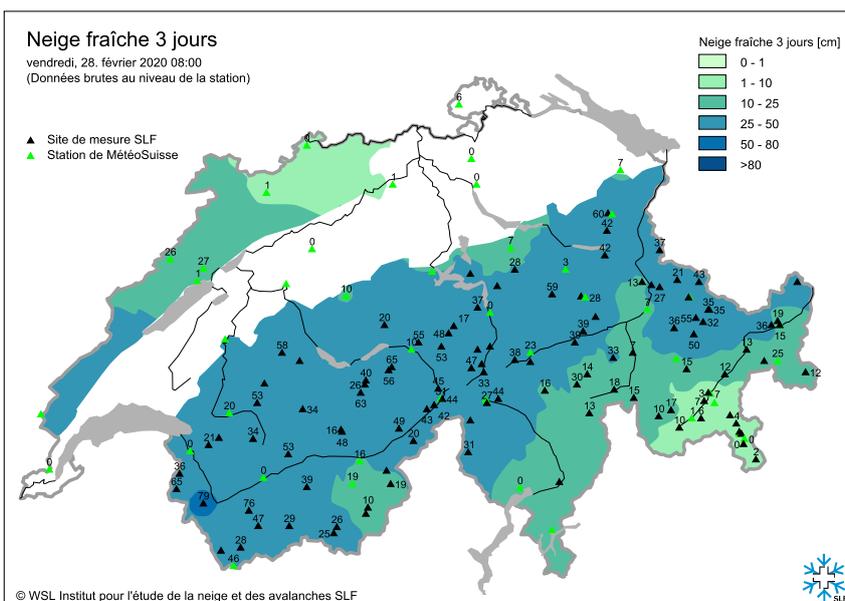
#### Neige fraîche

##### Endroits dangereux



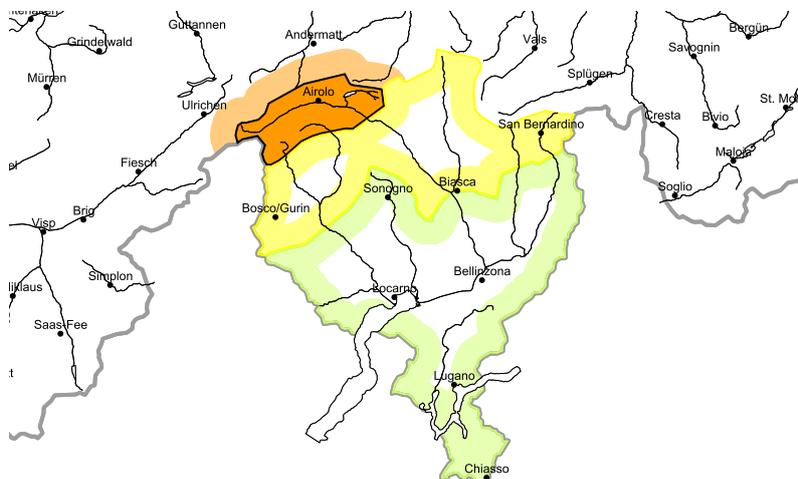
##### Description des dangers

La neige fraîche et les accumulations de neige soufflée grandes qui se sont formées pendant la chute de neige constituent le danger principal. Des avalanches peuvent être déclenchées par un seul amateur de sports d'hiver et atteindre une grande taille. Les randonnées demandent de l'expérience dans l'évaluation du danger d'avalanche et de la retenue.



## Au nord danger d'avalanches marqué dans certaines régions

Édition: 12.3.2020, 08:00 / Prochaine mise à jour: 12.3.2020, 17:00



### Marqué, degré 3

#### Neige fraîche

##### Endroits dangereux



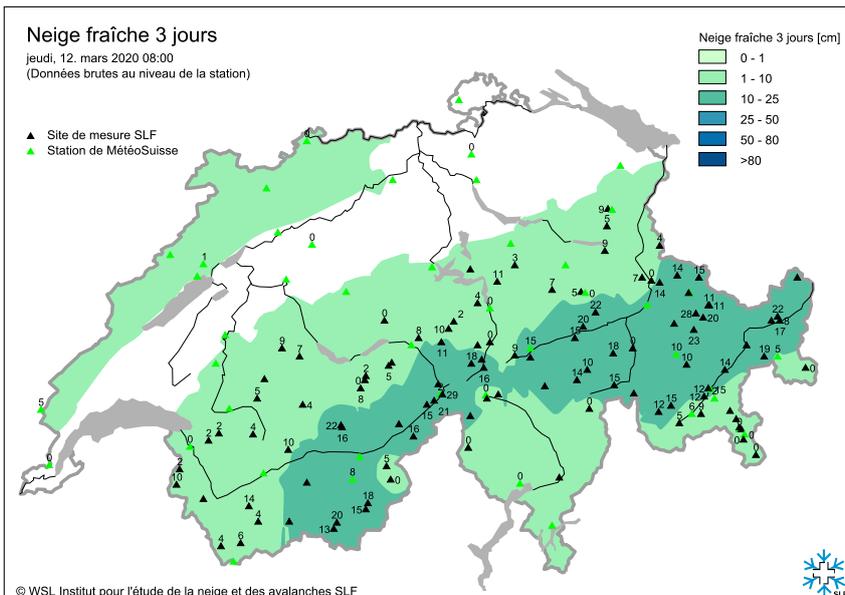
##### Description des dangers

La neige fraîche des derniers jours ainsi que les accumulations de neige soufflée sont partiellement encore fragiles. Des avalanches peuvent par endroits être déclenchées par un seul amateur de sports d'hiver et atteindre une grande taille de manière isolée. Les randonnées et descentes hors-piste demandent une expérience dans l'évaluation du danger d'avalanche.

#### Avalanches mouillées en cours de journée, avalanches de glissement

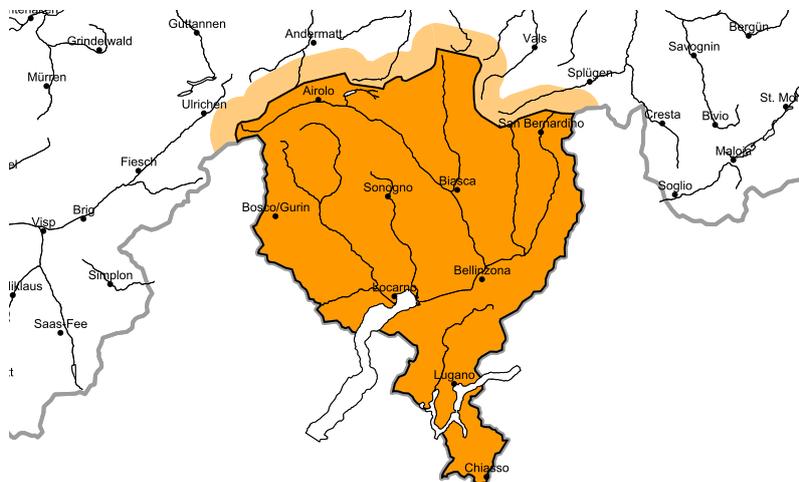
Avec le réchauffement diurne et le rayonnement solaire le danger d'avalanches mouillées augmente en cours de journée. Ceci surtout sur les pentes ensoleillées en dessous d'environ 2800 m. Les randonnées devraient être terminées à temps.

Les avalanches de glissement peuvent se déclencher à tout moment du jour et de la nuit. Elles peuvent atteindre une grande taille de manière isolée. Les zones présentant des fissures de glissement doivent être évitées.



## Danger d'avalanches marqué. Neige soufflée à surveiller

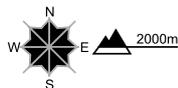
Édition: 10.12.2020, 17:00 / Prochaine mise à jour: 11.12.2020, 08:00



### Marqué, degré 3

#### Neige soufflée

##### Endroits dangereux



##### Description des dangers

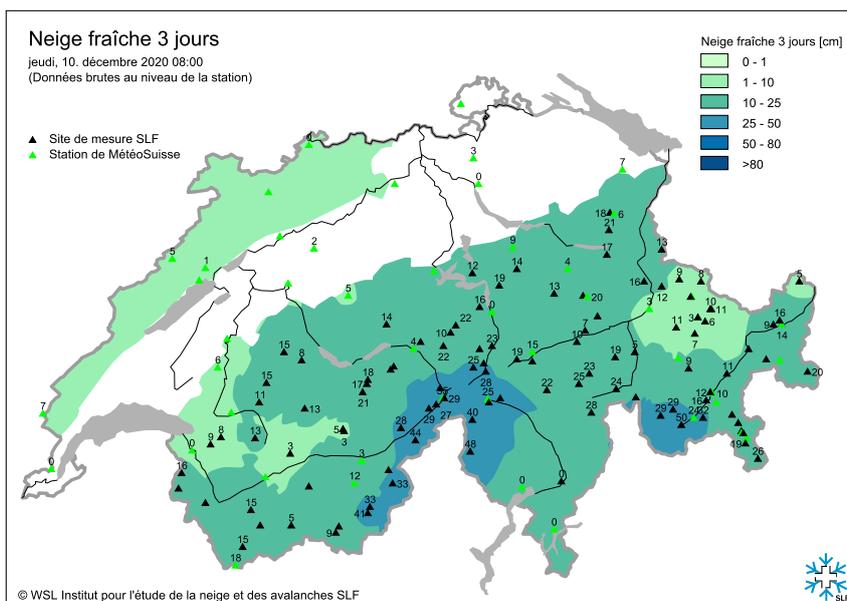
Les accumulations déjà plus anciennes de neige soufflée sont recouvertes de neige fraîche et donc difficilement identifiables. Elles sont en partie facilement déclençables. Des avalanches peuvent atteindre une taille moyenne. De petites accumulations de neige soufflée se forment surtout à proximité des crêtes. Les randonnées demandent de l'expérience dans l'évaluation du danger d'avalanche et un choix prudent des itinéraires.

#### Avalanches de glissement

Des avalanches de glissement sont toujours possibles, de manière isolée, également de grande taille. Ceci surtout sur les pentes raides exposées au sud. Les zones présentant des fissures de glissement doivent être évitées dans la mesure du possible.

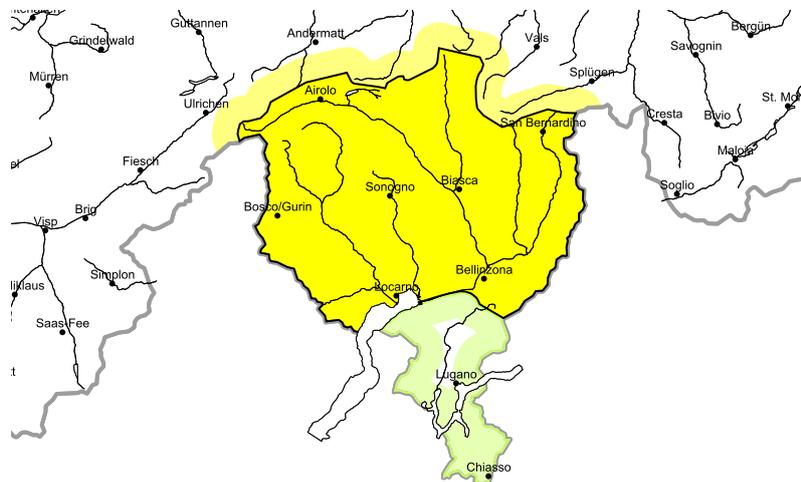
#### Remarque

Le prochain bulletin d'avalanche paraîtra demain vendredi 11 décembre à 08h00.



### Situation avalancheuse majoritairement favorable

Édition: 18.12.2020, 08:00 / Prochaine mise à jour: 18.12.2020, 17:00

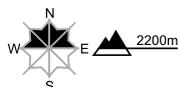


#### Limité, degré 2

#### Avalanches sèches: situation avalancheuse typique vague

##### Endroits dangereux

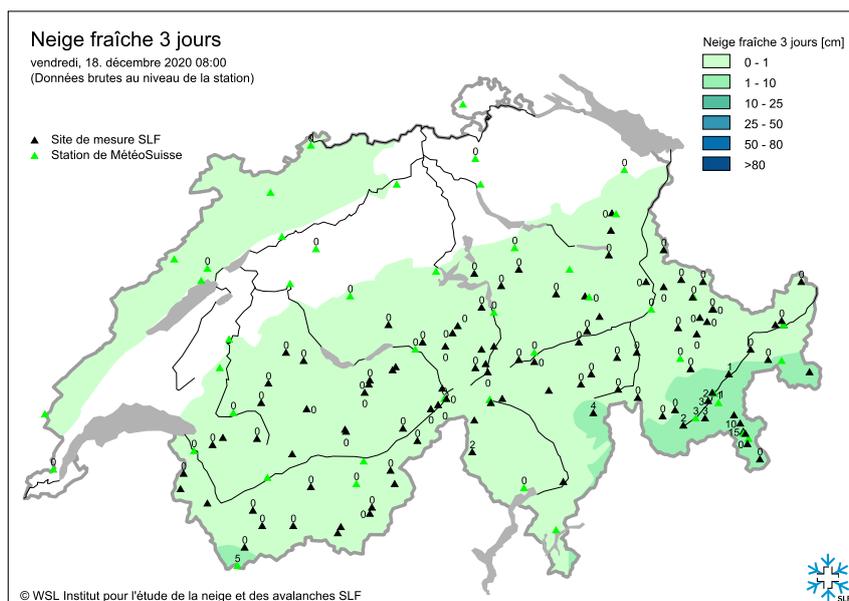
##### Description des dangers



Les conditions avalancheuses sont en général favorables. Des avalanches peuvent être déclenchées de manière isolée avec en général une surcharge importante dans les couches profondes du manteau neigeux. Les endroits dangereux sont à peine identifiables. Prudence surtout dans les endroits plutôt faiblement enneigés sur les pentes très raides à l'ombre.  
 Un choix prudent des itinéraires est recommandé.

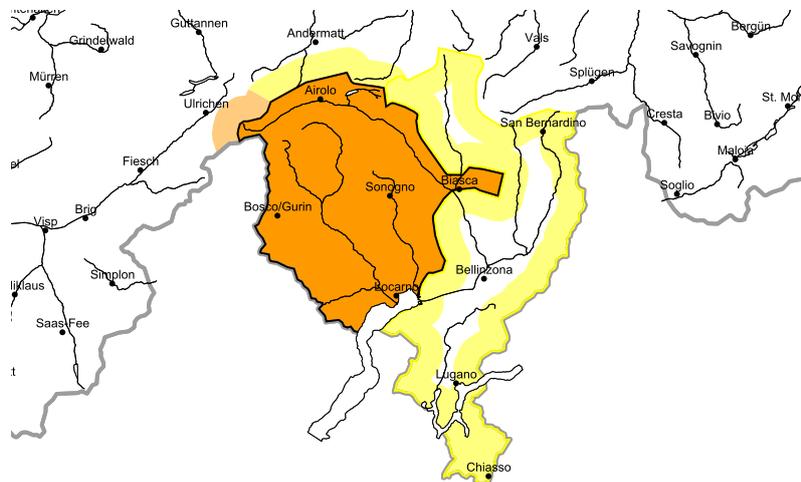
#### Avalanches de glissement

Des avalanches de glissement isolées de petite à moyenne taille sont possibles surtout sur les pentes très raides au soleil en dessous d'environ 2200 m.



### Danger d'avalanches marqué dans certaines régions

Édition: 7.1.2021, 08:00 / Prochaine mise à jour: 7.1.2021, 17:00



#### Marqué, degré 3

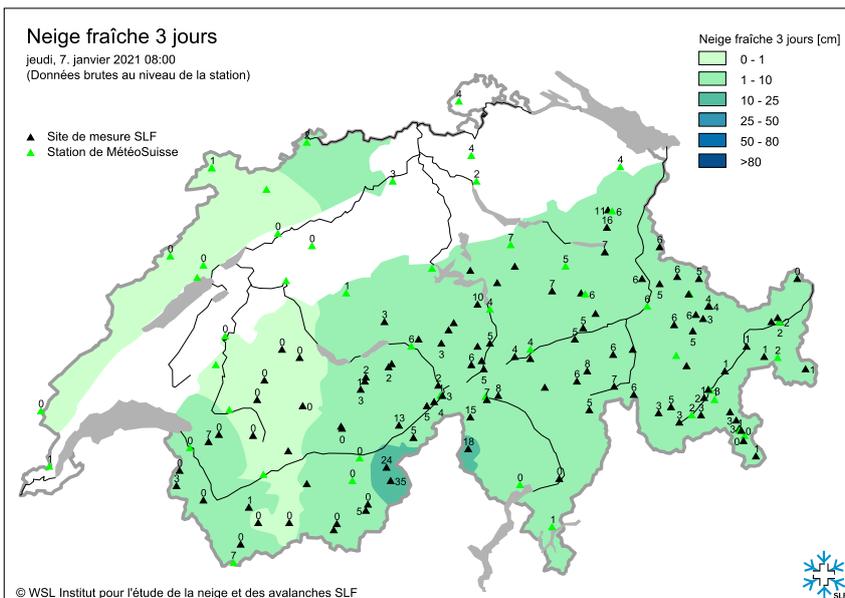
##### Neige fraîche

###### Endroits dangereux



###### Description des dangers

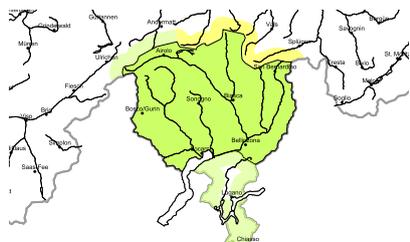
La neige fraîche des derniers jours constitue le danger principal. En outre des accumulations de neige soufflée en général petites se forment surtout à proximité des crêtes et des cols. Des amateurs de sports d'hiver même seuls peuvent déclencher des avalanches, certaines pouvant atteindre une taille dangereuse. Les randonnées à ski, descentes hors-piste et randonnées en raquettes demandent de l'expérience dans l'évaluation du danger d'avalanche et de la retenue.



## Le matin situation avalancheuse majoritairement favorable. Des avalanches mouillées en cours de journée

Édition: 24.2.2021, 08:00 / Prochaine mise à jour: 24.2.2021, 17:00

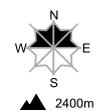
### Avalanches sèches



Faible, degré 1

#### Situation avalancheuse typique vague

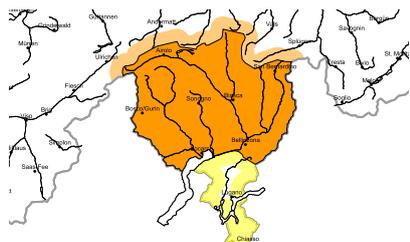
##### Endroits dangereux



##### Description des dangers

En matinée situation avalancheuse majoritairement favorable. Des avalanches peuvent de manière très isolée être déclenchées dans les couches du manteau neigeux proches de la surface. Ces endroits dangereux se situent surtout sur les pentes extrêmement raides. En haute montagne les endroits dangereux sont plus fréquents et le danger un peu plus élevé. A côté du danger d'ensevelissement, il faut aussi penser au danger d'être emporté et de chuter.

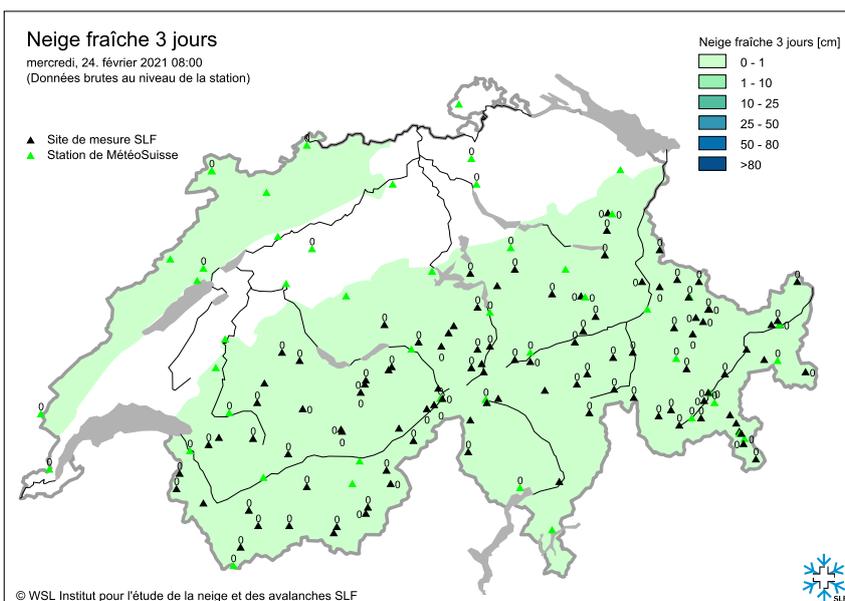
### Avalanches mouillées en cours de journée



Marqué, degré 3

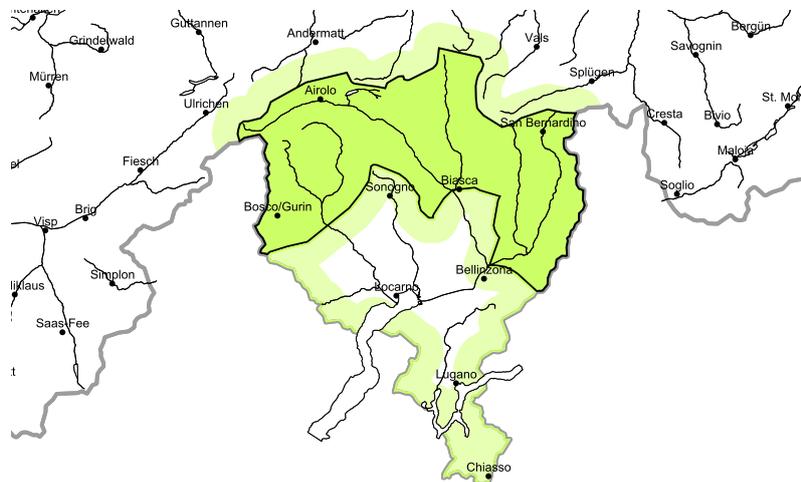
#### Avalanches mouillées en cours de journée

Des avalanches de neige mouillée et de glissement de moyenne à grande taille sont à attendre avec le réchauffement diurne et le rayonnement solaire. Ceci particulièrement sur les pentes très raides exposées au sud en dessous d'environ 2600 m comme sur les pentes exposées à l'est et à l'ouest en dessous d'environ 2000 m. Prudence en présence de fissures de glissement. Les randonnées devraient être terminées à temps.



### Situation avalancheuse favorable

Édition: 10.3.2021, 08:00 / Prochaine mise à jour: 10.3.2021, 17:00



#### Faible, degré 1

##### Neige soufflée

Des accumulations récentes et anciennes de neige soufflée sont généralement petites mais en partie fragiles. Quelques endroits dangereux se situent surtout sur les pentes extrêmement raides. En haute montagne les endroits dangereux sont un peu plus fréquents et le danger un peu plus élevé.

A côté du danger d'ensevelissement, il faut surtout penser au danger d'être emporté et de chuter.

