



Télédétection spatiale de dépôts d'avalanche pour le suivi de zones à risque avalancheux

Anna Karas

► To cite this version:

Anna Karas. Télédétection spatiale de dépôts d'avalanche pour le suivi de zones à risque avalancheux. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2023. Français. ⟨NNT : 2023INPT0014⟩. ⟨tel-04187774⟩

HAL Id: tel-04187774

<https://theses.hal.science/tel-04187774v1>

Submitted on 25 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Surfaces Interfaces Continentales Hydrologie

Présentée et soutenue par :

Mme ANNA KARAS

le vendredi 17 mars 2023

Titre :

Téledétection spatiale de dépôts d'avalanche pour le suivi de zones à
risque avalancheux

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Centre national de recherches météorologiques (CNRM METEO)

Directeur(s) de Thèse :

MME FATIMA KARBOU

M. NICOLAS ECKERT

Rapporteurs :

M. CHRIS KEYLOCK, LOUGHBOROUGH UNIVERSITY

MME YAJING YAN, UNIVERSITE DE SAVOIE CHAMBERY-ANNECY

Membre(s) du jury :

M. EMMANUEL TROUVE, UNIVERSITE DE SAVOIE CHAMBERY-ANNECY, Président

MME ARIANE STEPHAN, Dir. G. de la Prévention des Risques, Invité(e)

MME FATIMA KARBOU, CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES METEO, Membre

MME SOPHIE GIFFARD-ROISIN, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES, Membre

M. NICOLAS ECKERT, INRAE SAINT MARTIN D'HERES, Membre

M. SYLVAN LEINSS, Gamma Remote Sensing, Membre

Résumé

La surveillance du manteau neigeux, la prévision de son évolution et l'estimation du risque d'avalanche qui en découle font partie des missions de Météo-France. L'hétérogénéité des montagnes induite par le relief rend la prévision nivo-météorologique de ces territoires particulièrement difficile. A cela s'ajoute une forte demande sociétale de disposer de prévisions fiables de l'enneigement et du risque d'avalanche avec un niveau d'exigence sans cesse en accroissement tant sur la qualité des prévisions que sur leur forme et leur étendue géographique. La mise à disposition aux prévisionnistes nivologues et aux autres acteurs de montagne d'observation systématique sur l'activité avalancheuse permettrait une meilleure qualification des situations prévues par rapport aux événements passés et contribuerait à l'amélioration de la gestion du risque avalancheux. La localisation et l'estimation de taille des dépôts d'avalanches sont d'une grande importance pour les études de stabilité du manteau neigeux. Les avancées en matière de télédétection spatiale offrent la possibilité aux chercheurs et acteurs de montagne de suivre au plus près l'évolution du manteau neigeux. Dans cette thèse, nous exploitons les données d'observations satellitaires de Sentinel-1 couvrant l'intégralité des Alpes pour détecter les zones de débris avalancheux et pour suivre l'évolution de l'activité avalancheuse à l'échelle d'une région d'intérêt. Une méthode est développée permettant de détecter automatiquement les zones de débris d'avalanche de neige en utilisant une technique de segmentation novatrices des images Sentinel-1. Plusieurs autres développements algorithmiques sont menés pour améliorer les détections impliquant des méthodes de filtrage de fausses détections et de classification pour passer d'un ensemble de pixels avalancheux à un événement avalancheux. Les estimations de débris sont étudiées et leurs dépendances selon la direction de l'orbite, les caractéristiques du terrain (pente, altitude, orientation) examinées. La méthode de détection est également évaluée avec succès à l'aide d'une base de données indépendante issues d'identifications de débris d'avalanches sur une image optique de haute résolution. Par la suite, nous dérivons des indicateurs spatialisés à l'échelle des massifs de l'activité avalancheuses. Il s'agit de lignes de débris d'avalanches estimées par pente et par bandes d'altitudes. Ces indicateurs sont comparés à des données d'observations in-situ. Ce travail de thèse permet le développement de nouveaux produits à valeur ajoutée et est l'occasion d'initier une réflexion sur les besoins pour la prévision du risque d'avalanche et notamment le besoin de disposer d'indicateurs « synthétisables » sur des fenêtres temporelles d'intérêts (hebdomadaire, mensuelle, saisonnière) à des échelles allant de l'échelle locale (de l'événement) à l'échelle du massif.

Mots clés : Avalanche de neige, Télédétection, SAR, Détection automatique, Sentinel-1, Indicateurs régionaux

Abstract

The snow cover monitoring, the forecast of its evolution and the estimation of the avalanche risk are part of the task of Météo-France. The heterogeneity of the mountains induced by the terrain makes the snow-meteorological forecasting of these territories particularly difficult. In addition, there is a strong social demand for reliable snow and avalanche forecasts, with an ever increasing level of demand for the quality of forecasts as well as their form and geographical extent. The supply of systematic observations of avalanche activity to snow forecasters and other mountain actors would allow a better qualification of predicted situations in relation to past events and would contribute to the improvement of avalanche risk management. The location and size estimation of avalanche deposits are of great importance for snowpack stability studies. Advances in spatial remote sensing offer the possibility for researchers and mountain actors to follow the evolution of the snowpack more closely. In this thesis, we use Sentinel-1 satellite observation data covering the entire Alps to detect avalanche debris areas and to monitor the evolution of avalanche activity at the scale of a region of interest. A method is developed to automatically detect snow avalanche debris areas using an innovative segmentation technique of Sentinel-1 images. Several other algorithmic developments are conducted to improve detections involving false detection filtering and classification methods to change from a set of avalanche pixels to an avalanche event. Debris estimates are studied and their dependencies on orbit direction, terrain characteristics (slope, elevation, orientation) examined. The detection method is also successfully evaluated using an independent database from avalanche debris identifications on a high resolution optical image. Thereafter, we derive spatialized, massif-scale indicators of avalanche activity. These are avalanche debris lines estimated by slope and elevation bands. These indicators are compared to in-situ observation data. This thesis work allows the development of new value-added products and is the opportunity to initiate a reflection on the needs for avalanche risk forecasting and in particular the need to have "synthesizable" indicators on temporal periods of interest (weekly, monthly, seasonal) at scales ranging from local (event) to massif scale.

Keywords : Snow avalanches, Remote Sensing, SAR, Automatic Detection, Sentinel-1, Regional indicator

Remerciements

Je n'aurais jamais autant apprécié travailler sur ce sujet de thèse sans l'ambiance bienveillante des membres du CEN, merci à vos milles sourires, aux moments de partages dans les couloirs, à la cafèt et au volley. Le travail n'est rien sans ces moments d'échanges et de pauses (et sans le temps libre pardi!).

Merci à mes encadrants, pour leur grande humanité, logique et bonnes idées. Un grand merci à Fatima.

Merci à mes amis. Cela pourrait prendre des pages et des pages de vous remercier, la liste est longue. Je remercie mes amis d'Ecole, qui m'ont aidé dans mes choix. Paul, pour m'avoir fait découvrir tes amis et mon copain! Mes amis de la coloc, pour toutes ces sorties montagnes, nos repas, nos matchs de volley/foot. Merci à mes amis du labo, trop contente de pouvoir continuer à vous voir en plein air, pour des repas et des soirées jeux.

Merci Seb.

Merci à ma famille. Niech nasze marzenia się spełnia.

Merci la Vie! J'ai pu grimper sur cette falaise qui m'a fait rêvé, celle que j'avais vu avant de venir sur Grenoble, et après sur tant d'autres. Merci de m'avoir amené à la Montagne, mon chez moi.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	v
Remerciements	vii
Introduction générale	1
1 Contexte scientifique et état de l'art	5
1.1 La couverture neigeuse et ses caractéristiques	5
1.1.1 Composition du manteau neigeux	5
1.1.2 Propriétés de la neige	6
La densité	6
La température et la teneur en eau liquide	6
Hauteur du manteau neigeux	6
La forme et la taille des particules	6
La résistance de la neige à l'enfoncement	7
La cohésion	7
Le tassement de la neige	8
1.1.3 Le métamorphisme de la neige	8
1.1.4 La constante diélectrique de la neige	9
1.1.5 La profondeur de la pénétration d'une onde incidente dans la neige	10
1.2 Les avalanches de neige	10
1.2.1 Comment se forme une avalanche?	10
1.2.2 Les différentes constitutions et types d'avalanches	11
Les différentes zones d'un site avalancheux	11
Les principales formes de départ d'une avalanche	11
La taille des événement avalancheux	12
Les différents types d'écoulement d'une avalanche	13
Les situations avalanches typiques	14
Une classification non exhaustive des avalanches	15
1.3 L'estimation du risque avalancheux en France	15
1.3.1 Observations et mesures du manteau neigeux et des paramètres météorologiques à la surface de la neige	16
1.3.2 Modélisation	16
1.3.3 Les bulletins du Risque Avalanches	17
1.3.4 La vigilance du risque avalanche	18
1.4 Observation des phénomènes avalancheux	18
1.4.1 Les observations in-situ en France	18
L'Enquête Permanente sur les Avalanches	19
La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche	19

1.4.2	Observation par télédétection	21
	Les capteurs au sol	21
	Télédétection optique	21
	Les satellites radar	22
1.5	État de l'art de la télédétection radar de dépôts avalanches	22
1.5.1	Principes de la rétrodiffusion du manteau neigeux et des avalanches	22
	Cas d'un manteau de neige sèche	23
	Cas d'un manteau de neige humide	23
	Cas de dépôts d'avalanches	23
	Polarisation et angle d'incidence	25
1.5.2	État de l'art des méthodes de télédétection radar de dépôts d'avalanches	25
1.5.3	La mission Sentinel-1	27
	Les applications et missions de Sentinel-1	27
1.5.4	Propriétés du Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)	29
	Distorsions géométriques et chatoiement	30
	Acquisition et pré-traitements des mesures SAR par le CNES	30
1.5.5	Limites actuelles de la télédétection d'avalanche	30
	Complexité de l'interaction du signal SAR avec un manteau neigeux en montagne	30
	Limites des méthodes de détection d'avalanche	31
2	Développement d'une méthode originale et automatique de détection de dépôts d'avalanche par exploitation de mesures SAR du Sentinel-1	33
3	Vers des indicateurs de l'activité avalancheuse à l'échelle régionale	51
4	Méthodes de détection des événements avalancheux à partir de Sentinel-1	75
5	Enquête sur les besoins en produits dérivés des satellites des acteurs de prévision du risque en montagne	85
5.1	Présentation du questionnaire	85
5.2	Résultats et analyse du sondage	86
5.2.1	Présentation des participants	86
5.2.2	Des produits spécifiques, complémentaires et nécessaires au travail de chacun	87
5.2.3	L'utilisation d'une méthode avec une incertitude donnée ou bien très précise (peu de fausses détections), et l'échéance souhaitée des produits dépendent des usages	87
5.2.4	La télédétection dans un monde idéal	88
6	Conclusion et perspectives	89
6.1	Résumé des problématiques abordées et des principaux résultats	89
6.2	Discussion et perspectives	90
A	Annexe du chapitre 1	93

B Annexe du chapitre 5**95**

Table des figures

1.1	Illustration des différents types de métamorphismes de la neige sous l'effet d'un gradient de température. Les traits verticaux sur les images de particules de neige sont séparés de 0.2 mm (source : A. Duclos).	9
1.2	Illustration des différentes zones d'une avalanche	11
1.3	Illustration des deux principaux types de départ d'une avalanche. A : départ ponctuel caractéristique des avalanches de neige fraîche ou humide, et B : départ linéaire caractéristique des avalanches de plaque.	12
1.4	Exemple d'avalanche de taille large (source EAWS).	13
1.5	Exemple d'avalanche de taille très large (source EAWS).	13
1.6	Exemple de mesure réalisée sur le manteau neigeux. La sonde par battage est un instrument de référence pour la mesure de la résistance à l'enfoncement.	16
1.7	Exemple d'un Bulletin d'estimation du Risque Avalanche	18
1.8	Illustration des observations EPA par Cled'12.	19
1.9	Extrait de la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche.	20
1.10	Schéma simplifié des modèles de rétrodiffusion pour le cas d'un manteau neigeux sec (A) et humide (C) et le cas de présence de dépôts d'avalanche secs (B) et humide (D), source : Eckerstorfer & Malnes (2015)	24
1.11	Effet de l'angle d'incidence sur la rétrodiffusion de sols de surfaces rugueuse et lisse. Figure extraite de l'étude de Tompkin & Leinss (2021) . Le transfert d'énergie d'une diffusion principalement dirigée sur une surface lisse est représenté par l'ellipse bleue, tandis que celle de diffusion principalement omnidirectionnelle sur une surface rugueuse est représenté par l'ellipse rouge, pour des angles d'incidence locale petits (à gauche) et grands (à droite).	25
1.12	Synthèse des méthodes développées de détection de dépôts d'avalanche.	28
1.13	Illustration des passages du duo de satellites Sentinel-1A et B (source : ESA).	28
1.14	Présentation des orbites ascendantes et descendantes du Sentinel-1 couvrant les Alpes, source : Karbou et al. (2018)	29
A.1	Échelle européenne du risque d'avalanche (source Météo-France 2018).	93

Introduction générale

Les populations urbaines de montagnes sont exposées à de nombreux risques naturels notamment la "mort blanche", les avalanches de neige. Les avalanches de neige font régulièrement des victimes et peuvent causer des dégâts matériels (Leone et al. (2014); Berlin et al. (2019)). D'après les bilans des accidents de l'Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches (ANENA), de 1971 à nos jours, en France, la moyenne de décès est de 30 personnes par an (Jarry (2011)). Les avalanches sont des phénomènes complexes, sources de danger, et à considérer dans le cycle de la gestion des risques.

Le manteau neigeux est constitué de différentes couches de neige formées à la suite de différents événements météorologiques (chutes de neige, pluie, vent, changement de température, etc.). La neige subit des transformations en fonction des conditions atmosphériques, des phénomènes thermodynamiques et mécaniques, connus sous le nom de métamorphisme (Perla & Martinelli (1976); Colbeck (1982)). Ainsi, la stabilité du manteau va dépendre de ces différentes strates et de leur état (température, densité, teneur en eau, type de grain, etc.). Le manteau neigeux est en équilibre sur les pentes de montagne grâce à plusieurs forces de résistance qui compensent la force motrice de gravité. La rupture de cet équilibre mécanique déclenche le phénomène d'avalanche. Par exemple, une surcharge du manteau neigeux (précipitation, passage d'un randonneur ou skieur) peut déclencher une avalanche (Perla & Martinelli (1976); McClung & Schaerer (2006)).

La surveillance du manteau neigeux à l'échelle des massifs français est assurée par les centres de Météo-France durant toutes les saisons hivernales. Chaque centre spécialisé montagne / neige-avalanche couvre 1 à 3 départements de montagne et produit de manière hebdomadaire des Bulletins d'estimation du Risque Avalanche (BRA). L'estimation du risque est réalisée via des mesures et observations des postes météorologiques et de stations automatisées, et à l'aide de la modélisation numérique du manteau neigeux et de sa stabilité (Coleou et al. (2018)). Le phénomène avalancheux est également surveillé par un recensement organisé par les agents de terrain de l'Office National des Forêts (ONF) et dont les données sont gérées par l'Inrae, l'Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement. L'Enquête Permanente des Avalanches (EPA) est un répertoire des événements observés dans des couloirs avalancheux spécifiques. La Carte de Localisation des Phénomènes Avalanches (CLPA) est quant à elle une mémoire spatiale des limites extrêmes des événements avalancheux (Bourova et al. (2016)).

Les récentes avancées en matière de télédétection spatiale nous permettent d'étudier les changements du manteau neigeux. Les Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR) opèrent dans le domaine des micro-ondes, ce qui permet une observation quelles que soient les conditions météorologiques, de jour comme de nuit, de la surface du manteau neigeux ainsi que des variations du manteau neigeux. Un capteur radar émet des ondes électromagnétiques vers une cible et reçoit la réponse aux signaux émis. Celle-ci va interagir avec les ondes incidentes et diffuser par la suite des ondes diffuses qui seront reçues par le radar. L'interprétation des signaux observés va permettre de récolter des informations sur la cible. L'onde électromagnétique peut interagir avec la couverture neigeuse grâce à certaines propriétés de la neige

(par exemple, la teneur en eau liquide, la forme des particules et la densité). L'interaction avec les ondes conduit aux phénomènes de diffusion du sol, de l'interface sol-neige, de volume de neige, et de l'interface neige-air. Ces phénomènes donnent des informations sur les différentes strates de la neige (Mätzler (1987); Martini (2005); Shi & Dozier (2000)).

Une exploitation systématique des mesures de Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR) de Sentinel-1 apparaît attractive pour une observation des dépôts avalanches et pour l'estimation de leurs tailles. En effet, la mission Sentinel-1, une constellation de satellites pouvant fournir des observations à 20m de résolution et tous les 6 jours dans les Alpes, permet par l'accessibilité publique de ses images, d'étudier l'évolution de la couverture neigeuse. Une observation systématique des dépôts avalanches est très utile pour réaliser un suivi de l'activité avalancheuse et pour les études sur la stabilité du manteau neigeux. Disposer d'une série homogène, dans le temps et dans l'espace, des événements avalanches pourrait également améliorer les études sur la variabilité de l'activité avalancheuse naturelle sur une échelle inter-annuelle. De plus, une telle base de données permettrait un retour d'expériences fréquents sur les zones et périodes à enjeux permettant à terme d'améliorer l'estimation du risque avalanche et la gestion du risque.

L'exploitation des mesures Sentinel-1 pour le suivi de l'activité avalancheuse est assez récente. Un enjeu important est d'évaluer les algorithmes de détection des dépôts avalanches par confrontation aux mesures in-situ. Un autre aspect d'intérêt est le degré d'automatisation des algorithmes pour un usage facilité. En plus de la caractérisation des zones de débris d'avalanche, une extrapolation vers les zones d'activité avalancheuse est d'une grande utilité car cela permettrait de dériver des indicateurs de l'activité à différentes échelles de temps et d'espace.

Ce travail de thèse a permis de cerner différentes problématiques de recherche que nous allons aborder et auxquelles nous répondrons dans les différentes parties du manuscrit.

Questions scientifiques

Voici un ensemble de questions qui ont guidé mes travaux de thèse et auxquelles des éléments de réponse sont apportés dans ce manuscrit de thèse :

- *Comment peut-on détecter de manière automatique les dépôts d'avalanche ? Si plusieurs méthodes de détection de dépôts d'avalanche ont été développées par satellite radar et optique, l'efficacité des méthodes et leur degré d'automatisation sont encore perfectibles. Comment optimiser les détections des débris d'avalanches, évaluer les estimations, et quels sont les scores les plus pertinents ?*
- *Les méthodes de détection ciblent la détection de pixels associés avec des débris d'avalanches. Or, on aimerait détecter l'évènement avalancheux dans sa globalité. Quelle est la fiabilité des données radar pour ce type de détection (le radar ne voit en grande partie que les zones de dépôt) ? Comment passer de l'échelle du pixel à celle de l'évènement ? Dans quelles mesures peut-on développer des indicateurs du suivi de l'activité*

avalancheuse à une échelle plus agrégée que celle du pixel ? En effet, il n'existe pas à ce jour d'indicateurs de l'activité avalancheuse par satellite à l'échelle régionale. Disposer de ce type d'indicateurs serait-il utile pour des utilisateurs en lien avec la surveillance des massifs ?

- *Quels sont les besoins et attentes des acteurs professionnels de la montagne de leur usage de données issues d'observations satellitaires et en lien avec le phénomène avalanche ?*

Contenus du manuscrit de thèse

Le manuscrit est organisé de manière à répondre à ces différentes questions scientifiques.

- Le chapitre 1 introduit la notion d'avalanche de neige et fournit un récapitulatif des outils actuels utilisés pour la prévision du risque. Différents moyens d'observation du phénomène d'avalanche sont exposés. Les connaissances et limites de la recherche en matière de suivi et détection d'événements avalancheux par télédétection SAR sont également présentées.
- Le chapitre 2 décrit le développement de la méthode automatique de détection de dépôts d'avalanche développée dans cette thèse et son évaluation à l'aide de nombreuses données de validation, pour une période et une zone donnée. On s'est intéressé à une partie des Alpes suisses, durant le mois de janvier 2018, où il y a eu des activités avalancheuses particulièrement fortes. Nous avons utilisé une base de données de validation indépendante. Cette étude a été publiée dans Karas A., Karbou F., Giffard-Roisin S., Durand P., and Eckert N. (2021), *Automatic color detection-based method applied to sentinel-1 SAR images for snow avalanche debris monitoring*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- Le chapitre 3 porte sur l'application de la méthode de détection à l'échelle régionale, pour deux massifs alpins français, et pose la question de l'obtention d'un produit agrégé et synthétisé d'indicateurs avalancheux à une échelle régionale. On se base pour cela sur l'hypothèse d'une forte corrélation entre les observations de dépôts d'avalanche et l'activité avalancheuse. Par l'élaboration de statistiques régionales sur les débris d'avalanches intégrées dans le temps et l'espace, on souhaite obtenir une meilleure connaissance de l'étendue de l'activité avalancheuse et l'impact des conditions nivo-météorologiques sur le phénomène d'avalanche. Cette étude fait l'objet d'un article soumis au journal Cold Regions Science and Technology.
- Le chapitre 4 présente les études d'amélioration de la méthode de détection et notamment la détection des événements avalancheux, et non les pixels, en

exploitant des méthodes de filtrage et de classification. Les résultats sont évalués grâce à une base de données indépendante. Cette étude fait l'objet d'un article en préparation pour le journal IEEE JSTAR.

- Le chapitre 5 porte sur la présentation d'un sondage à destination des différents acteurs professionnels de la montagne, leurs besoins et utilisation potentielle des données satellites pour la surveillance des massifs. Les résultats et l'analyse de ce questionnaire sont présentés. Ce questionnaire nous permet de cerner les besoins des utilisateurs potentiels, d'évaluer l'adéquation des produits satellites par rapport aux besoins et de mieux cibler les améliorations pour répondre aux différentes attentes.
- Les conclusions et perspectives se situent dans le dernier chapitre (chapitre 6).

Les annexes permettent de fournir des détails supplémentaires. L'annexe A permet de visualiser l'échelle européenne du risque d'avalanche utilisé par les différents pays européens soumis au même risque naturel avalancheux. L'annexe B présente le sondage envoyé aux acteurs de montagne dans le but de cibler leurs attentes et besoins concernant l'utilisation de données issues d'observations satellitaires.

Chapitre 1

Contexte scientifique et état de l'art

1.1 La couverture neigeuse et ses caractéristiques

Il est nécessaire de bien connaître la neige et ses propriétés, afin d'introduire les différents types d'avalanches de neige, et comprendre leurs mécanismes.

D'autre part, certaines propriétés de la neige interviennent et impactent la rétro-diffusion du signal radar. C'est le cas de la hauteur du couvert neigeux, la densité, la teneur en eau liquide et la constante diélectrique de la neige. La présentation de ces caractéristiques nous permet par la suite de mieux comprendre le phénomène de rétrodiffusion et les principes de détection de dépôts d'avalanches par exploitation d'images satellites.

On précise qu'une grande partie de ce sous-chapitre s'appuie sur le travail de [Fierz et al. \(2009\)](#). Ce groupe d'experts en étude de la neige a réalisé une classification internationale pour la neige saisonnière au sol, dans le but de définir des notions et références communes et internationales de classification.

1.1.1 Composition du manteau neigeux

La neige est constituée d'air, d'eau sous forme solide (glace), et selon le type de neige, sous forme liquide et/ou de vapeur. Des cristaux se forment à partir de particules de glace élémentaires de formes hexagonales. Leur classification dépend de leur forme, qui peuvent être nombreuses ([Magono & WooLee \(1966\)](#); [Fierz et al. \(2009\)](#)). Dans l'atmosphère, la neige se forme et est représentée majoritairement sous trois formes (aiguille/colonne, plaquette et étoile).

La neige, une fois déposée sur le sol, va subir, en fonction des conditions atmosphériques, des processus de transformations, aussi nommées métamorphisme ([Colbeck \(1982\)](#)). Cela est notamment possible du fait de la température de la neige, qui est constamment proche du point de fusion ([Fierz et al. \(2009\)](#)). Par exemple, l'action du vent, le poids de la neige peuvent compacter la neige. Ainsi, de part les conditions météorologiques (précipitation, changement de température, etc.) et de part les processus de transformation, différentes couches de neige vont être créées. On classe ces dernières selon la structure microscopique de la neige, sa densité, sa teneur en eau liquide, sa température et dans certains cas, selon ses impuretés (grains ronds, croûte de regel, gobelets, etc.) ([Fierz et al. \(2009\)](#)).

1.1.2 Propriétés de la neige

Différentes propriétés de la neige sont présentées ci-dessous. Ces propriétés jouent un rôle majeur dans l'interaction du signal radar avec le couvert neigeux. De plus, certaines sont nécessaires pour une bonne compréhension des différents types d'avalanches et leurs mécanismes. En effet, on sait aujourd'hui que même des petites variations dans la microstructure de la neige possèdent une grande influence sur le comportement du manteau neigeux et la formation des avalanches (Perla & Martinelli (1976)). Ces variations et transformations, appelées aussi métamorphismes, sont présentées dans un second temps.

La densité

La densité est la mesure de la masse par unité de volume. Celle-ci s'exprime en $kg.m^{-3}$ et a pour symbole : ρ_s . Dans le cas de la neige, la densité totale peut être effectuée en mesurant son poids pour une unité de volume. Il est également possible de déterminer sa densité de par ses propriétés diélectriques (Denoth (1989); Matzler (1996); Fierz et al. (2009)).

La température et la teneur en eau liquide

La température de la neige s'exprime en degré Celsius ($^{\circ}C$, avec pour symbole : T_s).

La teneur en eau liquide (TEL) représente la quantité d'eau liquide contenu dans la neige, pouvant survenir après une précipitation, et/ou une fonte de la neige. La teneur en eau liquide peut s'exprimer en volume ($\theta_{w,V}$ ou TEL_V) ou en masse ($\theta_{w,m}$ ou TEL_m) (notamment en pourcentage). La mesure de la teneur en eau liquide est effectuée par divers moyens sur le terrain : par calorimétrie (Kawashima et al. (1998)), méthode de dilution (Boyne & Fisk (1990)) ou mesure des propriétés diélectriques (Denoth et al. (1984)).

On peut différencier différents types de neige via la mesure en teneur en eau liquide. Ainsi, la neige sèche est caractérisée par une absence d'eau liquide, et de manière générale, une température inférieure à $0^{\circ}C$. Elle peut, cependant, apparaître à une température de $0^{\circ}C$. Les autres types de neige (humide, mouillée) ont une température égale à $0^{\circ}C$ et une teneur en eau liquide non nulle (Fierz et al. (2009)).

Hauteur du manteau neigeux

La hauteur du manteau neigeux est la distance verticale de la base du manteau neigeux à sa surface. Celle-ci est mesurée en cm et a pour symbole : HS .

La forme et la taille des particules

La forme des particules (aussi nommées grains) est souvent définie sur le terrain à l'aide d'une crystal card (carte de poche pour la classification des cristaux de neige) et d'une loupe.

La taille des particules d'une couche de neige représente la taille moyenne de ses grains, exprimée en millimètre (symbole : E). En général, sur le terrain, un échantillon de neige de la couche étudiée est placé sur un plateau ayant une grille millimétrée (crystal card) (Fierz et al. (2009)).

La résistance de la neige à l'enfoncement

Une mesure courante sur le terrain est la dureté manuelle, estimée sur une échelle de 1 à 5 par l'observateur (suivant l'enfoncement possible de son poing, quatre doigts, un doigt, un crayon ou une lame de couteau dans la neige) (Fierz et al. (2009)).

Les instruments couramment utilisés pour obtenir une mesure de la résistance à l'enfoncement de la neige sont la sonde par battage, et le pénétromètre nommé SnowMicroPen (SMP) (Schneebeli et al. (1999)) qui fournit une mesure à haute résolution.

Le profilage vertical de la résistance à l'enfoncement est l'unique mesure sur le terrain permettant une caractérisation rapide et objective du manteau neigeux : cela constitue un bon indicateur de la cohésion de la neige et permet la corrélation à d'autres variables (masse volumique par exemple) et d'identifier le type de neige (croûte de regel, fines couches fragiles).

La cohésion

La cohésion est une caractéristique mécanique de la neige ayant un impact conséquent sur la stabilité du manteau neigeux, la formation et le mouvement des avalanches (Perla & Martinelli (1976); Bartelt et al. (2015); Ligneau et al. (2022)). Il est important de noter, dans le cas de sollicitations mécaniques, telles que la résistance au cisaillement et à la traction, que la cohésion de la neige fixe une limite à ces forces (Ancey (1996)). Cela va donc bien jouer un rôle significatif dans l'état de stabilité du manteau neigeux.

Il existe différents types de cohésion de la neige. Deux types de cohésion sont importants à retenir dans la formation et le mouvement des avalanches :

- La cohésion de frittage sèche qui concerne les particules reconnaissables, et en majorité, les grains fins. Ce type de cohésion est caractérisé par des soudures (nommées aussi pont de glace) entre les grains, qui sont dépendant de la température (Casassa et al. (1991)), et peuvent, dans certains cas, être dûs à l'action du vent.
- La cohésion capillaire humide qui concerne les grains ronds humides (présence d'une pellicule d'eau qui entoure les grains et fait la liaison entre ces derniers). La cohésion d'une neige humide va dépendre de sa teneur en eau liquide. Si cette dernière est de faible valeur, la neige possède une bonne cohésion et est collante. Au contraire, plus la teneur en eau est forte, plus la cohésion est mauvaise (Steinkogler et al. (2015)).

Le tassement de la neige

La neige est composée en grande partie d'air (entre 50 et 90 %). Cela induit un tassement de la neige fraîche rapide par rapport à une couche de neige ancienne. Le métamorphisme au sein du manteau neigeux va également contribuer au tassement de ce matériau. Lorsque la compression est trop rapide, et que les grains n'ont pas le temps de se réorganiser, une rupture peut survenir au sein du manteau neigeux (Ancey (1996))

1.1.3 Le métamorphisme de la neige

Tout comme mentionnée auparavant, la neige est en grande partie composée d'air, ce qui influence ses propriétés thermiques, explique l'existence de gradients de température importants, et les transformations pouvant avoir lieu à l'intérieur d'un manteau neigeux. Les métamorphoses de la neige, les évolutions d'une couche de neige liées aux conditions de température auxquelles elle est soumise sont généralement distinguées par deux formes : le métamorphisme de la neige sèche et le métamorphisme de la neige humide.

Le métamorphisme de la neige sèche dépend de 4 facteurs (Ancey (1996)) :

- L'effet de rayon de courbure des cristaux : les quantités de vapeur d'eau sont plus importantes au voisinage de fortes convexités, ainsi le déséquilibre de répartition des tensions de vapeur va induire des flux de vapeur d'eau des zones convexes aux zones concaves.
- Le gradient vertical de température : le base du manteau neigeux en contact avec le sol à une température proche de 0°C, tandis que pour une neige sèche, la température de la neige peut être basse (-20 à -30°C dans certains cas).
- La température joue un rôle d'accélération ou de freinage des processus de transformation.
- Le vent est un agent mécanique de transformation des cristaux.

La figure 1.1 illustre les différents métamorphismes de la neige sous l'effet d'un gradient de température. On parle de métamorphisme de faible gradient dans le cas où les processus de transformation conduisent à l'arrondissement des grains (grains fins). Cela confère également à la neige une cohésion de frittage (rapprochement des grains, et augmentation de points de contacts entre eux). Si la teneur en eau liquide est forte, la cohésion peut être perdue, ce qui provoque une fragilité de la couche (avalanche de neige humide ou de fonte) (Steinkogler et al. (2015)). Un fort gradient de température va rendre, au contraire, les grains anguleux (grains à faces planes, voire gobelets). La métamorphose de gradient moyen induit la transformation des grains en grains à face planes. Si une couche de neige de grains à face planes ou de gobelets est recouverte après une chute de neige, cela peut être source d'instabilité (présence de couche fragile) (Ancey (1996); McClung & Schweizer (1996); Schweizer & Gaume (2016)).

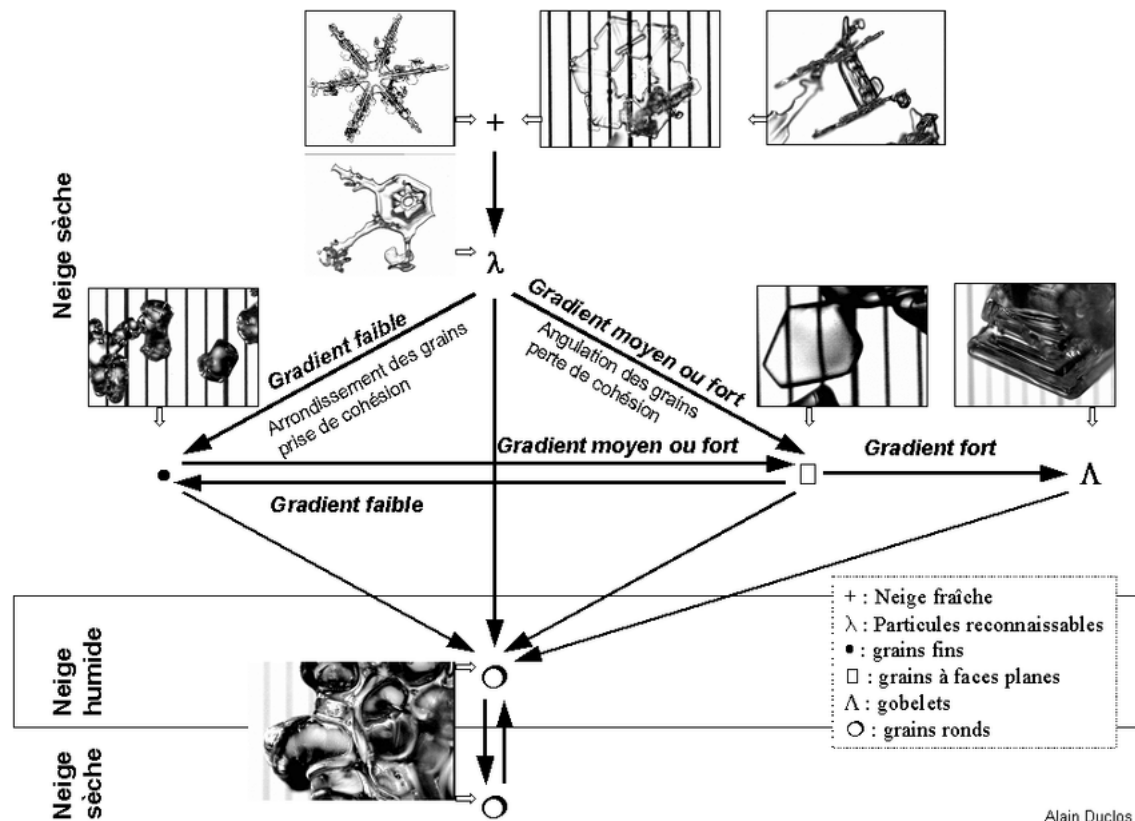


FIGURE 1.1 – Illustration des différents types de métamorphismes de la neige sous l'effet d'un gradient de température. Les traits verticaux sur les images de particules de neige sont séparés de 0.2 mm (source : A. Duclos).

1.1.4 La constante diélectrique de la neige

La constante diélectrique, appelée également permittivité, est une propriété électromagnétique de la neige, caractéristique du comportement électrique de ce matériau (réponse du matériau face à une onde électromagnétique). Dans le cas de la neige, la réponse électromagnétique du couvert neigeux va dépendre de cette constante diélectrique (Hallikainen (1954); Wei et al. (2020)).

Il existe des pertes électromagnétiques :

- par absorption, l'énergie électromagnétique est alors transformée en d'autres formes d'énergies (la chaleur par exemple)
- par diffusion, lorsque l'énergie se déplace dans d'autres directions que celle du rayonnement incident.

De part l'existence de ces pertes électromagnétiques, on définit une partie réelle et une partie imaginaire qui exprime la dissipation d'énergie (Hallikainen (2014)).

Plusieurs faits sont intéressants à connaître concernant la constante diélectrique de la neige :

- La constante diélectrique de la neige sèche peut se calculer en fonction de la densité (la permittivité augmente presque linéairement avec l'augmentation

de la densité) (Hallikainen et al. (2006)). Elle est également indépendante de la température et de la fréquence dans le domaine des micro-ondes (pour la neige sèche et des fréquences inférieures à 10 GHz) (Mätzler (1987)).

- La constante diélectrique de la neige humide augmente avec la teneur en eau liquide. Cela est notamment due au contraste diélectrique fort entre la neige et l'eau liquide (Colbeck (2001); Tiuri et al. (1984); Shi & Dozier (1995); Hallikainen et al. (2006)).

1.1.5 La profondeur de la pénétration d'une onde incidente dans la neige

Dans le cas de la neige, la profondeur de pénétration d'une onde incidente en bande C (partie du spectre électromagnétique utilisé par le radar de Sentinel-1) est liée au coefficient d'absorption du champ électromagnétique.

La neige sèche, ayant un faible coefficient d'absorption, permet aux micro-ondes de se propager sur de longues distances, sur des centaines de longueur d'onde. Ainsi, les effets de diffusion interne, nommés diffusion de volume peuvent devenir très prononcés : les micro-ondes vont facilement traversées le manteau neigeux et interagir avec l'interface neige-sol (Mätzler (1987)).

La profondeur de pénétration de la neige humide a pour caractéristique le fait qu'elle diminue avec l'augmentation de la teneur en eau liquide (Ulaby et al. (1986)). De plus, le coefficient d'absorption de la neige humide est fort. Ces deux composantes induisent l'absorption des micro-ondes sur de courtes distances d'environ une longueur d'onde : la diffusion est limitée à une fine couche près de la surface, ce qui rend la diffusion de surface dominante dans le processus de rétrodiffusion (Mätzler (1987)).

Le manteau neigeux est très divers de part ses composants (nombreuses couches de neige de propriétés différentes, avec des interfaces air-neige et neige-sol), ainsi il est important de prendre en compte la totalité du manteau neigeux lors d'une étude portant sur la rétrodiffusion (Mätzler (1987); Shi & Dozier (2000)). Dans la partie 1.5.1, nous nous intéresserons plus en détail sur les principes de rétrodiffusion au sein d'un manteau neigeux, et notamment celles appliquées aux dépôts d'avalanche.

1.2 Les avalanches de neige

1.2.1 Comment se forme une avalanche ?

Les avalanches de neige peuvent être déclenchées de manière spontanée (souvent causées par les conditions météorologiques) ou accidentelle (par exemple par le passage d'un skieur) (Perla & Martinelli (1976)). Elles résultent d'une rupture de l'équilibre mécanique au sein du manteau neigeux. Les forces de résistance du manteau permettent de résister à la force motrice de la gravité. La rupture de l'équilibre peut survenir par l'augmentation de la force motrice. Les surcharges du manteau neigeux sont une cause principale de cette augmentation. Ainsi, les chutes de neige,

le transport de neige par le vent, le passage d'homme ou d'animal peuvent être des facteurs de déclenchement des avalanches. On utilise par ailleurs des charges explosives pour déclencher artificiellement une avalanche. La diminution des forces de résistance du manteau neigeux est une autre cause de la rupture de l'équilibre (Naaïm-Bouvet & Richard (2015)). Par exemple, la fonte de la neige, suite à des précipitations, peut entraîner une perte de cohésion et de résistance du manteau neigeux (McClung & Schaerer (2006)). La stabilité du manteau neigeux est donc caractérisée par l'état et l'évolution des différentes couches de neige.

1.2.2 Les différentes constitutions et types d'avalanches

Les différentes zones d'un site avalancheux

Trois zones constituent l'étendue spatiale d'un site avalancheux. La zone d'accumulation est la zone supérieure qui pourra constituer et influencer le départ de l'avalanche. La zone de transit est la zone intermédiaire où peut progresser l'avalanche. Cette zone peut être ouverte (avalanche de versant) ou bien fermée (avalanche de couloir). La zone de dépôts, où la décélération peut être forte, est la zone la plus basse. C'est dans cette dernière zone que l'avalanche s'arrête et que l'on observe les dépôts avalancheux (Ancey & Charlier (1996); McClung & Schaerer (2006)). L'illustration de la figure 1.2 permet de visualiser ces trois zones.

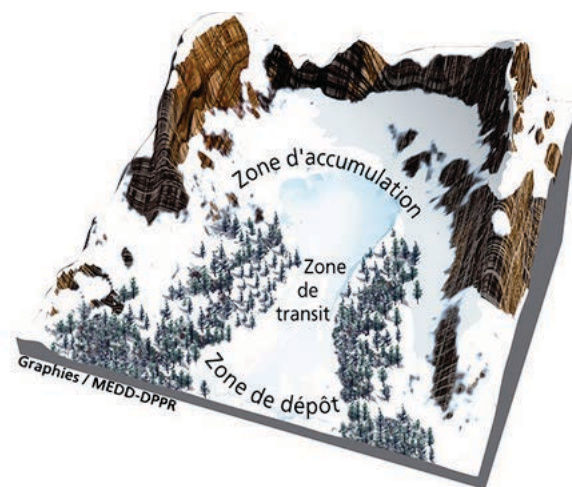


FIGURE 1.2 – Illustration des différentes zones d'une avalanche

Les principales formes de départ d'une avalanche

Il existe trois principales formes de départ d'une avalanche. Le départ ponctuel survient lorsque la cohésion des couches est très faible. Le départ de l'avalanche porte sur une petite zone, puis la taille de l'avalanche augmente en entraînant de la neige sur son parcours ainsi qu'au niveau de ses bordures. On parle d'avalanche en forme de poire, souvent caractéristique d'avalanche de neige fraîche ou de neige humide au printemps. Une avalanche de départ ponctuel est représentée sur la figure 1.3A.

La figure 1.3B illustre un départ linéaire. Ce dernier survient dans le cas où la ou les couches en cohésion se fragmentent. Les avalanches de plaque en sont un exemple. Les 3/4 des accidents mortels par avalanche sont engendrés par des avalanches de plaque (Faillietaz (2003)).

Le départ mixte est quant à lui composé d'un départ ponctuel suivi d'un départ en plaque (Ancey & Charlier (1996)).

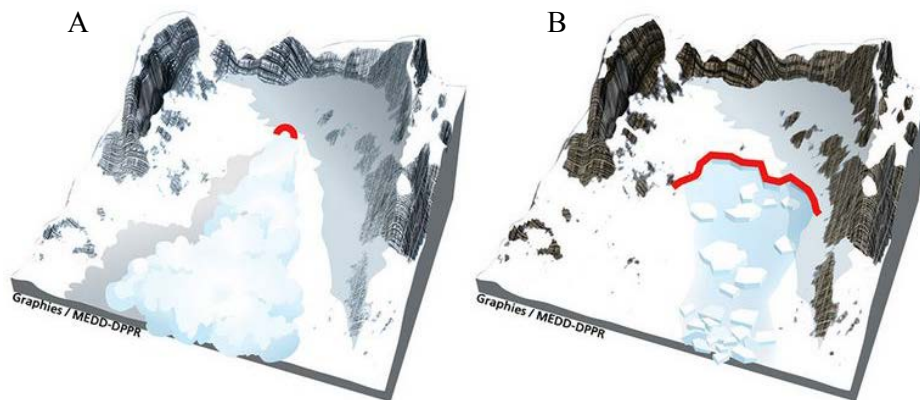


FIGURE 1.3 – Illustration des deux principaux types de départ d'une avalanche. A : départ ponctuel caractéristique des avalanches de neige fraîche ou humide, et B : départ linéaire caractéristique des avalanches de plaque.

La taille des événement avalancheux

Les événements avalancheux sont classés par leur taille en fonction de leur potentiel de destruction et la longueur de l'écoulement (McClung & Schaerer (2006)). Une échelle européenne est utilisée pour identifier la taille des avalanches. Elle est fournie par l'European Avalanche Warning Services (EAWS, <https://www.avalanches.org/downloads/#eaws-matrix>).

Les petites avalanches (taille 1) sont nommées des coulées et sont peu dangereuses (risque de chute, danger minime d'ensevelissement). Les avalanches moyennes (taille 2) peuvent ensevelir, blesser ou tuer des personnes et s'arrêtent généralement en bas des pentes. Les avalanches de taille large peuvent provoquer d'importants dégâts par leur force générée (destruction de voitures, d'arbres isolés). Leur écoulement peut être observé sur un terrain plus plat (inférieur à 30° et sur moins de 5 m). La figure 1.4 montre une avalanche de taille large (taille 3) tandis que la figure 1.5 présente une avalanche de taille très large (taille 4). Cette dernière est encore plus dangereuse. Tout comme nous le démontre la photographie, ces avalanches peuvent atteindre le bas des vallées. Elles peuvent détruire des poids lourds, de grands bâtiments et des petites surfaces de forêts. Enfin, les avalanches de taille extrêmement large (taille 5) sont catastrophiques et de très grande ampleur. Elles peuvent complètement changer le paysage par leur force de destruction importante.



FIGURE 1.4 – Exemple d’avalanche de taille large (source EAWS).



FIGURE 1.5 – Exemple d’avalanche de taille très large (source EAWS).

Les différents types d’écoulement d’une avalanche

Les avalanches denses s’écoulent le long de la pente (Ancey & Charlier (1996)). Elles peuvent être constituées de neige humide et/ou sèche (absence d’eau liquide) selon le type de neige présent. Les avalanches de neige humide ont le plus souvent lieu lorsque les températures sont élevées. La présence d’eau liquide peut également trouver sa source dans la percolation de l’eau à l’intérieur du manteau neigeux. L’exposition est un facteur à prendre en compte, puisque les pentes ensoleillées sont fortement soumises aux radiations solaires. Du fait de leur densité importante, les avalanches de neige humide peuvent exercer de grandes pressions face à des obstacles.

Les avalanches aérosols, aussi nommées poudreuses, sont formées d’un mélange d’air et de neige en suspension dans l’air (Ancey & Charlier (1996)). Elles sont souvent constituées de neige froide, sèche et de faible cohésion. Ces avalanches sont

caractérisées par une onde de pression connue pour sa puissance destructrice et pouvant provoquer des dégâts en dehors de la zone de dépôt.

Les situations avalanches typiques

L'**avalanche de plaque** se différencie par la présence d'une couche de faible cohésion au sein du manteau neigeux, nommée "couche faible". Cette dernière est souvent formée de gobelets, un type de neige créé lors de fort gradient de température, ou bien de face planes ou de neige fraîche. On distingue les couches persistantes des non persistantes : les couches persistantes évoluent très lentement dans le temps et peuvent subsister parfois tout au long d'une saison, elles sont souvent composées de gobelets et de faces planes, tandis que les couches non persistantes sont constituées de neige récente légère (chute de neige sans vent) et évoluent rapidement dans le temps par tassement et métamorphose.

Un autre constituant important de l'avalanche de plaque se situe au-dessus de la couche fragile. Cette couche, nommée plaque, est de poids et cohésion supérieures à la couche fragile. Les plaques dures sont de cohésion élevée et constituées de grains fins. Les plaques friables sont quant à elles constituées majoritairement de particules reconnaissables (McClung & Schaerer (2006)).

Le déclenchement d'une avalanche de plaque est causé par une série de ruptures mécaniques au sein du manteau neigeux :

- L'initiation d'une rupture dans une couche fragile sous une plaque relativement cohésive : rupture de ponts entre grains de neige lorsque la contrainte excède la résistance mécanique de la neige, formation d'une fissure macroscopique suite à ces ruptures. Le déclenchement peut être dû à une augmentation progressive de la charge (chute de neige, transport de neige par le vent), et/ou au métamorphisme (fissure macroscopique qui se forme en quelques minutes ou plusieurs heures). Dans le cas d'un déclenchement provoqué, la rupture peut être soudaine. La rupture est dite mixte (Schweizer & Gaume (2016)) : les contraintes en cisaillement sont souvent majoritairement responsables de la rupture par rapport aux contraintes liées à la compression (cela est causé par les caractéristiques de résistance des couches fragiles) (Reiweger et al. (2015)).
- La propagation de la rupture dans la couche fragile : lorsque la fissure macroscopique atteint une taille critique, la rupture va se propager dans toutes les directions dans la couche fragile (si un skieur déclenche cette avalanche de plaque, il peut se retrouver au sein même de l'avalanche), le déplacement d'air va créer un bruit reconnaissable (le "whumpf") (Gaume et al. (2016)).
- La rupture en traction de la plaque et le glissement de la plaque dans la pente : lorsque les forces de frictions reliant le bas plaque à son substrat sont insuffisantes, la plaque va glisser (Schweizer & Gaume (2016)). La majorité des déclenchements de plaques sèches se produisent dans des pentes d'angle supérieur à 30°C (McClung & Schaerer (2006)). La présence d'une pente assez forte n'est pas indispensable pour l'initiation et la propagation de la rupture,

elle l'est néanmoins pour le glissement de la plaque.

Les avalanches de neige humide sont liées à la déstabilisation du manteau neigeux de part la forte présence en eau liquide. Cela peut être due à des précipitations affectant les orientations en dessous de la limite pluie-neige, ou à une fonte de la neige par rayonnement solaire ou changement de température de l'air (Conway (1998); McClung & Schaerer (2006)). Les avalanches de neige humide, sont des situations avalancheuses typiques au printemps et peuvent être des :

- Avalanches de plaque de neige humide : la pluie peut être une charge supplémentaire, l'accumulation de l'eau liquide à une interface ou au sein de la couche fragile peut fragiliser et provoquer sa rupture (Colbeck & B. (2001)).
- Avalanches de neige non cohésive et humide (perte de cohésion entre les grains de neige).

Les avalanches de neige fraîche surviennent après des chutes de neige en cours ou récentes qui induisent une surcharge sur le manteau neigeux. Les avalanches de plaques sèches et les avalanches de neige sans cohésion peuvent être déclenchées spontanément ou accidentellement (McClung & Schaerer (2006)).

Les avalanches de glissement sont des avalanches ayant mobilisées l'ensemble du manteau neigeux.

Une classification non exhaustive des avalanches

Dans de nombreux écrits, les avalanches sont classifiées par les types d'avalanche poudreuse, avalanche de plaque et avalanche humide. Cette classification mélange le type d'écoulement, le type de départ et de neige. Cependant, lors d'un phénomène avalancheux, une avalanche peut présenter ces trois formes. C'est notamment le cas de l'avalanche de mai 1983 du couloir des Favrans (massif du Mont-Blanc), où une plaque mobilisant de la neige humide a produit un aérosol. Cette avalanche a détruit une forêt sur 250 m de large. Les avalanches peuvent être mixtes, avec une partie dense en contact avec le lit du couloir et une partie aérosol. Il faut aussi savoir qu'il existe 24 critères distinctifs pour classer une avalanche, ce qui donne plus de 4 000 combinaisons possibles (Naaim-Bouvet & Richard (2015)). Ainsi, il est important de connaître les différents types d'écoulement, de départ et de neige. Cela nous permet au mieux de définir les événements avalancheux et de garder en tête la variabilité du phénomène.

1.3 L'estimation du risque avalancheux en France

L'hiver 1970 fut catastrophique au vu du nombre important d'avalanches, notamment celle d'ampleur exceptionnelle à Val d'Isère (Savoie) qui causa la mort de 39 personnes. Cet événement fut à l'origine de l'attribution à Météo-France, anciennement nommé Météorologie nationale, de la prévision du risque avalanche. Les prévisionnistes utilisent des observations du réseau nivo-météorologique et des sorties de modèles pour produire des Bulletin d'estimation du Risque Avalanche

(BRA). Le Centre d'Etudes de la Neige (CEN), l'unité de recherche du Centre National de Recherches Météorologiques, a permis le développement de modèles d'état du manteau neigeux, de son évolution et stabilité comme outils numériques pour assister les prévisionnistes nivologues. En complément de la production hebdomadaire de bulletin, Météo-France assure la vigilance météorologique (Coleou et al. (2018)).

1.3.1 Observations et mesures du manteau neigeux et des paramètres météorologiques à la surface de la neige

L'estimation du risque est réalisée en étudiant les paramètres météorologiques à la surface de la neige (température, précipitation, vent, rayonnements visibles et infrarouges) qui jouent un rôle central dans l'évolution des conditions du manteau neigeux. Des observations et mesures sont également effectuées afin d'étudier la composition du manteau neigeux. Un exemple de mesure permettant l'évaluation de la stabilité du manteau neigeux est le sondage par battage illustré par la figure 1.6 (évaluation de la résistance à l'enfoncement). Pour ces différentes mesures, 150 postes d'observation localisés entre 1 000 et 2 500 m sont surveillés en grande partie par le personnel des stations de ski. 28 stations automatiques situées entre 1 700 et 3 000 m font également partie du réseau nivo-météorologique. Les centres de Météo-France réalisent également des mesures complémentaires. Ils collectent et analysent les données fournies par le réseau. Les différentes observations constituent une aide à la décision pour les prévisionnistes et sont complémentaires aux informations de sortie de modèle.



FIGURE 1.6 – Exemple de mesure réalisée sur le manteau neigeux. La sonde par battage est un instrument de référence pour la mesure de la résistance à l'enfoncement.

1.3.2 Modélisation

La chaîne de prévision numérique du risque d'avalanche, nommée Safran-Crocus-Meptra, est composée de trois modules (Bellocq (1991); Pahaut & Giraud (1995); Durand et al. (1999); Brun et al. (2012)).

Le Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Nivologie, SAFRAN, utilise toutes les observations et mesures terrains réalisées. Il produit de ce fait des réanalyses atmosphériques à l'échelle des massifs de montagne, par pas de 300 m, pour des pentes de 20 et 40° et 8 types d'orientations différentes (N, NE, E, SE, S, SO, O et NO). Les produits de SAFRAN sont ensuite donnés en entrée du modèle de neige Crocus (Brun et al. (1992); Durand et al. (1993); Vionnet et al. (2012)).

Crocus simule l'évolution du manteau neigeux pour les différents niveaux d'élévation, types de pentes et d'orientations, en prenant en compte les processus de transformation physique.

Les propriétés mécaniques diagnostiquées et la stabilité de la neige sont quant à elles assurées par le modèle MEPRA, le Modèle Expert pour la Prévision du Risque d'Avalanche. Ce dernier prend en entrée les profils de manteau neigeux obtenus par Crocus (Giraud (1992); Morin et al. (2019)).

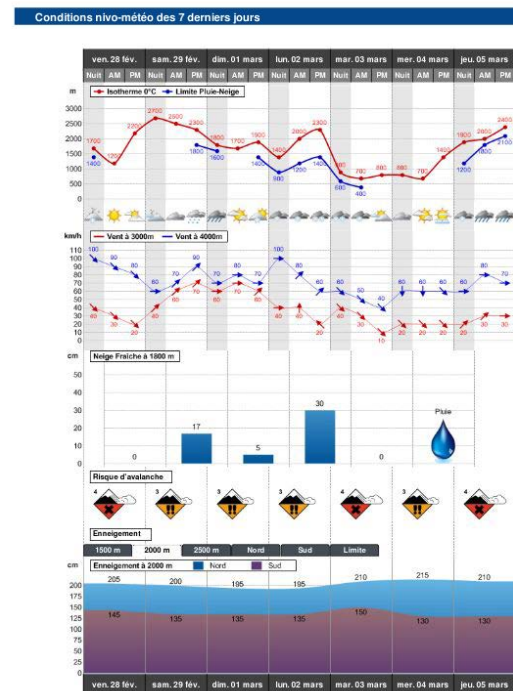
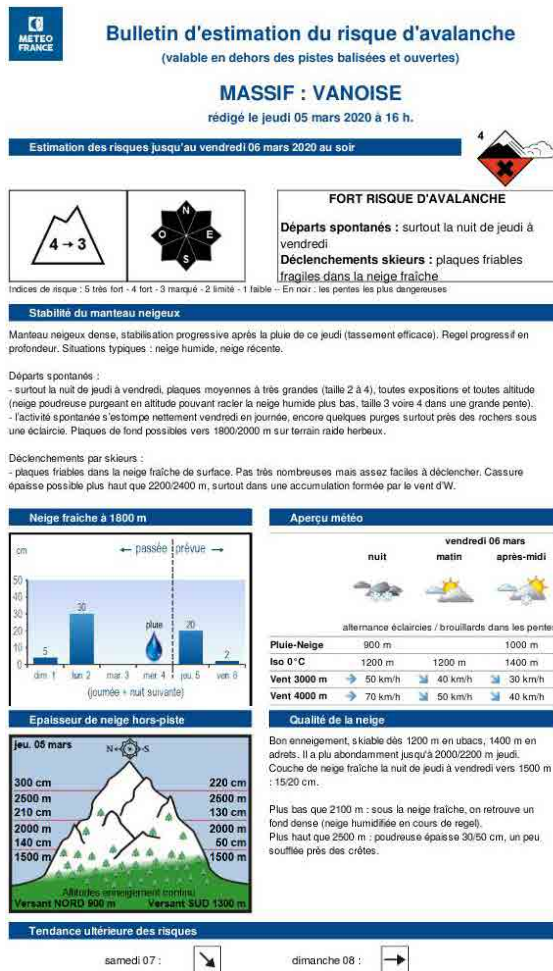
Les prévisionnistes ont un important travail d'analyse critique pour comparer la modélisation avec les observations terrains.

La chaîne de modélisation du risque d'avalanche comporte comme principales limites l'hypothèse d'homogénéité à l'échelle du massif et l'absence de prise en compte des observations nivologiques pour la correction de la simulation du manteau neigeux. De plus, les phénomènes de transport de neige par le vent ne sont pas considérés par la modélisation actuelle. Des recherches sont en cours pour pallier ces limites (Coleou et al. (2018)).

1.3.3 Les bulletins du Risque Avalanches

Le BRA est un outil d'aide à la décision pour les pratiquants de la montagne, les professionnels et les services de sécurité (routes, stations de skis). Il est effectué par les prévisionnistes de Météo-France afin de décrire le risque avalancheux dans un massif donné en précisant l'altitude et les pentes les plus dangereuses, ainsi que les cas d'évolution du risque au cours de la journée. Les BRA informent, entre autres, sur la stabilité du manteau, de la qualité de la neige et des conditions météorologiques au cours des 7 derniers jours. Ils sont rédigés vers 16h et formulent une estimation du risque jusqu'au lendemain soir. A la fin du mois d'avril, avec l'arrivée du beau temps, les stations de ski ferment et moins d'observations sont mises à disposition. De ce fait sont produites les "Informations Neige et Avalanche" (INA). Les BRA et les INA sont archivés et mis en ligne à disposition de tous et gratuitement par Météo-France (Coleou et al. (2018)). Un exemple de BRA archivé est présenté via la figure 1.7.

Le niveau du risque d'avalanche estimé se base sur l'échelle européenne élaborée par le groupe de travail European Avalanche Warning Services (EAWS8). Cela permet une évaluation du risque avalanche homogène pour les bulletins de montagne en Europe. Il existe 5 niveaux dans l'échelle du risque définis par le nombre, la taille et la probabilité d'occurrence d'une avalanche pour une zone donnée (Coleou et al. (2018)) (l'échelle européenne est présentée en annexe par la figure A.1).



Rédigé par Météo-France avec la contribution des observateurs du réseau nivo-météorologique. Partenariat : ANMS (Maires de Stations de Montagne), DSF (Domaines Skiables de France), ADSP (Directeurs de Pistes et de la Sécurité Stations de Sports d'Hiver) et autres acteurs de la montagne.

FIGURE 1.7 – Exemple d'un Bulletin d'estimation du Risque Avalanche

1.3.4 La vigilance du risque avalanche

La vigilance météorologique permet d'avertir les populations en montagne d'un risque très élevé, par exemple dans le cas d'avalanche pouvant impacter les habitations et/ou fermer une route. Cela permet, selon les situations de dangers, aux services en charge de la sécurité, les responsables locaux dans les communes de montagne, de mettre en place des mesures préventives. Les prévisionnistes et les membres du point focal avalanche, spécialisés dans les enjeux nivo-météorologiques, assurent cette vigilance (Coleou et al. (2018)).

1.4 Observation des phénomènes avalancheux

1.4.1 Les observations in-situ en France

La gestion et la prévention du risque d'avalanche en France s'appuient sur deux données regroupant des informations historiques sur l'aléa avalancheux : l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) et la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche (CLPA). Ces données sont utiles pour l'optimisation de la sécurité de

zones urbaines, la prise en compte du risque dans l'aménagement et la gestion du territoire en montagne, ainsi que pour les études de recherche en lien avec le risque avalancheux.

L'Enquête Permanente sur les Avalanches

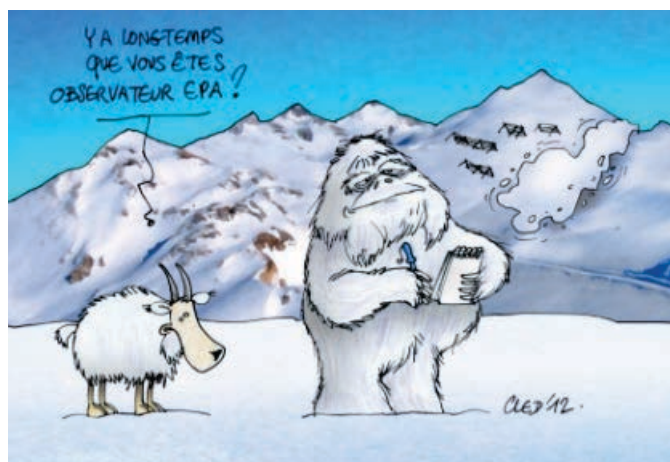


FIGURE 1.8 – Illustration des observations EPA par Cled'12.

Le début du recensement du phénomène d'avalanche a été initié en Savoie dans les années 1900 par Paul Mougin, ingénieur des Eaux et Forêts, dans le but diminuer les dégâts en forêt, d'améliorer de la correction des torrents (diminution du charriage causé par les avalanches) et la compréhension des avalanches (modes de formations, emplacement, etc.) (Mougin (1922)).

De nos jours, environ 4 000 couloirs d'avalanche sont surveillés au sein des Alpes et des Pyrénées par les agents de l'Office National des Forêts (ONF) et la base de données est gérée par l'Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (Inrae). Cet inventaire a initialement été créé afin de recenser les événements d'avalanche de grande ampleur (de taille large, très large et extrêmement large) et situés à proximité de zones urbaines. De ce fait, les avalanches reportées sont celles qui excèdent un certain seuil défini et situé majoritairement en bas de vallées.

Les données EPA contiennent des informations quantitatives (altitudes de départ et d'arrêt, volume de dépôt) et qualitatives (caractéristiques de l'avalanche, dégâts, causes). Une courte fenêtre de dates du déclenchement de l'avalanche est donnée. Cette base de données est disponible gratuitement sur le site www.avalanches.fr. La surveillance régulière des sites avalancheux rend la base de données EPA unique par sa richesse historique (Bourova et al. (2016)).

La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche

La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche a été créée suite à une avalanche catastrophique à Val d'Isère, en 1970. La CLPA est une carte descriptive des phénomènes historiques et observés. Elle permet de mémoriser et cartographier les

limites extrêmes atteintes par toutes les avalanches connues et recensées. Cette carte contient des données spatiales et temporelles intégrées sur une longue période de temps. Les agents de l'ONF font régulièrement des mises à jour des zones impactées par les avalanches. La figure 1.9 permet de visualiser un extrait de la CLPA. Elle est composée de recueil de témoignages (service de restauration des terrains en montagne, sécurité des pistes, bergers, guides, etc.) et d'interprétation des événements passés (études de photographies).

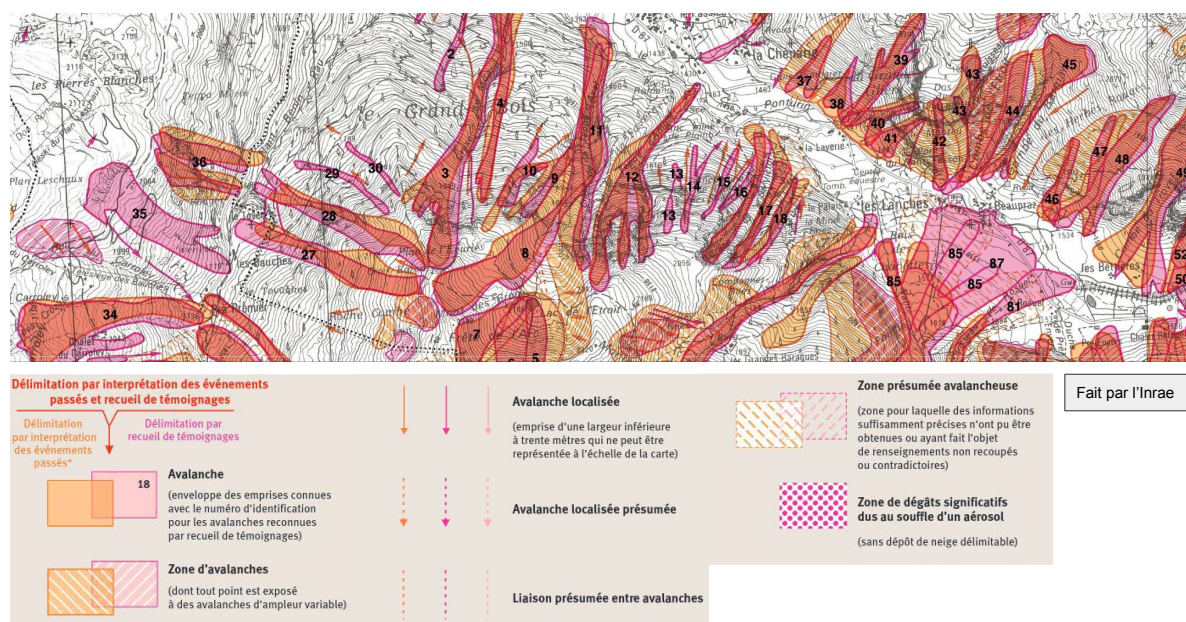


FIGURE 1.9 – Extrait de la Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche.

La CLPA est un outil essentiel auprès des opérationnels. En effet, la connaissance des événements historiques permet une expertise et un appui aux décisions de prévention et de gestion du risque. Entre autres, la CLPA est utilisée pour les études de projets d'équipement et d'aménagement de la montagne (remontées mécaniques, voies de communication, etc.). Elle est un document de référence pour la mise en place du Plan d'Intervention pour le Déclenchement d'Avalanches à l'explosif (PIDA). C'est un document informatif et technique à destination des maires et services administratifs et techniques. Par exemple, la CLPA permet l'établissement de cartes de risques (Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles, PPR) et de documents d'urbanisme (Bonnefoy et al. (2010); Bourova et al. (2016)).

En recherche, la délimitation des zones CLPA peut être très utile. Par exemple, cela a été utilisé dans le cadre de travaux menés sur la dendrogéomorphologie par (Schläppy et al. (2013); Schläppy (2014)). La CLPA apporte également de l'information sur la gestion et l'aménagement du territoire de montagne face au risque avalanche dans le cadre d'étude d'archives historiques (Giacona et al. (2017)).

1.4.2 Observation par télédétection

Certaines avalanches peuvent être observées grâce à des agents sur le terrain. Cependant, en cas de conditions météorologiques non favorables et pour de nombreuses zones difficiles d'accès, l'observation in-situ est inenvisageable. La télédétection a récemment permis de développer des méthodes de détection d'événements avalanches passés. Certaines de ces méthodes ont été développées via des capteurs au sol tandis qu'une grande majorité l'ont été grâce à des satellites optiques et radar.

Les capteurs au sol

Différents capteurs au sol ont été étudiés. Le radar Doppler a été utilisé pour suivre les caractéristiques de l'écoulement avalancheux, notamment dans l'étude de [Vriend et al. \(2013\)](#). L'interférométrie radar terrestre permet de suivre et d'évaluer l'activité de glissement de la neige sur la zone surveillée, et donc de détecter des zones précurseurs d'avalanches ([Caduff et al. \(2016\)](#)). La société IDS GeoRadar a mis au point un produit nommé RockSpot composé d'un radar Doppler et d'interférométrie pour localiser et suivre des avalanches de neige et des chutes de roches ([Viviani et al. \(2020\)](#)). Les infrasons permettent également la surveillance des avalanches de neige ([Watson et al. \(2021\)](#)). D'autre part, les événements avalancheux peuvent être suivis par des caméras à déclenchement automatique. Par exemple, dans l'étude de [Veilleux et al. \(2021\)](#) cela a été utilisé afin de suivre différents événements, leur modes de départ et les types de dépôts. Les capteurs sismiques ont également été étudiés pour la détection d'avalanches de neige ([van Herwijnen et al. \(2016\)](#); [Pérez-Guillén et al. \(2019\)](#)).

Les capteurs au sol ciblent souvent une zone restreinte en comparaison des satellites et plates-formes aéroportées dont la couverture spatiale est plus étendue.

Télédétection optique

Les images optiques de satellites et de plates-formes aéroportées ont été utilisées pour cartographier les avalanches avec des résolutions spatiales élevées et très élevées. Cependant ces images nécessitent une absence de couverture nuageuse et sont utilisables que sur certains territoires cibles ([Buhler et al. \(2009\)](#); [Lato et al. \(2012\)](#); [Larsen et al. \(2013\)](#)). L'analyse de données optiques SPOT 6/7 est prometteuse. En effet, l'étude de [Hafner & Bühler \(2019\)](#) a permis d'identifier manuellement environ 18 000 avalanches dans les zones montagneuses suisses. [Hafner et al. \(2021\)](#) a démontré le potentiel de cette cartographie en tant que base de données de validation. Récemment, [Hafner et al. \(2022\)](#) a évalué la détection automatique par apprentissage profond d'images optiques SPOT 6/7. Le F1-score, une mesure statistique de la performance d'une méthode utilisant la précision et la sensibilité, est de 0.625 pour la zone et période testées, ce qui est proche de celui obtenu par identification manuelle de contours avalanches.

Les satellites radar

Les satellites radar permettent de s'affranchir des conditions météorologiques. D'autre part, certains satellites ont une couverture spatiale très étendue, des données gratuites et facilement accessibles. Des algorithmes ont été développés afin de détecter automatiquement sur des images radar de Sentinel-1 des dépôts d'avalanche (Karbou et al. (2018); Eckerstorfer et al. (2019)). Les instruments de Radar à Synthèse d'Ouverture, SAR, permettent d'obtenir des images quelque soit le temps, de jour comme de nuit.

Nous utilisons dans nos études les satellites Sentinel-1. La partie qui suit permet de comprendre comment est réalisée la télédétection SAR de dépôt d'avalanche, tout d'abord en présentant les principes de la rétrodiffusion du manteau neigeux et des avalanches. Dans un second temps, un état de l'art plus approfondi de la télédétection spatiale par radar est introduit.

1.5 État de l'art de la télédétection radar de dépôts avalanches

1.5.1 Principes de la rétrodiffusion du manteau neigeux et des avalanches

La télédétection radar est l'étude de la réponse électromagnétique d'une cible à un signal. Un radar va émettre des micro-ondes vers une cible. Ces ondes vont interagir avec la cible. La rétrodiffusion est une mesure de la partie du signal qui est renvoyée au capteur du radar. La variation du signal est liée aux propriétés bio et géo-physiques de la cible, dans notre cas le manteau neigeux (constante diélectrique, taille, géométrie, etc) (Longépé (2009)). C'est pour cela qu'il est important de comprendre les principes de la rétrodiffusion du manteau neigeux et des avalanches.

La hauteur du couvert neigeux, sa densité, sa teneur en eau liquide et sa constante diélectrique sont différentes propriétés du manteau neigeux pouvant impacter la rétrodiffusion du signal. La taille et la forme des particules dans chaque couche du manteau neigeux peuvent être des facteurs importants de variation de la rétrodiffusion, tout comme la rugosité de surface du manteau neigeux. Le sol sous-jacent joue lui aussi un rôle par sa constante diélectrique, qui est un paramètre caractéristique du comportement électrique du milieu. Afin de considérer la totalité de la rétrodiffusion du signal, les rétrodiffusions du sol, du volume de neige et de l'interface air-neige doivent être prises en compte. D'autre paramètres liés aux satellites interviennent également (fréquence et polarisation de l'onde incidente et l'angle d'incidence locale) (Mätzler (1987); Shi & Dozier (1992); Nagler & Rott (2000); Martini (2005); Flores-Anderson et al. (2019); Shi & Dozier (2000)).

Cas d'un manteau de neige sèche

Nous avons vu précédemment, que dans le cas de la neige sèche, les micro-ondes pénètrent facilement dans le manteau neigeux de part le faible coefficient d'absorption de la neige (Mätzler (1987)).

D'autre part, le contraste diélectrique à l'interface air-neige est très faible ce qui rend la rétrodiffusion de cette interface négligeable dans le cas où la surface est lisse (Gunteriusen (1997); Martini et al. (2003); Surendar et al. (2015)). La rétrodiffusion de l'interface neige-sol représente une composante majeure par rapport à celle de l'interface air-neige et du volume de neige (Nagler & Rott (2000)).

Cas d'un manteau de neige humide

Il a été noté précédemment que la propagation des micro-ondes à l'intérieur du manteau neigeux était limité, surtout avec une teneur forte en eau liquide (diminution de la pénétration des micro-ondes avec une augmentation de la teneur en eau liquide) (Ulaby et al. (1986); Mätzler (1987); Gunteriusen (1997)). En bande C, la rétrodiffusion du signal de la neige humide est dominée par la rétrodiffusion de l'interface air-neige, surtout lorsque la surface du manteau neigeux est rugueuse, et celle de la composante volumique (Nagler & Rott (2000)).

Cas de dépôts d'avalanches

De nos jours, il n'existe pas de modèle approprié électromagnétique de rétrodiffusion de dépôts d'avalanches. Il n'y a pas actuellement d'explication théorique ou statistique exacte de part le manque de ce modèle, et l'absence de paramétrage des paramètres physiques de débris d'avalanche (tels que la taille des cristaux, la teneur en eau liquide, la densité de la neige, etc.) (Eckerstorfer & Malnes (2015)). Un modèle simplifié, conçu par interprétation qualitative, a été présenté dans l'étude de Eckerstorfer & Malnes (2015). Cette dernière étude s'appuie en grande partie sur les travaux de Ulaby et al. (1986), qui a étudié un modèle électromagnétique d'un manteau de neige sèche (non affecté par des phénomènes d'avalanches).

Nous avons vu que dans le cas d'un manteau de neige sèche, la rugosité de surface et le contraste diélectrique entre l'air et la neige sont faibles. Les micro-ondes sont facilement propagés jusqu'au sol en raison du faible coefficient d'absorption. Cela induit une rétrodiffusion de l'interface neige-sol plus importante que celle de l'interface air-neige et du volume de neige. Ce cas est illustré par la figure 1.10A qui a été élaborée par Eckerstorfer & Malnes (2015).

Lors de présence de dépôts avalancheux de neige sèche, la rétrodiffusion de surface peut être augmentée, d'après Eckerstorfer & Malnes (2015). Cela est dû à la hausse de rugosité de surface. De plus, la rétrodiffusion liée au manteau neigeux peut également être plus grande puisque les dépôts modifient considérablement la hauteur du manteau neigeux (voir figure 1.10B) : plus la hauteur du manteau neigeux est importante, plus le signal sera atténué de part la diffusion volumique, et la contribution de l'interface neige-sol sera diminuée.

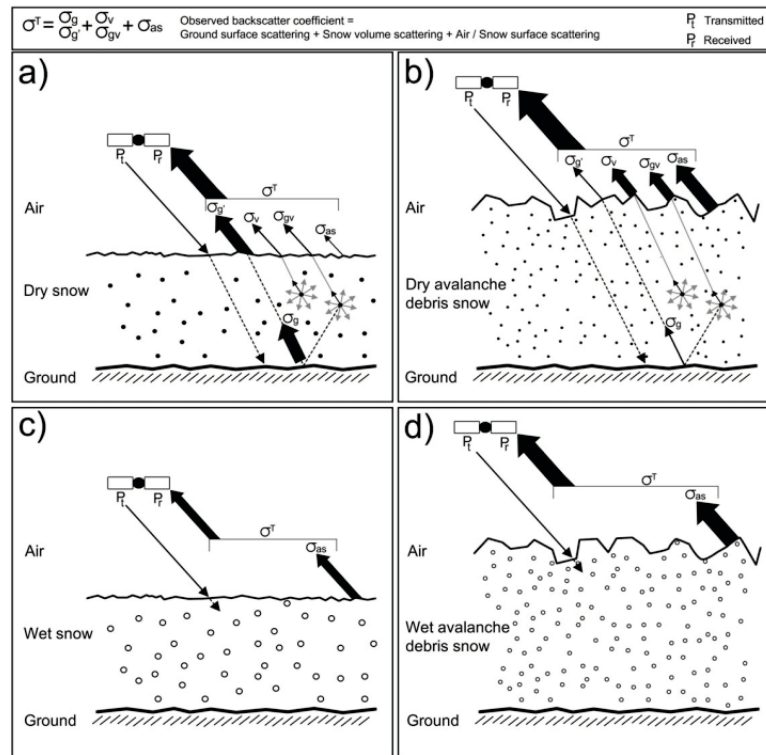


FIGURE 1.10 – Schéma simplifié des modèles de rétrodiffusion pour le cas d'un manteau neigeux sec (A) et humide (C) et le cas de présence de dépôts d'avalanche secs (B) et humide (D), source : [Eckerstorfer & Malnes \(2015\)](#)

Lorsque la neige est humide, les micro-ondes vont être absorbés par la surface du couvert neigeux (voir figure 1.10C) ([Martini \(2005\)](#)).

En considérant la présence de dépôts avalancheux humides, la rétrodiffusion à l'interface air-neige est importante par la rugosité de surface de dépôts, tout comme nous l'illustre la figure 1.10D.

Les observations par satellite radar sont utiles pour l'observation, directe ou indirecte, de certaines variables du manteau neigeux en raison du lien entre le rayonnement électromagnétique, la structure et les propriétés de la neige.

Les mesures en bande C sont sensibles à certaines propriétés du manteau neigeux et notamment au contenu en eau. La détection de débris d'avalanche est possible par le biais d'une augmentation locale du coefficient de rétrodiffusion suite au dépôt d'avalanches ([Eckerstorfer & Malnes \(2015\)](#)).

La rétrodiffusion reste néanmoins complexe. Il ne faut pas oublier qu'outre les propriétés de la neige et de ses interfaces air-neige et neige-sol, l'angle d'incidence du radar, la polarisation de l'onde et la variation topographique (voir les parties 1.5.4 et 1.5.5) interviennent dans l'interaction entre les micro-ondes et le couvert neigeux en montagne ([Nagler & Rott \(2000\)](#); [Shi & Dozier \(1992\)](#); [Martini \(2005\)](#)).

Polarisation et angle d'incidence

Selon la polarisation (VH, VV, HH), certains types de rétrodiffusion peuvent être prédominants (la rétrodiffusion de volume, de rugosité de surface ou de double rebond). Dans le cas de la polarisation VH, la rétrodiffusion de volume sera prédominante, tandis qu'avec une polarisation VV, la rétrodiffusion de surface sera forte (Flores-Anderson et al. (2019)).

D'autre part, selon le type de polarisation, l'angle d'incidence et la rugosité du sol, la rétrodiffusion sera plus ou moins forte (omnidirectionnelle ou directe, loin du radar). Le schéma réalisé par Tompkin & Leinss (2021) illustre cela (figure 1.11). Pour de large angle d'incidence, davantage d'énergie sera rétrodiffusée de manière omnidirectionnelles, par une surface rugueuse par rapport au plus faible transfert d'énergie réalisé par un manteau de neige de surface lisse (diffusion vers l'avant, loin du capteur).

Avec une polarisation VH, quel que soit l'angle d'incidence, la rétrodiffusion de surface rugueuse est prédominante par rapport à celle de surface lisse. Avec une polarisation VV, cela est aussi vrai pour des angles d'incidence supérieur à 30°. Cependant, pour des angles d'incidence plus faibles, le transfert d'énergie de part la rétrodiffusion de surface lisse est prédominante par rapport à celle de surface rugueuse (Oh et al. (1992); Tompkin & Leinss (2021)). Cela explique la rétrodiffusion plus importante pour une polarisation VH que pour une polarisation VV, pour des angles d'incidence faibles.

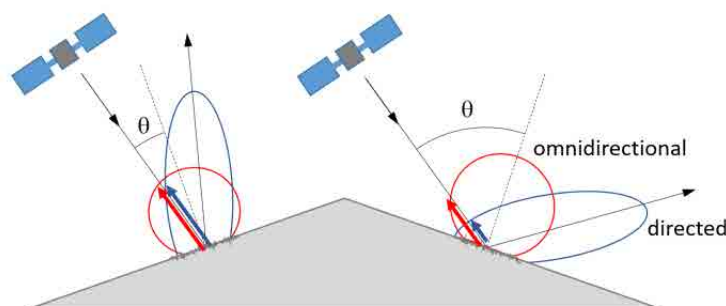


FIGURE 1.11 – Effet de l'angle d'incidence sur la rétrodiffusion de sols de surfaces rugueuse et lisse. Figure extraite de l'étude de Tompkin & Leinss (2021). Le transfert d'énergie d'une diffusion principalement dirigée sur une surface lisse est représenté par l'ellipse bleue, tandis que celle de diffusion principalement omnidirectionnelle sur une surface rugueuse est représenté par l'ellipse rouge, pour des angles d'incidence locale petits (à gauche) et grands (à droite).

1.5.2 État de l'art des méthodes de télédétection radar de dépôts d'avalanches

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour la détection de dépôts avalancheux. Une seule image SAR peut être étudiée de manière manuelle. La détection est alors

basée sur des méthodes d'amélioration du contraste de rétrodiffusion entre les dépôts d'avalanche et la neige environnante (Malnes et al. (2013); Eckerstorfer et al. (2014); Eckerstorfer & Malnes (2015)). L'étude de Leinss et al. (2020) a utilisé des images SAR et sur chacune ont été visuellement identifiées des zones brillantes dont la forme est semblable à une 'langue' d'avalanche. Cette même étude a permis de démontrer une meilleure sensibilité des méthodes dites de détection de changement en comparaison avec les études d'images uniques de SAR.

La méthode de détection de changement est couramment utilisée pour exploiter les images SAR. On se base sur le fait que les zones où a eu lieu l'avalanche sont caractérisées par une hausse locale majeure en coefficient de rétrodiffusion par rapport au reste du manteau neigeux non impacté par l'événement. On utilise des images composites RGB associant deux ou trois images couvrant la même zone géographique mais prises à des instants différents. On définit une ou deux images de référence où il y a absence de débris d'avalanche (prises en été ou quelques jours avant l'évènement) (R et B) et une image prise juste après que l'évènement se soit produit, que l'on nomme souvent image d'activité (G). Ainsi, on obtient une image RGB, présentant des zones roses, vertes, et grises indiquant, respectivement, une diminution du coefficient de rétrodiffusion (neige humide), une augmentation du coefficient (présence possible de dépôts d'avalanche) et une absence de changement (pas de modification physique de la zone) (Ulaby et al. (1986); Wiesmann et al. (2001); Wesselink (2015)).

On peut citer la première détection manuelle de débris d'avalanche par Wiesmann et al. (2001), qui a utilisé 3 images SAR pour former une image RGB. Les études de Buhler et al. (2014); Eckerstorfer & Malnes (2015) sont des exemples de travaux ayant utilisé des méthodes basées sur la détection de changement de rétrodiffusion entre l'image de référence et l'image d'activité.

Dans l'étude de Tompkin & Leinss (2021), des images composites multi-orbitales ont été créées. Des images provenant de différentes orbites et polarisations ont été combinées en utilisant un filtre pour éliminer le bruit et minimiser les zones d'ombres et de repliements. Cela a induit une meilleure visibilité.

La détection automatique a l'avantage de conférer un gain de temps par rapport aux méthodes de détections manuelles. Une méthode automatique de détection basée sur l'algorithme de Vickers et al. (2017), a été utilisée par Eckerstorfer et al. (2019, 2022). Une méthode de classification non supervisée, la méthode des k-means a été utilisée pour cela. En comparant la méthode automatique avec les observations terrains et la méthode manuelle, les probabilités de détections étaient respectivement de 57 et 79 %. Depuis l'hiver 2020-2021, cette même méthode est utilisée par les prévisionnistes afin de visualiser des cartes de dépôts d'avalanche détectées par satellite en Norvège (Eckerstorfer et al. (2020)).

En France, au sein du centre de recherche du CEN a été développée une méthode de détection du changement par Karbou et al. (2018). Celle-ci se base sur le calcul du ratio de coefficient de rétrodiffusion avec une valeur seuil de 4 dB pour la détection de débris d'avalanche. La comparaison se fait entre le coefficient de rétrodiffusion d'une image d'activité et une image de référence prise en été.

Afin de minimiser les effets de distorsions géométriques, il est possible de combiner les orbites ascendantes et descendantes avec la pondération de résolution locale

(LWR, [Small \(2012\)](#); [Tompkin & Leinss \(2021\)](#)). Ainsi, [Hafner et al. \(2021\)](#) a utilisé une étape de traitement SAR pour cartographier les zones associées à une forte hausse du signal SAR à l'aide d'images LWR. [Tompkin & Leinss \(2021\)](#) a démontré la précision plus grande de la segmentation par seuil fixe sur images LWR par rapport à des images à orbite unique ou à orbites moyennes pondérées. La méthode LWR permet de prendre en compte davantage les angles d'incidence larges que les faibles angles d'incidence. Le but est d'augmenter la visibilité des dépôts d'avalanches.

Une autre composante importante pour la détection de dépôts avalancheux est le choix des satellites utilisés. Sentinel-1 est accessible gratuitement, tandis que certaines données satellitaires ne peuvent fournir une couverture systématique et sont payantes. C'est le cas de TerraSAR-X dont les données peuvent être obtenues uniquement sur demande. [Leinss et al. \(2020\)](#) a obtenu un score plus élevé de détection par TerraSAR-X que par Sentinel-1. Cela peut être due à la résolution plus importante de TerraSAR-X par rapport à Sentinel-1. En effet, les petites avalanches ne peuvent pas être détectées par Sentinel-1 car les pixels sont alors de 20 m de résolution ([Leinss et al. \(2020\)](#); [Hafner et al. \(2021\)](#)). [Hafner et al. \(2021\)](#) a démontré le potentiel de Sentinel-1 à détecter des avalanches de taille large et a obtenu une probabilité de détection de 27 %.

La détection d'avalanches permet principalement de détecter des dépôts d'avalanche. Cela a été démontré par [Hafner et al. \(2021\)](#). Dans son étude, 75 % des avalanches détectées ont permis de localiser la zone de dépôts de l'avalanche, tandis que 52 % des zones détectées ont cartographié les parties de la trajectoire de l'avalanche, et 35 % la zone de départ. Ainsi, on nomme souvent la détection d'avalanches, la détection de dépôts d'avalanches. On retrouve également dans la bibliographie concernant la télédétection par SAR de dépôts d'avalanches, la notion de détection de débris d'avalanche (avalanche debris and avalanche deposits). C'est pour cela que dans ce manuscrit et dans les études présentées on utilise ces deux termes. Cependant, il est important de ne pas oublier les cas possibles de détection de zones de départ et d'écoulement d'avalanche par SAR.

La figure 1.12 permet de visualiser sous forme de synthèse les différentes méthodes de détection développées. On présente ces méthodes en fonction du nombre d'images SAR et des méthodes manuelles et automatiques utilisées.

1.5.3 La mission Sentinel-1

Les applications et missions de Sentinel-1

La mission Sentinel-1 est une constellation de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), un duo de satellites composé de Sentinel-1A et 1B, que nous avons utilisés au cours de nos études. La mission Sentinel-1 a pour but de soutenir les applications opérationnelles dans les domaines de la surveillance marine, des terres et des services d'urgence, dans le cadre du programme Copernicus de la Commission Européenne (CE). Sentinel-1A et 1B ont été lancés respectivement en avril 2014 et 2016. Les satellites Sentinel-1A et 1B ont un temps de revisite de 6 jours dans les Alpes. Comme nous le montre la figure 1.13, les deux satellites orbitent autour de la Terre sur le même plan orbital, à 180° d'intervalle.

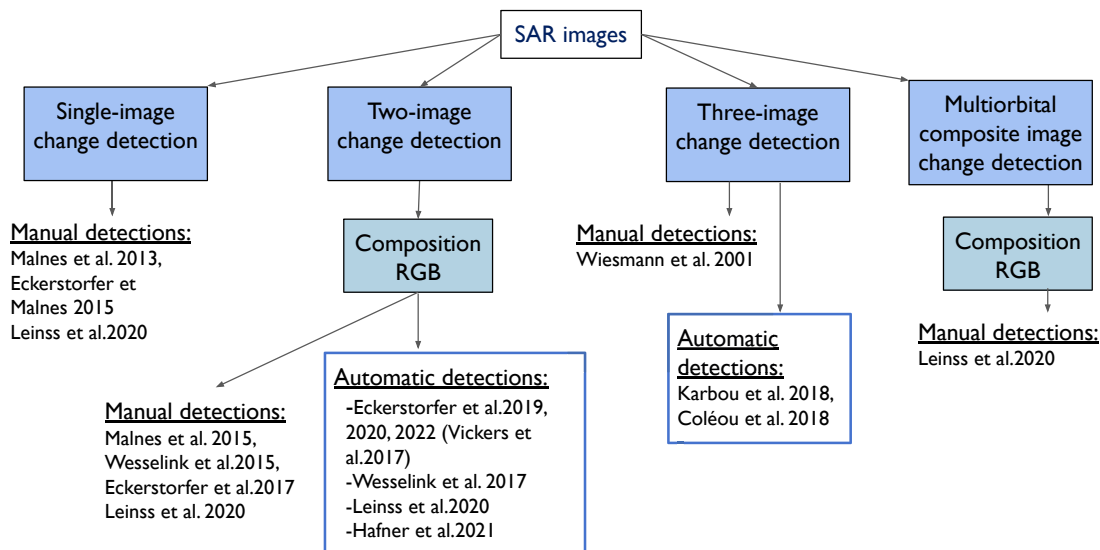


FIGURE 1.12 – Synthèse des méthodes développées de détection de dépôts d'avalanche.

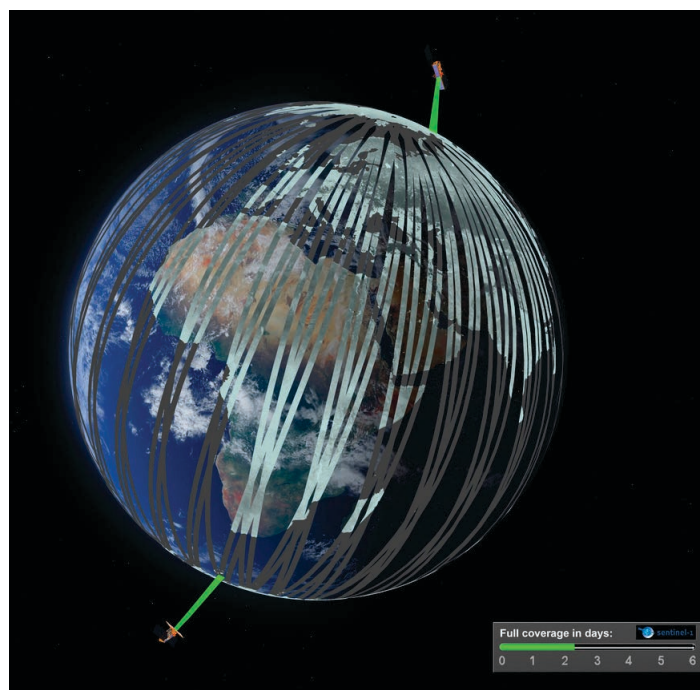


FIGURE 1.13 – Illustration des passages du duo de satellites Sentinel-1A et B (source : ESA).

Chaque satellite détient deux orbites, l'orbite ascendante et l'orbite descendante. Les orbites ascendantes et descendantes permettent, par complémentarité, de couvrir l'ensemble des Alpes. Dans la figure 1.14, les couvertures des orbites ascendantes, A88 (en jaune) et A161 (en bleu), et descendantes, D139 (en rouge) et D66 (en vert), sont présentées et couvrent convenablement toutes les Alpes Françaises. A bord de ces deux satellites, un instrument de Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)

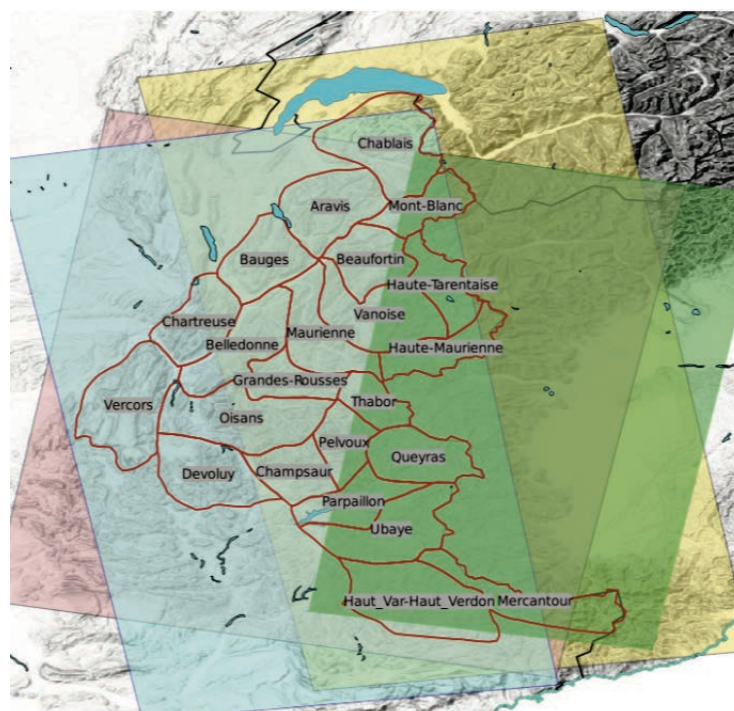


FIGURE 1.14 – Présentation des orbites ascendantes et descendantes du Sentinel-1 couvrant les Alpes, source : [Karbou et al. \(2018\)](#)

en bande C à 5.405 GHz permet d'obtenir des images à une résolution spatiale de 20 m. Celui-ci joue un rôle considérable dans l'acquisition de données par tous temps. En effet, le radar est dit 'actif' car il possède sa propre source d'énergie et ne dépend pas du rayonnement du soleil. De plus, ce radar est peu sensible aux nuages.

1.5.4 Propriétés du Radar à Synthèse d'Ouverture (SAR)

Les instruments SAR émettent et réceptionnent des ondes électromagnétiques dans le domaine des micro-ondes. Les ondes qui vont interagir avec la cible peuvent ensuite être rétrodiffusées et renvoyées aux capteurs SAR. C'est par cette différence entre le signal émis et reçu, par l'effet de la rétrodiffusion, que l'on peut observer indirectement les propriétés de la neige et du sol sous-jacent ([Longépé \(2009\)](#)). Les polarisations utilisées au cours de cette étude sont les polarisations VV et VH (H pour horizontale et V pour verticale).

Il existe différents modes d'acquisition du Sentinel-1 en fonction des observations et domaines d'application. Dans le cas d'études de surfaces continentales, le mode Interferometric Wide Swath (IW) est utilisé. Les études réalisées au cours de cette thèse portent sur ce mode d'acquisition ainsi que sur le produit Level-1 Ground Range Detected (GRD) qui a comme avantage d'être pré-traité par rapport aux produits bruts. Cela permet de limiter le chatoiement connu en anglais sous le nom de speckle et dégradant la lisibilité des images. Ce terme est défini dans la partie qui suit. L'amplitude du signal, liée à la quantité d'énergie rétrodiffusée qui dépend des propriétés de la surface, est conservée. D'autre part, les produits GRD sont projetés en projection ellipsoïdale terrestre WGS84 et corrigés.

Distorsions géométriques et chatoiemement

Les produits Level-1 GRD doivent être pré-traités pour différentes raisons. Le chatoiemement et les distorsions géométriques sont inhérents à l'imagerie SAR.

Le chatoiemement est défini comme un bruit aléatoire et multiplicatif. En effet, la sommation cohérente de signaux rétrodiffusés par différentes cibles génère une difficulté d'interprétation.

Par ailleurs, le traitement des observations en montagne est complexe en raison de l'hétérogénéité du terrain qui induit des distorsions géométriques tels que les zones d'ombre (shadow), raccourcissement (foreshortening) et repliement (layover). Les zones d'ombres sont présentes en montagne du fait de la présence de nombreuses pentes. Ces zones ne sont pas visibles par le radar car cachées par la pente. Les raccourcissements définissent les cas où il y a un effet de compression des distances au sein de l'image SAR dû à la pente du terrain qui est inférieure à l'angle d'incidence de l'onde. Par exemple, le sommet de la montagne peut paraître plus rapproché du capteur SAR par rapport à sa base. Enfin, les effets de repliements sont générés lorsque la pente du terrain est largement supérieure à l'angle d'incidence (Veyssière (2019); Wu et al. (2021)).

Acquisition et pré-traitements des mesures SAR par le CNES

Les données acquises par le satellite sont téléchargées gratuitement via le site de l'ESA (<http://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>). Cependant, afin de réduire l'impact des distorsions géométriques et chatoiemement, les données subissent un prétraitement. Au cours de nos études, ce prétraitement a été permis grâce à l'outil nommé 'S1tiling', développé par le service radar du CNES, en collaboration avec le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) (<https://github.com/CNES/S1Tiling>). Les données pré-traitées sont ensuite calibrées, orthorectifiées et filtrées. La librairie de traitement d'images satellites Orfeo Toolbox permet l'orthorectification des images.

1.5.5 Limites actuelles de la télédétection d'avalanche

Complexité de l'interaction du signal SAR avec un manteau neigeux en montagne

L'interaction du signal SAR avec le manteau neigeux en montagne est complexe de part l'hétérogénéité du terrain de montagne (pentes, altitudes, type de terrain) mais aussi des variations importantes des conditions météorologiques selon les pentes et les altitudes.

Au cours de ma dernière année d'Ecole Ingénieure, j'ai eu la chance de réaliser mon stage de master M2 au sein du CEN et de travailler dans le but d'une meilleure compréhension de la variation du signal SAR pour différents types de terrain et cas avalancheux répertoriés.

Nous avons défini deux échantillons par types de terrains, chacun de taille d'environ 16 pixels, au sein du massif de la Haute Maurienne (Alpes du Nord), pour la saison hivernale 2017-2018. Cet hiver a été particulièrement remarquable par ses précipitations abondantes et l'enneigement important (Goetz (2018)). A titre d'exemple,

une avalanche a eu lieu le 8 Janvier 2018 et a enseveli la route reliant Bessans et Bonneval-sur-Arc (Haute-Maurienne) sous plusieurs mètres de neige provoquant ainsi de lourds dégâts. Les différents types de terrains étudiés étaient : les lacs, glaciers et neiges éternelles, forêts de conifères, forêts de feuillus, roches nues, prairies et systèmes culturels et parcellaires complexes.

Les échantillons ont présenté des signaux aux variations temporelles et spatiales bien différentes. L'interprétation de ces signaux a été très complexe. Certains ont semblé être assez stables dans le temps (lacs) mais subir des chutes plus ou moins brusque en rétrodiffusion en fin avril ou mai (glaciers et neiges éternelles et roches nues). En 2022, Louis Rey, au cours de son stage de M2, a pu poursuivre l'étude de la variation du signal SAR ainsi que la télédétection de lacs glaciaires.

Certains signaux d'échantillons localisés en zone de forêts denses de feuillus et conifères ont eu des fluctuations légères, par forme de vague, de 2 dB tous les 6 jours. D'autres signaux, tels que ceux des échantillons placés en terrains agricoles, zones de prairies et systèmes culturels, ont présenté des fluctuations un peu plus voir beaucoup plus importantes.

Par la suite, la variation de signaux d'échantillons placés dans des zones où il y a eu des cas avalancheux répertoriés a été étudiée. L'étude qualitative de toutes les différentes séries temporelles nous a permis de valider le choix d'un seuil de 4 dB pour la détection de dépôts d'avalanche. De plus, cela nous a démontré la complexité de l'analyse des données SAR en zone montagneuse (influence de la végétation, l'altitude, la pente et l'orientation).

Limites des méthodes de détection d'avalanche

Un projet lancé par l'ESA, "Improved Alpine Avalanche Forecast Service" (IAFF), a permis d'identifier des problématiques présentant un manque d'information pour les services de gestion du risque avalancheux et les pratiquants de la montagne, notamment les informations sur la couverture neigeuse, l'état et la stabilité du manteau neigeux. Le but de cette étude a été d'étudier les technologies existantes afin de remédier aux différentes problématiques sur le manque d'information concernant les événements avalancheux. Un intérêt particulier a été porté aux techniques basées sur le radar qui ont le potentiel de fonctionner indépendamment de la lumière du jour et des conditions météorologiques. Les mesures SAR ont été identifiées comme une des solutions à ces manques de connaissance, notamment par une acquisition possible quelles que soient les conditions météorologiques, la disponibilité et la gratuité des données (Buhler et al. (2014)).

Il y a des limites à la méthode de détection de changement puisque son hypothèse de base est l'absence de changements majeurs, en dehors des zones de dépôt, entre les images SAR. En réalité, plusieurs événements peuvent avoir lieu en l'espace de 6 jours comme le redoux, les chutes de neige, de pluie, le vent, etc. D'autre part, les avalanches de petite taille ne sont pas détectées par le radar du Sentinel-1 (Leinss et al. (2020); Hafner et al. (2021)).

Tout comme nous le résume la synthèse de Eckerstorfer et al. (2022), différentes

probabilités de détection sont obtenues selon les méthodes appliquées, les conditions météorologiques, les sites et périodes d'études choisies. La détection d'avalanche de neige sèche est difficile par bande C du SAR qui est sensible à l'eau. Une probabilité de 11.9 % a été obtenue par Eckerstorfer et al. (2022) pour des cas d'avalanche de neige sèche, tandis que pour le cas d'avalanche de neige humide 81.3 % des avalanches ont été détectées en comparaison des observations terrains (Eckerstorfer et al. (2019)). Il y a une limite à la détection de neige sèche due aux propriétés intrinsèques du SAR à bande C, qui possède une sensibilité à l'eau importante (voir la partie 1.5.1).

La variabilité des scores de détections obtenues d'une étude à une autre s'explique par le choix sélectif de la zone et période d'études (Eckerstorfer et al. (2022)). On peut citer à titre d'exemple les études de Eckerstorfer et al. (2017); Wesselink et al. (2017); Abermann et al. (2019); Buhler et al. (2019); Sinha et al. (2019); Leinss et al. (2020); Tompkin & Leinss (2021) qui ont choisi des périodes d'études liées à des moments de forte activité avalancheuse.

Hafner et al. (2021) a pu démontrer que la détection par satellites Sentinel-1 est souvent partielle. Différents petits groupes détectés peuvent correspondre à une seule et même avalanche. Cela peut rendre complexe l'attribution des groupes en événements avalancheux.

Ces différentes limites sont à prendre en compte dans les études menées au cours de cette thèse.

Chapitre 2

Développement d'une méthode originale et automatique de détection de dépôts d'avalanche par exploitation de mesures SAR du Sentinel-1

Ce chapitre porte sur l'étude de développement d'une méthode novatrice permettant de détecter automatiquement les zones de débris d'avalanche de neige en utilisant une technique de segmentation de l'espace des couleurs appliquée aux séries chronologiques d'images SAR (Karas et al. (2021)) (article publié). La détection des zones de débris se fait avec certaines hypothèses sur le signal radar et en sélectionnant des images de références auxquelles les images d'hiver sont comparées.

Notre méthode a été évaluée en tenant compte des caractéristiques du terrain et en faisant varier les images de références. La pertinence des détections a été étudiée sur de larges secteurs en Suisse disposant de relevés de 4 000 couloirs avalancheux identifiés sur une image optique de haute résolution (SPOT-6). Nous avons montré que, dans notre zone d'étude, la quasi-totalité des avalanches enregistrées dans la base de données SPOT sont détectées par notre méthode sur le mois de janvier 2018. Les avalanches de petites tailles n'ont pas été détectées par les images SAR et, selon l'orientation du terrain, certaines avalanches n'ont pas été détectées soit par l'orbite ascendante soit par l'orbite descendante (ce qui était attendu compte tenu de la présence de zones de distorsions géométriques variables selon le sens de l'orbite). Les résultats de détection ont été variables selon l'image de référence choisie. Une méthode de filtrage des détections par méthode d'apprentissage a également été testée dans cet article.

Ce travail ouvre la voie vers une exploitation des images de Sentinel-1 pour le suivi de l'activité avalancheuse dans les massifs français.

Automatic Color Detection-Based Method Applied to Sentinel-1 SAR Images for Snow Avalanche Debris Monitoring

Anna Karas, Fatima Karbou, Sophie Giffard-Roisin, Philippe Durand, Nicolas Eckert

Abstract—In this study, we develop a novel method to automatically detect areas of snow avalanche debris using a color space segmentation technique applied to SAR image time series through January 2018 in the Swiss Alps. Debris avalanche zones are detected assuming that these areas are characterised by a significant and localised increase in SAR signal relative to the surrounding environment. We undertake a sensitivity study by calculating debris products by varying the D-M reference images (a stable reference image taken several weeks before the event). We examine the results according to the direction of the orbit, the characteristics of the terrain (slope, altitude, orientation) and also by evaluating the relevance of the detection with the help of an independent SPOT database ([1]) including 18,737 avalanche events. Small avalanches are not detected by SAR images and depending on the orientation of the terrain some avalanches are not detected by either the ascending or the descending orbit. The detection results vary with the reference image; best detection results are obtained with some selected individual dates with almost 70 % of verified avalanche events using the ascending orbit.

Index Terms—Automatic detection, Color space, Random Forest, SAR, Sentinel-1, Segmentation, Snow Avalanche

I. INTRODUCTION

SNOW avalanches represent a serious hazard in the mountains, with direct consequences on human lives and considerable damage to the dwellings and infrastructure of the communities concerned. Large-scale and regular avalanche monitoring is essential for the needs of snowpack stability evaluation and avalanche forecasting. Field monitoring of snow avalanches is generally fairly sparse and limited in time and space. This is particularly true for areas that are difficult to access. It should also be noted that periods of high danger level of avalanches are often associated with very bad weather conditions, which further limits field observations.

By contrast, with satellite based remote sensing observations, it is becoming increasingly conceivable to carry out reliable and regular monitoring of areas affected by snow avalanche debris ([2]).

Optical images from both aircraft and satellites have been used to map avalanche events with high and very high spatial

resolution, but these images require generally cloud-free conditions and can be used over some specific target territories ([3], [4], [5], among others). [5] presented an automatic method of texture classification on very high resolution optical imagery. A lot of studies are based on object-based image analysis. [3] used object-based classification and combined directional, textural and spectral information. [4] generated avalanche maps with an object-oriented image interpretation approach (segmentation and classification) within very high resolution panchromatic optical imagery. [6] developed an automatic object-based approach to detect avalanche deposits on near-infrared images. More recently, [1] performed a systematic avalanche mapping on one SPOT6 image over the entire Swiss Alps. 18,737 avalanche events were mapped during the extreme avalanche period of January 2018. The description of the generation of this SPOT6 database is presented by [7]. [8] confirmed the high potential of SPOT6-7 images in mapping avalanche outlines by using ground truth validation points. They studied two avalanche activity periods in 2018 and 2019, in a 180 km² area around Davos, and found: a Probability of Detection of 74 % (POD, events correctly detected by a human on the satellite data) and a Positive Predictive Value (percentage of identified events by manual detection that were an avalanche event) of 88 %.

While the use of optical data is limited by cloud cover, which should be as low as possible, usable data from radar satellites are independent of illumination and weather conditions ([9], [10]). Moreover, optical remote sensing imagery can be expensive and only available on request for specific areas, as is the case of optical SPOT6-7 ([8]). Sentinel-2 is free of charge, but [8] found it not suitable for avalanche mapping. The use of Synthetic Aperture Radar (SAR) is increasingly used in avalanche detections to obtain a continuity of observations. Sentinel-1 is publicly available while some satellite data cannot provide systematic coverage but only upon request for scientists such as TerraSAR-X. The first SAR avalanche detections were undertaken by [10] using ERS-1 and ERS-2 C-band SAR data. A change detection method was used to identify high backscatter coefficient in multi-temporal SAR images. The main idea behind the detection of debris by SAR imagery is that snow avalanche debris exhibit a higher localised radar backscatter compared to the surrounding snow due to increased surface roughness and increased snow depth at the avalanche site ([11], [9]). [10] used three images for the RGB composite image, the multi-temporal combination of SAR images: one image taken one month before the event (in

A. Karas, F. Karbou are with Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France (Corresponding author: anna.karas@meteo.fr).

S. Giffard-Roisin is with ISTerre; Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, IFSTTAR Grenoble, France

Ph. Durand is with CNES, Toulouse, France.

N. Eckert is with UR ETNA, INRAE, Université Grenoble Alpes, France.

the R channel), during the avalanche activity period (in the G channel) and one without snow (end of September, in the B channel). Thus, the local backscatter increase can be seen in green in a RGB composite image.

First studies on SAR avalanche detection often considered one radar image acquired after the event or two images, one before and one taken after the event as a difference image ([12], [9], [13], among others). We can also note that most of the studies, that used change detection methods applied to a series of SAR images, masked complex areas for the detection (layover, forest, etc.) ([14], [15], [16]). With single backscatter images, the detection was based on enhancement methods to improve the backscatter contrast between avalanche deposits and the surrounding snow ([12], [17], [9]). By using two SAR images, the detection method was based on a backscatter change between the reference image (taken few days before the event) and the activity image (taken just after the event) ([13], [9], [16]). Different SAR satellites were used. [13] showed that TerraSAR-X could be a reliable tool to manually map avalanches. [17] demonstrated that manual avalanche detection can be undertaken using Radarsat2 measurements. [2] later showed successful results using manual avalanche detection on Sentinel-1 images. More recently, [16] compared field recordings with manual detections and obtained a Probability of Detection of 77.3 % using Sentinel-1 SAR imagery.

However, manual mapping is time-consuming which supports the development of automatic detection methods. [18] tested an automatic detection method by combining a change detection approach with a K-means classification method. They have shown satisfactory detection rates when the method was applied under typical operational monitoring circumstances. This method was also used by [15], based on a backscatter change within a 6-days period on Sentinel-1 images. [16] developed a near-real time automatic avalanche monitoring system that was first applied pre-operationally on three regions in Norway by the Norwegian Avalanche Warning service, also using Sentinel-1 SAR imagery. From winter 2020-2021, it is daily used in all Norwegian forecasting regions ([19]). Thus, forecasters can produce feedback on avalanche risk. [16] compared this automatic method to field observations and manual detection: the POD were 57 % and 79 %, respectively.

[20] compared avalanche mapping with optical and SAR images: radar Sentinel-1 with TerraSAR-X and optical SPOT6-7 images. The comparison of detection methods was also made: single image avalanche detection, two-image composite avalanche detection, multi-orbital composite image (one RGB composite image made of a combination of 12 images taken before the avalanche activity period and 12 images taken after the events) and automatic avalanche detection. [20] found that change detection is more sensitive than single avalanche detection. The change detection with TerraSAR-X images detected more avalanche events than with the Sentinel-1 (small avalanches were missed due to the lower resolution of Sentinel-1 compared to TerraSAR-X). [8] used similar pre-processing steps of [20] and compared the reliability of avalanche detections of: SPOT-6, Sentinel-1 and optical Sentinel-2 images. [20] and [8] studies found that Sentinel-

1 is effective in mapping avalanches (significant spatial and temporal coverage) despite the fact that these observations do not help to detect avalanches of small and medium sizes. [8] obtained a POD of 0.27 using Sentinel-1 manual mapping. The authors found a lower POD than for the SPOT mapping because of the majority of medium and large size avalanches.

To minimise the effects of geometric distortions, [21] suggests merging the ascending and descending orbits with the local resolution weighting (LRW). This is based on applying a weighted average according to incidence angles to merge acquisitions from different orbits. In the study of [20], the authors showed that the use of LRW improves avalanche visibility by weighting the slopes opposite the radar more strongly. [8] used similar SAR processing steps and used pre and post avalanche event LRW image differences to map areas associated with an increase in the SAR backscatter signal. [22] proved that a segmentation with a fixed threshold was more accurate on LRW images ($F1 = 0.75$) than on unweighted average orbits ($F1 = 0.68$) and on single orbit images ($F1 = 0.5$).

The change detection method using three different SAR images was recently used to manually detect avalanche debris in the French Alps. In the study of [23], time series of Sentinel-1 images were studied. [23] investigated the possibility to synthesise and visualise the detected avalanche activity at a regional scale (e.g. 500 km²) by aggregating the detected avalanche activity according to some terrain characteristics (elevation, slope, orientation).

Recent studies also evaluated the potential of machine learning approaches such as Random Forests and Convolutional Neural Networks using Sentinel-1 imagery. In the work of [24], [25] and [26], a binary classification of avalanches was realised. [25] and [27] were mostly based on manual interpretation, whereas in [26], an independent avalanche inventory was used. This last study explored the question of the potential of deep learning methods which could help improve the detection of avalanche debris. More recently, [22] trained and tested a deep neural U-Net using manual mapped avalanches outlines and obtained a high detection score ($F1 = 0.81$). Random Forest is a machine learning approach and is very effective in classification ([28]). The results of [29] are promising to automatically detect and map snow avalanches. [30] used Random Forest to classify and predict avalanche activity in the French Alps by taking into account snow and meteorological conditions. Random Forest was already used in various and multiple applications and is especially well suited for limited data size : it does not overfit, it is fast and also robust with respect to noise ([28]).

Although the potential of Sentinel-1 SAR data is promising for snow avalanche mapping, their exploitation still raises significant scientific challenges. Meteorological conditions can impact the snow pack (wind, change in temperature, precipitation, etc.) and the heterogeneity of mountainous terrain makes it all the more difficult to study the SAR signal and its interaction with the snow cover. Moreover, the side-looking radar and the complex mountainous terrain cause geometric distortions in the radar image like foreshortening, layover and shadows. In-situ observation datasets are limited by the terrain

accessibility and are realised punctually for specific avalanche paths.

In this work, a new automatic debris detection method is evaluated using part of the [1] as a validation database. [1] mapped a large number of avalanche outlines using high resolution observations from SPOT6 images. It was found that some avalanche deposits, mainly the large ones, can remain visible several days after an avalanche event [7]. Our detection method is based on "light green color" detections in a multi-date SAR image composite in the HSV (Hue Saturation Value) color space. In order to better account for the contribution of snow-free surfaces to SAR signal, we look at the detection results when using different reference images. An automatic classification is applied after a study of the variability of the SAR signal. Our goal is to better understand SAR signal variations during the winter season for different types of land cover and prepare our automatic method of detection. The results of detection are then evaluated against snow avalanche events from the SPOT database of [1]. We also discuss the potential of a Random Forest filtering to reduce false detections. Data and methods used in this study are described in the first Section. In the second Section, we study SAR signal variations in some locations of our test areas. In Section 3, we introduce the color based detection method. The results and evaluations with the SPOT reference are presented in Section 4. Section 5 is the Discussion section and the last section provides conclusions.

II. STUDY CONTEXT, DATA AND METHOD

A. Study Context and Data

The area under investigation is located in the Swiss Alps, as shown on Fig.1. It is covered by one Sentinel-1 tile, the 32TLS zone. The study area, with, approximately, a surface of 3'800 km², includes Lower Valais and the southern part of the cantons Vaud and Bern. This area was studied in the work of [7]. Almost 4,000 avalanches were mapped in the 32TLS zone after a period of very high avalanche activity (preceded by several avalanche periods) in January 2018.

We used backscatter coefficients at C-band from SAR observations of Sentinel-1 (noted S1 hereafter). Sentinel-1 mission consists in a constellation of two satellites, Sentinel-1A and Sentinel-1B, which were launched in April 2014 and April 2016, respectively, by the European Space Agency (ESA) within the Copernicus Programme. S1 has a side-looking imaging geometry, so that images are subject to geometry-induced radiometric distortions (shadow, layover and foreshortening effects). We relied on the French Space Agency, CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), computing facilities to pre-process S1 data. The pre-processing included thermal noise removal, speckle filtering using the multi-temporal filtering of [31], radiometric calibration and terrain correction using the SRTM digital elevation model at 30 m. SAR images are obtained for tiles of 110*110 km². S1 data are accessible on the PEPS platform. The flowchart of this pre-processing is shown on Fig.A.1.

S1 SAR imagery is not limited by weather conditions ([13], [2]). With two satellites and considering the same incidence

TABLE I
Acquired Sentinel-1 data, with the descending orbit (DES, around 05:43) and ascending orbit (ASC, around 17:22, time UTC).

Satellite	Orbit	Date
S1A	139 - DES	2018-01-03
S1B	088 - ASC	2018-01-05
S1B	139 - DES	2018-01-09
S1A	088 - ASC	2018-01-11
S1A	139 - DES	2018-01-15
S1B	088 - ASC	2018-01-17
S1B	139 - DES	2018-01-21
S1A	088 - ASC	2018-01-23
S1A	139 - DES	2018-01-27
S1B	088 - ASC	2018-01-29

angle, the revisit frequency is 6 days for each orbit for central Europe. The image acquisition of the descending orbit (D139) is two days ahead of the ascending orbit (A088). There were several high avalanche activity periods in January 2018. To take into account the large areas of SAR geometric distortions not usable for the detection and the differences in dates and times of observation between S1 and SPOT6, we considered the whole month of January for the avalanche detection. Indeed, some deposits from large avalanches released before the period of the 21-23 January were visible several days after the events on the SPOT6 image of the 24 January ([7]). We used all acquisition images of this month with a total of 10 images. Information on these images are introduced on Table I.

In addition, more SAR data was used for selecting the best reference image (here we consider the whole SAR image time serie from early August 2017 to end of December 2017 with a total of 60 SAR images). We mainly focused on SAR backscatter at VH polarisation. We used the Interferometric Wide Swath (IW) acquisition mode and Level-1 Ground Range Detected (GRD) products.

SPOT mapped avalanches are a great support to evaluate our methods over a rather large area during the exceptional avalanche period of January 2018 in the Alps. As mentioned in Section I, [8] have shown the high potential of SPOT for avalanche mapping using validation points from ground truth (POD = 0.74). The SPOT mapped avalanches cover the majority of the Swiss Alps (surface of 12'500 km²) [1]. However, this data set is not exhaustive, some avalanches could not have been mapped because of the visibility and weather conditions but it represents quite well the last avalanche activity of the month of January 2018 (noted SPOT data hereafter).

Using the winter reports and avalanche bulletins made by the WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, we report some of the meteorological context and danger level of January 2018 for the study zone on Fig.3. In this figure, a timeline of acquisition dates of the SAR and SPOT images is also given. Exceptional quantities of snowfall were measured. In 25 days, at high elevations (above 2'000 m), there was 2,5 to 5 m of snow. Hence, over a large part of the study

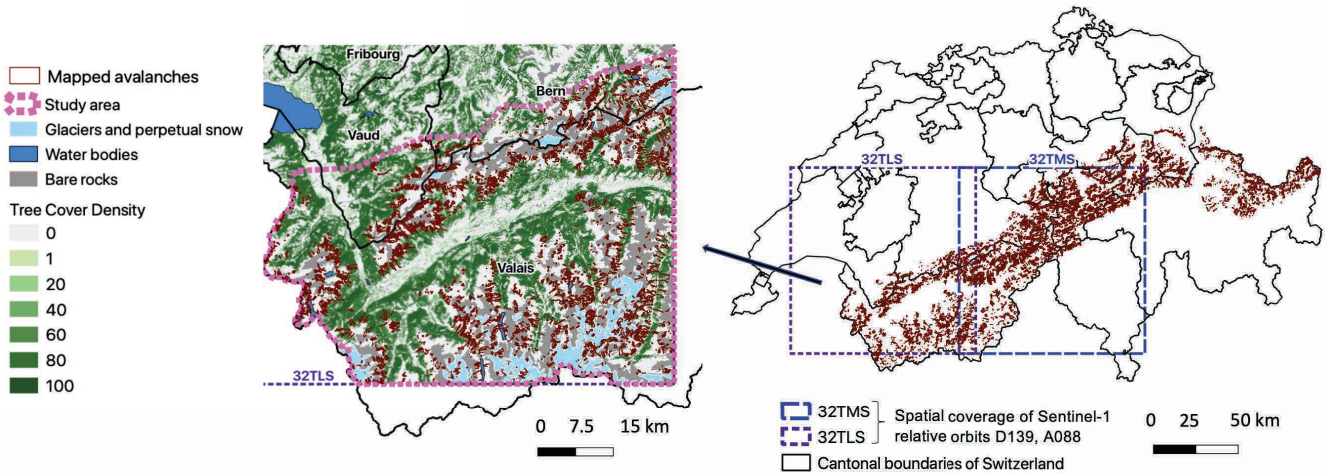


Fig. 1. Location of the study area and the mapped avalanches in the work of [7] and a zoom in of the study area. We use the cantonal boundaries of Switzerland (swissBOUNDARIES3D), the Tree Cover Density layer and the CORINE Land Cover layer (Copernicus Land Cover Services).

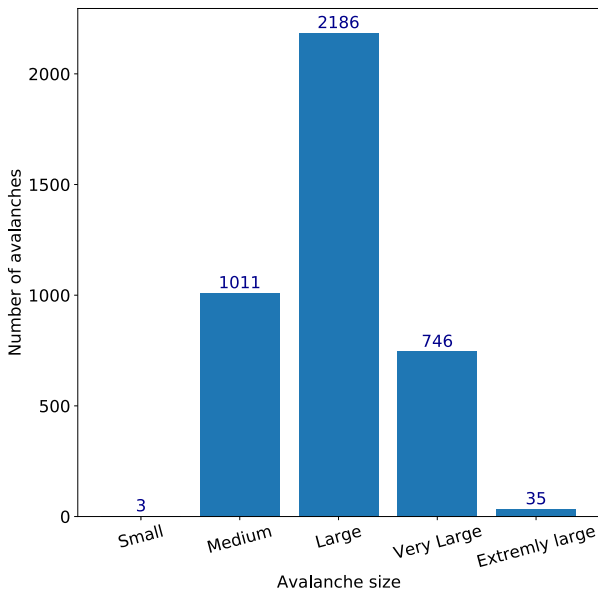


Fig. 2. SPOT mapped avalanches size distributions in the study area.

area, high danger level (level 4) was frequent. The highest danger level occurred on the 22nd of January (level 5). January was also a month incredibly mild with heavy snowfall at high elevation and abundant precipitation at low elevation. Valais was the most impacted zone and many large to extremely large avalanches were reported. The majority of the SPOT mapped avalanches in this area are of large size as shown on Fig.2. Several periods of stormy weather characterised by winds of strong velocity to storm force and heavy to intensive snowfall occurred in January 2018. Numerous snowfall and strong winds predominantly from the West generated large snow accumulations on slopes exposed to the East. Mapped avalanches are mainly located on southeast, east- and south-

facing slopes over our study area.

B. Automatic Avalanche debris using color detection

Fig.4a shows a SAR RGB (Red, Green, Blue) composite image using three SAR acquisitions. In R, G, they are two successive SAR acquisitions and the image in B channel is a reference image without snow (R: 20180121, G: 20180127 and B: mean SAR image (average of the images of August and September 2017)). In case of avalanche events, the SAR image after the event will show a localised increase in the backscatter with respect to the acquired image six days earlier. An increase in backscatter appears green, while a decrease in backscatter appears in magenta and areas of no temporal change appear in grey.

The avalanche features, visible in the debris image in Fig.4b, appear as bright green features in the RGB image, which indicates an increase in backscatter with respect to the reference images. These are the kind of characteristics that we wish to detect automatically, without any prior knowledge of the area where the debris might be located. Obviously, a localised increase in the SAR signal can be due to many other reasons besides avalanches. Nevertheless, the signal increase can be considered as a proxy to target areas potentially affected by avalanche debris. The main idea of our approach is therefore to correctly detect areas of bright green, which is equivalent to segmentation in the color space.

To achieve this, we developed a novel method to detect areas of debris using a color space segmentation technique applied on three SAR images acquired at different dates:

- R: the D minus 6 days image (noted D-6 hereafter);
- G: the activity image (at day D);
- B: the stable reference image taken several weeks before the event (noted D-M hereafter).

Color based detection methods are widely used in many applications, such as computer graphics, image processing,

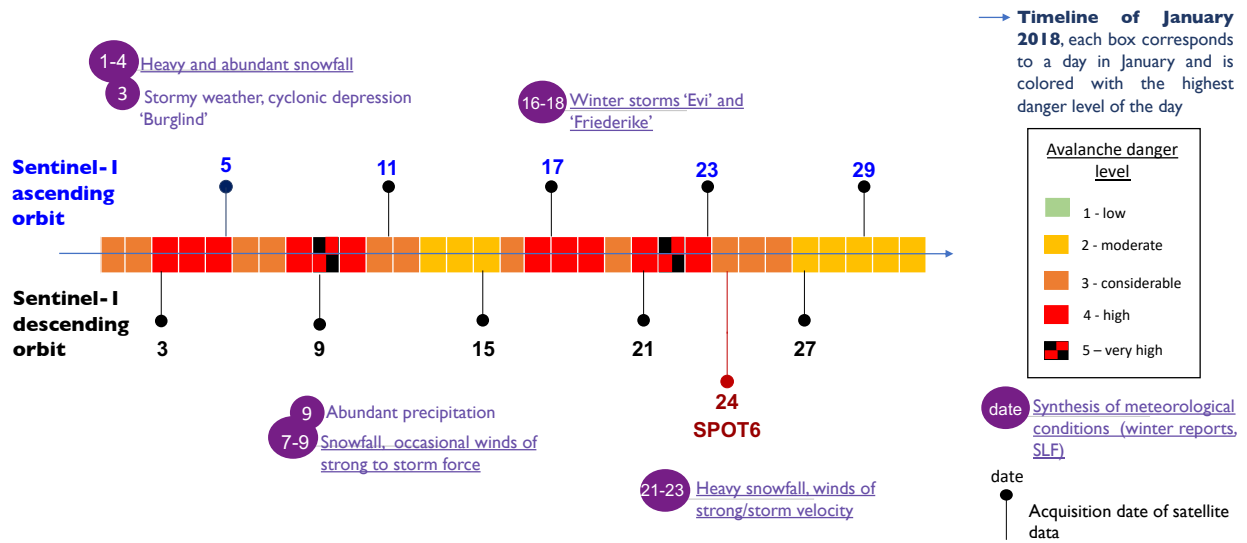


Fig. 3. Synthesis of meteorological conditions, danger level and timeline of the acquisition dates of Sentinel-1 and SPOT6 during January 2018.

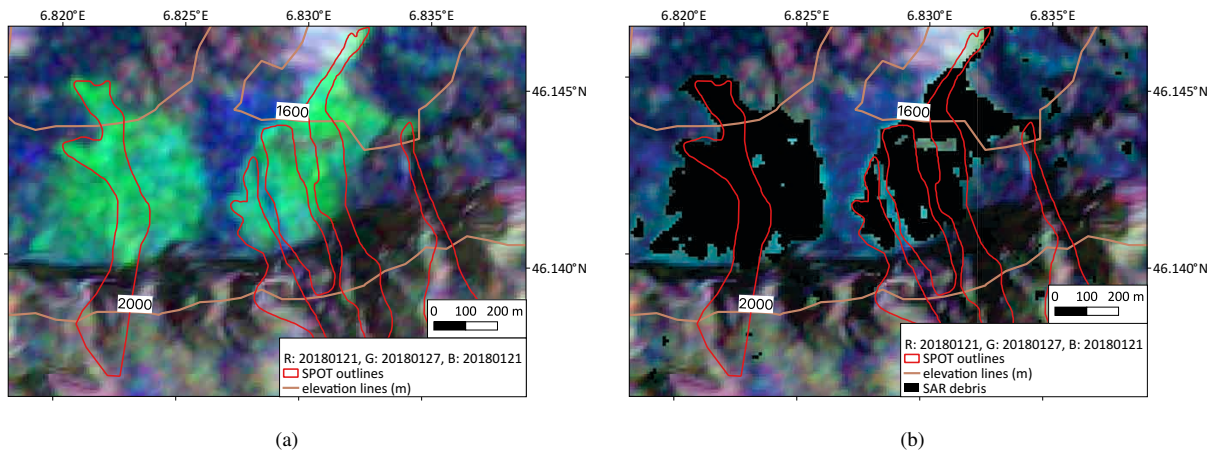


Fig. 4. Results of the color detection on 4b and RGB composite image on 4a, using R: 20180121, G: 20180127, B: mean summer (average of the images of August and September 2017). We used an adaptive threshold to focus on interesting areas (by using the color space segmentation approach).

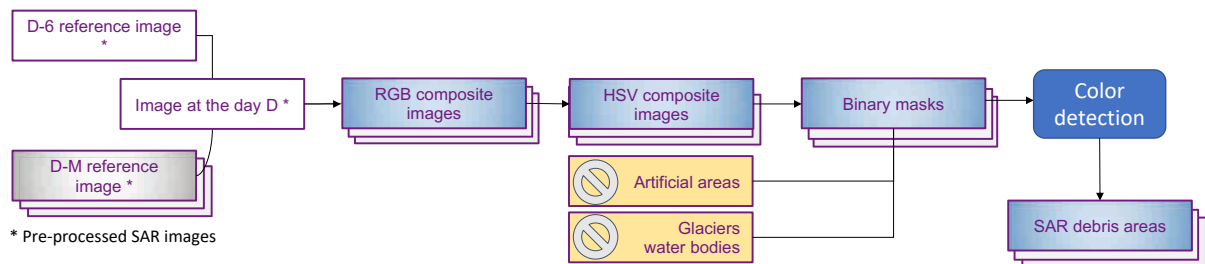


Fig. 5. Flowchart of the automatic method of snow avalanche debris detection.

TV broadcasting, and computer vision. Color space is a mathematical model used to represent color information as three or four different color components. One of the most common color space is RGB (Red Green Blue), where colors are represented in terms of their proportions of red, green,

and blue. Another useful color space is HSV (Hue Saturation Value), which is particularly relevant for identifying contrast in images. Our method relies on the use of HSV color space, where the H(ue) dimension represents the color, the S(aturation) dimension represents the dominance of this color

and the V(value) dimension represents the brightness. The color detection algorithm seeks for the position of the color and its luminance instead of looking for specific RGB values. The detection of shades of bright green was done in two main steps. (1) First, an RGB composition was made with 3 images (R: D-6 reference image, G: activity image at day D, B: D-M reference image). (2) Then, the resulting RGB image was converted into HSV space using the following formulas (provided by Python for the "colorsys" modules):

$$V = \max(R, G, B); \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}, & \text{if } V \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}; \quad (2)$$

$$H = \begin{cases} \frac{60(G-B)}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = R \\ \frac{120 + 60(B-R)}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = G \\ \frac{240 + 60(R-G)}{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}, & \text{if } V = B \end{cases}. \quad (3)$$

A green color variation range was chosen to detect several shades of light green. We used OpenCV python open libraries to perform color space conversions. An illustrative example of the detection results is shown in Fig.4b where the detection of light greens are shown in black. One can notice that almost all the light green areas are very well detected by our method. In this example, the D-M reference image is the average of the images taken from August to September 2017. In addition, in layover areas, we observed a scarce number of detections. The flowchart of this method of detection is shown on Fig.5.

It is expected that reference image selection can have a significant impact on the detection results. For instance, the condition of snow on pre-event images can increase false avalanche detection in case of wet to dry snow transition between reference and activity image ([16]). We performed several estimations of debris detections of the same scenes by varying the D-M reference images. To select D-M reference image dates, we relied on the results of [32] who used different metrics to better select the reference images. Such a reference is commonly used in change detection approaches. In our study, particular emphasis was placed on methods that would allow optimal selection of the D-M reference image. We calculated cross correlations between all SAR image time series, covering the 32TLS tile, from August 2017 to end of January 2018 (ascending/descending images were used separately, which represents a total of 60 SAR images). Cross correlations (1 minus correlation) figures are shown on Fig.A.2 in the Appendix section. To select D-M reference image dates, the idea was to find dates for which a fairly clear loss of correlation can be noted with the observed scenes of January 2018. We aim at better identifying avalanche events. We strive to select D-M reference images that will add information on the surface/ground condition. We also chose D-M reference dates with different meteorological conditions. The correlation matrices were examined to select possible dates for each month between August and November. We ended up with the following reference dates (descending/ascending): 6th/8th August 2017, 5th/7th September 2017, 5th/7th October 2017, 10th/12th November 2017. The synthesis of meteorological

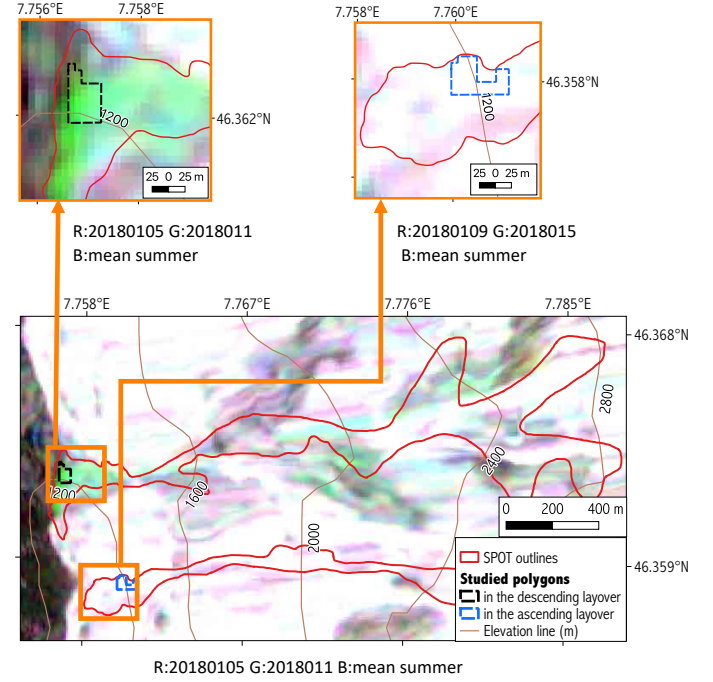


Fig. 6. Localisation of the two polygons of pixels on pastures areas, in different avalanche outlines and different layovers. The background image is an ascending SAR RGB composite.

conditions for each D-M dates is shown on Table II. Moreover, we tested the use of a mean SAR image by averaging the images of August and September 2017. The month of August was particularly warm, with little precipitation. There were many snowfalls in the high mountains during September 2017.

III. ON SAR SIGNAL VARIABILITY IN A COMPLEX MOUNTAINOUS TERRAIN

In this section, we examine SAR backscatter variation at the pixel scale in areas associated with different types of land cover : dense forest, glaciers and perpetual snow, bare rocks, and pasture areas. We aim at better understanding the SAR variation at the lowest scale, by studying groups of 35 to 40 pixels.

We selected polygons of pixels located outside and inside avalanche outlines. Polygons located outside SPOT mapped avalanches are on flat areas where no avalanche could occur in order to demonstrate that a high backscatter increase is not connected to other factors outside an avalanche. Groups of pixels validated by the SPOT data are studied so that we can state that the observations acquired at these locations are associated with at least one avalanche event during the month of January 2018. We used the Corine Land Cover (CLC) to get information on the types of land cover and the high resolution layer Tree Cover Density (TCD) to select trees and non-trees covered areas. CLC and TCD of 2018 are produced by the Copernicus Land Cover Services (CGLS) and the European Environment Agency (EEA). The selected pixels are :

- two polygons located in pastures areas, in different avalanche outlines and geometric distortions: one in the

TABLE II
Selected D-M reference dates and synthesis of meteorological conditions, for both orbits. We used winter reports and avalanche bulletins of the SLF.

Date Descending/Ascending orbit	Meteorological conditions Descending/Ascending orbit
2017-08-06/08	Little snowfalls in the high mountains
2017-09-05/07	Beginning of meteorological autumn snowfalls in the high mountains (1 st -3 rd)/up to 10 cm of snow above 3500 m (snowfalls the 6 th and 7 th)
2017-10-05/07	Thin snow cover at high altitudes
2017-11-10/12	Beginning of winter conditions Few cm of snow/fresh snow and storm winds

ascending and the other one in the descending path, Fig.6 displays the location of these groups of pixels;

- two other groups of pixels in the same avalanche outline and with different tree cover density: one in a dense forest area (more than 60 % of Tree Cover Density) and another one in a tree-free zone (0 % of Tree Cover Density) (location not shown).
- two other groups in bare rock area, one in an avalanche outline and the other one outside SPOT mapped avalanches (location not shown);
- two additional groups in glaciers and perpetual snow area, one in an avalanche outline and the other one outside (location not shown);

The corresponding backscatter time series of the polygons located on different geometric distortion zones (depending on the orbit direction) and SPOT outlines (located on Fig.6), from early December 2017 to end of January 2018, are presented on Fig.7. Results are given for the ascending (Fig.7a) and the descending orbits (Fig.7b). Note that if a pixel falls in the ascending orbit geometric distortion zone, this same pixel will not be affected by the descending orbit distortions, and conversely. As expected, a group of pixels falling into a geometric distortion zone exhibits very high backscatter values: for instance, for the descending orbit, the backscatter average from the polygon falling into the descending layover ranges from around -7.5 to -2.5 dB while the signal from the other one (outside the descending layover zone) ranges from -21 to -17 dB with an exception on January 15th. For the groups of pixels outside layover zones, we can note a lack of significant variation of SAR signal from early December till early January and, for the ascending orbit, strong increases of the signal are observed on January 11th (mean value increases of 10 dB) and 29th. We do not observe a significant change concerning the signal in layover zones.

We now consider two other groups of pixels on the same SPOT outline, not affected by layovers and associated with dense forest (more than 60 % of Tree Cover Density), tree free (0 % of Tree Cover Density), bare rock areas (see Fig.8). For dense forest, the backscatter signal varies smoothly with no significant drop of the signal, except for the decrease on December 12th. We observe a rather strong increase in backscatter for tree free pixels on January 11th after avalanche events. We can make the hypothesis that detection over dense forest might be challenging as there was no significant increase for the dense forest polygon because of difficulties to separate the contributions of snow and canopy effects. Similar conclusions can be drawn for bare rock, whose signal variation can be

examined with or without avalanche events (see Fig.8b). One could observe a strong increase in backscatter on January 11th while the signal varies more smoothly in areas outside the SPOT outlines.

A decrease of SAR signal can be observed with a dry to wet snow transition. Indeed, snow volume scattering is often more visible in cross-polarization (VH polarization) with a backscatter decrease due to wet snow. It can be linked to absorption, reflection processes, and the decreasing amount of snow volume scattering in a shallowing snowpack ([33]). A net backscatter increase due to wet to dry snow transition can result in false alarms ([16]). The avalanche detection is then impacted and difficult for these periods. Wet snow avalanches are usually easier to detect as they usually have a higher surface roughness than dry snow avalanches ([16], [20]).

We also examine the evolution of the SAR signal on glaciers and perpetual snow areas from early December 2017 to end of January 2018 (not shown). We considered two polygons, one in a SPOT outline and one on flat terrain. For both orbits and polygons, there was no significant SAR variation (not shown). It is worth noting that the mean backscatter range was high in December and January 2018 compared to the reference (the average of August and September 2017), respectively with the ascending and descending orbits: from -14 to -11 dB and -12 to -6 dB in December and January, while the mean references were around -18 dB and -21 dB. This can be linked to different snow conditions, as discussed previously.

The detection method we have developed is based on the analysis of the evolution of the SAR signal between two successive dates and with the inclusion of a reference image selected with a sensitivity study. We therefore anticipated difficulties in detecting avalanche debris in areas of glaciers, layover and also in areas of dense forest.

In our study, we masked out water bodies, glaciers and perpetual snow, and the artificial areas (urban fabrics, industrial, commercial and transport units, etc.) using classes of land cover. We do not take into account artificial areas as it is rarely affected by snow avalanches. The SAR backscatter variation of glaciers stands out comparing to those of various snow types ([34]). The detection of snow on lakes must be treated differently from snow on open areas ([35]). We choose to exclude water bodies, glaciers and perpetual snow as different studies have found the properties of those surfaces challenging for radar detection and analyzing the signal change would go beyond the scope of this paper ([9], [14], [16]).

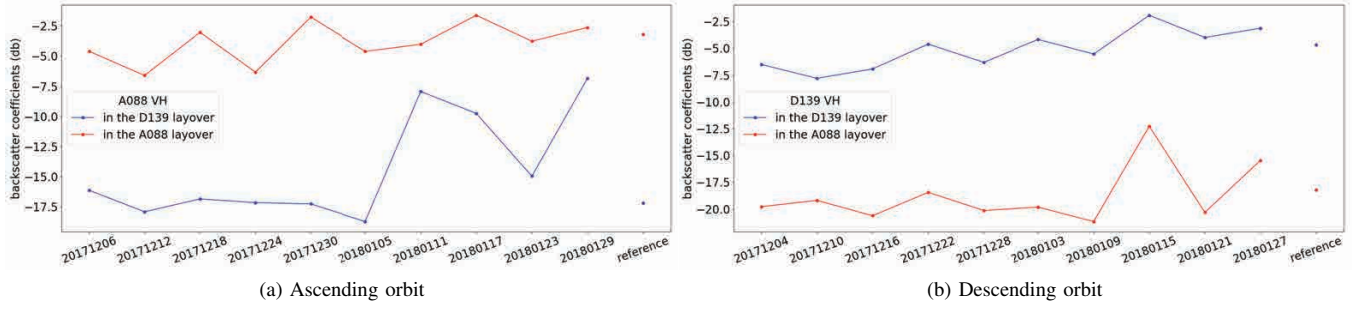


Fig. 7. Mean backscatter time series from early December 2017 to end of January 2018 for test pixels shown in Fig.6, on a pasture area: with, a, the ascending orbit and b, the descending orbit. The last date named 'reference' is the average of two months (August and September 2017).

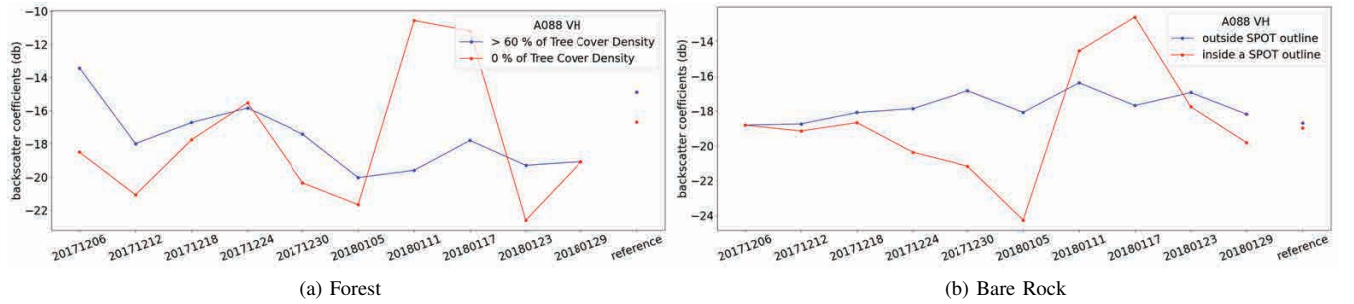


Fig. 8. Mean backscatter time series from the ascending orbit from early December 2017 to end of January 2018 for polygons on (a) different tree-covered areas, but on the same avalanche outline and (b) on a bare rocks area, inside a SPOT outline and outside, on a flat terrain. The last date named 'reference' is the average of two months (August and September 2017).

IV. AVALANCHE DEBRIS DETECTION RESULTS

We used our detection method to calculate binary products of avalanche debris for the entire month of January 2018 (using 5 SAR images from the ascending orbit and 5 images from the descending orbit). To facilitate comparison with the SPOT reference, a binary product was generated by assigning a value of 1 to any pixel that was detected as debris, 0 if no detection was performed. All Sentinel-1 acquisitions during January were accounted for. We obtained as many binary products as D-M reference images that were tested. We recall that the following dates were used as D-M reference images (ascending/descending): 6th/8th August 2017, 5th/7th September 2017, 5th/7th October 2017, 10th/12th November 2017 and a mean image using all images of August and September 2017.

We then studied the properties of the avalanche debris pixels using the SPOT data, which we consider here as our reference. We first calculated the number of pixels falling within a SPOT contour and also the location of SPOT outlines for which no debris was detected. We also examined the characteristics of SAR detection outside the SPOT outlines.

A. Overall statistics

In this section, we consider the detection results obtained using SAR images of the average of August and September as D-M reference for both orbits.

We introduce some global statistics with rates of True Positive (noted TP hereafter) and False Negative detection

(noted FN hereafter). A snow avalanche event is considered TP if at least 10 SAR debris pixels fall in the SPOT outline. In case of lack of SAR detection or when less than 10 pixels are inside the SPOT mapped avalanche, the SPOT outline is then associated with a FN event. The True Positive Rate (TPR) is the percentage of TP events compared to TP and FN events. The False Negative Rate (FNR) is the percentage of FN compared to the TP and FN events. Thus, TPR and FNR of 100 and 0 %, respectively, are for perfect detections. The choice of 10 pixels is made considering the low spatial resolution of S1 and the fact that many studies highlighted the difficulty to detect snow avalanches of small sizes using S1 (size 1, 10 to 500 m², according to the European Avalanche Warning Services, EAWS) ([16], [20]). [16] used a cut-off minimum size of 10 pixels to reduce false alarms and pointed out the limitation of detecting small avalanches using S1 images. [20] also noticed that small avalanches were often missed when using S1.

With the SPOT outlines, the TPR are around 58 % and 36 % with the ascending and descending orbits, respectively. By combining the detection from both orbits, we obtain a TPR of around 66.4 %.

Fig.9 shows percentages of FNR and TPR using both orbits per classes of orientations. The maximum values of FNR are obtained with South-Western and Western orientations for the ascending orbit (FNR are around 69 to 63 %) and Eastern, South-Eastern and North-Eastern orientations for the descending orbit (around 83 to 70 %). This is in line with the presence of areas of geometric distortion affecting the

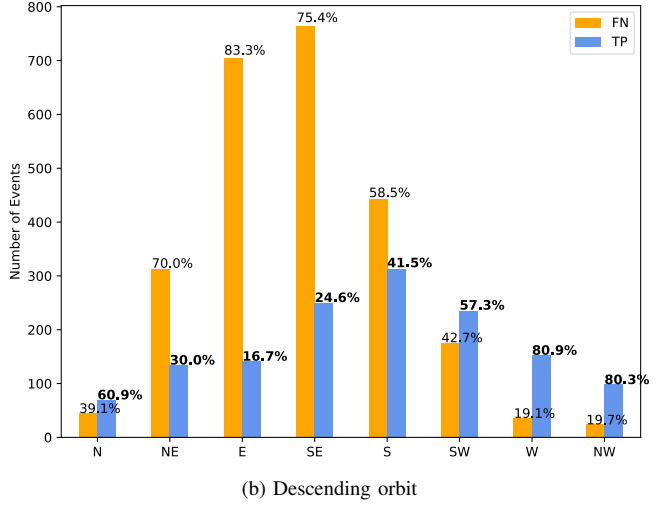
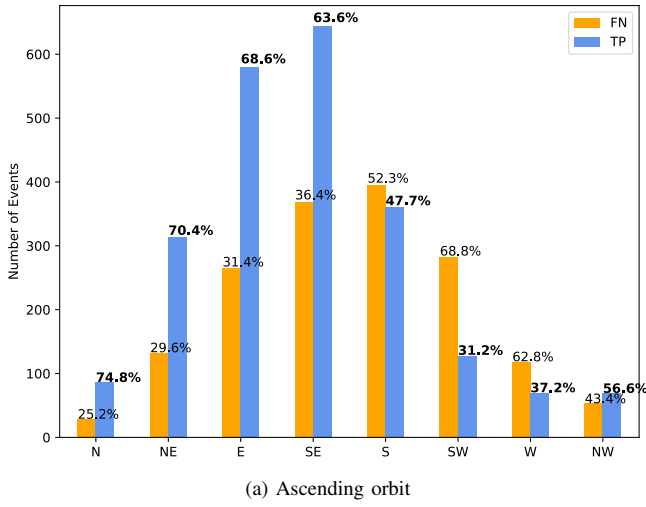


Fig. 9. The percentages of TPR and FNR using the ascending and the descending orbits, with the average of two months for the D-M reference image. We are looking at these percentages per classes of orientations. For each orientation, TPR and FNR of 100 and 0 %, respectively, are for perfect detections.

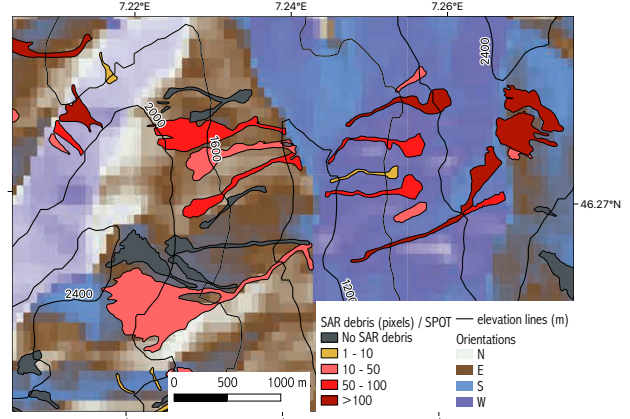
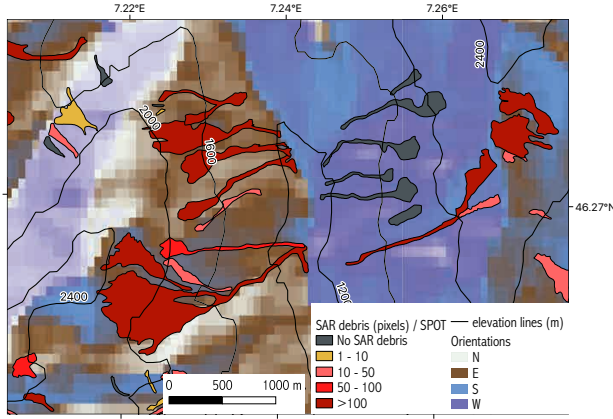


Fig. 10. Number of debris pixels in SPOT mapped avalanches as shades of red: the darker the color, the larger the number of debris pixels within an avalanche detected outline. Grey indicates avalanche tracks where no debris is detected by SAR. Yellow indicates a small number of SAR debris, while dark red represents a high number of SAR pixels. Results are given for : a, the ascending orbit and b, the descending orbit. We used the average of two months for the D-M reference image. The background map is the classes of orientation (SRTM digital terrain model).

Eastern orientation for the descending orbit and the Western orientation for the ascending orbit. Indeed, we can observe higher TPR in Western orientation for the descending orbit than for the ascending one. We can see it visually on Fig.10. This figure shows the SPOT mapped avalanches as shades of red depending on the number of detected pixels falling in each outline: the darker the color, the larger the number of debris pixels within an avalanche outline. Note that outlines with less than 10 SAR pixels detected (yellow and grey colors) are not considered in our statistics.

We now consider percentages of TPR and FNR per classes of avalanche size. We used the same classification as in the study of [7] and we excluded the smallest class (size 1). The remaining avalanche events are classified as : "Medium: size 2" (501 to 10,000 m²), "Large: size 3" (10,001 to 80,000 m²), "Very large: size 4" (80,001 to 500,000 m²) and "Extremely large: size 5" (greater than 500,000 m²) events. We expect to

have less detection of size 2 avalanches as we have chosen not to consider SPOT outlines with less than 10 detected pixels. Approximately 30% of our detections of less than 10 pixels and with at least 1 pixel, fall in the outlines associated with avalanche size 2 (29.8% and 40 % obtained in ascending orbit with a reference image taken in November and early August respectively). Unsurprisingly, the larger the avalanche, the easier SAR detection is (at least 10 pixels) and the larger is the number of detected pixels that fall within the avalanche boundary. Thus, about 21 to 13 % of medium-sized avalanches are detected with ascending and descending orbits respectively. The percentages are 64 to 36 % for large avalanches, 87 to 63 % for very large avalanches and 100 to 94 % for extremely large events.

TABLE III

Percentages of TPR using different datasets of SAR debris detection (using different D-M reference dates and only one D-6 reference image) for both orbits. TPR are calculated with respect to the SPOT mapped avalanches. A SPOT avalanche detected event is a SPOT outline that includes at least 10 detected pixels.

D-M reference image	Whole January		End of January	
	DES	ASC	DES	ASC
Aug-Sep 2017	35.7	57.8	23.6	33.5
6-8 Aug 2017	44.6	59.1	32.6	34.8
5-7 Sep 2017	42.2	68.0	30.3	47.8
5-7 Oct 2017	44.6	64.4	34	42.4
10-12 Nov 2017	47.1	71.7	37.3	52.9
D-6 image	30.1	59.8	12.4	29.3

B. Results using different D-M reference images

We now consider the whole set of debris calculations using various selections of D-M reference images. Table III shows the percentages of TPR and FNR for, respectively, the ascending and the descending orbits using different datasets of SAR debris detection. Results using the whole month of January and the end of the month are compared on this table. We use the following D-M reference dates (descending/ascending): 6th/8th August 2017, 5th/7th September 2017, 5th/7th October 2017, 10th/12th November 2017. FNR and TPR are calculated with respect to the SPOT mapped avalanches. On Table III, we note that for the D-M reference images, the use of selected individual dates improves detection results with regards to the average over two months. Considering the whole month of January: with the descending and ascending orbits, respectively, around 36 to 58 % of SPOT avalanche events are detected with the average of August and September while the maximum of detection is obtained using the 10 and 12th of November, with 47 to 72 % of detected SPOT avalanche events. If we use the same method of detection but with only two images, the D-6 reference image (in R and G channels) and the activity image, we obtain similar results than when using the average over two months as the D-M reference image : 30 to 60 % of SPOT avalanche events are detected, respectively, with the descending and ascending orbits for all of January 2018. Therefore, the use of two reference images (D-6 and a reference image) appears to improve debris detection results. The average reference image D-M mixes dates that might not be as favorable for detection (warm weather and few snowfalls/rain in the high mountains). Moreover, choosing D-M reference dates with similar snow and meteorological conditions to the beginning of winter season seems to enhance SAR detections (November dates). We also note that there is more debris detection with the evening orbit (ascending) than with the morning orbit (descending). For the events verified with SPOT mapped avalanches, we also have a high percentage of TPR with the evening orbit while having a fairly low percentage of FNR compared to the morning orbit.

Comparing the results obtained for the whole month and those obtained for the end of January, we observe, respectively for the ascending and descending orbits, average gaps of around 23 % and 12 % (see Table III).

We studied the results using different D-M reference images

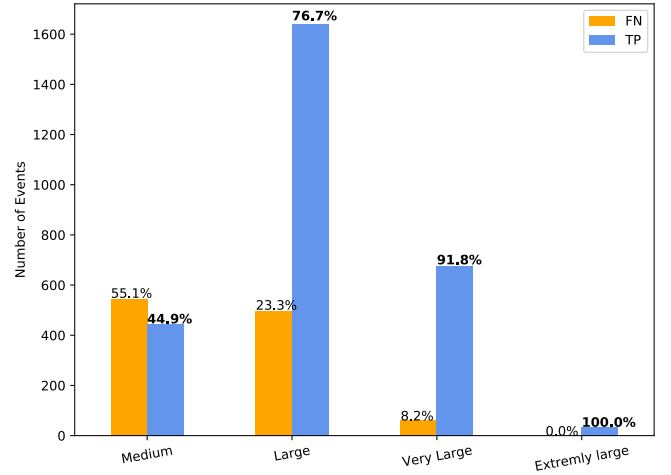
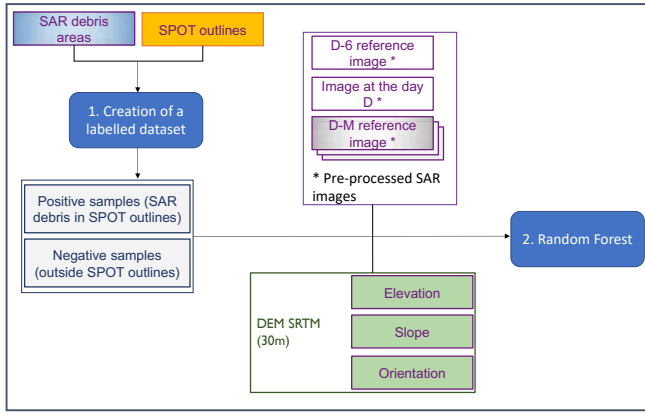


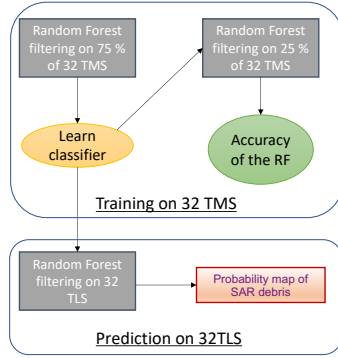
Fig. 11. The percentages of TPR and FNR per classes of avalanche size using the ascending orbit, with the 12th November 2017 for the D-M reference image. For each avalanche size, perfect detections are obtained with a TPR of 100 % and a FNR of 0 %.

per classes of orientations for the whole month of January. The general trend in detection results by orientation is broadly similar regardless of the D-M reference chosen. For the ascending orbit, we note better detection rates for the North, North East, East, South, South East orientations while the South West, West and North West orientations are worse. This effect can be explained by the impact of geometric distortions. Considering a given orientation, the best detections are obtained with the reference of 12th November 2017 with the highest TPR and the lowest FNR. For the South East orientation, which is associated with the highest number of SPOT avalanche events, the TPR/FNR are, respectively, 78.7 / 21.3 % when the D-M reference is that of November 12 compared to rates of 65.9 / 34.1 %, 74.8 / 25.2 %, 70.4 / 29.6 and 63.6 / 36.4 % when the D-M reference is that of August 8 , September 7, October 7 and Summer mean image respectively. For the descending orbit, the South orientation is associated with the highest number of SPOT avalanche events. The TPR are respectively : 52.1, 52.1, 52.6, 54 and 41.5 % when the D-M reference is that of August 6, September 5, October 5, November 10 and Summer mean image respectively.

We also looked at avalanche detection results by avalanche size and for different reference images for the month of January. Medium/large/very large avalanches seem to be better detected when using individual dates rather than a mean summer image (best results are obtained with September and November images). For example, for the ascending orbit, the detection rate of "Large" and "Very large" avalanches increases, respectively, from 64 % and 87 %, when D-M is the summer average, to 77 % and 92 % when the 12th November reference is used (see Fig.11). Poorer detection results are obtained for the medium avalanche class. Therefore, the selection of reference images based on the criterion of cross correlation of images seems to be relevant to improve avalanche debris detection. November was the beginning of winter but with different ground conditions from January.



(a) Random Forest filtering



(b) Training and Prediction

Fig. 12. General steps of Random Forest filtering used for the training and prediction of SAR avalanche debris.

C. Potential of a Random Forest approach : Improving the detection by filtering with machine learning

The complexity of the interaction between the radar signals and the snow is also linked to the terrain characteristics such as surface type, slope, orientation and elevation. Our debris detection method targets areas with a strong increase in backscatter between two successive dates. However, an increase in signal may be due to other effects than the debris of a snow avalanche. This is why we additionally developed and compared an automatic filtering of the color-based detection using a machine learning approach. The goal is to accurately remove the false debris detections by learning the non-linear function linking the SAR signal variation between successive dates, a D-M reference image and the topology information (slope, orientation, elevation and tree cover) to the presence or absence of avalanche deposit.

We trained a random forest (noted RF hereafter) classification model on the 32TMS tile (see Fig. 1) in order to avoid any overfitting on the 32TLS tile, where the results are then evaluated. RF is an ensemble learning method that constructs multiple decision trees during training and averages the regression prediction over the trees ([28]). Each tree is

independent and generates a class prediction. The best class prediction is selected at the end (vote for the most popular class) ([28]). Moreover, a machine learning algorithm can be robust to label noise (i.e. mislabelled samples). Thanks to the SPOT mapped avalanches on the 32TMS, we created a labelled database from which we trained our RF model: for each of the January SAR acquisition dates, the color detection-based SAR detections that were in agreement with the SPOT mapped detections were labelled as *positive* samples. Conversely, the SAR detections outside of the SPOT outlines were labelled as *negative* samples. For the training, we took the same number of positive and negative samples in order to facilitate the learning. Machine learning can learn even if the training data is not perfect. As discussed in Section II-A3, SPOT6-7 images are a reliable tool to map avalanches. However, a minority of avalanches could not have been mapped because of the visibility and weather conditions. There are also differences in dates and times of observation between Sentinel-1 and SPOT. Thus, some samples could have been mislabelled. From a grid search analysis on 75 % of the 32TMS tile detections, we selected a RF model with 128 trees of depth 10. Grid search allowed us to select the best parameters for the RF classification : we tested different values for each parameter and selected the best combination of settings. We obtained on the remaining 25 % of the 32TMS tile a 81 % accuracy for the descending D066 orbit and 95 % accuracy for the ascending A088 orbit. Once trained (few minutes), the model is computationally efficient and the prediction output of the full 32TLS is estimated in less than a minute. Among the outputs of the RF classification is the probability of occurrence of events, which varies from 0 to 1, which is associated with detections. False detections can be reduced by only considering detections associated with a high probability (e.g. > 0.7). We can thus derive a probability map for each SAR acquisition date for January 2018, which gives a confidence for every detection. Two flowcharts summarize the described processing steps: the Random forest filtering is shown on Fig.12a and the steps of the training and the prediction are introduced on Fig.12b.

Table IV introduces the percentages of TPR using different thresholds for each orbit and the average of two months for the D-M reference image. Concerning the RF filtering, we did not add a minimum value of number of detected pixels as we suppose that the RF filters SAR debris according to the non-linear function linking the S1 data and the topology information. By default, we consider that a pixel belongs to an avalanche if the probability is above 0.7 for the descending orbit and above 0.2 for the ascending orbit. We empirically chose these values because the RF results are below the SAR " ≥ 10 pixels in each SPOT track" results. In addition, outside and inside SPOT outlines, the higher the threshold, the more pixels are filtered. This is why we can observe a drop of TPR values with a high threshold. Moreover, visually, there is an improvement of the detection, as it removed many isolated pixels and kept the majority of verified detections.

An example is shown on Fig.13 with the detected pixels using : a, the color detection-based method, b, the probability of RF output being an avalanche and c the RF filtering on

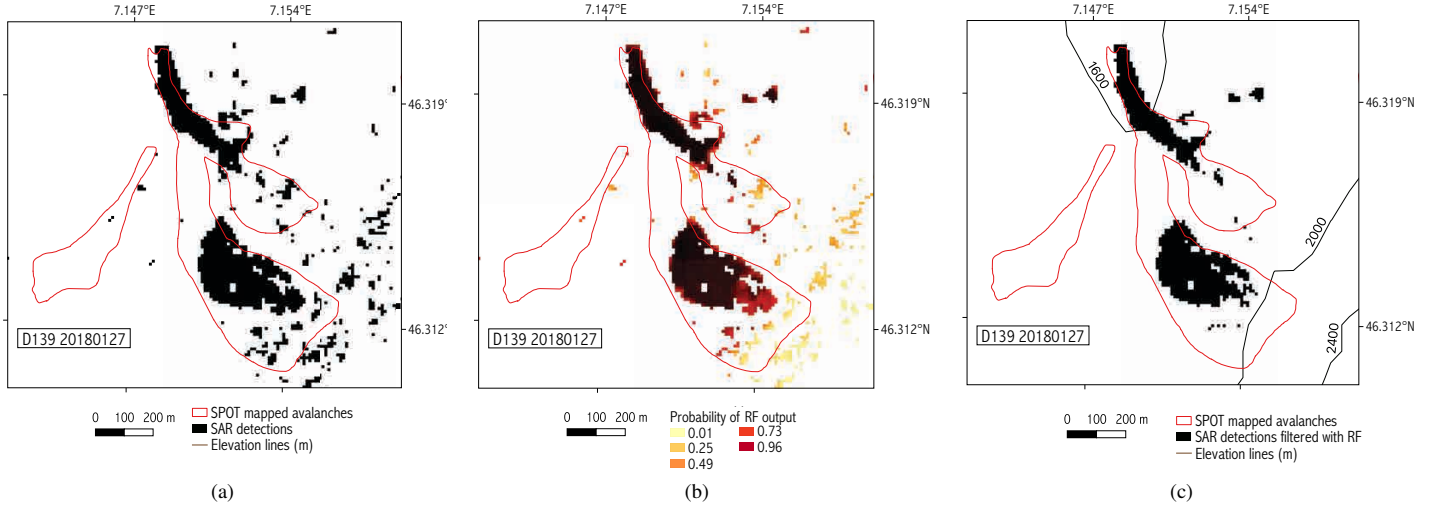


Fig. 13. Example of detected pixels with : a, SAR and c, RF methods using the D139 acquisition date, the 27 January 2018. The probability of RF output of being an avalanche is shown in b.

TABLE IV
Percentages of TPR using different thresholds of RF filtering. We filtered all SAR debris.

SAR filtered debris Threshold of RF	Ascending orbit	Descending orbit
RF > 0.1	68.1	53.4
RF > 0.2	38.1	52.2
RF > 0.3	25.3	50.5
RF > 0.7	8.2	31.3

January 27th (descending orbit). Note that the RF filtering shown in Fig.13c was obtained using 0.7 as threshold.

We compared results obtained with different RF thresholds (not shown). We can note that the RF does not deteriorate results of validated pixels using SAR color based detection. For January 2018, the number of detected pixels outside the SPOT outlines with no RF filtering are around 1'048'160 / 1'479'500 with the descending and ascending orbits, respectively. With a RF filter, the number of pixels decreases and we obtained : with a RF threshold above 0.3, around 587'500 / 99'500 and with a RF filter above 0.7, around 157'100 / 8'500.

We can observe with the descending and ascending orbits, respectively, that the number of pixel outside the SPOT outlines is significantly decreased compared to the number of pixel inside the SPOT paths: with a RF filter of 0.3, 56 / 7 % of detected pixels are kept outside SPOT outlines while 88 / 25 % of detected pixels inside SPOT outlines are kept by the RF filtering, respectively. The difference between orbit RF filtering models have not been investigated, but might be due to the number and variety of available training data in the 32TMS. The RF filtering reduced the number of pixels outside SPOT mapped avalanches, while retaining a majority of the true positives ones, without removing verified detections. We trained the RF classification model with the SPOT mapped avalanches, thus we expected a reduction of the number of pixels outside SPOT mapped avalanches.

On the one hand, for detected pixels falling inside the SPOT-mapped avalanches, the orientation distribution *after* RF filtering is close to the distribution of *verified* detections (not shown). On the other hand, for detected pixels falling outside the SPOT-mapped avalanches, RF filtering makes some changes to the detections according to the orbit direction. For the descending orbit, RF filtering significantly reduces the number of detected pixels for west orientations compared to east orientations. For instance, with an RF filter of 0.3, 7 % (69 %) of the detected pixels on the eastern (western) slopes are discarded after filtering.

V. DISCUSSION

Regarding the detection method, we use a color space segmentation approach to detect areas of avalanche debris. For this purpose, we rely on the use of two reference images (D-6 and D-M) instead of one, which was used in previous studies (D-6 or D-12) ([2], [36], [37] [14], [16], [8], [20]). It is worth noting here that some studies dealing with wet snow detection using Sentinel-1 have investigated the issue of using not only one but two reference images. A method has been proposed by [38] which suggests using two reference images taken before and after the melting season. However, if the second reference image is without snow and the ground was already drying, false detection can occur ([39]).

We looked at the impact of using the D-M images by performing debris detection with only the D-6 image as reference. The results are summarized in Table III where one could see that the use of two reference images improves the percentages of TPR by about 6 to 17 % for the ascending orbit and by about 3 to 12 % for the descending orbit (values depend on D-M images). These results also suggest that the D-M image must be carefully selected to maximise debris detection. We have shown that the use of an average image as a D-M reference does not seem to be the right option for optimising avalanche debris detection, but rather the selection of reference images. The D-M reference images were selected

using the criterion of low cross-correlation of SAR images with respect to the avalanche activities periods of January 2018. By studying the meteorological and snow conditions of these dates, and comparing it to the obtained results, it seems that best results are obtained when using a reference image at the very beginning of winter. This was the case of the ascending D-M reference date of the 12th November 2017 (considerable snowfalls and beginning of the winter condition), for which we obtained the highest detection score. During the 10th November 2017, the snow depth was lower than the 12th November (11-13 November was a snowfall period). This change of snow conditions could explain the difference of results using the ascending and descending orbits. Good results were obtained using September reference images. The issue of reference images still requires further work to select the best possible option. The use of images at well selected dates would allow better capture of ground/snow conditions and effect of growing vegetation. The D-6 and D images in January 2018 were also different for both orbits : images from the descending orbit are acquired in the early morning while those of the ascending orbit are acquired, two days after, in the end of the afternoon. The snow and meteorological conditions are then also different and lead to different results. The extent of the distortion zones (which do not allow the detection of debris on specific mountain slopes) could also partly explain the detection gaps between the two orbits. Further studies are underway to better understand these differences in detection.

In the study of [8], it was emphasized that S1 detection was often partial. Indeed, the detected areas can be disconnected as many patches corresponding to a single avalanche. Our detection is done at the pixel level and not at the level of polygons or avalanche shapes. We evaluated our results by looking at detected events verified by SPOT outlines (with at least 10 pixels falling within a mapped avalanche). Contrary to studies that generated avalanche polygons, we can't evaluate avalanche detection outside SPOT tracks in absence of other validation datasets ([16], [8]). A specific processing to combine the different patches into a single avalanche should allow better detection performance. It would avoid overestimating the number of avalanches or underestimating their size.

We have relied on the previous work of [8] and [7] who showed the very good quality of the SPOT database which we have considered as our reference. In [1], the authors have documented the avalanche period of January 2018 over a large spatial extent using SPOT6's high resolution measurements by mapping 18,737 avalanche contours in Switzerland providing us with a great tool to evaluate our algorithms. The SPOT database is very relevant for us since it helps us to evaluate several properties of avalanches, including avalanche size, we could hardly find elsewhere with such high spatial coverage. The current study covers one month with successive avalanche periods and must necessarily be extended with further assessments covering different periods and areas, with various meteorological conditions and zones

of different characteristics. The use of SPOT images should also be complemented as far as possible by in-situ avalanche observations.

SPOT mapped avalanches were identified after the avalanche period from the 21 to 23 January 2018. In our study, we focus on January 2018 which had several successive avalanche periods. Results of the detections with the Sentinel-1 images taken at the end of January show average differences in detections of the order of 12-23 % compared to the detections of all S1 images of the month (see Table III). Regarding the use of the SPOT data set, [7] estimated that 10 to 20 % of the avalanches were released before the avalanche period of the end of January, with an upper limit value of 25 % of old avalanches. Including the whole month of January could be useful to include as much as possible avalanches from previous avalanche periods that might still have been visible and therefore mapped in the SPOT reference. This choice may lead to some bias if we consider avalanches that occurred in early January and are not present in the SPOT reference. Using multiple images could also increase the cumulative number of false detections and will not improve avalanche detection in areas of geometric distortion.

We expected to find different results for the SAR and SPOT avalanche monitoring because of the relatively large areas not taken into account in the SAR images due to geometric distortions and the differences in dates and times of observation between Sentinel-1 and SPOT. It is worth noting that studies of [20] and [8] already compared the Sentinel-1 manual detection to SPOT6-7 mapping and found different percentages of detection. The gap between these detection scores can be explained by the difference of visibility, spatial resolution and acquisitions dates (variation of the snow pack state and avalanche visibility according to the meteorological conditions changes) between the optical and radar satellites. [20] found that S1 detected 68 % of SPOT detected avalanches while SPOT detected 44 % of S1 mapped avalanches. [8] detected with S1 55 % of SPOT avalanches and, with SPOT mapping, 89 % of S1 avalanches were detected. Mapped avalanches were linked to validation points from ground truth. With the 10th and 12th November 2017 as D-M reference images, we also found different detection scores: 48 and 72 % of SPOT mapped avalanches, with the descending and ascending orbits of S1 respectively.

In the Section IV, we discussed the detection of SPOT avalanche events using our segmentation method. It is worth noting that we applied a detection threshold of 10 pixels in a outline so that it could be considered in our statistics. Relaxing the 10 pixels threshold criterion can be of interest in situations where avalanche pixels can be detected at the edges of the SPOT outlines (due to differences in acquisition dates between SPOT and Sentinel-1, changes in meteorological conditions, etc.). Another effect of using the 10 pixels threshold is the potential deterioration of the detection of small and medium-sized avalanches (sizes 1 and 2). We have examined the predominant avalanche size associated with outlines for which there are less than 10 SAR pixels detected (and at least 1 pixel). Whatever the D-M reference chosen, avalanche

size 2 was found to be the dominant size (more than 30 % of cases). This may partly explain the poorer detection results for medium avalanches. This result is consistent with those of [8], who noted a similar tendency to under detect small and medium sized avalanches. [8] showed that there was a clear improvement in detection scores with increasing size of avalanches (12 % of medium avalanches, 42 % of large avalanches, 90 % for very large ones and 100 % for extremely large events). Despite differences in detection rates, we obtained relatively similar trends with our detection method with better detection with increasing avalanche size (21 % (45 %) of medium-sized events, 64 % (77 %) of large ones, 87 % (92 %) of very large ones, 100 % (100 %) of extremely large events with the mean summer for the D-M reference image (the 12th November 2017 for the D-M reference image) and the ascending orbit).

As noted in [8], the avalanche debris mapped in the Sentinel-1 data often appear as multiple patches. In our paper, the event definition method allows us to consider even fragmented debris. We consider that we get an avalanche event if at least 10 pixels of SAR debris fall within a SPOT contour. This may also explain the relatively higher scores we get.

It is worth noting that the classes of avalanche size of our detected events are based on the area of SPOT outlines and not the volume or destructive potential of avalanches.

Another useful information of SPOT mapped avalanches is the quality of outlines. Extending the SPOT mapped avalanches could be helpful in taking better account of the pixels detected on the edges and it may also be useful for situations where the detection of avalanches on the SPOT image is difficult, leading to a lower quality indicator (presence of clouds, shadows, ...).

For the mountain regions of interest, the choice of auxiliary data such as DEM (and its resolution) is not obvious. In our study, our choice was driven by the use of the CNES generic processing chain which can be used worldwide and the availability of the 30 m SRTM DEM model. In the framework of surface type classification, [40] have investigated the influence of the DEM employed for terrain normalization of backscatter and coherence data. The authors show that high-resolution TanDEM-X DEM (20 or 30 m resolution) was the global DEM providing the largest reduction of terrain induced variability. It would be very useful to conduct such an analysis with the specific objective of detecting avalanche debris.

Snow conditions can have a significant impact on Sentinel-1 debris detection results. It is often expected that wet snow avalanches are easier to detect overall (e.g. [20], [16]). Indeed, as it is reminded in the work of [41], with C-band SAR images, there are physical based limitations to the detection of dry snow avalanches. Nevertheless, [8] show good detection results in dry snow especially for medium to large avalanches. In case of highly changing conditions like in January 2018, it is possible that the radar backscatter images before and after the event show fast snow transitions/changes making debris

detection considerably more difficult. For instance, from 15 to 23 January, the snowfall line oscillated around 500 to 2'000 m (winter reports of the SLF). There were intense snowfalls and periods of lower avalanche danger with no precipitations. With stable dry snow conditions, avalanches can be more easily detected (see for instance, [8] and [16]). [16] obtained better results for dry to wet snow transition than with stable wet snow conditions or with wet to dry snow transition. All this argues for examining the results of detection under diverse snow conditions.

Another direction of improvement of our system is to take into account the local incidence angle of the SAR as it was the case in the [20], [8] and [22] studies. In our study, we rely on the Sentinel-1 processing chain of the CNES to process SAR time series. This processing chain does not yet include a module to correct or attenuate layover/foreshortening effects but the method of [42] which allows terrain flattening is scheduled to be implemented in future updates of the system.

Since our assumption for detecting avalanche pixels is based only on areas with a significant increase in backscatter compared to reference images, we expect to overestimate the number of pixels labelled as avalanche debris. Outside the SPOT corridors we are testing the potential of a RF filtering approach to remove false detections. The idea is to train the filtering model on detections that we can evaluate (with the SPOT database) and then apply it to areas for which we have no evaluation data. The learning process takes into account labelled SAR detections as well as terrain characteristics. We therefore expect this method to help reduce false detections, but work remains to be done to properly calibrate the method (define best probability threshold values, increase training data, take into account different avalanche periods, etc.).

VI. CONCLUSIONS

In this study, we developed a novel method to automatically detect areas of snow avalanche debris using a color space segmentation technique applied to SAR image time series. We provide the first study on SAR detection using D-6 and D-M reference dates. We have shown that, in our study area, almost 66 % of the avalanche events recorded in the SPOT database were detected by our method, by combining the ascending and descending orbits and using the average of two months as the D-M reference image. Small avalanches were not detected by SAR images and, depending on the orientation of the terrain, some avalanches are not detected by either the ascending or the descending orbit. Large, very large and extremely large avalanches were mainly detected, in agreement with [8] who also noted a clear improvement in detection scores with increasing size of avalanches: 64 % of avalanches of size 3 are detected, 87 % of size 4, 100 % of size 5, with the mean summer for the D-M reference image and the ascending orbit. We have also shown that detection results vary with the selected reference image; best detection results are obtained with individual dates chosen in autumn with 72 % of verified avalanche events using the ascending orbit. Poorer results were obtained with the descending orbit; and we do

not yet have a precise explanation for this. This detection gap could be linked to the difference between the state of the snow pack/ground conditions of D-M reference dates of the ascending and descending orbits. At first, we selected D-M reference images with the lowest cross-correlation values with respect to the avalanche activities periods of January 2018. Reference images taken during autumn seem to give best results of detection. The comparison of results obtained using only one D-6 images and using two references image (D-M and D-6) demonstrates the potential of selecting specific D-M reference dates (increase of TPR by about 6 to 17 % for the ascending orbit and by about 3 to 12 % for the descending orbit).

A possible improvement of the detection method was briefly presented in order to discuss its potential and possible future developments. We have tested an automatic filtering system to remove false detections using a Random Forest classification model. Despite the preliminary status of this machine learning filtering, its results are very promising.

Our approach generates avalanche detection at a pixel level. Thus, we cannot directly compare our results with those of studies that detect avalanche polygons. The evaluation of the number of avalanches detected by our method outside SPOT data is difficult, as we do not produce avalanche polygons and the detection can be partial [8]. Therefore, more improvements of our method need to be done.

More in-depth studies are underway to generate systematic validation of the color based detection method and optimize the detection scores. An interesting direction could be the exploitation of a series of reference images rather than a single one with statistical metrics to derive probabilities of avalanche debris occurrences. Methods will be further evaluated on a larger spatial scale including the French mountains and for several avalanche periods with different meteorological conditions.

APPENDIX

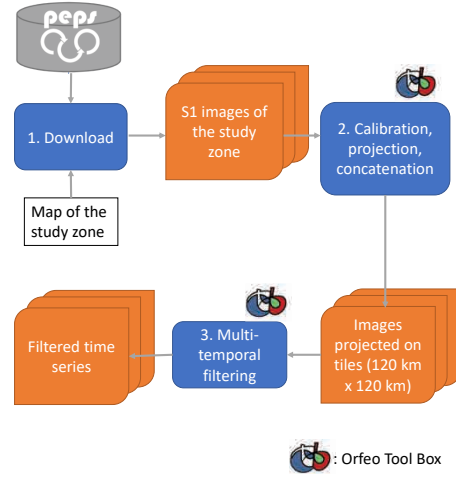
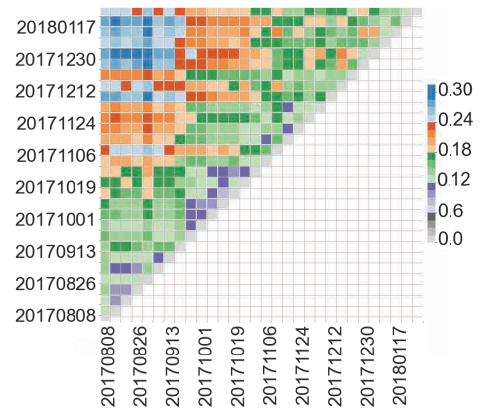
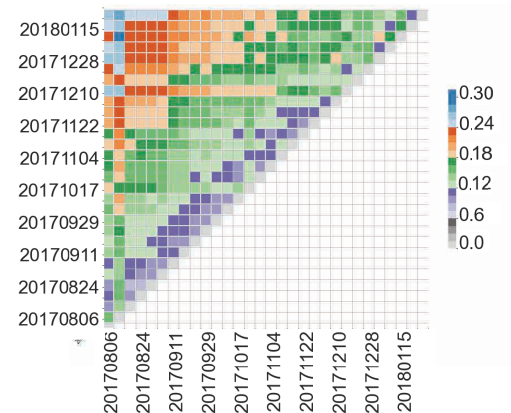


Fig. A.1. Flowchart of the pre-processing of Sentinel-1 images using S1-Tiling chain developed by the CNES radar service.



(a) Ascending orbit



(b) Descending orbit

Fig. A.2. Cross correlations of backscatter coefficients between all SAR time series, covering the 32TLS tile, for both orbits, from August 2017 to the end of January 2018. The values are equal to: 1- Corr, with Corr the values of backscatter correlations.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to deeply thank two anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions. Mapped avalanche outlines from SPOT images were realised by [1]. We wish to thank all co-authors of [1] for sharing the data.

The authors would also like to acknowledge:

- The support provided by the PNTS French program (Programme National de Télédétection Spatiale).
- The support provided by CNES for preprocessing SAR images using the PEPS facilities.
- The support provided by the Research and Service Support team of the European Space Agency (ESA) for the processing resources and data access provided for the pre-processing of Sentinel-1 images through the RSS CloudToolbox service. The support of the Geohazard Exploitation Plateform (GEP) initiative through the project approved by ESA for monitoring avalanche deposits over the French mountains.

Meteorological data are available and provided by the WSL Institute for Snow and Avalanche Research (SLF): <https://www.slf.ch/en/avalanche-bulletin-and-snow-situation/weekly-and-winter-reports.html>. Cantonal boundaries of Switzerland (swissBOUNDARIES3D) are produced by the Federal Office of Topography, swisstopo and available at : <https://opendata.swiss/fr/dataset/swissboundaries3d-kantons Grenzen>. The Tree Cover Density and CORINE Land Cover were produced by the Copernicus Global Land Service (CGLS) and the European Environment Agency (EEA) “with funding by the European Union”.

REFERENCES

- [1] E. Hafner and Y. Bühler, “Spot6 avalanche outlines 24 january 2018,” *EnviDat*, 2019.
- [2] E. Malnes, M. Eckerstorfer, and H. Vickers, “First sentinel-1 detections of avalanche debris,” *The Cryosphere Discuss*, no. 9, pp. 1943–1963, 2015.
- [3] Y. Bühler, A. Huni, M. Christen, R. Meister, and T. Kellenberger, “Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data,” *Cold Regions Science and Technology* 57, pp. 99–106, 2009.
- [4] F. R. Lato, M. J. and Y. Buhler, “Automated detection of snow avalanche deposits: segmentation and classification of optical remote sensing imagery,” *Natural Hazards Earth System Sciences*, p. 2893–2906, 2012.
- [5] S. R. Larsen SØ, Salberg A, “Automatic avalanche mapping using texture classification of optical satellite imagery,” *edited by: Lasaponara, R., Masini, N., and Biscione, M., EARSeL, 2013, Towards Horizon 2020*, p. 399–410, 2013.
- [6] K. Kozreniowska, Y. Buhler, M. Marty, and O. Korup, “Regional snow-avalanche detection using object-based image analysis of near-infrared aerial imagery,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 17, pp. 1823–1836, 2017.
- [7] Y. Bühler, E. D. Hafner, B. Zweifel, M. Zesiger, and H. Heisig, “Where are the avalanches? rapid spot6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the swiss alps,” *The Cryosphere*, vol. 13, p. 3225–3238, 2019.
- [8] E. D. Hafner, F. Techel, S. Leinss, and Y. Bühler, “Mapping avalanches with satellites – evaluation of performance and completeness,” *The Cryosphere*, vol. 15, p. 983–1004, 2021.
- [9] M. Eckerstorfer and E. Malnes, “Manual detection of snow avalanche debris using high-resolution radarsat-2 sar images,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 120, no. 6, pp. 205–218, 2015.
- [10] A. Wiesmann, U. Wegmuller, M. Honikel, T. Strozzi, and C. L. Werner, “Potential and methodology of satellite based sar for hazard mapping,” *Proceedings of IGARSS, Sydney, Australia*, pp. 9–13, 2001.
- [11] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung, “Microwave dielectric properties of natural earth materials,” *Microwave remote sensing*, vol. 3, pp. 2017–2027, 1986.
- [12] E. Malnes, M. Eckerstorfer, and A. Jonsson, “Remote sensing of avalanches in northern norway using synthetic aperture radar,” *International Snow Science Workshop Grenoble*, 2013.
- [13] C. Bühler, Y. ans Bieler, C. Pielmeier, A. Wiesmann, R. Caduff, R. Frauenfelder, C. Jaedicke, and G. Bippus, “All-weather avalanche activity monitoring from space ?” *International Snow Science Workshop ISSW, At Banff, AB, Canada*, 2014.
- [14] D. S. Wesselink, E. Malnes, M. Eckerstorfer, and R. c. Lindenberg, “Automatic detection of snow avalanche debris in central svalbard using c-band sar data,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 120, no. 6, pp. 205–218, 2017.
- [15] M. Eckerstorfer, E. Malnes, H. Vickers, and K. Muller, “Operational avalanche activity monitoring using radar satellites: From norway to worldwide assistance in avalanche forecasting,” *International Snow Science Workshop, At Innsbruck, Austria*, 2018.
- [16] M. Eckerstorfer, H. Vickers, E. Malnes, and J. Grahm, “Near-real time automatic snow avalanche activity monitoring system using sentinel-1 sar data in norway,” *Remote Sensing*, vol. 11, pp. 773–791, 2019.
- [17] M. Eckerstorfer, E. Malnes, and U. Domaas, “Avalanche debris detection using satellite-borne radar and optical remote sensing,” *International Snow Science Workshop 2014*, 2014.
- [18] H. Vickers, M. Eckerstorfer, E. Malnes, and A. P. Doulgeris, “Synthetic aperture radar (sar) monitoring of avalanche activity: An automated detection scheme,” *20th Scandinavian Conference, SCIA, Tromsø, Norway. Proceedings, Part II. Springer International Publishing*, 2017.
- [19] M. Eckerstorfer, K. Müller, J. Grahm, E. Malnes, R. Engeset, T. Humstad, A. Widforss, and D. Moldestad, “Norway’s operational avalanche activity monitoring system using sentinel-1,” *Virtual Snow Science Workshop (poster)*, 2020.
- [20] S. Leinss, R. Wicki, S. Holenstein, S. Baffelli, and Y. Bühler, “Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from terrasars-x and sentinel-1,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 1783–1803, 2020.
- [21] D. Small, “Sar backscatter multitemporal compositing via local resolution weighting,” *IGARSS - 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 25 Munich, Germany, 22.07.2012 - 27.07.2012*, pp. 4521–4524, 2012.
- [22] C. Tompkin and S. Leinss, “Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021.
- [23] F. Karbou, C. Coleou, M. Lefort, M. Deschartres, N. Eckert, R. Martin, C. G., and A. Dufour, “Monitorin avalanche debris in the french mountains using observations from sentinel-1 satellites,” *Proceedings, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria*, 2018.
- [24] P. E. Kummervold, E. Malnes, M. Eckerstorfer, I. M. Arntzen, and F. Bianchi, “Avalanche detection in sentinel-1 radar images using convolutional neural networks,” *International Snow Science Workshop, At Innsbruck, Austria*, 2018.
- [25] A. U. Walldeland, J. H. Rekten, and A.-B. Saldberg, “Avalanche detection in sar images using deep learning,” *IGARSS 2018 - IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018.
- [26] S. Sinha, S. Giffard-Roisin, a. M. D. F. Karbou, N. Eckert, A. Karas, C. Coleou, and C. Monteleoni, “Can avalanche deposits be effectively detected by deep learning on sentinel-1 satellite sar images,” *International Workshop on Climate Informatics*, 2019.
- [27] F. M. Bianchi, J. Grahm, M. Eckerstorfer, E. Malnes, and H. Vickers, “Snow avalanche segmentation in sar images with fully convolutional neural networks,” *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020.
- [28] L. Breiman, “Random forests,” *Machine Learning* 45 (1), p. 5–32, 2018.
- [29] J. B. Hamar, A.-B. Salberg, and F. Ardelean, “Automatic detection and mapping of avalanches in sar images,” *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 130, p. 689–692, 2016.
- [30] P. D. Sielenou, L. Viallon-Galinier, P. Hagenmuller, P. Naveau, S. Morin, M. Dumont, D. Verfaillie, and N. Eckert, “Combining random forests and class-balancing to discriminate between three classes of avalanche activity in the french alps,” *Cold Regions Science and Technology*, vol. 187, 2021.
- [31] S. Q. J. J. Yu, “Multi-channel filtering of sar images,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001.
- [32] F. Karbou, G. James, P. Durand, and A. Atto, *Thresholds and distances to better detect wetsnow over mountains with Sentinel-1 SAR image time*

series. ISTE-WILEY Science- Change Detection and Image Time-Series Analysis, 2020, in prep, ch. 5.

- [33] H. Lievens, M. Demuzere, H. Marshall, R. H. Reichle, L. Brucker, P. de Rosnay, M. Dumont, M. Girotto, W. Immerzeel, T. Jonas, and al, "Snow depth variability in the northern hemisphere mountains observed from space," *Nat. Commun.*, vol. 4629, 2019.
- [34] H. Rott, "Possibilities and limits of synthetic aperture radar capabilities for snow and glacier monitoring," *Advances in Space Research*, vol. 4, pp. 241–246, 1984.
- [35] E. Malnes and T. Guneriusson, "Mapping of snow covered area with radarsat in norway," *IEEE Xplore*, 2002.
- [36] D. S. Wesselink, "Optimisation of methods for snow avalanche detection in sar images," *Delf University of Technology, Science in Geoscience and Remote Sensing*, 2015.
- [37] M. Eckerstorfer, E. Malnes, and K. Muller, "A complete snow avalanche activity record from a norwegian forecasting region using sentinel-1 satellite-radar data," *Cold Regions Science and Technology*, 2017.
- [38] J. Koskinen, J. J. Pulliainen, and M. Hallikainen, "The use of ers-1 sar data in snow melt monitoring," *Remote Sensing*, vol. 35, pp. 601–610, 1997.
- [39] K. Luojus, J. Pulliainen, S. Metsamäki, and M. Hallikainen, "Snow-covered area estimation using satellite radar wide-swath images," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 45, pp. 978–989, 2007.
- [40] I. Borlaf-Mena, M. Santoro, O. Badea, and M.A., "Investigating the impact of digital elevation models on sentinel-1 backscatter and coherence observations," *Remote Sensing*, vol. 12/18, p. 3016, 2020.
- [41] M. Eckerstorfer, K. Mueller, E. Malnes, and H. D. Oterhals, "Manual and automatic detection of dry snow avalanches in sentinel-1 sar images," *IEEE Conference, IGARSS*, 2021.
- [42] D. Small, "Flattening gamma: radiometric terrain correction for sar imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 8, 3081–3093, 2011.

Chapitre 3

Vers des indicateurs de l'activité avalancheuse à l'échelle régionale

L'étude présentée dans ce chapitre introduit l'application de la méthode développée dans [Karas et al. \(2021\)](#) à une échelle régionale, dans le but de dériver aisément des indicateurs de l'activité avalancheuse. Pour cela, deux massifs alpins français, la Vanoise et le Beaufortain, ont été étudiés au cours de deux saisons hivernales. Ces deux massifs possèdent un nombre et une répartition de données EPA distinctes (nombres de couloir et d'événements différents), et se distinguent par leurs caractéristiques terrain.

Dans ce chapitre, on présente des analyses spatio-temporelles de données générées pour des pentes et des bandes d'altitudes pertinentes. Deux échelles spatiales ont été analysées, celle du couloir d'avalanche et celle du massif, l'échelle régionale. Les données SAR ont été comparées aux observations in-situ, les données EPA, et nous avons utilisé les informations fournies par les BRA. La base de données EPA nous a permis d'avoir une compréhension de l'activité avalancheuse à l'échelle régionale. C'est un proxy de l'activité avalancheuse, que l'on a comparé aux données SAR, les zones détectées par Sentinel-1 présentant des surfaces potentielles de dépôts d'avalanches. L'analyse des BRA a apporté des informations riches sur l'estimation du risque avalanche et les périodes importantes à considérer. Cela nous a permis de mieux comprendre les conditions nivologiques et météorologiques ayant eu lieu au sein du massif et au cours des deux saisons hivernales étudiées.

On remarque qu'en général il y a une concordance positive concernant les occurrences temporelles et l'altitude des débris des événements avalancheux enregistrés dans la base de données in-situ et les observations satellitaires.

Lors de cette étude, j'ai pu contribuer à l'amélioration d'une partie du code de la base de données EPA de l'INRAE, par l'attribution automatique pour chaque couloir EPA de son orientation moyenne. J'ai également pu fournir un code permettant de faciliter le travail en cours de fermeture des limites des couloirs EPA.

L'article présenté ci-dessous a été soumis au journal Cold Regions Science and Technology.

Regional-scale assessment of avalanche activity from Remote Sensing SAR-based avalanche debris: insights from the French Alps

Anna Karas^a, Fatima Karbou^a, Nicolas Eckert^b

^a*Univ. Grenoble Alpes, Universite de Toulouse, Meteo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, 38000, France*

^b*Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, 38000, France*

Abstract

Regional avalanche debris statistics may provide useful insights on snow avalanche activity and its relation to snow and meteorological conditions, including feedback on past critical situations. This study presents a temporal and spatial analysis of avalanche debris data retrieved from two years of Sentinel-1 SAR images and an analysis of their correlation with observed avalanche events and danger levels from the French avalanche bulletins. Avalanche debris binary products are obtained following the method described in [1] and are used to produce avalanche debris occurrence diagrams by date of observation, elevation and orientation classes. The diagrams are computed at two spatial scales: a small area close to the scale of avalanche paths and the scale of the entire Vanoise and Beaufortain massifs. The debris diagrams are evaluated against ground truth, showing a good consistency of these satellite products. In particular, time occurrences and distributions of debris elevations from satellite observations compare favourably with those of the in-situ measurements. Considering a period of high avalanche activity, and at the scale of the Vanoise massif, a correlation of 0.63 is obtained using late afternoon SAR products (considering western orientations and a specific range of elevations). Correlations are lower when considering the descending orbit for the season 2019-2020 or by focusing on different terrain characteristics. This study is a first step towards the systematic generation of avalanche

Email address: anna.karas@meteo.fr (Anna Karas)

activity indicators on a regional scale, as a potential support to avalanche forecasting.

Keywords: SAR, Snow Avalanche Debris, Automatic Detection, Sentinel-1, Regional indicators, Ground Truth

1. Introduction

Urban areas in mountain areas are exposed to avalanche hazard, sudden events that can endanger people, residential areas, infrastructures and can significantly impact the mountain environments ([2, 3, 4, 5, 6]). Achieving times series of avalanche events and deriving indicators of avalanche activity is crucial for avalanche forecasting. The French avalanche hazard forecasting, produced at the massif scale, is based on meteorological and snow cover observations and modelling ([7, 8]). Regular observations of avalanche deposits at a regional scale could help assessing the snowpack evolution, improve physical models and, in fine, improve avalanche forecasting. Moreover, such data could be a great addition to the existing French avalanche database, the EPA chronique (Enquête Permanente sur les Avalanches) that provides relevant in-situ data but is limited by weather conditions, terrain accessibility and focus only on specific avalanche paths and large events reaching valley floor ([9, 10]).

SAR imagery allows a continuity of observations and it is not dependent on daylight or weather conditions ([11], [12]). Numerous studies have shown that snow avalanche debris detection is possible at regional scale using Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery of Sentinel-1 ([13], [14], [15], [16]). Avalanche deposits are detectable using SAR images because of the higher localized radar backscatter in modified areas compared to the surrounding snow (for instance, an increase of surface roughness and snow depth at the avalanche site) ([17], [11]). A common method used for the detection of avalanche debris is the combination of images from several dates before and after an avalanche event. It allows to highlight areas associated with avalanche debris. Typically, an RGB composite image is generally made up of an image taken 6 days before the event (in the R and B channels) and another taken during the avalanche activity period (in the G channel). In this case, the debris areas appear in bright green on the composite image.

The results of automatic debris detection with SAR data, compared to independent data, are highly variable from one study to another, as shown

in [18]: with a maximum Probability Of Detection (POD) of 81.3 % for wet snow avalanches, evaluated with field observations in [13], and a minimum of 11.9 % for dry snow avalanches, achieved in the work of [18]. This latter study highlights the complexity of comparing the performance of each method. Among others, there is a variability of the number of SAR image that were used, and of the acquisition period for the study (a period after large avalanche cycles are chosen by many researchers, e.g. [19], [20], [21], [22], [15], [23]). Another limitation of Sentinel-1 avalanche mapping methods is that very small avalanches are difficult to detect due to the resolution of the satellites ([15], [16]). In addition, dry snow is transparent in C-band SAR. This leads to scarce detection of dry snow avalanches ([18]). Indeed, in the [18] study, the performance of automatic and manual avalanche detection was investigated using a dataset of 318 dry snow avalanches during four winter seasons. The resulting POD for automatic dry snow avalanche detection was 11.9 %, with a false alarm rate of 5.9 %. In addition, there may be instances of false negatives and false positives induced by the transition between wet and dry snow conditions, as noted in the studies of [19] and [13]. Yet, since winter 2020-2021, an automatic detection method is used operationally in all Norwegian forecast regions, using Sentinel-1 to produce avalanche risk feedback ([14]). Forecasters can display the detections using an interactive web platform. Compared to field observations and manual detection, this automatic method led to a POD of 57 % and 79 % respectively ([13]).

In the study of [1], a new automatic debris detection method is described and evaluated on a part of the Swiss Alps using the SPOT6 database of [24], almost 4'000 outlines of avalanche events that occurred after an exceptional avalanche period. The automatic detection is based on color segmentation of multi-date SAR images composite in the HSV (Hue Saturation Value) color space. Different reference images were selected in order to better account for the contribution of snow-free surfaces to SAR signal. Almost 66 % of the avalanche events recorded in the SPOT database were detected by this method, when using SAR time series of the whole January month and comparing with high resolution avalanche mapped events using SPOT 6 image acquired on January 24th 2018 (with the ascending and descending orbits combination and the average of two months as the D-M reference image).

In France, as in other contexts, there is a strong need for indicators of avalanche activity at a regional scale to improve meteorological and snow modelling and to support feedback from past events and critical situations

[25, 26]. Hence, the objectives of this study are i) to investigate how spatio-temporal indicators of snow avalanche activity can be derived from satellite observations of avalanche debris products at the scale of a mountain range and ii) to evaluate their usefulness to monitor temporal variations in avalanche activity. This analysis is conducted in the French context but could be in the future extended to other mountain areas that are frequently observed by Sentinel-1. We rely on the avalanche debris detection method described in [1]. From the binary debris products retrieved using this method and by taking advantage of terrain features such as elevation, slope, and orientation, we derive synthetic avalanche debris diagrams at the scale of mountain ranges. In this way, we generate diagrams of avalanche deposition occurrence lines by elevation and orientation classes. We focus on two massifs : the Vanoise massif and the Beaufortain massif which are unevenly covered by field validation data, namely observations from the EPA and avalanche danger levels from the French avalanche Bulletins taken as ground truth. We also target two winter seasons: 2017-18 and 2019-20, both of which were subject to a number of wet snow avalanche events and long periods of wet snow cover [27, 28].

The article is organized as follows: the data and methods used are described in section 2, the results are presented in section 3 with a discussion of limitations and potential implications for future work. Conclusions are given at the end of the article.

2. Material and method

2.1. Test zones and time period

As stated earlier, we focused on the winters of 2017-2018 and 2019-2020 as well as on the two massifs of the Vanoise and Beaufortain. The studied massifs include high and mid-mountain areas with a diversity of slope orientations, vegetation cover and the presence of several lakes and high elevation glaciers.

The Vanoise massif is located in Savoie and is a typical inland high mountain massif with glaciers and mountain peaks of almost 4000 m (see Figure 1 for the location of the massif). Its area is approximately 1'200 km². The Vanoise massif is limited to the north by the high valley of the Isère and to the south by the valley of the Arc. The massif hosts the Vanoise National Park and several very large ski resorts offering significant and very diversified tourist attractions.

The Beaufortain massif located in Savoie and Haute-Savoie is limited by the Vanoise massif to the south, by the Arly river to the northwest and the Bon-Nant river to the northeast. The massif has vast Nordic ski areas in Nâves and Les Saisies. Its area is approximately 760 km².

Besides the Vanoise and the Beaufortain massifs, we also focus on a smaller test zone, noted Zone1 hereafter, located near the city of Pralognan-la-Vanoise (see blue square in Figure 1). Zone1 was selected as it includes several avalanche paths monitored in the EPA. The monitored paths have slopes that are predominantly oriented East/West (see Figure 1 for the location of avalanche paths within Zone1). The results we present in this article are drawn at the scale of the zone 1 and also at the scale of the whole Vanoise and Beaufortain massifs.

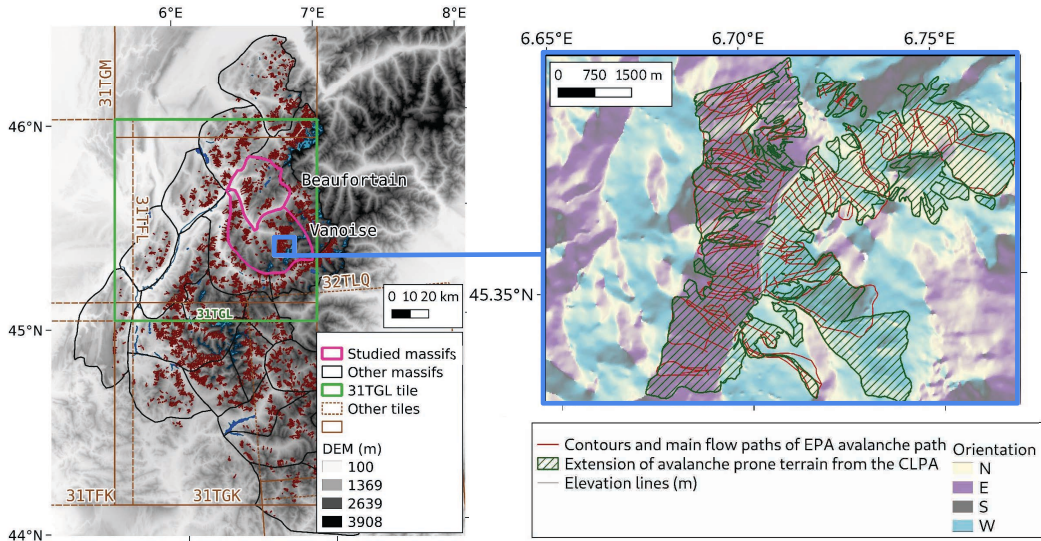


Figure 1: Localization of the studied massifs in the Northern part of the French Alps, with a zoom on zone1 in the Vanoise massif. Avalanche paths that are monitored (EPA database), and extreme limits of all known avalanches, (CLPA avalanche cadastre), are localized on this zoom.

The study period covers two winters from November 2017 to June 2020 characterised by remarkable avalanche activities with mainly wet snow avalanche conditions.

Snow cover during the 2017-2018 winter season was remarkably abundant

in snow ([29]). The winter was marked by an excess of precipitation and with temperatures well below average, with the exception of January 2018, which had rather moderate temperatures. The winter was characterized by many very active "easterly return" episodes, which have the ability to generate significant snowfall and avalanche activity ([30]). In December 2017 and January 2018, several periods of rain were recorded up to high elevations (2,000 to 2,400 m) and strong winds. Avalanche activity was significantly high during January 2018 with frequent high and very high danger levels. During March 2018, there were significant avalanche events (47 recorded accidents/incidents). Several large wet avalanches were released in April 2018, which was associated with rather dry and mild temperature conditions.

The 2019-2020 winter season was exceptionally warm, 2 to 3°C above the 1981-2010 average ([31]). In the high mountains of the Northern Alps, over 1800/2000 m, snow cover was generally abundant. The first two weeks of December 2019 were characterised by episodes of intense precipitation and temperatures that were generally low for the season. Snow cover was abundant even at medium elevation. In February 2020, very mild temperatures and low snowfall caused a snow deficit at elevations below 1'500 m, while snowfall was generally deeper than normal at higher elevations (above 1'800 m). Between late February and early March 2020, heavy accumulations of snow, often at low elevations, restored the snow cover to its normal level.

2.2. Remote sensing of avalanche debris using Sentinel-1 SAR images

We used remote sensing data coming from Sentinel-1 satellites constellation (noted S1 hereafter) which were launched by the European Space Agency (ESA) within the Copernicus Programme (S1A in April 2014 and S1B in April 2016). We use Level-1 Ground Range Detected and backscatter coefficients at C-band (GRD, with a spatial resolution of 20 m). The products are available from CNES and ESA web sites (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>, <https://peps.cnes.fr>). Our study area is optimally covered for two Sentinel-1 orbits: the ascending orbit with relative orbit number 161 (late afternoon pass, noted A161 hereafter) and the descending orbit with relative orbit number 139 (early morning pass, noted D139 hereafter). The reprocessing steps of SAR images are fully described in in [1], and rely on the computing facilities of the French Space Agency, CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) using the S1Tiling processing (see <https://github.com/CNES/S1Tiling>). S1Tiling operates preprocessing of SAR images to provide ready-to-use images on regular tiles (shown on Figure 1, the 31TGL tile includes our test zones).

To generate avalanche debris, we rely on the method fully described and evaluated by [1]. It is a segmentation method in the HSV (Hue Saturation Value) color space allowing to segment an area of interest by targeting its associated color. The basic principle of this method is to combine SAR images at different dates (observation Day, observation Day-6, a summer image) on the basis of a composite RGB image, each channel being associated with a SAR image. By construction, areas associated with a significant increase in backscatter can be seen in green in the RGB image. In order to detect the green areas, a transformation of the RGB composite image to HSV space is performed. As in [1], we masked out water bodies, glaciers and perpetual snow, and the artificial areas (urban fabrics, industrial, commercial and transport units, etc.) using classes of land cover from Corine Land Cover database. We are also masking areas outside the French avalanche map, called CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes d’Avalanche). It is a spatial record of the extreme limits of all known avalanches in the French Alps and Pyrenees ([32], [10]). It contains spatial information, integrated over a long period of time, of exceptional richness. Hence, we are focusing on areas where avalanches are most likely to occur.

We therefore end up with SAR-based binary products generated from a total of 138 SAR images : 0: no avalanche debris, 1: avalanche debris identified. The total surface area of the SAR coverage at regional scale is of around 270 km². For the Zone1, it is of around 27 km².

2.3. *In-situ data*

To evaluate our statistics, we used in-situ data from the Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) database. EPA is an inventory of approximately 3’000 avalanche paths monitored in the French Alps and Pyrenees ([10]). It contains quantitative and qualitative avalanche data such as release cause, a short window of the avalanche released day, run-out elevations, etc. The EPA data are stored by the Inrae research institute (Institut National de Recherche pour l’Agriculture, l’Alimentation et l’Environnement). It was initially created to capture large avalanche events in exposed areas. Thus, events are only recorded when deposits reach a certain threshold (reaching the valley floor, for example, is one of the criteria used). This ground truth database is the result of the monitoring of avalanche debris by ONF (Office Nationale des Forêts) forest rangers. As it is based on human observations, it is not totally free of uncertainties (e.g., on the dates of avalanche triggering) but has the advantage of having records over a long time span that can

be used as a proxy for real avalanche activity. This is acknowledged by its extensive use for hazard and risk assessment, and as a relevant information source to identify climate change impact on process activity [33, 34, 35].

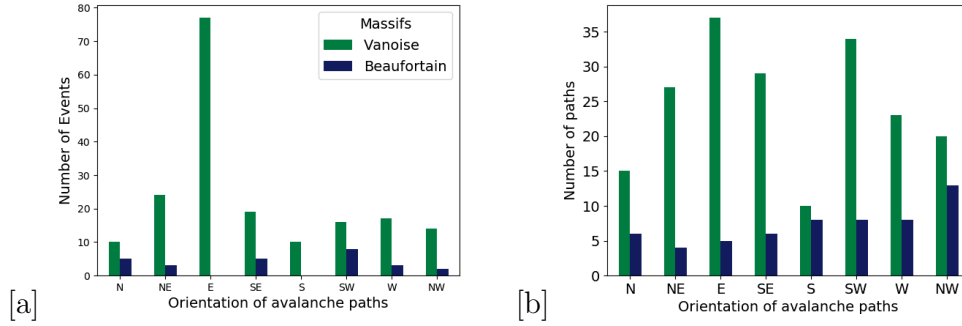


Figure 2: Number of EPA avalanche events and paths per classes of orientations in the Vanoise and Beaufortain massifs of the French Alps. **(a)** is the number of events for the winter season 2019-20 and **(b)** the distribution of the paths' orientation.

Figure 2(a) shows the number of EPA avalanche events by studied massifs and by EPA path's orientation for the winter season 2019-2020. Figure 2(b) displays the number of paths per orientations for the Vanoise and Beaufortain massifs. The Vanoise massif is the massif with the greatest number of EPA paths (with a total of 195, 77 and 93 respectively west-facing and east-facing). The Beaufortain is the massif of the French Alps with the smallest number of EPA observed paths (with a total of 58). Regarding the number of avalanche events observed, the statistics are season dependent. For the Vanoise massif, for example, and for the east-facing paths, a total of 179 events were recorded in 2017, 85 in 2018, 120 in 2019 and 86 in 2020. For the west facing paths, the number of events was 81, 28, 47 and 43 for 2017, 2018, 2019 and 2020 respectively.

The winter seasons 2017-2018 and 2019-2020 are associated with high avalanche activity. The Vanoise and Beaufortain massifs are two contrasted massifs in terms of in-situ data number (different number of paths) and coverage (varied distribution of the number of observed events according to orientation classes). As mentioned previously, for the present article we focus on the winters of 2017-2018 and 2019-2020 and on the two massifs of Vanoise and Beaufortain.

2.4. Reports from models and In-Situ data

The BRA (Bulletin d’Estimation du Risque d’Avalanche) is the French avalanche bulletin. The European Avalanche Warning Services (EAWS8) is a working group that facilitates homogeneous evolution of the avalanche bulletin content. This group decided that the same European avalanche risk scale, designed with five levels, should be used by all countries facing snow avalanche hazards. This scale refers to the number, size and probability that an avalanche can occur in a given area ([36]). For the French massifs, it is expertly and daily produced by Météo-France agents given available in-situ observations, weather and snowpack condition. It relies on modelling that provides information otherwise unavailable on the current and future state of the snowpack and its mechanical stability ([7]). It gives information to those having a professional or recreational usage of the mountains, among others, on the avalanche risk for each massif by elevation range and it described the most dangerous slopes.

Note that during the COVID-19 pandemic, the production of BRA bulletins ended earlier in the 2019-2020 season. The last BRA bulletins was given the 20th of March 2020. This pandemic could have also restricted the EPA observations.

2.5. Principles and criteria for data comparison

As described in the Subsection 2.2, the method generates binary products (0: no avalanche debris, 1: avalanche debris identified).

Debris lines :

To examine avalanche debris seen by satellite, we compute elevation-orientation-time diagrams (called debris lines hereafter) that are suitable for monitoring the normalized percentage of SAR pixels associated with avalanche debris areas at the scale of massifs or at the scale of an area of interest. The following equation is used to calculate the percentage of SAR pixels associated with avalanche debris areas, with N_1 the number of detected pixels and N_0 the number of not detected pixels: $P = 100 \times \frac{N_1}{N_0 + N_1}$. 100% means that for a given elevation and orientation class, 100% of the pixels are associated with avalanche debris. On the contrary, 0% would indicate that no pixels are associated with avalanche debris. Diagrams of this type have been used by [37] to track snow meltlines from SAR images at the scale of massifs. The elevation-orientation-time diagrams are created by

computing the percentage of SAR detected pixels per 100 m elevation band. On the elevation-orientation-time diagrams, the dates of observation of EPA paths are given:

- date1 corresponds to the date on which the EPA path was observed without deposits
- date2 is the date on which visible deposits were observed on the EPA path

For each EPA observation date, the minimum elevation value of avalanche deposits are reported in the diagram. The elevation-orientation-time diagrams is computed for specific cases:

- eastern orientations that takes into account NE, E and SE orientations (22.5° to 157.5°)
- western orientations that takes into account NW, W and SW orientations (202.5° to 337.5°)
- all classes of orientations (0° to 360°)

Elevations of debris :

To compare SAR detection products with in-situ data, we produce a boxplot distribution of avalanche debris elevation as observed by in-situ or Sentinel-1 measurements. For Sentinel-1, we make use of the previously described debris lines and look at the distribution of debris elevations over a given time period for all orientation classes. For the EPA measurements, we consider the distribution of minimum and maximum debris heights observed over the same time period as Sentinel-1. From these time series of debris elevations, we first produce moving average of the data and then calculate correlations between the EPA database and the data from the satellite, either by considering the whole database or by targeting elevations close to those of the EPA.

3. Results

3.1. Zoom on Zone1 close to avalanche paths

Figure 3 shows debris lines from SAR products for Zone1 as a function of SAR observation dates and elevation classes (all orientations combined) for

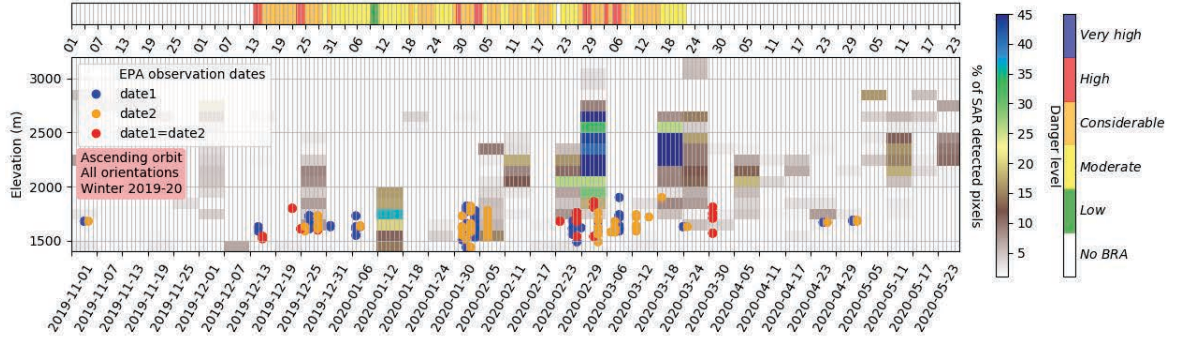


Figure 3: Debris lines from SAR products for Zone1 as a function of SAR observation dates and elevation classes (all orientations combined) for the 2019-2020 season. Results are given for the ascending orbit. The debris elevations observed by the EPA data are also shown. Note that for these data, two different observation dates are reported when the exact date of the event was not confirmed by the observer. The upper part of the figure is a timeline showing the daily avalanche danger level as indicated by the BRA bulletins. Each box corresponds to a day and is colored with the highest danger level of the day, according to the BRA bulletins.

the 2019-2020 season. Results are given for the ascending orbit. The debris elevations observed by the EPA data are also shown (circle symbols). Note that for these data, two different observation dates are reported (blue and orange circles) when the exact date of the event was not confirmed by the observer (red circles).

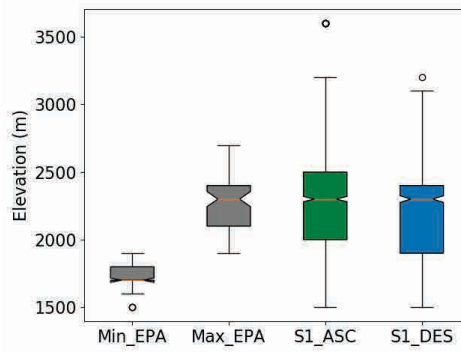


Figure 4: Distributions of avalanche deposits elevations as inferred from EPA observations and from satellite deposit lines. Results are given for the season 2019-2020, Zone1, with the ascending orbit and all classes of orientation.

Indeed, the circles stand for the EPA observations: blue circles for the first observation date of the EPA path without any avalanche deposits, oranges circles for the second observation date with visible deposits and red ones when the first and second observation dates coincide (observation of a released avalanche). We used the minimal elevation value of avalanche deposits within the lower part of the EPA path. The upper part of the figure is a timeline showing the daily avalanche danger level as indicated by the BRA bulletins. Each box corresponds to a day and is colored with the highest danger level of the day, according to the BRA bulletins.

We observe a temporal correspondence between EPA events and high danger level days (displayed in red on the figure). Results from Sentinel-1 ascending orbit seem in rather good agreement with independent data as long as SAR detections are obtained at dates and elevations close to the reported avalanche events, for instance, the 5th February 2020, with around 5 to 40 % of detection in the elevation range of 1'500 - 2'000 m. It is notable that some of the SAR detections were at higher elevation than those of the EPA events that are mostly located in the elevation range of 1'500 - 2'000 m (as for the 29th February, with SAR detection up to 3'100 m). As we used the minimal observed elevation range of the deposits located on the EPA paths, we expect the SAR pixels detected to be associated with an elevation range equal to or greater than the one of EPA observations. Some of the SAR detections occurred on days when no EPA events were observed. An example of this is 11th May 2020.

We extracted the debris elevations as seen by satellites (from debris line diagrams) for comparison with EPA events. Figure 4 shows boxplot distribution of elevations of avalanche debris for the Zone1 and for the 2019-2020 season. Results are given for EPA (in grey), using separately the minimum and maximum elevation values of observed deposits, and for SAR ascending and descending orbits. For the 2019-2020 season and Zone1, the median value of debris elevations is around 1'700 m for the minimum EPA elevation values, 2'300 m for the maximum EPA elevation values, while it is close to 2'300 for the ascending orbit and the descending orbit. The distribution of the EPA elevations shows less variability than the one of the SAR observations. If we focus on the elevation range of 1'400 to 2'700 m (the minimum and maximum elevation values of observed EPA deposits), correlation between SAR and EPA data is 0.45 and 0.34, respectively for ascending and descending orbits (Pearson coefficient). Correlations are larger for elevations ranging from 1'400 to 2'000 m (0.6 and 0.38, respectively for ascending and

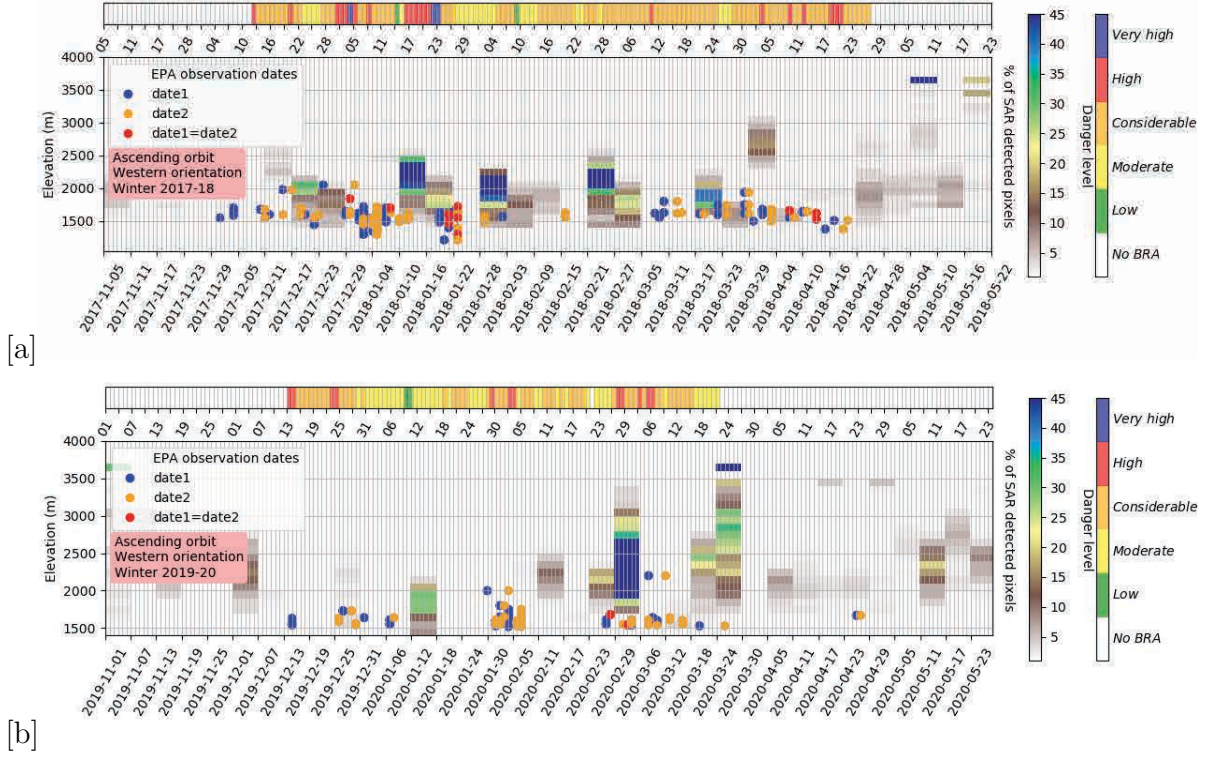


Figure 5: Same as Figure 4 but at the scale of the Vanoise massif and for ascending orbit and western orientations. Results are given for (a) 2017-2018 season and (b) 2019-2020 season.

descending orbits).

3.2. Results at the scale of the Vanoise and the Beaufortain massifs

We now examine the detection results at the scale of the Vanoise and Beaufortain massifs. Figures 5 and 7 show debris lines as obtained from SAR data at the scale of the Vanoise and the Beaufortain massifs, respectively. For the massif of the Vanoise, results are given for the ascending orbit, western orientations and for two seasons (2017-2018 and 2019-2020). For the massif of the Beaufortain, results are given for all orientations, for the 2017-2018 season and for both ascending and descending orbits. For the Vanoise massif, we can see a very good agreement between EPA events (elevations, temporality) and SAR detections especially for the 2017-2018 season. Generally, the SAR detections are close to avalanche activity periods

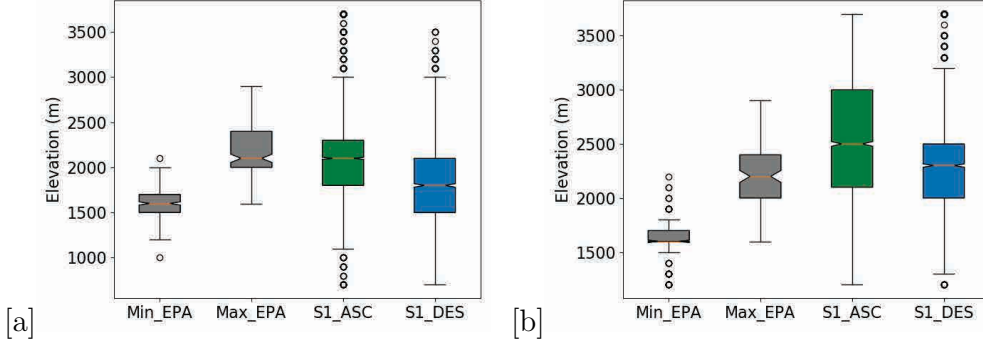


Figure 6: Boxplot distribution of elevations of avalanche debris for the Vanoise massif, with western orientations and for the (a) 2017-2018 and (b) 2019-2020 seasons. Results are given for EPA (in grey) and for SAR ascending and descending orbits.

announced by the BRA information: for days with a considerable to high danger levels, for the season 2017-18 and with mostly considerable danger levels for the winter of 2019-20. We extracted the debris elevations as seen by satellites (from debris line diagrams) for comparison with EPA events (results are shown in Figures 6 and 8). Figure 6 shows boxplot distribution of elevations of avalanche debris for the Vanoise massif, all orientations and for the ascending and descending orbits (two seasons are shown: 2017-2018 and 2019-2020). Figure 8 shows boxplot distribution of elevations of avalanche debris for the Beaufortain massif, all orientations and for the ascending and descending orbits. EPA statistics are given in grey boxplots. For the Vanoise massif, the median values of EPA maximum elevation values are of 2'100 m and 2'200 m, respectively in 2017-2018 and 2019-2020. The median values of SAR-based debris elevations are of 2'100 m and 2'500 m in 2017-2018 and 2019-2020 respectively, with the ascending orbit. The distribution of debris elevations by satellite differs from that of the EPA, which is expected. This hypothesis is also confirmed by the results obtained in the Beaufortain massif (median values of elevations for the season of 2019-2020: Min_{EPA} (1'300 m), Max_{EPA} (1'900 m), SAR ascending and descending : (2'200 m)).

The Table 1 introduces correlation coefficients obtained for all classes of orientation and at the scale of the Vanoise massif. For the range of elevation of the minimum and maximum values of observed EPA debris (1'000-2'800 m for 2017-2018 and 1'100-2'800 m for the 2019-2020 winter season), we have correlation values between SAR and EPA close to 0.5 for 2017-2018 and close to 0.35 for 2019-2020. If we consider the period of particularly high avalanche

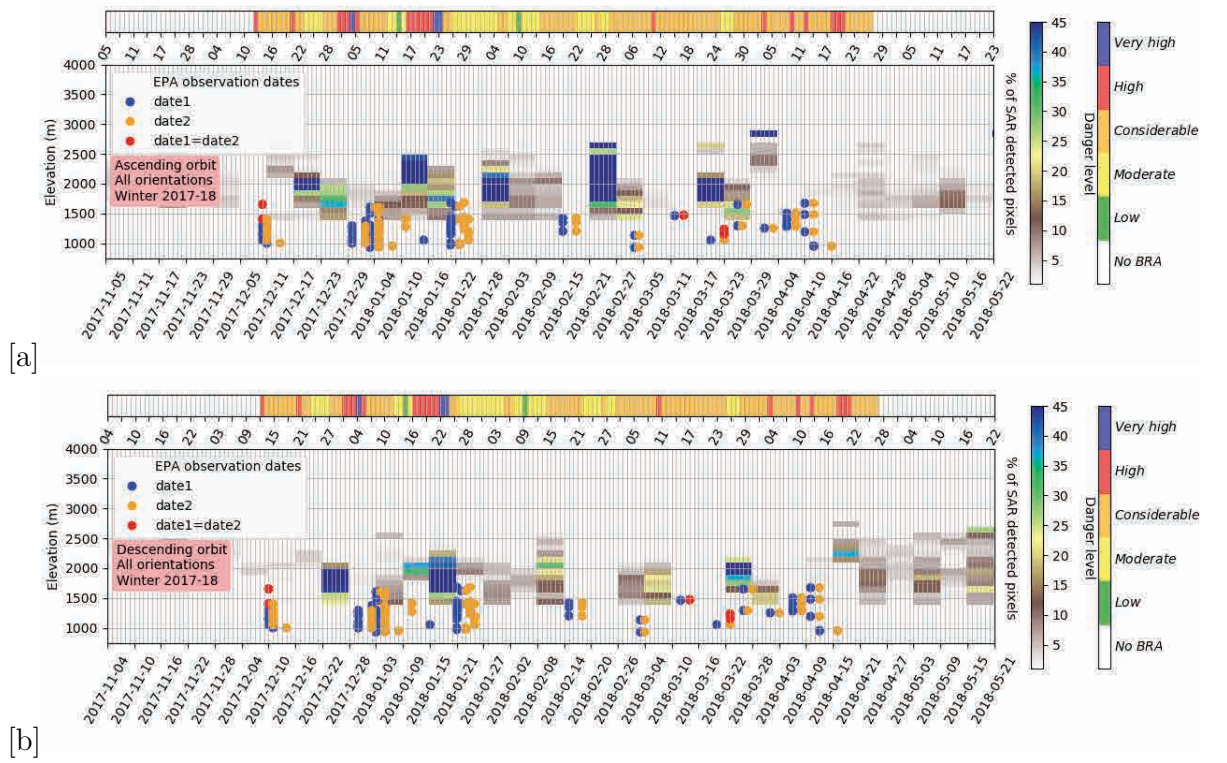


Figure 7: Same as the Figure 4 but at the scale of the Beaufortain massif, with all orientations and the 2017-2018 season. Results are given for (a) the ascending orbit and (b) the descending orbit.

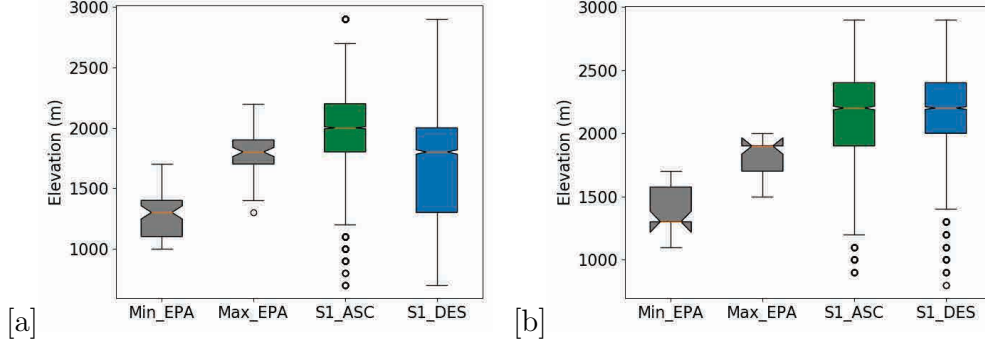


Figure 8: Boxplot distribution of elevations of avalanche debris for the Beaufortain massif, with western orientations and for the 2017-2018 and 2019-2020 seasons. Results are given for EPA (in grey) and for SAR ascending and descending orbits.

Table 1: **Pearson correlation between the percentages of SAR detected pixels and the number of EPA events for the studied seasons at the Vanoise massif scale. We considered all classes of orientation. The results are given for the ascending (ASC) and descending (DES) orbits.**

Winter season	Elevation range (m)	ASC	DES
2017-2018	1'000 - 2'800	0.47	0.50
	1'000 - 2'000	0.39	0.54
2019-2020	1'100 - 2'800	0.32	0.29
	1'100 - 2'000	0.35	0.38

activity, from mid-December 2017 to the end of January 2018 (with several days of high and very high danger), for the Vanoise massif, we obtained correlation of about 0.55 with the ascending orbit. Over this period, there are about 190 EPA events over the period and 310 for the entire 2017-2018 season.

4. Discussion, conclusion and outlooks

For an effective monitoring of avalanche activity areas, we rely on a set of terrain data, expert model outputs and satellite products. Each of these products is not perfect but contains useful information that can be related to avalanche activity. The EPA database is very rich but has the disadvantages of in-situ databases: an inhomogeneous geographical distribution, lack of details for some avalanche events, data that is difficult to acquire in

winter depending on weather conditions, an extension of the database that is very difficult to achieve due to the significant potential additional cost, the complexity of the mountain terrain, and the difficulties of quantifying an index of the measurement quality. Sentinel-1 SAR images provide a spatial view of avalanche debris but with some limitations: the 6-day temporal frequency may create the risk of missing an avalanche event. Snow surface conditions can change in 6 days. For instance, during some days of the winter, in the early morning, the snow cover could have been frozen while in the late afternoon, it could have been thawed on sunny slopes.

The rapidly changing snow cover conditions may explain the difference in the number of detections between the two orbits. Previous studies have observed high scores of detection of wet snow avalanches ([13], [15], [16]). As discussed and summarized in the study of [18], the probability of detection scores are highly variable when comparing the avalanche detection studies. SAR images in mountainous terrain present zones of geometrical distortions which make the exploitation of the images very difficult. Depending on the direction of the orbit, some areas are not well observed with the risk of not being able to observe avalanche events. In general, ascending orbits do not optimally see east-facing areas and descending orbits do not optimally see west-facing areas. Observations from ascending orbit are acquired at the end of the day while those from descending orbit are acquired very early in the morning, resulting in a difference in detection capacity depending on avalanche events and the state of the snowpack.

These limitations and the differences in observation between satellites and field measurements were the driving force behind the search for satellite based information which could be synthesized at the scale of an area of interest and which can usefully supplement the information obtained from the in situ data. In this study, we have therefore shown that the avalanche debris lines generated at the scale of the massifs and at the scale of another area of interest make it possible to target information of interest for the avalanche activity: monitoring of the minimum elevation of the debris over time and for different slope orientations. This quantity is directly comparable with in-situ measurements. Satellite estimates of debris elevations could be evaluated or even adjusted by in-situ measurements and then applied to areas poorly covered by field data.

The correlation coefficient is a measure of the strength of the relationship between two variables ([38]). We showed the existence of a positive linear relationship between SAR products and ground truth at the considered

spatio-temporal scales. The maximum value of the correlation coefficient obtained is of 0.63 for the period of high avalanche activity from mid-December 2017 to the end of January 2018, with the ascending orbit and for the elevation band of $[Min_{EPA}; Max_{EPA}]$. It is important to note that hazard levels high (4) and very high (5) are often representative of moments when there is a strong spontaneous avalanche activity of significant size (large, very large and extremely large avalanches, according to the European Avalanche Warning Services Matrix). Thus, it was expected that there would be high avalanche activity detected by SAR during a period of high avalanche activity, with many hazard levels 4 and 5. The difference of correlation coefficients between the two orbits for the same period and zone can be explained by the possible existence of gaps between the EPA events and SAR detection. For instance, because of meteorological conditions changes, some avalanche deposits can be visible by the satellite only few days after the events. Furthermore, it is worthwhile to note that, for the same study zone, the SAR method would better detect the potential deposits on specific orientations with the ascending orbits, while it would better detect other orientations with the descending orbit for the season 2019-2020. This variation of SAR visibility could also explain the difference of the correlation coefficients for the ascending and descending orbits.

This work is a first step towards the generation of regional indicators on avalanche activity, but many developments are still to be expected, in particular with algorithmic work to improve the debris detection technique and the implementation of a statistical method allowing useful combination of satellite information with field data. At this cost, it could become a valuable support to avalanche activity assessment and forecasting in the many areas where SAR remote sensing data is available.

Author Contributions

Study design, F.K., N.E.; Methodology, A.K., F.K., N.E.; Application: A.K.; Writing—original draft preparation, A.K.; writing—review and editing, A.K., F.K., N.E.; All authors have read and agreed to the submitted version of the manuscript.

Acknowledgments

Authors are grateful to the numerous people from ONF-RTM that contributed to the EPA data collection.

The authors would also like to acknowledge:

- The support provided by the PNTS French program (Programme National de Télédétection Spatiale).
- The support provided by CNES for preprocessing SAR images using the PEPS facilities. CNRM and IGE are members of Labex OSUG.

References

- [1] A. Karas, F. Karbou, S. Giffard-Roisin, P. Durand, N. Eckert, Automatic color detection-based method applied to sentinel-1 sar images for snow avalanche debris monitoring, . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers 60 (2021) 1–17. doi:10.1109/TGRS.2021.3131853.
- [2] D. McClung, P. A. Schaerer, The avalanche handbook, The Mountaineers Books, 2006.
- [3] SLF, W. Ammann, Der Lawinenwinter 1999: Ereignisanalyse, Eidgenössisches Institut für Schnee-und Lawinenforschung, 2000.
- [4] F. Leone, A. Colas, Y. Garcin, N. Eckert, V. Jomelli, The snow avalanches risk on alpine roads network. assessment of impacts and mapping of accessibility loss., Journal of Alpine Research - Revue de géographie alpine (2014). doi:10.4000/rga.2501.
- [5] C. Berlin, F. Techel, B. Moor, M. Zwahlen, R. Hasler, study group SNC, Snow avalanche deaths in switzerland from 1995 to 2014—results of a nation-wide linkage study, PLoS one (2019). doi:10.1371/journal.pone.0225735.
- [6] N. Eckert, F. Giacona, Towards a holistic paradigm for long-term snow avalanche risk assessment and mitigation, Ambio (2022) 1–22doi:10.1007/s13280-022-01804-1.
- [7] S. Morin, S. Horton, F. Techel, M. Bavay, c. Coléou, C. Fierz, A. Gobiet, P. Hagenmuller, M. Lafaysse, M. Ližar, C. Mitterer, F. Monti, K. Müller, M. Olefs, J. S. Snook, A. van Herwijnen, V. Vionnet, Application of physical snowpack models in support of operational avalanche

- hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future, *Cold Regions Science and Technology* (2019) 02910doi:10.1016/j.coldregions.2019.102910, 2019.
- [8] L. Viallon-Galinier, P. Hagenmuller, N. Eckert, Combining snow physics and machine learning to predict avalanche activity: does it help?, *The Cryosphere Discussions* [preprint], in review (2022) 1–23doi:10.5194/tc-2022-108.
 - [9] N. Eckert, C. Keylock, H. Castebrunet, A. Lavigne, M. Naaim, Temporal trends in avalanche activity in the french alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods, *Journal of Glaciology* 59 (213) (2013) 93–114. doi:10.3189/2013JoG12J091.
 - [10] E. Bourova, E. Maldonado, J. Leroy, R. Alouani, N. Eckert, M. Bonnefoy-Demongeot, M. Deschatres, A new web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in france, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16 (2016) 1205–1216. doi:10.5194/nhess-16-1205-2016, 2016.
 - [11] E. M. Eckerstorfer and Malnes, Manual detection of snow avalanche debris using high-resolution radarsat-2 sar images, *Cold Regions Science and Technology* 120 (6) (2015) 205–218. doi:10.1016/j.coldregions.2015.08.0164.
 - [12] A. Wiesmann, U. Wegmuller, M. Honikel, T. Strozzi, C. L. Werner, Potential and methodology of satellite based sar for hazard mapping, *IGARSS Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)* 7 (2001) 3262–3264. doi:10.1109/IGARSS.2001.978322.
 - [13] M. Eckerstorfer, H. Vickers, E. Malnes, J. Grahn, Near-real time automatic snow avalanche activity monitoring system using sentinel-1 sar data in norway, *Remote Sensing* 11 (2019) 773–791. doi:10.3390/rs11232863.
 - [14] M. Eckerstorfer, K. Müller, J. Grahn, E. Malnes, R. Engeset, T. Humstad, A. Widforss, D. Moldestad, Norway’s operational avalanche activity monitoring system using sentinel-1, *Virtual Snow Science Workshop* (2020). doi:10.13140/RG.2.2.14281.36966.

- [15] S. Leinss, R. Wicki, S. Holenstein, S. Baffelli, Y. Bühler, Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from terrasar-x and sentinel-1, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (2020) 1783—1803. doi:10.5194/nhess-20-1783-2020.
- [16] E. D. Hafner, F. Techel, S. Leinss, Y. Bühler, Mapping avalanches with satellites – evaluation of performance and completeness, *The Cryosphere* 15 (2021) 983–1004. doi:10.5194/tc-15-983-2021.
- [17] F. Ulaby, R. Moore, A. Fung, Microwave dielectric properties of natural earth materials, *Microwave remote sensing* 3 (1986) 2017–2027.
- [18] M. Eckerstorfer, H. D. OterhalsK., K. Mueller, E. Malnes, J. Grahn, S. Langeland, P. Velsand, Performance of manual and automatic detection of dry snow avalanches in sentinel-1 sar images, *Cold Regions Science and Technology* (2022). doi:10.1016/j.coldregions.2022.103549.
- [19] M. Eckerstorfer, E. Malnes, K. Muller, A complete snow avalanche activity record from a norwegian forecasting region using sentinel-1 satellite-radar data, *Cold Regions Science and Technology* (2017). doi:https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.004.
- [20] D. S. Wesselink, E. Malnes, M. Eckerstorfer, R. c. Lindenbergh, Automatic detection of snow avalanche debris in central svalbard using c-band sar data., *Cold Regions Science and Technology* 120 (6) (2017) 205–218. doi:10.1080/17518369.2017.1333236.
- [21] E. M. M. E. Abermann, J., B. U. Hansen, A large wet snow avalanche cycle in West Greenland quantified using remote sensing and in situ observations, Vol. 97, *Nat Hazards*, 2019, p. 517–534. doi:10.1007/s11069-019-03655-8.
- [22] S. Sinha, S. Giffard-Roisin, a. M. D. F. Karbou, N. Eckert, A. Karas, C. Coleou, C. Monteleoni, Can avalanche deposits be effectively detected by deep learning on sentinel-1 satellite sar images, *International Workshop on Climate Informatics* (2019).
- [23] C. Tompkin, S. Leinss, Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* (2021). doi:10.1109/JSTARS.2021.3074418.

- [24] E. Hafner, Y. Bühler, Spot6 avalanche outlines 24 january 2018, EnviDat (2019). doi:10.16904/envidat.77.
- [25] N. Eckert, M. Naaim, F. Giacona, P. Favier, A. Lavigne, D. Richard, F. Bourrier, E. Parent, Repenser les fondements du zonage règlementaire des risques en montagne récurrents, *La Houille Blanche* (2) (2018) 38–67. doi:doi.org/10.1051/lhb/2018019.
- [26] P. D. Sielenou, L. Viallon-Galinier, P. Hagenmuller, P. Naveau, S. Morin, M. Dumont, D. Verfaillie, N. Eckert, Combining random forests and class-balancing to discriminate between three classes of avalanche activity in the french alps, *Cold Regions Science and Technology* 187 (2021). doi:10.1016/j.coldregions.2021.103276.
- [27] M. Stoffel, C. Corona, Future winters glimpsed in the alps, *Nature Geoscience* 11 (7) (2018) 458–460. doi:10.1038/s41561-018-0177-6.
- [28] G. Evin, P. D. Sielenou, N. Eckert, P. Naveau, P. Hagenmuller, S. Morin, Extreme avalanche cycles: Return levels and probability distributions depending on snow and meteorological conditions, *Weather and Climate Extremes* 33 (2021) 100344. doi:10.1016/j.wace.2021.100344.
- [29] D. Goetz, Hiver 2017-2018: bilan de l’enneigement dans les massifs français, Météo-France, Cellule Montagne et Nivologie avec l’aide des nivologues des Centres Météorologiques de montagne (2018).
- [30] N. Eckert, C. Coleou, H. Castebrunet, M. Deschatres, G. Giraud, J. Gaume, Cross-comparison of meteorological and avalanche data for characterising avalanche cycles: The example of december 2008 in the eastern part of the french alps, *Cold Regions Science and Technology* (2010). doi:10.1016/j.coldregions.2010.08.009.
- [31] D. Goetz, Bilan de l’enneigement durant la saison hivernale 2019-20 dans les massifs montagneux français, Météo-France, Cellule Montagne et Nivologie avec l’aide des nivologues des Centres Météorologiques de montagne (2020).
- [32] M. Bonnefoy, G. Borrel, D. Richard, L. Bélanger, M. Naaim, La carte de localisation des phénomènes d’avalanche (clpa) : enjeux et perspectives, *Sciences Eaux et Territoires* 2 (2010) 6–14. doi:10.3917/set.002.0006.

- [33] N. Eckert, E. Parent, T. Faug, M. Naaïm, Bayesian optimal design of an avalanche dam using a multivariate numerical avalanche model, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 23 (8) (2009) 1123–1141. doi:10.1007/s00477-008-0287-6.
- [34] N. Eckert, H. Baya, M. Deschâtres, Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in france, *Journal of Climate* 23 (12) (2010) 3157–3180. doi:10.1175/2010JCLI3312.1.
- [35] H. Castebrunet, N. Eckert, G. Giraud, Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the french alps, *Climate of the Past* 8 (2) (2012) 855–875.
- [36] C. Coléou, S. Morin, Twenty-five years of avalanche risk forecasting at météo-france, *La Météorologie* 100 (2018) 79–84.
- [37] F. Karbou, G. Veyssière, C. Coleou, A. Dufour, I. Gouttevin, P. Durand, S. Gascoin, M. Grizonnet, Monitoring wet snow over an alpine region using sentinel-1 observations, *Remote Sensing* (2021). doi:10.3390/rs13030381.
- [38] P. Schober, C. Boer, L. A. Schwarte, Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation, *Anesthesia Analgesia* (2018). doi:10.1213/ANE.0000000000002864.

Chapitre 4

Méthodes de détection des événements avalancheux à partir de Sentinel-1

Dans l'étude de [Karas et al. \(2021\)](#), nous avons discuté des différentes possibilités d'améliorations et de perspectives. L'une de ses possibilités est le passage de l'échelle des pixels à celle des événements, qui semble être plus en accord avec la nature de l'événement avalanche et qui permettra de faciliter le travail d'évaluation ou de validation. Nous étudions ce sujet dans ce chapitre, en mettant en place une méthode de regroupement de pixels. Ceci nous permet de considérer des événements, en utilisant un algorithme de partitionnement des données.

Nous introduisons dans ce chapitre, une amélioration de la méthode par un filtrage des détections développé par [Eckerstorfer et al. \(2019\)](#). Ce filtrage permet de cibler les zones ayant une hausse locale et importante du coefficient de rétrodiffusion, par rapport au reste du manteau neigeux dont les propriétés ont été peu modifiées.

On compare différentes versions de segmentation de l'espace de couleur, ayant chacune des paramétrages de segmentation distincts. Nous évaluons statistiquement les événements détectés par les versions sélectionnées en utilisant la base de données de [Hafner & Bühler \(2019\)](#).

L'étude présentée dans ce chapitre fait l'objet d'un article en préparation pour le journal IEEE JSTAR.

A systemic validation approach of snow avalanche events detected by Sentinel-1 and improvement of an automatic avalanche method of detection

Anna Karas, Fatima Karbou, Nicolas Eckert

Abstract—The systematic observation of avalanche deposits is crucial for monitoring avalanche activity and improving avalanche risk management. However, the detection of avalanche events remains difficult due to the partial detection of the Sentinel-1, the difficulty to differentiate one event from another (avalanche release in nearby avalanche path or in the same path) and the fact that most of the detection is done in the deposit area (contrary to the release and track areas) ([1]). Thus, the step of event definition from the detected pixels is complex. This study evaluates the performance and efficiency of the color space segmentation technique, an avalanche debris detection method developed in [2], using a systematic approach of validation based on scores. Different versions of the method are compared. Each version has distinct color space segmentation parameters. We evaluate these versions using the avalanche contour database developed by [3] using a SPOT-6 image captured on 24 January 2018 in the Swiss Alps. Our study is based on a part of the Swiss Alps, of area around 330 km². Measurements of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired at the end of January 2018 are exploited. The aim of this comparison and statistical analysis is to investigate which version of the method and which parameterization performs optimally in terms of avalanche event detection. Indeed, this study also attempts to define events from detected pixels. One version of detection achieved a F1 score of 38 % using the descending orbit, with a Positive Predictive Value of 67 % and True Positive Rate of 26 %. The results of the different versions of the method are summarized in the form of an ROC curve which allows a global visualization of the effectiveness of the method. Thus, in the future, the evaluation approach can be generalized to other methods that can be inter-comparable.

Index Terms—Automatic detection, Color space segmentation, SAR, Sentinel-1, Clustering, Snow avalanche, Evaluation

I. INTRODUCTION

A SYSTEMATIC observation of avalanche deposits is most valuable for monitoring avalanche activity and for studies on snowpack stability. Having a spatially and temporally homogeneous series of avalanche events could also improve studies on the variability of natural avalanche activity on an interannual scale.

Recently, an automatic detection method of high-resolution SPOT6-7 optical images has enabled the automatic detection of avalanche event contours for large areas. SPOT6-7 images are not freely available and their spatial coverage is

constrained by image size. Furthermore, they are subject to weather conditions and visibility may be restricted, for example in cloudy conditions ([1]). The advantages of Synthetic Aperture Radar (SAR) remote sensing by Sentinel-1 (named S1) are its free and easy availability and the possibility to obtain images every 6 days in the Alps, regardless of weather conditions ([4], [5]).

SAR detection of avalanche events is possible under the assumption that deposits are characterised by a significant local increase in backscatter compared to unchanged snow in the surrounding area ([5], [6]).

Thus, in an RGB composite image, with an activity SAR image in the G channel taken after the avalanche, and a SAR image in the R and B channels taken 6 days before the event, the significant local increase in backscatter would be visible, in this case, in fluorescent green. In the literature on the subject of SAR remote sensing of past avalanche events, the terms avalanche "deposits" and "debris" are used. In this paper, both terms are used to refer to the detection of avalanche events.

Different methods of detection have been developed. These methods were evaluated using in-situ data and/or remote sensing (for example: avalanche outlines mapping using SPOT 6/7 images, and manual SAR detection can also be used as benchmark) ([1], [2], [7]). The performance of the various SAR image detection methods developed around the world varies, among others, depending on the study areas, the selected periods of time and the different weather conditions. This was demonstrated by the literature review by [8]. Indeed, each method is using a different mountainous and seasonal context and the lack of a rich worldwide database of validation results in different statistical methods of validation for each study.

We can quote different studies on snow avalanche debris detection with various validation database, time and period of study. The automatic detection method of unsupervised classification of [7] based on the algorithm of [9], has a detection probability of 57 % compared to field observations and 79 % compared to the manual method. The method developed by [1], on the other hand, has a detection probability of 27 % when comparing with in situ data. The latter method has a SAR processing step to map the areas associated with a strong SAR signal increase using Local Resolution Weighting (LWR) images. This step minimises the effects of local distortions by combining the ascending and descending

A. Karas, F. Karbou are with Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Études de la Neige, Grenoble, France (Corresponding author: anna.karas@meteo.fr).

N. Eckert is with Univ. Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France.

Manuscript under progress

orbits with the LRW ([10]). The study of [11] obtained, using a multi-orbital composite image, a 76 % detection probability for the automatic method compared to the manual S1 detection method.

Authors in [8] compared automatic and manual detection studies and concluded that the probability of detection was highly variable: with a maximum of 81.3 % of automatically detected wet snow avalanches validated by field observations ([7]) and a minimum of 11.9 % of automatically detected dry snow avalanches validated by in-situ data ([8]). The comparison of all the methods remains difficult because of the underlying data which are of different nature.

The detection of avalanche events remains challenging due to the partial detection of the Sentinel-1. The SAR detection can generate multiple patches, therefore, the method of avalanche event detection can sometimes produced over-detections ([1]). In addition, the heterogeneity of the mountain topography can also complicate the detection. It can be difficult to differentiate one event from another as avalanches can release in nearby avalanche paths or in the same path. Sentinel-1 principally detect the deposit area, contrary to the release and track areas ([1]). Thus, the definition of an avalanche event using detected pixels is complex and must be correctly evaluated.

In manual avalanche detection, the events can be mapped manually using the backscatter difference images of Sentinel-1 and/or the RGB backscatter composites, as in the study of [1], [7], [8]. Expert interpretations are used for this process ([1], [7], [8]). Single images can also be used for the visual inspection of avalanche events, by identifying bright features and tongue shaped forms comparable to an avalanche deposition zone ([11]).

Automatic detection method are using an algorithm that includes the creation of avalanche events. In most of the studies, various masks were applied, thresholding and filtering methods were applied ([7], [8], [11]).

In the studies of [7], [8], authors used an improved version of the algorithm of [9], a K-means unsupervised clustering method. A difference of Gaussians filtering, a segmentation and a combination of the resulting maps with a backscatter contrast filter is used. The multiple overlapping detected areas with Sentinel-1 are aggregated using an age tracking algorithm.

In the work of [11], a median filter and a threshold were used to backscatter difference images. A filter was applied to remove isolated pixels and to consider groups of event of more than 10 pixels (this last criterion was also applied by [7], [8]).

In the study of [12], authors applied a Local Resolution Weighting (LRW) on images of multiple orbits to enhance avalanche detection ([10]). An automatic segmentation was used with a fixed threshold obtained by comparing the automatic segmentation with manual mapped avalanches. For this step, the Receiver Operating Characteristic (ROC) curves and area under the curves were used and proved the the increased accuracy achieved with LRW images compared to single orbits images. Another method of detection was developed, a deep

neural U-Net was used for the segmentation and classification of each pixel into the classes "avalanche" and "no avalanche".

The differentiation of avalanche event can be difficult. It was noted by [11] that multiple detected patches can correspond to a single avalanche event. The partial avalanche detection can be induced by possible lack of contrast in Sentinel-1 imagery ([1]). [12] also observed a large number of medium sized avalanches that were fragmented into multiple small connected components by the U-Net.

An automatic detection method was developed in [2], using a part of the SPOT-6 database of [3] as a validation database. This method is based on a segmentation technique of multi-date SAR images composite in the HSV (Hue Saturation Value) color space. The maximum score of detection was of almost 70 % of verified avalanche events using the ascending orbit and with a selected individual date as reference image.

There is a need of a systematic validation approach to detect avalanche event using Sentinel-1 SAR imagery. To achieve this goal, we use a systematic and statistical approach applied to different versions of the method developed in [2].

In this study, we compare and evaluate different versions of the method developed by [2] by varying the segmentation parameters of the color space. Another major aim of the study is to define avalanche events from detected pixels and evaluate them using a systematic and statistical validation approach. The results of the different versions of the method are summarized in the form of a ROC curve which allows a global view of the effectiveness of the method. Hence, in the future, the evaluation approach can be generalized to other methods and enable inter-comparable studies.

After selecting different versions of the method, a clustering method is performed to obtain polygons that we assume are indicative of avalanche events. The retrievals are evaluated by focusing on a part of the Swiss Alps and considering the end of January 2018. In this way, we aim to evaluate the events detected by SAR against those identified by [3], which are our validation data. The results of the detection and the statistical analysis are presented. The results and perspectives are discussed in the last section.

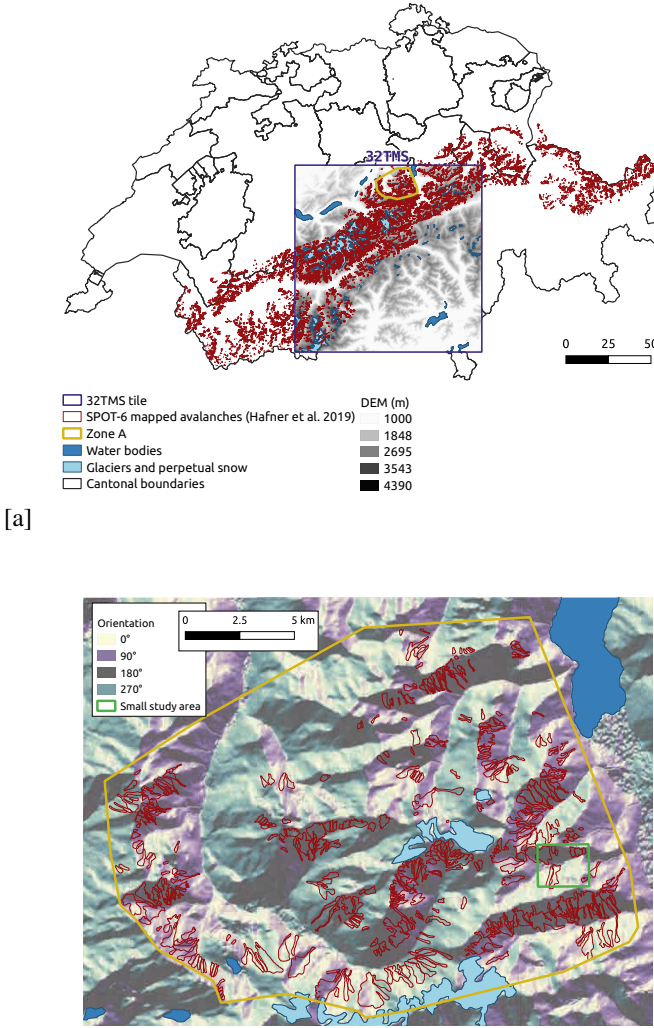
II. MATERIAL AND METHOD

A. Localization and periods of study

For this study, we focus on a small study zone, called hereafter "zone A", localised in the Swiss Alps. The Fig.1 shows its localisation on the Sentinel-1 tile, the 32TMS tile. We chose this study area because of the significant occurrence of avalanche debris detection within this area, for the end of January 2018. We selected this period of study to focus on the avalanche activity period recorded by [3], using one SPOT-6 image.

B. Sentinel-1 SAR imagery

Sentinel-1 satellites constellation (noted S1 hereafter) were launched by the European Space Agency (ESA) within the Copernicus Programme (S1A in April 2014 and S1B in April



[b]

Fig. 1. Localisation of the study area in the Swiss Alps. With [a] the localisation on the 32TMS tile and [b] a zoom in of the study zone, called zone A. We can see on [b] the localisation of the small study area used for examples of the detection in 2 and 3.

2016). We use Level-1 Ground Range Detected and backscatter coefficients at C-band (GRD, with a spatial resolution of 20 m, pixel spacing of 10 x 10 m on range and azimuth axes and VH polarization). The products are available from CNES and ESA web sites (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>, <https://peps.cnes.fr>). We use 4 SAR images acquired during the end of January 2018 and introduced by the Table I. We use SAR data from ascending (late afternoon) and descending (early morning) orbits. We apply the same steps to pre-process SAR S1 data as in [2], thanks to computing facilities of the French Space Agency, CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). The so-called S1Tiling processing is using a total of 9 tiles when applied over the whole French Alps, as shown in Fig.1.

TABLE I

Information on the Sentinel-1 images used for the study. The images from the descending orbit (D066) and the ascending orbit (A015) are acquired with Sentinel-1A.

Orbit	Acquisition date (UTC)
D066	2018-01-22 05:35
A015	2018-01-24 17:14
D066	2018-02-28 05:35
A015	2018-01-30 17:14

C. Color detection method

1) *Color segmentation:* We apply the segmentation method described in [2]. The method is based on a color based detection method that uses the RGB (Red Green Blue) color space, where colors are represented in terms of their proportions of red, green, and blue. The color detection algorithm converts the RGB images into HSV (Hue Saturation Value), another color space relevant for identifying contrast in images and focusing on a particular color (the bright green color that characterized high rise of SAR backscatter). In this study we focus on two SAR images acquired at different dates for the color segmentation technique :

- R and B: the D minus 6 days image (noted D-6 hereafter);
- G: the activity image (at day D);

In addition to the color detection method, we apply a filtering method developed by [7] to target areas with a local and significant increase in the backscatter coefficient, compared to the rest of the snowpack whose properties have changed little (basic hypothesis of the detection change method ([5], [6])). This filtering method is called the backscatter contrast filtering.

The method generates SAR-based binary products: 0 for no avalanche debris, and 1 for avalanche debris identified. We use the binary products of the method for the end of January 2018: 2 SAR images from each orbit (see Table I). For each orbit, 2 binary products were combined to one binary product (maximum of detection).

We use different HSV parameters to create several versions of the method called V0, V1, V2, V3 and V4 versions. We introduce these versions on examples shown by the Fig.2(a), (c), (e), (g) and Fig.3(a). These figures are example of the SAR detected pixels using one activity image, the 28th of January 2018, with the descending orbit. Contrary to the rest of the study, in these figures, we are using only one SAR activity image (and not the maximisation of 2 SAR binary products for each orbit) so as to clearly illustrates the variations of detection of green shades by the different selected versions.

We chose these versions using visual evaluation of SAR generated debris. The goal of this selection is to compare different segmentation parameters of the color space, to evaluate and select efficient versions of the method.

2) *HDSBCAN clustering:* We cluster the SAR debris pixels using a clustering method. The HDBSCAN clustering (High Density Based Spatial Clustering of Application with Noise) is

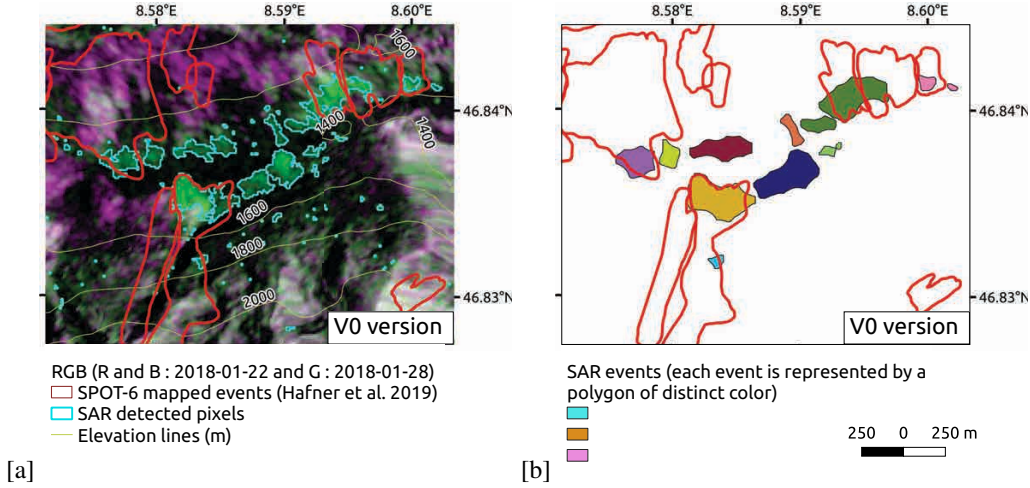


Fig. 2. Presentation of one selected segmentation, the V0 version, and generated SAR events, using the activity image of the 28th of January (with the descending orbit and D-6 as the reference date). We focus on a small area, localised on 1(b). The subfigure (a) introduces an example of SAR detected pixels, with no filter applied (blue outlines), and (b) is a comparison of SAR clusters (each event is represented by a polygon of different color) with SPOT avalanche outlines (red outlines).

useful for data with highly variable densities ([13], [14]). This machine learning method sorts data into clusters of varying shapes. The parameters that are adjusted are :

- "epsilon", the size of the radius (each object is a neighborhood of a given radius), measured in number of pixels (noted 'eps' hereafter);
- "min cluster size", the minimum number of pixels to form a cluster (noted 'minc' hereafter);
- "min samples", the minimum number of neighbours to a core point (noted 'min').

The pixels that do not meet a given density criterion are called noise and are erased.

After applying the clustering method, we smooth the edges of resulting clusters.

The Fig.2(b), (d), (f), (g) and Fig.3(b) depict examples of the clustering events obtained using one activity image. We used for all the versions the clustering parameters of 3 eps, 15 min cluster size and 10 min samples. We chose the parameters arbitrarily, by focusing on various cases studies and with the goal to generate various polygons of events that are larger or equal to 10 pixels.

D. The SPOT-6 mapped avalanches

SPOT-6 mapped avalanches are the validation data used for this study. It is an extremely rich data set of mapped avalanche identified after an extreme avalanche period, with one SPOT-6 image, by [3].

We do not consider the mapped avalanches of small and medium sizes, that is, of sizes 1 and 2 in the European Avalanche Warning Services (EAWS) scale. Hence, we take into account SPOT outlines of large, very large and extremely large avalanche events. Moreover, we apply a buffer zone for each mapped avalanche of quality outline that was estimated or created. For estimated outlines, a 10 m buffer is applied and for created outlines, we are creating a 20 m buffer. If more than 50% of the surface of a mapped avalanche is intersecting

with a masked area (glaciers, water, etc.), we do not take into account this mapped avalanche for our statistics.

E. Meteorological context

F. Principles of the statistic analysis

We consider that a SAR event is verified by SPOT-6 database if at least 25 % of its area is inside the SPOT-6 contour.

To compare the performance of the clustering methods we calculate the percentages of True Positive Rate, TPR, the proportion of SPOT events detected with S1 to all avalanches of the SPOT database (also called the probability of detection in studies on avalanche debris detection using remote sensing). The following formula is used to calculate it:

$$TPR = \frac{\text{True Positive Events}}{\text{True Positive Events} + \text{False Negative Events}}$$

The percentages of Positive Predictive Value (PPV) is the the proportion of SPOT events detected with S1 (the SAR avalanches that are validated by the SPOT database) to all SAR detected avalanches:

$$PPV = \frac{\text{True Positive Events}}{\text{True Positive Events} + \text{False Positive Events}}$$

The F1 score is the harmonic mean of TPR and PPV:

$$F1 \text{ score} = 2 \times \frac{TPR \times PPV}{TPR + PPV}$$

We defined the Deviation in the Number of Events, DNE, the absolute value of the difference between the number of SPOT detected events and the number of SAR avalanches that are validated by the SPOT outlines.

$$DNE = |Nb_{SPOT \text{ Events}} - Nb_{SAR \text{ Validated Events}}|$$

This last number allows us to know, simplistically, whether the clustering methods can gather correctly the SAR debris. For instance, if there is inside a SPOT outline, one cluster or several clusters.

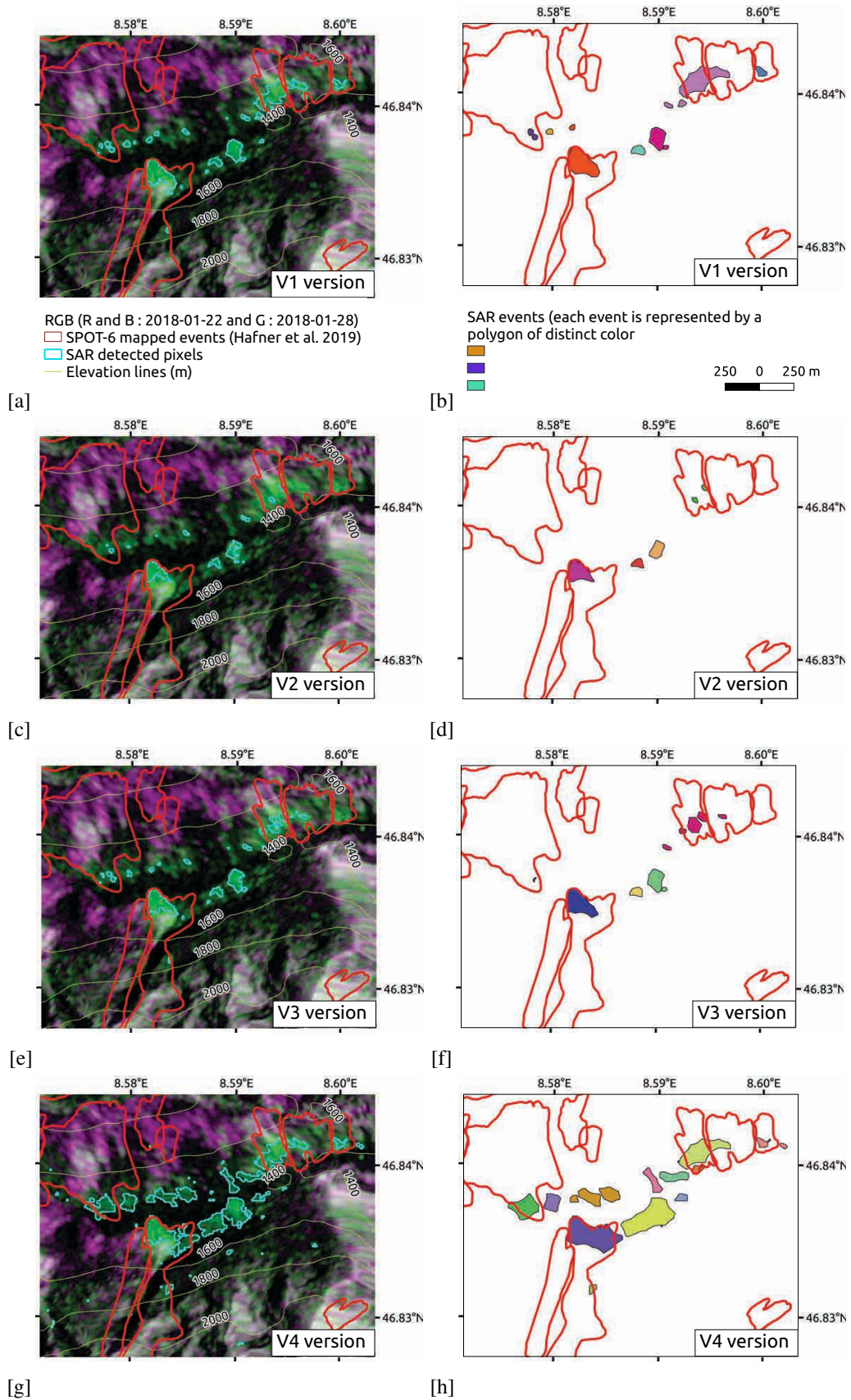


Fig. 3. This figure is the complement of the previous Fig.2 and depicts example of SAR events with the V1, V2, V3 and V4 versions. The subfigures on the left (a), (c), (e) and (g) introduce examples of SAR detected pixels, with no filter applied (blue outlines). (b), (d), (f) and (h) are comparison of SAR clusters (each event is represented by a polygon of different color) with SPOT avalanche outlines (red outlines)

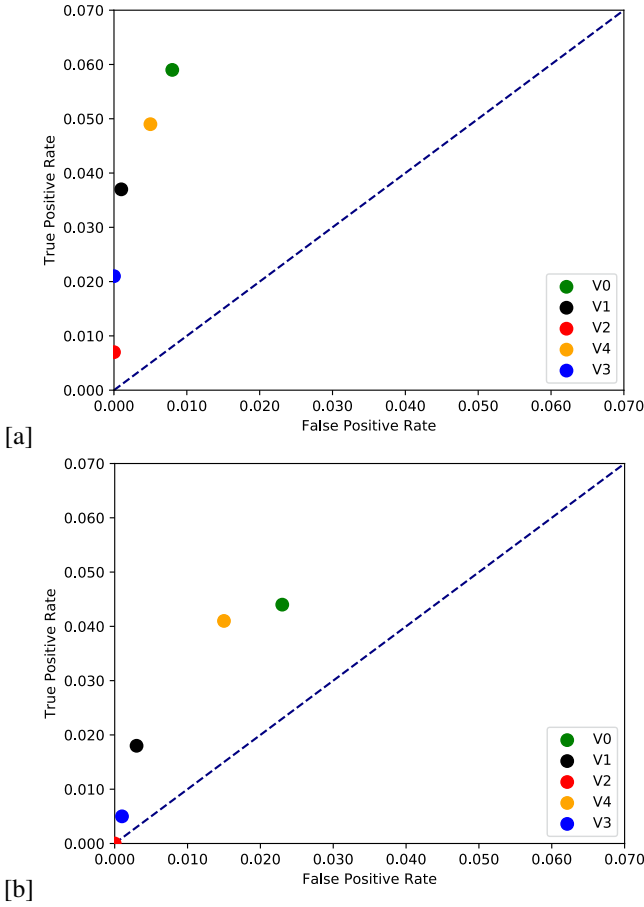


Fig. 4. ROC curves evaluated from the different versions of the proposed detection method using the (a) descending orbit and (b) the ascending orbit. Note that these ROC curves are obtained using the area of SPOT and SAR events.

We also compute a ROC curve to identify the most efficient and precise versions, by considering the area detected and not detected by SPOT and SAR. Examining a ROC curve is useful since the different versions of the detection method are similar in all aspects except one sensitivity parameter. Hence, it is possible to combine the different versions in the form of a ROC curve. In addition, the ROC curve allows us to have a global view of the efficiency of the method, by comparing all the versions simultaneously on the same graphic. The ROC curve use the results of TPR, in terms of area and not events, and the False Positive Rate: $FPR = \frac{False\ Positive}{True\ Negative + False\ Positive}$. For the True Negative, we consider the area outside SPOT outlines that is not detected by SAR. The False Positive is the area of SAR events not validated by SPOT. For the TPR, in terms of area and not events, we consider the True Positive as the area of SAR events validated by SPOT and the False Negative is the area of SPOT outlines not detected by SAR.

III. RESULTS

In order to compare and evaluate the SAR avalanche events, we produce ROC curves for the descending and ascending orbits, respectively shown by Fig.4(a) and (b). We would like to stress that these curves were generated using the TPR and

Orbit	Version	PPV	TPR	F1	DNE
DES	V0	28	37	32	57
	V1	67	26	38	23
	V2	79	9	16	10
	V3	74	15	24	9
	V4	33	30	31	33
ASC	V0	25	30	27	29
	V1	38	20	26	26
	V2	40	2	3	1
	V3	45	10	16	8
	V4	26	27	27	46

TABLE II

PERCENTAGES OF TPR, PPV, F1 SCORE AND NUMBER OF DNE USING THE DIFFERENT VERSIONS OF THE SAR DEBRIS CLUSTERING METHOD. THE RESULTS ARE OBTAINED WITH THE ASCENDING AND DESCENDING ORBITS. NOTE THAT THESE RESULTS ARE OBTAINED USING THE NUMBER OF SPOT AND SAR EVENTS.

FPR considering the SPOT and SAR avalanche events. This can explain the low scores obtained of TPR and FPR for each version: SPOT outlines takes into account the release, run-out and deposits zones while SAR often detect the deposits area.

The ROC curve enable us to compare simultaneously all the versions together. In general it is used to have a global vision through the area under the curve. Here there is no curve because we are comparing five versions (five points on the figure, each point represents a version). We can see that the points representing the different versions on the figures 4(a) and (b) are above the first bisector (dashed blue line), which means that the method is, in principle, very effective. We can note that the highest score of TPR, but also of FPR is achieved with V0 version (TPR close to 0.05 and FPR close to 0.01 with the descending orbit), followed by V4 version. The FPR is close to 0 for V1, V2 and V3 versions. V2 and V3 versions are near the dashed blue line that represents a baseline, a random method that do not possess the capacity to distinguish between positive events and negative events.

Considering the results in terms of number of events, the table II introduces the percentages of TPR, PPV, the F1 score and number of DNE for the different versions. The highest percentages of PPV are obtained with V1, V2 and V3 versions. For instance, with the descending orbit, 67 % of PPV is obtained with V1 version and 79 % with V2 version. The highest percentages of TPR are achieved with V0, V4 and V1 version: with respectively, for the descending orbit, 37 %, 30 % and 26 % of TPR. We can note the highest F1 score of 38 % with the V1 version and the descending orbit. The lowest DNE numbers are obtained with V2 and V3 versions, for both orbits, while the highest DNE numbers are obtained with V0 and V4 versions. Lower percentages of PPV and TPR are obtained when using the ascending orbit than when using the descending orbit.

The Fig.5 shows the number of avalanche events of SAR and SPOT by classes of orientation, (a) with the ascending orbit and (b) with the descending orbit. We can observe particular high number of events with V0 and V4 version in comparison with SPOT events. For example, for the Northern orientation, there are close to 4 times more SAR events with V0 and V4 versions than with SPOT. On the contrary, very

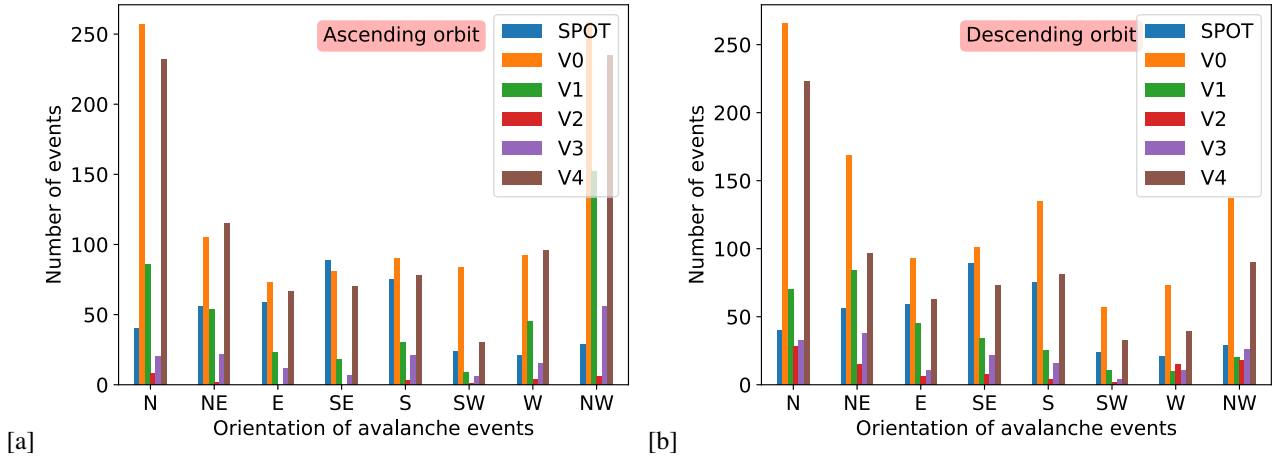


Fig. 5. Number of avalanche events detected by the different versions of the SAR detection method and the SPOT-6 image by classes of orientation. (a) is produced using the ascending orbit and (b) using the descending orbit.

low numbers of avalanche events are obtained for all classes of orientation, with V2 version. When focusing on V1 version, we can note variations of the number of events per classes of orientation: with a maximum of around 150 avalanche events exposed to North-West orientation with the ascending orbit, and a maximum of around 80 events for North-East orientation and the descending orbit. When considering the SPOT events, we can observe highest number of events that are exposed to South-East, South, East and North-East orientations.

IV. DISCUSSION, CONCLUSION AND OUTLOOKS

A. Main outcomes

The high values of FPR of the V0 and V4 versions are linked to SAR events outside SPOT outlines and not validated avalanche events (see Fig.4). In terms of number of events, V0 and V4 versions detected, for particular orientation, up to 4 times more events than SPOT (see Fig.5). It can explain the low percentages of PPV of V0 and V4 versions in the Table II.

Low percentages of TPR and PPV of V2 and V3 versions can explain the position of respective points on the ROC curves (FPR close to 0 on Fig.4).

We can point out that the highest F1 score was obtained using V1 version and the descending orbit. V1 version allows to detect 26 % of SPOT events (TPR, see Table II), with a PPV of 67 %. The number of events not validated by SPOT is lower than V0 and V4 versions and this can explain the low FPR of V1 version on ROC curves (Fig.4).

B. Discussion of assumptions

By observing the variation of the number of events of V1 version per classes of orientation, we can assume that SAR visibility is greater, respectively with the ascending and the descending orbits, for North-West and North-East orientations. When considering SPOT events, more events were identified on slopes exposed to South-East, South, East and North-East orientations. We can assume that SAR

visibility and changes of meteorological conditions could not have allowed SAR to detect all of the SPOT events. Indeed, changes of meteorological conditions can impact SAR detection, as in 6 days many modification of the snowpack can occur (precipitation, increase or decrease of temperature, etc.). These changes can also clarify the gap of the results when using the ascending and descending orbit (see Table II).

We can compare the scores obtained in this study with the scores of the previous studies of automatic avalanche debris detection. However, as noted in the Section I, it is important to note the complexity of this comparison due to the different nature of the data in each study. [1] studied an area localised near Davos and two avalanche periods in 2018 and 2019, using Sentinel-1 manual mapping, and obtained a probability of detection 26 %. This score is very close to the TPR obtained with V1 version (27 %). However, the PPV achieved in the study of [1] was higher : 87 % against a PPV of 67 % with the V1 version.

In our study, we focused on one avalanche period (end of January 2018) with wet snow avalanches. The obtained TPR with the V1 version is very low (26 %) compared to the maximum probability of detection of wet snow avalanches (81.3 %) ([7]), but superior to the minimum probability of detection obtained for dry snow avalanches (11.9 %) ([8]).

To compare the different versions together, we used a ROC curve to get a global visualisation of the effectiveness of the method. This validation approach was also applied in the study of [12]. Nevertheless, the validation dataset used in [12] was composed of manual mapped events, while in our study we are using mapped outlines of avalanche events that were identified on one SPOT-6 image. Thus, the ROC curve of [12] was constructed based on the number of automatically and manually detected events, while in our study, we used the area of SAR avalanche debris detected events and SPOT-6 mapped avalanches. As the validation database is of different nature, the comparison between the two studies is complex.

We can recall that SAR detection often produces partial and multiple patches of detection, and it is then difficult to consider avalanche events ([1]), specially for avalanche events that occurred close to each other (for instance, in case of avalanche paths that are side-by-side). The algorithm of [7], [8] takes into account the aggregation of multiple overlapping patches. In our study, a strong clustering algorithm for data of variable density and form, HDBSCAN, was used to define avalanche events based on detected pixels. The DNE values on the Table II make it possible to better understand the performance of the clustering algorithm. However, this measure is simplistic, and the selection of HDBSCAN parameters were chosen with a visual analysis of generated clusters. A more in depth study is needed to confirm the efficiency of HDBSCAN clustering. It could be interesting to use a statistical approach with ROC curves to compare the obtained clusters using different HDBSCAN parameters.

C. Conclusion and outlooks

This study compared different versions of the segmentation method, introduced by [2], by using the SPOT database of [3], per classes of orientation, and considering the number of events and their areas. We defined avalanche events using a clustering algorithm on detected pixels. We evaluated five versions of the method that differ by their segmentation parameters. We proposed to evaluate the versions using a systematic and robust approach of evaluation. The ROC curve is an interesting tool of validation because it allowed to examine the effectiveness of the method by comparing the different versions concurrently.

V1 version allowed to detect 26 % SPOT events when using the descending orbit, with a percentage of PPV of 67 %. This version seemed to best perform comparing to other versions.

More studies are still need to evaluate the clustering effect of the used algorithm on SAR debris.

The developed statistical approach of validation allows us to study the performance of the method for various periods and areas of study (large areas, other mountainous and seasonal contexts). It also enable a benchmark with other detection methods proposed in the literature. The ROC curve can be a powerful tool as it gives a global vision of the efficiency of the method.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, F.K., N.E.; Methodology, A.K., F.K., N.E.; Application: A.K.; Writing—original draft preparation, A.K.; writing—review and editing, A.K., F.K., N.E.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge:

- The support provided by the PNTS French program (Programme National de Télédétection Spatiale).
- The support provided by CNES for preprocessing SAR images using the PEPS facilities.

- Sophie Giffard for useful discussions about data clustering.
- All co-authors of [3] for sharing the data of mapped avalanche outlines from SPOT 6 image.
- CNRM and IGE are members of Labex OSUG.

REFERENCES

- [1] E. D. Hafner, F. Techel, S. Leinss, and Y. Bühler, "Mapping avalanches with satellites – evaluation of performance and completeness," *The Cryosphere*, vol. 15, p. 983–1004, 2021.
- [2] A. Karas, F. Karbou, S. Giffard-Roisin, P. Durand, and N. Eckert, "Automatic color detection-based method applied to sentinel-1 sar images for snow avalanche debris monitoring," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 60, pp. 1–17, 2021.
- [3] E. Hafner and Y. Bühler, "Spot6 avalanche outlines 24 january 2018," *EnviDat*, 2019.
- [4] A. Wiesmann, U. Wegmuller, M. Honikel, T. Strozzi, and C. L. Werner, "Potential and methodology of satellite based sar for hazard mapping," *IGARSS Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No.01CH37217)*, vol. 7, pp. 3262–3264, 2001.
- [5] E. M. Eckerstorfer and Malnes, "Manual detection of snow avalanche debris using high-resolution radarsat-2 sar images," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 120, no. 6, pp. 205–218, 2015.
- [6] F. Ulaby, R. Moore, and A. Fung, "Microwave dielectric properties of natural earth materials," *Microwave remote sensing*, vol. 3, pp. 2017–2027, 1986.
- [7] M. Eckerstorfer, H. Vickers, E. Malnes, and J. Grahm, "Near-real time automatic snow avalanche activity monitoring system using sentinel-1 sar data in norway," *Remote Sensing*, vol. 11, pp. 773–791, 2019.
- [8] M. Eckerstorfer, H. D. Oterhalsk., K. Mueller, E. Malnes, J. Grahm, S. Langeland, and P. Velsand, "Performance of manual and automatic detection of dry snow avalanches in sentinel-1 sar images," *Cold Regions Science and Technology*, 2022.
- [9] H. Vickers, M. Eckerstorfer, E. Malnes, and A. P. Doulgeris, "Synthetic aperture radar (sar) monitoring of avalanche activity: An automated detection scheme," *20th Scandinavian Conference, SCIA, Tromsø, Norway. Proceedings, Part II. Springer International Publishing*, 2017.
- [10] D. Small, "Sar backscatter multitemporal compositing via local resolution weighting," *IGARSS - 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 25 Munich, Germany, 22.07.2012 - 27.07.2012, pp. 4521–4524, 2012.
- [11] S. Leinss, R. Wicki, S. Holenstein, S. Baffelli, and Y. Bühler, "Snow avalanche detection and mapping in multitemporal and multiorbital radar images from terrasat-x and sentinel-1," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 1783–1803, 2020.
- [12] C. Tompkin and S. Leinss, "Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021.
- [13] L. McInnes, J. Healy, and S. Astels, "hdbscan: Hierarchical density based clustering," *The Journal of Open Source Software*, vol. 2, no. 11, mar 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.21105/joss.00205>
- [14] C. Malzer and M. Baum, "A hybrid approach to hierarchical density-based cluster selection," in *2020 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*. IEEE, 2020, pp. 223–228.

Chapitre 5

Enquête sur les besoins en produits dérivés des satellites des acteurs de prévision du risque en montagne

5.1 Présentation du questionnaire

Afin de mieux connaître les attentes et besoins des acteurs professionnels de la montagne en termes d'utilisation de données issues d'observations satellitaires pour le suivi de l'activité avalancheuse, un questionnaire a été élaboré. En effet, en sachant quels sont les manques et besoins des acteurs, nous pouvons savoir dans quelle mesure les données d'observations satellitaires développées au cours de cette thèse répondent aux attentes et quels sont les points à améliorer. Par la suite, il sera alors plus facile de définir les études à mettre en place, afin de générer des données exploitables.

Les différents acteurs qui sont ciblés par notre questionnaire proviennent de diverses institutions. Nous avons contacté des agents de l'ONF, travaillant au sein du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Le service RTM a pour but de prévenir et gérer les risques naturels en montagne. Il agit pour le compte de l'Etat et en appui aux collectivités dans la gestion du risque. Il délivre notamment un travail de recensement d'événements naturels et a pour mission la conception, réalisation et gestion d'ouvrages de protection.

Comme nous l'avons vu dans le [chapitre 1](#), Météo-France assure un rôle de prévision du risque avalanche par la publication quotidienne en période hivernale du bulletin d'estimation du risque avalanche. Nous avons ainsi contacté des prévisionnistes nivologues et des agents du point focal, qui travaillent sur la mise en place du BRA à l'échelle nationale et sur la vigilance avalanche.

Par ailleurs, nous avons demandé à différentes personnes de l'Inrae de répondre à ce sondage. Leurs thématiques de recherche et travail sont en lien avec le phénomène avalanche : gestion de la base de données EPA, cartographie des zones à risques naturels, et recherche en statistiques de l'activité avalancheuse et des risques associés.

Le but est de cibler les priorités des acteurs, savoir à quelles échelles spatiales et temporelles les données issues de l'exploitation des mesures SAR peuvent être les plus utiles pour chacun. On s'est interrogé sur la question de l'usage de données à la plus haute résolution (20 m) par le biais d'une cartographie d'événements avalanches détectés ou bien de données à une échelle agrégée et synthétisée, celle des massifs ou d'une autre zone d'intérêt. On s'est également demandé s'il y avait une importance des données générées le matin et le soir, après l'acquisition d'images d'orbites ascendantes et descendantes, ou bien s'il était plus utile de combiner les deux orbites et de fournir les données obtenues, permettant ainsi une visibilité optimale des zones montagneuses. Les zones géographiques d'intérêts des acteurs, le degré d'incertitude toléré, la fréquence et la portée de leur usage ont été questionnées.

Nous avons défini deux produits que l'on peut obtenir par exploitation de mesures SAR du Sentinel-1 : la cartographie de polygones de dépôts d'avalanche à une échelle de 20 m ainsi que la production d'indicateurs avalanches à une échelle régionale, celle des massifs montagneux français.

Le formulaire détient une dizaine de questions et est inclus dans l'annexe B. La section suivante présente les résultats et l'analyse du sondage.

5.2 Résultats et analyse du sondage

5.2.1 Présentation des participants

Au sein de l'Inrae, nous avons interrogé : Michael Deschartre, coordinateur de l'EPA, Mylène Bonnefoy, ingénieure d'étude des risques naturels, et Nicolas Eckert, directeur de recherche, menant des recherches en liant avec le phénomène avalanches (statistique appliquée aux risques en montagne).

Stéphane Roudnitska et Rémy Martin travaillant quant à eux dans le service RTM des Alpes du Nord, à l'ONF, nous ont fourni leur point de vue et avis sur leur besoin. Stéphane Roudnitska est expert national des risques glaciaires et périglaciaire ainsi que du risque avalanche. Rémy Martin est un expert des ouvrages paravalanches.

Nous avons également demandé aux personnes de Météo-France responsables de la production de l'estimation du risque d'avalanche et de la vigilance avalanche, notamment à des prévisionnistes nivologues, de répondre aux questionnaires. Les personnes suivantes ont participé : Romain Valiente, Denis Debray, Romain Vérité, Vincent Latu, Florent Estival, Frédéric Cabot (prévisionnistes nivologues des Hautes Alpes, de la Savoie, la Haute-Savoie, l'Isère, et les Pyrénées en renfort), Cécile Coléou (responsable de la Cellule Montagne et Nivologie : coordination de la prévision avalanche opérationnelle, veille scientifique et expression de besoins pour la prévision), Anne Dufour (point focal avalanche des Alpes), Richon Jacques (point focal des Pyrénées), Gabrielle Mercklé (adjointe au responsable du Centre Montagne Pyrénées), Sophie Tessier (responsable de la production du risque d'avalanche et de la vigilance avalanche en Isère), Gilles Brunot (adjoint chef de centre de MF Alpes du

Nord, prévision locale avalanche, carte de vigilance pour le paramètre avalanche, point focal Alpes et Corse) et Denis Roy (responsable du Centre de Montagne des Alpes du Nord).

5.2.2 Des produits spécifiques, complémentaires et nécessaires au travail de chacun

Une cartographie des dépôts d'avalanche obtenue par observations satellitaires, serait un élément d'expertise pour les agents du service RTM. Dans un premier temps, cela peut être utilisé pour mesurer l'évolution de l'activité avalancheuse, et serait un élément à la gestion de crise. Dans un second temps, cela peut aider à la délimitation des zones de dépôts dépassant les limites connues (type CLPA), et de former un élément d'aide à la décision. D'après le coordinateur EPA, Michael Deschartres, la cartographie de dépôts d'avalanche permettrait de déclencher des tournées EPA (observations des couloirs suite à des conditions météorologiques spécifiques, où il y a eu une forte activité avalancheuse), ainsi qu'un contrôle des observations EPA.

En plus du besoin de cartographie à l'échelle de 20 m de dépôts, l'obtention d'indicateurs à l'échelle régionale, permettrait de quantifier l'activité avalanche dans le temps et l'espace, et de répondre aux besoins de recherche, en statistique sur l'activité avalancheuse.

Il est revenu plusieurs fois, parmi les réponses des agents de MF (5 sur 13 individus), qu'un produit fourni tous les 6 jours ne serait pas adapté à l'estimation opérationnelle de la prévision du risque avalanche sur 24h. Les informations issues des observations satellitaires seraient toutefois intéressantes pour confirmer un passage en vigilance, l'évaluer et suivre la période de vigilance (par le constat d'événements). En utilisation différée, un produit de synthèse à l'échelle des massifs et un produit de cartographie à l'échelle des couloirs, permettrait de réaliser des retours sur expérience sur une situation passée. Cela pourraient être utilisés pour construire des modèles statistiques de l'activité avalancheuse, et pour l'assimilation de données spatialisées dans la modélisation.

Il y a donc un réel besoin de produits issus de l'exploitation du signal SAR par les différents acteurs. On remarque que la cartographie de dépôts d'avalanche à une échelle de 20 m, tout comme le produit de synthèse à l'échelle du massif, sont des informations utiles pour les professionnels de la montagne.

5.2.3 L'utilisation d'une méthode avec une incertitude donnée ou bien très précise (peu de fausses détections), et l'échéance souhaitée des produits dépendent des usages

L'obtention d'un produit le plus rapidement possible est important pour les agents de l'ONF, notamment pour des situations météorologiques spécifiques. La

combinaison d'orbites et la précision de la méthode de détection sont également nécessaires. Tout comme le souligne Rémy Martin, il est important de garder en tête qu' "il existe de très nombreuses incertitudes à tous les niveaux de l'expertise. Fortement améliorer cette précision sera de toutes les manières gommer par les incertitudes qui suivront".

Le besoin d'une méthode précise de détection, à contrario d'une méthode avec une incertitude connue, dépend de son utilisation. Par exemple, à des fins de recherche en statistique, si l'incertitude est quantifiée, la méthode peut être utilisée. La combinaison d'orbite, un produit de synthèse, est alors utile, afin d'avoir des informations sur différentes durées temporelles. Dans le cadre du travail du service RTM et la gestion des données EPA par l'Inrae, la précision de la méthode (peu de fausses détections) semble essentielle.

Sur les 13 personnes de MF interrogées, 10 répondent pouvoir utiliser une méthode avec une incertitude connue. Une des personnes précise qu'il serait intéressant d'avoir le choix possible de plusieurs niveaux de détection (avec donc différents niveaux d'incertitudes). Au vu d'un besoin rapide, par exemple dans le cas d'un suivi d'une vigilance avalanche, l'obtention rapide de produit le soir et le matin est primordiale. Pour un usage différé, la combinaison d'orbite est le produit le plus approprié.

5.2.4 La télédétection dans un monde idéal

Dans un monde idéal, une détection plus fine des dépôts, avec une fiabilité totale, par exemple via des images optiques Pléiades de très haute résolution, permettrait de distinguer la structure des dépôts (boules, souillures, arbres couchés, etc.) et de mieux les délimiter. La cartographie idéale du phénomène avalanche serait celle actualisée tous les jours, donnant une information sur la localisation des zones de départ, des zones de dépôts, et intégrant des calculs de fréquences et d'épaisseurs du manteau neigeux, et du volumes de neige mobilisés. Ces diverses informations seraient fortes utiles pour le service RTM.

Nicolas Eckert présente, tout comme l'ONF, un souhait, dans un monde idéal, d'une cartographie exhaustive de dépôts à des résolutions temporelles plus fine que 20 m, et de quantification de volumes de dépôts.

C'est un idéal partagé par plusieurs personnes de MF (visualisation en temps réel de l'activité avalancheuse, localisation, taille des dépôts, lignes d'enneigement, etc.). Des indicateurs agrégés par zone et sur l'état de surface de la neige seraient également présents dans un monde "parfait".

En allant, encore plus loin, le rêve des prévisionnistes nivologues serait d'avoir une détection en temps réel des structures de plaques et leur instabilité en fonction de la pente, exposition et altitudes.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

6.1 Résumé des problématiques abordées et des principaux résultats

La télédétection SAR de dépôts d'avalanche est complexe de part la variabilité du terrain hétérogène en montagne et des variations importantes des conditions nivologiques et météorologiques en périodes hivernales (selon la pente, l'altitude et l'orientation). La complexité de la télédétection réside également dans la compréhension de la variation du signal SAR en fonction de son interaction avec les différents types de terrain en montagnes (lacs, forêts, roches nues, glaciers, etc.). Les propriétés intrinsèques au radar, en bande C, engendrent une sensibilité du SAR à l'eau, d'où la limitation de détection d'avalanche de neige sèche. Ces différents aspects sont notables et doivent être pris en compte pour le cas de télédétection de dépôts d'avalanche de neige (voir le [chapitre 1](#)).

La méthode développée dans [Karas et al. \(2021\)](#) est une méthode originale de détection automatique par segmentation de l'espace de couleur, qui a été évaluée à l'aide de données de contours avalanches identifiées par une image SPOT 6 de haute résolution au cours d'une période de forte activité avalancheuse. Dans l'étude de [Karas et al. \(2021\)](#), différentes images de références sont sélectionnées dans le cadre d'une étude de sensibilité. Les résultats de détection sont ensuite étudiés en fonction de plusieurs paramètres, selon la direction de l'orbite et les caractéristiques du terrain, et comparés aux données de validations. Une méthode de filtrage de détections par machine learning a été également appliquée et a donné des résultats prometteurs (voir le [chapitre 2](#)).

Dans un deuxième temps, des indicateurs spatialisés de l'activité avalancheuse à l'échelle d'une zone d'intérêt (échelle des couloirs et échelle des massifs) ont été dérivés. La dérivation d'indicateurs avalanches, ou lignes de débris, pour des pentes et des bandes d'altitude a été analysée et comparée à l'aide de données d'observation in-situ. Cette étude a montré le potentiel des données SAR pour générer des indicateurs de l'activité avalancheuse, en complément des données in-situ EPA et des BRA émis à l'échelle régionale. L'article portant sur ce sujet a été soumis au journal Cold Region Science and Technology (voir le [chapitre 3](#)). Ce travail ouvre la voie de la génération d'indicateurs régionaux, qui permettraient par la suite une

meilleure évaluation de la prévision de l'activité avalancheuse pour des zones d'intérêt. Cependant, un travail de développement complémentaire est encore nécessaire pour généraliser l'approche à l'ensemble des massifs français et poursuivre le travail d'évaluation.

L'étude en cours de préparation présentée dans le [chapitre 4](#) porte sur l'application d'une méthode de filtrage développée par [Eckerstorfer et al. \(2019\)](#), le regroupement de pixels pour la création d'événement, ainsi que la comparaison de différentes versions de la méthode ayant des paramètres de segmentation distincts. Le but de ce travail est d'identifier les paramètres de segmentation les plus optimaux pour la détection de dépôts d'avalanche et de mener une analyse statistique sur la performance et la précision de la méthode. Ce travail permet de préparer les développements visant à rendre la méthode automatique de détection de dépôts d'avalanche de neige exploitable par les acteurs de montagne.

Un sondage permet de prendre en compte les demandes des acteurs professionnels de la montagne, et de cibler les objectifs de recherche en télédétection de dépôts d'avalanche (voir le [chapitre 5](#)). L'échelle de la plus haute résolution du radar de Sentinel-1, de 20 m, ainsi que l'échelle du massif sont des zones spatiales cruciales pour les différents acteurs. Selon les usages directs ou en différé, il y a des besoins variés de l'utilisation de données issues soit de chaque orbite, ou bien de produit combiné. La précision de la méthode prévaut dans l'usage de données SAR en lien avec les données EPA gérées par l'Inrae et dans le cadre du travail du service RTM. Avec une méthode de détection ayant une incertitude donnée, les agents de MF peuvent obtenir une information complémentaire et utile pour leur travail (retour d'expérience de situation passée, étude lors de période de vigilance, etc.).

6.2 Discussion et perspectives

Ce travail de thèse explore la question de la télédétection de dépôts d'avalanche à différentes échelles de temps et d'espace, une thématique de recherche émergente, et ouvre la voie vers l'utilisation en France de nouveaux produits de détection de dépôts d'avalanche par imagerie satellitaire.

Les différents besoins des acteurs de montagne ont été analysés à l'aide du questionnaire que j'ai préparé et diffusé auprès de différents utilisateurs potentiels. Compte tenu de la complexité du sujet de recherche et des attentes fortes des utilisateurs, nous pouvons apprécier les avancées réalisées au cours de cette thèse : développement d'une méthode de détection automatique à l'échelle des pixels permettant par la suite de fournir un produit d'activité avalancheuse agrégé à l'échelle du massif ou de toute autre zone d'intérêt. Des améliorations algorithmiques ont été effectuées permettant notamment de mieux affiner la méthode de détection et d'envisager la détection des événements avalancheux au lieu de détecter les pixels avalancheux. Le questionnaire a été l'occasion de mieux cibler les attentes et les besoins des utilisateurs et pourrait servir à mieux calibrer les futurs produits satellitaires à valeur

ajoutée.

Parmi les points d'intérêt figure le besoin de disposer d'une méthode permettant la cartographie d'événements avalanches et la production d'indicateurs pour des échelles de temps et d'espace agrégées, avec une incertitude connue pour différentes situations. En réalisant des études d'évaluation et de statistiques avancées pour des multiples périodes aux conditions météorologiques variées, et pour des zones géographiques distinctes. La prise en compte de paramètres supplémentaires liées à la méthode de segmentation (choix de paramètres de seuillage, choix des images de référence, etc.) permettrait d'aller vers la quantification des incertitudes liées à l'estimation des débris ou des événements avalanches.

Les méthodes exposées dans cette thèse ont été testées dans les Alpes françaises et suisses et il serait très utile d'étendre leur usage pour tous les massifs français depuis l'avènement des satellites Sentinel-1 (octobre 2014). De telles estimations ouvrirait de nouvelles perspectives quant à l'évaluation des produits de débris ou d'événements avalanches, l'estimation des erreurs associées et l'examen de la variation en temps et en espace d'indicateurs sur l'activité avalancheuse.

L'étude de Karas et al. (2021) a permis d'évaluer les données de détection générées sous forme de pixels associés avec des débris, cependant, cette évaluation reste limitée à un territoire donné et sur des événements survenus en janvier 2018. Nous avons utilisé des critères de choix d'images de références qu'il serait utile de généraliser pour une application à l'échelle des massifs Français.

Par ailleurs, la comparaison de pixels détectés avec les données de validation a été complexe et soulève des questions. Les données SAR sont obtenues tous les 6 jours, sont soumises aux variations des conditions météorologiques et aux distortions géométriques, tandis que les images SPOT 6-7 sont acquises à des dates et des heures différentes des images SAR. La comparaison avec les données in-situ n'est pas plus simple car les données EPA sont concentrées sur des zones observées par les agents de l'ONF et permettent une évaluation partielle des débris par satellite (les dates et heures d'observations sont variables selon les possibilités d'accès aux zones observées).

Des études complémentaires sont à réaliser afin de fournir des statistiques plus poussées, de manière à quantifier l'efficacité et la précision de la détection. L'article en cours de préparation, présenté dans le chapitre 4, est une première étape vers cet objectif : application de méthodes de filtrage et de regroupement de pixels, et identification des paramétrages les plus optimaux de la segmentation permettant plusieurs déclinaisons de la méthode de détection.

On peut également se demander si l'utilisation d'analyses en composante principale (PCA) pourrait aider à identifier les zones de dépôts d'avalanches. Il a, en effet, été démontré que pour certains types de terrains, l'utilisation de PCA était efficace pour la segmentation, en comparaison avec des méthodes RGB (Mesner &

Oštir (2014)).

Un travail sur la délimitation de la base de donnée EPA permettrait d'obtenir des données de validation plus exploitables et comparables aux données générées par SAR. La détection automatique de contours avalancheux identifiés sur images SPOT 6-7 permettrait de fournir davantage de données de validation. Le travail de [Hafner et al. \(2022\)](#) nous démontre ce potentiel et plaiderait vers une systématisation des acquisitions haute et très haute résolution, en complément des images SAR, pendant les épisodes à fort enjeux.

L'usage de méthode de filtrage par apprentissage automatique semble prometteur mais des études complémentaires sont encore nécessaires afin d'éliminer efficacement les fausses détections de débris en apprenant la fonction non linéaire reliant la variation du signal SAR entre des dates successives, les images de références, et les informations de terrain (pente, orientation, élévation, couverture arborée) à la présence ou non de dépôts d'avalanche.

Une étude internationale comparative des méthodes de détections permettrait de comprendre les limites et possibilités de chaque méthode développée de télédétection de dépôts d'avalanche. En effet, l'analyse bibliographique de [Eckerstorfer et al. \(2022\)](#), prouve le caractère difficile de comparaison des scores de détections obtenus par chaque étude. En choisissant une zone et période d'étude communes à toutes les méthodes, il serait possible de connaître le potentiel de chaque méthode et d'aller ainsi vers une méthodologie communautaire, en libre accès, internationale et performante de détection de dépôts d'avalanche. De même les bases de données générées peuvent être d'intérêt pour un bon nombre d'utilisateurs ou de chercheurs et il serait très pertinent de les partager via les services des pôles de données.

L'exploitation de mesures SAR pour la télédétection de dépôts d'avalanche est utilisée en Norvège, dans le cas de visualisation d'événements avalancheux détectés automatiquement, via la plateforme GEP (Geohazards Thematic Exploitation, voir le service AVAMAP) [Eckerstorfer et al. \(2020\)](#)), mais cela repose encore sur des expertises humaines visuelles des événements. Il faut rappeler que dans les pays nordiques, l'acquisition d'images SAR est plus fréquente que dans les Alpes. Nous considérons que l'utilisation de ces observations est d'ores et déjà utile pour réaliser des suivis de l'activité avalancheuse et pour réaliser des retours d'expériences à différentes échelles spatiales et temporelles, améliorer la gestion du risque avalancheux, et les études de stabilité du manteau neigeux.

Annexe A

Annexe du chapitre 1

	Indice de risque	Icône	Stabilité du manteau neigeux	Probabilité de déclenchement
	Très fort		L'instabilité du manteau neigeux est généralisée.	De nombreux départs spontanés de très grandes avalanches, parfois d'ampleur exceptionnelle, sont à attendre, y compris en terrain peu raide*.
4	Fort		Le manteau neigeux est faiblement stabilisé dans la plupart* des pentes suffisamment raides.	Déclenchements d'avalanches probables même par faible surcharge** dans de nombreuses pentes suffisamment raides*. Dans certaines situations, de nombreux départs spontanés de grandes, et parfois très grandes avalanches, sont à attendre.
3	Marqué		Dans de nombreuses* pentes suffisamment raides, le manteau neigeux n'est que modérément à faiblement stabilisé.	Déclenchements d'avalanches possibles parfois même par faible surcharge** et dans de nombreuses pentes suffisamment raides*, surtout dans celles généralement décrites dans le bulletin. Dans certaines situations, quelques départs spontanés de grandes, et parfois très grandes avalanches, sont possibles.
2	Limité		Dans quelques* pentes suffisamment raides, le manteau neigeux n'est que modérément stabilisé. Ailleurs, il est bien stabilisé.	Déclenchements d'avalanches possibles surtout par forte surcharge** et dans quelques pentes suffisamment raides*, généralement décrites dans le bulletin. Des départs spontanés de très grandes avalanches ne sont pas à attendre.
1	Faible		Le manteau neigeux est bien stabilisé dans la plupart des pentes.	Les déclenchements d'avalanches ne sont en général possibles que par forte surcharge** dans de très rares pentes raides*. Seules des coulées ou des avalanches de taille moyenne peuvent se produire spontanément.
* Caractéristiques des pentes • La localisation des pentes les plus dangereuses est généralement précisée dans le bulletin (altitude, orientation, topographie, etc.) • Terrain peu raide : pente insuffisante pour que la neige parte en avalanche. • Pente suffisamment raide : pente propice à un départ ou déclenchement d'avalanche en raison de son inclinaison, la configuration du terrain, la proximité des crêtes, ... • Pente raide : pente particulièrement propice aux avalanches notamment en raison de sa forte inclinaison, sa topographie ou de la nature du sol. ** Surcharge : • faible : par exemple skieur/surfeur isolé évoluant en douceur et sans tomber, raquetteur, groupe avec distances d'espacement entre eux (d'au moins 10 m) • forte : par exemple plusieurs skieurs/surfeurs sans distances d'espacement entre eux, dameuse, tir d'un explosif Départ spontané : sans intervention humaine Déclenchement : concerne les avalanches provoquées par surcharge, notamment par le(s) skieur(s).				

FIGURE A.1 – Échelle européenne du risque d'avalanche (source Météo-France 2018).

Annexe B

Annexe du chapitre 5

Formulaire sur les attentes et besoins de produits à valeur ajoutée - détection de dépôts d'avalanches de neige par satellites

L'objectif de ce questionnaire est de cibler les attentes et besoins des différents acteurs professionnels par rapport à leur utilisation possible de données et d'information issues d'observation satellitaire, en complément des données déjà existantes en lien avec le phénomène d'avalanche (EPA, CLPA, BRA, etc.).

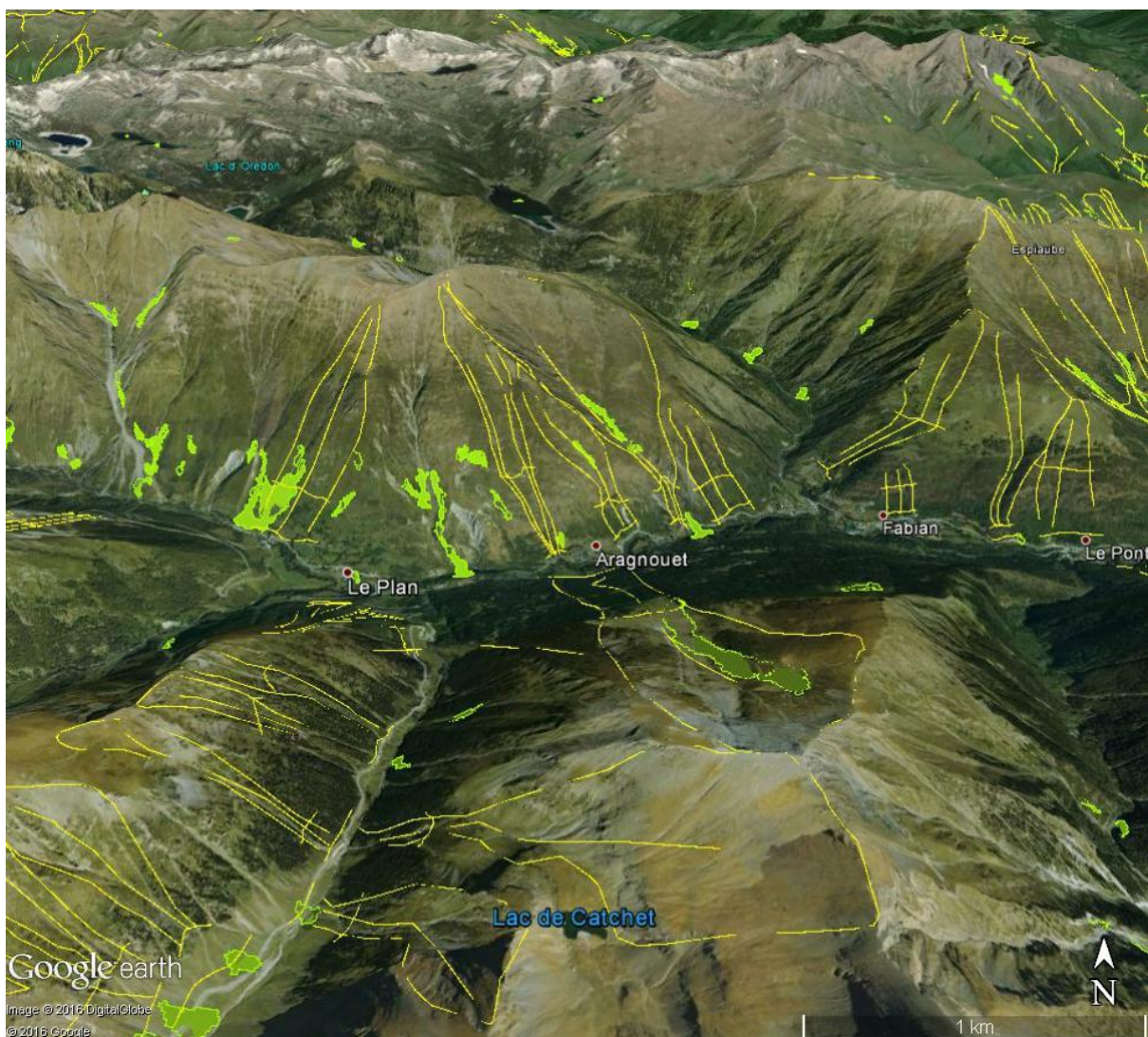
Le but de ma thèse est de dériver des indicateurs relatifs aux dépôts d'avalanche par l'exploitation de mesures radar des satellites Sentinel-1, pour différentes échelles spatiales (échelle à 20m du pixel, échelle du couloir avalancheux et celle du massif). La méthode de détection automatique qui a été développée permet d'obtenir différents produits :

- une cartographie de dépôts d'avalanche à l'échelle de 20 m (Karas et al. 2021) (voir la figure ci dessous)
- des indicateurs de l'activité avalancheuse à l'échelle de massifs (Karas et al. 2022 en cours de rédaction)

Figure illustrant un exemple de détection de dépôts d'avalanche

En vert : Zones détectées par radar

En jaune : Couloirs EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches)



1. Quel est votre nom et prénom, et dans quelle institution travaillez-vous ?

2. Quelle est votre fonction et quels sont vos liens avec les avalanches dans votre métier ?

3. De quel(s) type(s) de produit auriez-vous besoin ?

☐ Une carte de polygones de dépôts d'avalanches, précisant le contour de chaque événement détecté, à une échelle de 20 m

☐ Besoin d'un produit à résolution plus large que 20m : indicateurs avalancheux à l'échelle d'un massif ou/et de plusieurs couloirs avalancheux

☐ Autre (veuillez préciser)

4. Les images satellites sont générées tous les 6 jours via l'orbite ascendante (tôt le matin) et l'orbite descendante (le soir). Les orbites ascendantes et descendantes ont 36h d'intervalles. Certaines pentes sont cachées en orbite ascendante mais visibles en orbite descendante et vice versa. La combinaison des deux orbites permet une meilleure visibilité, et donc une détection plus complète.

A quelle échéance auriez-vous besoin des produits ?

☐ Le plus rapidement possible, quelques heures après l'acquisition de chaque orbite (importance d'obtenir des produits le matin et le soir)

☐ Besoin d'un produit synthétisé plus abouti (combinaison des orbites)

☐ Autre (veuillez préciser)

5. Classer par ordre de priorité les éléments les plus importants selon vous (du plus important au moins important) :

a/ Cartographie de polygones de dépôts d'avalanche, à une résolution de 20 m

b/ Indicateurs de l'activité avalancheuse à l'échelle des massifs

c/ Obtention de données quelques heures après l'acquisition de chaque orbite

d/ Obtention de données tous les 6 jours (combinaison des orbites)

6. Quel degré d'incertitude pourriez-vous tolérer pour vos applications ?

- ☐ Besoin d'une méthode extrêmement précise (très peu de fausses détections)
- ☐ Il vous est possible d'utiliser une méthode avec incertitude
- ☐ Autre (veuillez préciser)

7. Quelles sont vos zones géographiques d'intérêt ?

- ☐ Les massifs des Alpes
- ☐ Les massifs des Pyrénées
- ☐ Autre (veuillez préciser)

8. Comment pourriez-vous utiliser les données de détection dans votre travail et à quelle fréquence ?

9. Selon vous, dans un monde parfait, quel serait le produit opérationnel idéal en lien avec le phénomène d'avalanche, issu de la télédétection spatiale (de dépôts d'avalanche et/ou une autre variable liée au sol ou à l'enneigement) ?

Avez-vous des commentaires et/ou des suggestions ?

Bibliographie

- Abermann J, M Eckerstorfer, E Malnes, & BU Hansen 2019 *A large wet snow avalanche cycle in West Greenland quantified using remote sensing and in situ observations* Nat Hazards volume 97 p. 517–534 doi: [10.1007/s11069-019-03655-8](https://doi.org/10.1007/s11069-019-03655-8).
- Ancey C 1996 *Guide Neige et Avalanches. Connaissances, Pratiques, Sécurité* Edisud, Aix-en-Provence.
- Ancey C & C Charlier 1996 « Quelques réflexions autour de la classification des avalanches » *Revue de Géographie Alpine* 84-1 :9–21 doi: [10.3406/rga.1996.3844](https://doi.org/10.3406/rga.1996.3844).
- Bartelt P, CV Valero, T Feistl, M Christen, Y Bühler, & O Buser 2015 « Modeling cohesion in snow avalanche flow » *Journal of Glaciology* 61(229) :837–850 doi: [10.3189/2015JoG14J126](https://doi.org/10.3189/2015JoG14J126).
- Bellocq A 1991 « Les j.o., fête sportive, enjeu économique. l'impact de la météorologie » *Revue de Géographie Alpine* 79-3 :89–98 doi: [10.3406/rga.1991.3616](https://doi.org/10.3406/rga.1991.3616).
- Berlin C, F Techel, B Moor, M Zwahlen, R Hasler, & study group SNC 2019 « Snow avalanche deaths in switzerland from 1995 to 2014—results of a nation-wide linkage study » *PLoS one* doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225735>.
- Bonnefoy M, G Borrel, D Richard, L Bélanger, & M Naaim 2010 « La carte de localisation des phénomènes d'avalanche (clpa) : enjeux et perspectives » *Sciences Eaux et Territoires* 2 :6–14 doi: [10.3917/set.002.0006](https://doi.org/10.3917/set.002.0006).
- Bourova E, E Maldonado, J Leroy, R Alouani, N Eckert, M Bonnefoy-Demongeot, & M Deschatres 2016 « A new web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in france » *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16 :1205–1216 doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1205-2016>, 2016.
- Boyne HS & DJ Fisk 1990 « A laboratory comparison of field techniques for measurements of the liquid water fraction of snow » *Cold Regions Research and Engineering Laboratory Special Report* 90-3 doi: [10.3189/1998AoG26-1-103-106](https://doi.org/10.3189/1998AoG26-1-103-106) URL <https://erdc-library.erd.c.dren.mil/jspui/bitstream/11681/12066/1/SR-90-3.pdf>.
- Brun E, P David, M Sudul, & G Brunot 1992 « A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting » *J Glaciol* 38(128) :13 – 22 doi: [10.3189/s0022143000009552](https://doi.org/10.3189/s0022143000009552).
- Brun E, V Vionnet, S Morin, A Boone, E Martin, S Faroux, P Le Moigne, & JM Willemet 2012 « Le modèle de manteau neigeux crocus et ses applications » *La Météorologie* 76 :44–54 doi: [10.4267/2042/47245](https://doi.org/10.4267/2042/47245).

- Buhler Y, A Huni, M Christen, R Meister, & T Kellenberger 2009 « Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data » *Cold Regions Science and Technology* 57 :99–106 doi: [10.1016/j.coldregions.2009.02.007](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.02.007).
- Buhler Y, C Bieler, C Pielmeier, A Wiesmann, R Caduff, R Frauenfelder, C Jaedicke, & G Bippus 2014 « All-weather avalanche activity monitoring from space? » *International Snow Science Workshop ISSW, At Banff, AB, Canada* doi: [10.13140/2.1.4692.6082](https://doi.org/10.13140/2.1.4692.6082).
- Buhler Y, ED Hafner, B Zweifel, M Zesiger, & H Heisig 2019 « Where are the avalanches? rapid mapping of a large snow avalanche period with optical satellites » *The Cryosphere Discussions* doi: [10.5194/tc-2019-119](https://doi.org/10.5194/tc-2019-119).
- Caduff R, A Wiesmann, Y Bühler, C Bieler, & P Limpback 2016 « Terrestrial radar interferometry for snow glide activity monitoring and its potential as precursor of wet snow avalanches » *13th congress INTERPRAEVENT 30 May to 2 June 2016 Lucerne, Switzerland Conference proceedings "Living with natural risks"* :239–248.
- Casassa G, H Narita, & N Maeno 1991 « Shear cell experiments of snow and ice friction » *Journal of Applied Physics* 69, 3745–3756 doi: <https://doi.org/10.1063/1.348469>.
- Colbeck SC 1982 « An overview of seasonal snow metamorphism » *Reviews of Geophysics* 20(1) :45–61 doi: <https://doi.org/10.1029/RG020i001p00045> URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG020i001p00045>.
- Colbeck SC 2001 « The geometry and permittivity of snow at high frequencies » *Journal of Applied Physics* 53 :4495–4500 doi: [10.1063/1.331186](https://doi.org/10.1063/1.331186).
- Colbeck SC & JJ B 2001 « The formation of faceted layers above crusts » *Cold Regions Science and Technology* 33 Issues 2–3 :247–257 doi: [10.1016/S0165-232X\(01\)00045-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(01)00045-3).
- Coleou C, F Karbou, M Deschartes, R Martin, A Dufour, & N Eckert 2018 « The use of sar satellite observations to evaluate avalanche activities in the french alps during remarkable episodes of the 2017-2018 season » *International Snow Science Workshop 2018, Innsbruck, Austria* .
- Conway H 1998 « The impact of surface perturbations on snow-slope stability » *Annals of Glaciology* 26 :307–312 doi: [10.3189/1998AoG26-1-307-312](https://doi.org/10.3189/1998AoG26-1-307-312).
- Denoth A 1989 « Snow dielectric measurements » *Advances in Space Research* 9(1) :233–243 doi: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90491-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90491-2) URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0273117789904912>.
- Denoth A, A Foglar, P Weiland, C Mätzler, H Aebischer, M Tiuri, & A Sihvola 1984 « A comparative study of instruments for measuring the liquid water content of snow » *Journal of Applied Physics* 56 :2154–2160 doi: <https://doi.org/10.1063/1.334215>.

- Durand Y, E Brun, L Mérindol, G Guyomarc'h, B Lesaffre, & E Martin 1993 « A meteorological estimation of relevant parameters for snow models » *Ann Glaciol* 18 :65–71 doi: [10.3189/s0260305500011277](https://doi.org/10.3189/s0260305500011277).
- Durand Y, G Giraud, E Brun, L Mérindol, & E Martin 1999 « A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting » *J Glaciol* 45(151) :469–484 doi: [10.3189/s0022143000001337](https://doi.org/10.3189/s0022143000001337).
- Eckerstorfer M & E Malnes 2015 « Manual detection of snow avalanche debris using high-resolution radarsat-2 sar images » *Cold Regions Science and Technology* 120(6) :205–218 doi: [10.1016/j.coldregions.2015.08.016](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.016).
- Eckerstorfer M, E Malnes, & U Domaas 2014 « Avalanche debris detection using satellite-borne radar and optical remote sensing » *International Snow Science Workshop 2014* .
- Eckerstorfer M, E Malnes, & K Muller 2017 « A complete snow avalanche activity record from a norwegian forecasting region using sentinel-1 satellite-radar data » *Cold Regions Science and Technology* doi: [10.1016/j.coldregions.2017.08.004](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.004).
- Eckerstorfer M, H Vickers, E Malnes, & J Grahn 2019 « Near-real time automatic snow avalanche activity monitoring system using sentinel-1 sar data in norway » *Remote Sensing* 11 :773–791 doi: [10.3390/rs11232863](https://doi.org/10.3390/rs11232863).
- Eckerstorfer M, K Müller, J Grahn, E Malnes, R Engeset, T Humstad, A Widforss, & D Moldestad 2020 « Norway's operational avalanche activity monitoring system using sentinel-1 » *Virtual Snow Science Workshop (poster)* doi: [10.1109/igarss47720.2021.9553152](https://doi.org/10.1109/igarss47720.2021.9553152).
- Eckerstorfer M, HD OterhalsK, K Mueller, E Malnes, J Grahn, S Langeland, & P Velsand 2022 « Performance of manual and automatic detection of dry snow avalanches in sentinel-1 sar images » *Cold Regions Science and Technology* doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103549>.
- Faillietaz J 2003 *Le déclenchement des avalanches de plaque de neige : De l'approche mécanique à l'approche statistique* Ph.D. thesis.
- Fierz C, R Armstrong, Y Durand, P Etchevers, E Greene, D McClung, K Nishimura, P Satyawali, & S Sokratov 2009 « The international classification for seasonal snow on the ground » *IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris* .
- Flores-Anderson AI, KE Herndon, RB Thapa, & E Cherrington 2019 *The SAR Handbook, Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation* SERVIR Global Science Coordination Office doi: [10.25966/nr2c-s697](https://doi.org/10.25966/nr2c-s697).
- Gaume J, A Van Herwijnen, G Chambon, N Wever, & J Schweizer 2016 « Critical length for the onset of crack propagation in snow : reconciling shear and collapse » in *In ISSW proceedings. International snow science workshop proceedings* pp. 12–16.

- Giacona F, N Eckert, & B Martin 2017 « A 240-year history of avalanche risk in the vosges mountains based on non-conventional (re)sources » *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17(6) :887–904 doi: 10.5194/nhess-17-887-2017 URL <https://nhess.copernicus.org/articles/17/887/2017/>.
- Giraud G 1992 « MEPRA : an expert system for avalanche risk forecasting » in *Proceedings of the International snow science workshop, 4-8 oct 1992, Breckenridge, Colorado, USA* pp. 97–106.
- Goetz D 2018 « Bilan nivo-météorologique de l'hiver 2017-2018 » *Météo-France, Cellule Montagne et Nivologie avec l'aide des nivologues des Centres Météorologiques de montagne*.
- Guneriussen T 1997 « Backscattering properties of a wet snow cover derived from dem corrected ers-1 sar data » *International Journal of Remote Sensing* 18 :2 :375–392 doi: 10.1080/014311697219123.
- Hafner E & Y Bühler 2019 « Spot6 avalanche outlines 24 january 2018 » *EnviDat* doi: 10.16904/envidat.77.
- Hafner ED, F Techel, S Leinss, & Y Bühler 2021 « Mapping avalanches with satellites – evaluation of performance and completeness » *The Cryosphere* 15 :983–1004 doi: 10.5194/tc-15-983-2021.
- Hafner ED, P Barton, RC Daudt, JD Wegner, K Schindler, & Y Bühler 2022 « Automated avalanche mapping from spot 6/7 satellite imagery with deep learning : results, evaluation, potential and limitations » *The Cryosphere* 16 :3517–3530 doi: 10.5194/tc-16-3517-2022.
- Hallikainen M 1954 *Dielectric Materials and Applications* Artech House Microwave Library. Artech House.
- Hallikainen M 2014 *Microwave Dielectric Properties of Materials* Encyclopedia of Remote Sensing. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, New York, NY doi: 10.1007/978-0-387-36699-9_100.
- Hallikainen M, F Ulaby, & M Abdelrazik 2006 « Dielectric properties of snow in the 3- to 37ghz range. » .
- Jarry F 2011 « 40 ans d'accidents d'avalanche » *Neige et Avalanches, ANENA* 135.
- Karas A, F Karbou, S Giffard-Roisin, P Durand, & N Eckert 2021 « Automatic color detection-based method applied to sentinel-1 sar images for snow avalanche debris monitoring » *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 60 :1–17 doi: 10.1109/tgrs.2021.3131853.
- Karbou F, C Coleou, M Lefort, M Deschartres, N Eckert, R Martin, G Charvet, & A Dufour 2018 « Monitorin avalanche debris in the french mountains using observations form sentinel-1 satellites » *Proceedings, International Snow Science Workshop, Innsbruck, Austria*.

- Kawashima K, T Endo, & Y Takeuchi 1998 « A portable calorimeter for measuring liquid-water content of wet snow » *Annals of Glaciology* 26 :103–106 doi: [10.3189/1998AoG26-1-103-106](https://doi.org/10.3189/1998AoG26-1-103-106).
- Larsen S, A Salberg, & R Solberg 2013 « Automatic avalanche mapping using texture classification of optical satellite imagery » *edited by : Lasaponara, R, Masini, N, and Biscione, M, EARSeL, 2013, Towards Horizon 2020* :399–410.
- Lato MJ, R Frauenfelder, & Y Buhler 2012 « Automated detection of snow avalanche deposits : segmentation and classification of optical remote sensing imagery » *Natural Hazards Earth System Sciences* :2893–2906 doi: [10.5194/nhess-12-2893-2012](https://doi.org/10.5194/nhess-12-2893-2012).
- Leinss S, R Wicki, S Holenstein, S Baffelli, & Y Bühler 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 :1783—1803 doi: [10.5194/nhess-20-1783-2020](https://doi.org/10.5194/nhess-20-1783-2020).
- Leone F, A Colas, Y Garcin, N Eckert, & V Jomelli 2014 « The snow avalanches risk on alpine roads network. assessment of impacts and mapping of accessibility loss. » *Journal of Alpine Research - Revue de géographie alpine* doi: <https://doi.org/10.4000/rga.2501>.
- Ligneau C, B Sovilla, & J Gaume 2022 « Numerical investigation of the effect of cohesion and ground friction on snow avalanches flow regimes » *PLoS ONE* 17(2) : e0264033 doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264033>.
- Longépé N 2009 *Apport de l'Imagerie SAR Satellitaire en Bandes L et C pour la Caractérisation du Couvert Neigeux* Ph.D. thesis.
- Magono C & C WooLee 1966 « Meteorological classification of natural snow crystals » *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University Series 7, Geophysics* 2 :321–335.
- Malnes E, M Eckerstorfer, & A Jonsson 2013 « Remote sensing of avalanches in northern norway using synthetic aperture radar » *International Snow Science Workshop Grenoble* .
- Martini A 2005 *Télédétection d'un couvert neigeux en milieux alpins à partir de données SAR polarimétriques multi-fréquentielles et multi-temporelles* Ph.D. thesis.
- Martini A, L Ferro-Famil, & E Pottier 2003 « Polarimetric study of scattering from dry snow cover in alpine areas » in *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)* volume 2 pp. 854–856 vol.2 doi: [10.1109/IGARSS.2003.1293942](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1293942).
- Mätzler C 1987 « Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover » *Remote sensing reviews* 2(2) :259–387.
- Matzler C 1996 « Microwave permittivity of dry snow » *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2) :573–581 doi: [10.1109/36.485133](https://doi.org/10.1109/36.485133).

- McClung D & P Schaerer 2006 « The avalanche handbook, 3rd edition » *The Mountaineers, Seattle*.
- McClung D & J Schweizer 1996 « Effect of snow temperatures on skier triggering of dry slab avalanches » in *Proceedings of the 1996 International Snow Science Workshop in Banff, Alberta. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, BC* pp. 113–117.
- Mesner N & K Oštir 2014 « Investigating the impact of spatial and spectral resolution of satellite images on segmentation quality » *Journal of Applied Remote Sensing* 8 :083696 doi: [10.1117/1.JRS.8.083696](https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083696).
- Morin S, S Horton, F Techel, M Bavay, C Coléou, C Fierz, A Gobiet, P Hagenmüller, M Lafaysse, M Ližar, C Mitterer, F Monti, K Müller, M Olefs, JS Snook, A van Herwijnen, & V Vionnet 2019 « Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting : A status report on current implementations and prospects for the future » *Cold Regions Science and Technology* :02910doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102910>, 2019.
- Mougin P 1922 « Les avalanches en savoie » *Collections de glaciologie* :175–310.
- Naaïm-Bouvet F & D Richard 2015 *Les risques naturels en montagne* Hors Collection Edition Quae.
- Nagler T & H Rott 2000 « Retrieval of wet snow by means of multitemporal sar data » *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(2) :754–765 doi: [10.1109/36.842004](https://doi.org/10.1109/36.842004).
- Oh Y, K Sarabandi, & F Ulaby 1992 « An empirical-model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces » *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 30 :370 – 381 doi: [10.1109/36.134086](https://doi.org/10.1109/36.134086).
- Pahaut E & G Giraud 1995 « La prévision du risque d’avalanche en france – bilan et perspectives » *La Météorologie* 12 :46–57 doi: [10.4267/2042/52005](https://doi.org/10.4267/2042/52005).
- Perla RI & MJ Martinelli 1976 *Avalanche Handbook* 3rd edition The Mountaineers Books.
- Pérez-Guillén C, K Tsunematsu, K Nishimura, & D Issler 2019 « Seismic location and tracking of snow avalanches and slush flows on mt. fuji, japan » *Earth Surface Dynamics* :989–1007doi: [10.5194/esurf-7-989-2019](https://doi.org/10.5194/esurf-7-989-2019).
- Reiweger I, J Gaume, & J Schweizer 2015 « A new mixed-mode failure criterion for weak snowpack layers » *Geophysical Research Letters* 42(5) :1427–1432 doi: <https://doi.org/10.1002/2014GL062780> URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014GL062780>.
- Schläppy R 2014 *Snow avalanche hazard assessment in the French Alps using a combination of dendrogeomorphic and statistical approaches* Ph.D. thesis.

- Schläppy R, V Jomelli, D Grancher, M Stoffel, C Corona, D Brunstein, N Eckert, & M Deschatres 2013 « A new tree-ring-based, semi-quantitative approach for the determination of snow avalanche events : use of classification trees for validation » *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 45(3) :383–395 doi: [10.1657/1938-4246-45.3.383](https://doi.org/10.1657/1938-4246-45.3.383).
- Schneebeli M, C Pielmeier, & JB Johnson 1999 « Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer » *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1–3) :101–114 doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00030-0).
- Schweizer BRAvH J & J Gaume 2016 « Avalanche release 101 » *International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 1–11* doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(99\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(99)00030-0) URL https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/WSL/Mitarbeitende/schweizj/Schweizer_etal_Avalanche_release_101_ISSW_2016.pdf.
- Shi J & J Dozier 1992 « Radar backscattering response to wet snow » [Proceedings] *IGARSS '92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2* :927–929.
- Shi J & J Dozier 1995 « Inferring snow wetness using c-band data from sir-c's polarimetric synthetic aperture radar » *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 33 :905 – 914 doi: [10.1109/36.406676](https://doi.org/10.1109/36.406676).
- Shi J & J Dozier 2000 « Estimation of snow water equivalence using sir-c/x-sar, part ii : inferring snow depth and particle size » *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 38 :2475 – 2488 doi: [10.1109/36.885196](https://doi.org/10.1109/36.885196).
- Sinha S, S Giffard-Roisin, F Karbou, M Deschartres, N Eckert, A Karas, C Coleou, & C Monteleoni 2019 « Can avalanche deposits be effectively detected by deep learning on sentinel-1 satellite sar images » *International Workshop on Climate Informatics* .
- Small D 2012 « Sar backscatter multitemporal compositing via local resolution weighting » *IGARSS - 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 25 Munich, Germany, 22072012 - 27072012* :4521–4524 doi: [10.1109/igarss.2012.6350465](https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6350465).
- Steinkogler W, J Gaume, H Löwe, B Sovilla, & M Lehning 2015 « Granulation of snow : From tumbler experiments to discrete element simulations » *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 120(6) :1107–1126 doi: <https://doi.org/10.1002/2014JF003294> URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2014JF003294>.
- Surendar M, A Bhattacharya, G Singh, Y Yamaguchi, & G Venkataraman 2015 « Development of a snow wetness inversion algorithm using polarimetric scattering power decomposition model » *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 38 :65 – 75 doi: [0.1016/j.jag.2015.05.010](https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.010).

- Tiuri M, A Sihvola, E Nyfors, & M Hallikainen 1984 « The complex dielectric constant of snow at microwave frequencies » *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 9 :377–382 doi: [10.1109/JOE.1984.1145645](https://doi.org/10.1109/JOE.1984.1145645).
- Tompkin C & S Leinss 2021 « Backscatter characteristics of snow avalanches for mapping with local resolution weighting » *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* doi: [10.1109/JSTARS.2021.3074418](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3074418).
- Ulaby F, R Moore, & A Fung 1986 « Microwave dielectric properties of natural earth materials » *Microwave remote sensing* 3 :2017–2027.
- van Herwijnen A, M Heck, & J Schweizer 2016 « Forecasting snow avalanches using avalanche activity data obtained through seismic monitoring » *Cold Region Science Technology* :68–80doi: [10.1016/j.coldregions.2016.09.014](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.014).
- Veilleux S, A Decaulne, & N Bhiry 2021 « Snow cornice and snow avalanche monitoring using automatic time lapse cameras in tasiapik valley, nunavik (québec) during the winter of 2017–2018 » *Arctic Science* 7(4) :798–812 doi: [10.1139/as-2020-0013](https://doi.org/10.1139/as-2020-0013).
- Veyssière G 2019 *Apport des mesures du radar à synthèse d'ouverture de Sentinel-1 pour l'étude des propriétés du manteau neigeux* Ph.D. thesis.
- Vickers H, M Eckerstorfer, E Malnes, & AP Doulgeris 2017 « Synthetic aperture radar (sar) monitoring of avalanche activity : An automated detection scheme » *20th Scandinavian Conference, SCIA, Tromsø, Norway Proceedings, Part II Springer International Publishing* doi: [10.1007/978-3-319-59129-2_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-59129-2_12).
- Vionnet V, E Brun, S Morin, A Boone, E Martin, S Faroux, PL Moigne, & JM Willemet 2012 « The detailed snowpack scheme Crocus and its implementation in SURFEX v7.2 » *Geosci Model Dev* 5 :773–791 doi: [10.5194/gmd-5-773-2012](https://doi.org/10.5194/gmd-5-773-2012).
- Viviani F, A Michelini, & L Mayer 2020 « Rockspot : an interferometric doppler radar for rockfall/avalanche detection and tracking » in *2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20)* pp. 1–5 doi: [10.1109/RadarConf2043947.2020.9266677](https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266677).
- Vriend NM, JN McElwaine, B Sovilla, CJ Keylock, M Ash, & PV Brennan 2013 « High-resolution radar measurements of snow avalanches » *Geophysical Research Letters* 40(4) :727–731 doi: <https://doi.org/10.1002/grl.50134> URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/grl.50134>.
- Watson L, B Carpenter, K Thompson, & JB Johnson 2021 « Using local infrasound arrays to detect plunging snow avalanches along the milford road, new zealand (aotearoa) » *Natural Hazards* :949–972doi: [10.1007/s11069-021-05086-w](https://doi.org/10.1007/s11069-021-05086-w).
- Wei M, X Pengfeng, Z Xueliang, S Yina, M Tengyao, & Y Lizao 2020 « Retrieving snow wetness based on surface and volume scattering simulation » *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 169 :17–28 doi: [10.1016/j.isprsjprs.2020.08.021](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.021).

- Wesselink DS 2015 *Optimisation of methods for snow avalanche detection in SAR images* Ph.D. thesis.
- Wesselink DS, E Malnes, M Eckerstorfer, & Rc Lindenberg 2017 « Automatic detection of snow avalanche debris in central svalbard using c-band sar data, » *Cold Regions Science and Technology* 120(6) :205–218 doi: [10.1080/17518369.2017.1333236](https://doi.org/10.1080/17518369.2017.1333236).
- Wiesmann A, U Wegmuller, M Honikel, T Strozzi, & CL Werner 2001 « Potential and methodology of satellite based sar for hazard mapping » *Proceedings of IGARSS, Sydney, Australia* :9–13.
- Wu L, H Wang, Y Li, Z Guo, & N Li 2021 « A novel method for layover detection in mountainous areas with SAR images » *Remote Sensing* 13(23) :4882 doi: [10.3390/rs13234882](https://doi.org/10.3390/rs13234882).