



Le dépôt d'avalanche : une nouvelle variable dans la connaissance du risque avalancheux

Thèse présentée en vue de l'obtention du doctorat de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
Préparée au sein des laboratoires LGP et INRAE ETNA dans l'Ecole Doctorale de Géographie de Paris (ED434)
Spécialité : Géographie Physique

Présentée et soutenue par Hippolyte KERN
sous la direction de Vincent JOMELLI et Nicolas ECKERT

Soutenance publique le 22 mars 2023

Armelle Decaulne, Directrice de recherche, Nantes Université.....Rapporteuse
Markus Stoffel, Professeur des universités, Université de Genève..... Rapporteur
Florie Giacona, Chargée de recherche, INRAE.....Examinatrice
Frédéric Leone, Professeur des Universités, Université Paul Valéry..... Examineur
Denis Mercier, Professeur des Universités, Sorbonne-Université.....Examineur
Vincent Jomelli, Directeur de recherche,CEREGE.....Directeur de thèse
Nicolas Eckert, Ingénieur HDR, INRAE..... Co-directeur de thèse

Résumé

Les avalanches représentent l'un des principaux aléas dans les zones de montagne, entraînant régulièrement des dégâts de grandes ampleurs et affectent le réseau routier, entraînant des coupures de routes. L'ampleur de ces dommages et perturbations est directement conditionnée par les caractéristiques du dépôt d'avalanches, résultat final de l'écoulement, avec en premier lieu ses dimensions. Or, les dépôts d'avalanches sont restés des objets peu étudiés, les variables responsables des variations spatio-temporelles des volumes des dépôts ainsi que de leurs caractéristiques géométriques et nivologiques restent à ce jour mal connues. Cette thèse vise donc à améliorer la connaissance sur les caractéristiques des dépôts ainsi que les variations temporelles et les facteurs de contrôle des volumes des dépôts. Pour ce faire, le travail se focalise sur des relevés de terrains et l'étude d'une base de données événementielle opérés sur deux massifs des Alpes françaises. Nos résultats montrent l'importance des caractéristiques du manteau neigeux au moment du déclenchement de l'avalanche comme facteur de contrôles des caractéristiques du dépôt final. Nos résultats ont mis en avant l'importance d'une approche saisonnière pour déterminer les variables de contrôle des volumes des dépôts d'avalanches. Les liens entre les volumes des dépôts et les variables morphologiques des couloirs et les conditions météorologiques locales sont plus élevés pour l'hiver que pour le printemps. On note une influence plus importante des variables météorologiques. Enfin, si la vulnérabilité du réseau routier est essentiellement contrôlée par la proximité de la route aux couloirs d'avalanche, certains facteurs météorologiques favorisant des coupures de routes ont été identifiés.

Abstract

Avalanches are one of the main hazards in mountain areas, frequently causing extensive damage and impacting the road network, resulting in road closures. The extent of damage and disturbance is directly determined by the avalanche deposit characteristics, and in particular its volume. Yet, avalanche deposits are still poorly studied objects, and the variables responsible for the deposit volumes spatio-temporal variations as well as their geometric and snow characteristics remain largely unknown so far. Therefore, this thesis aims to provide further knowledge about deposit characteristics as well as temporal variations and deposit volumes controlling factors. For this purpose, the study is based on field surveys and the analysis of an event database conducted on two massifs of the French Alps. Our results show the importance of the snowpack characteristics at initiation of the avalanche as a factor controlling the characteristics of the final deposit. Our results pointed out the importance of a seasonal approach to determine the controlling variables of avalanche deposit volumes. The relationships between deposition volumes and avalanche paths morphological variables and local weather conditions are higher for winter than for spring. Meanwhile, the influence of meteorological variables is more important. Finally, although the vulnerability of the road network is essentially controlled by the proximity of the road to avalanche paths, a few meteorological factors favoring road cuts have been identified.

Remerciements

A l'heure où j'écris ces lettres, quelques jours me séparent de la fin de la rédaction de mon manuscrit. Je souhaite à travers ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de mon aventure doctorale : mes encadrants, mes collègues, mes amis et ma famille avec qui j'ai partagé les péripéties du doctorat au cours de ces dernières années.

Mes plus vifs remerciements vont à mes deux directeurs de thèse, Vincent Jomelli et Nicolas Eckert, qui m'ont accordé leur confiance dès le Master 2 et qui ont assumé la direction de ma thèse de manière exemplaire. Je leur exprime ma profonde gratitude pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et l'ensemble des contributions apportées à cette aventure scientifique. J'ai beaucoup appris à vos côtés et je garderais précieusement vos nombreux enseignements.

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail, à commencer par les deux rapporteurs : Armelle Decaulne, directrice de recherche à l'université de Nantes et Markus Stoffel, professeur à l'université de Genève. J'adresse également mes remerciements à Florie Giacona, chargée de recherche à l'INRAE, Frédéric Leone, professeur à l'université Paul Valéry et Denis Mercier, professeur à Sorbonne-Université, pour leurs évaluations en tant qu'examineurs.

Je souhaite ensuite remercier l'École Doctorale de Géographie de Paris (ED 434) qui m'a accordé une bourse doctorale de trois ans à dater de septembre 2017. Cette bourse m'a permis de vivre sereinement cette expérience de thèse. Je suis également reconnaissant envers le Labex Dynamite pour avoir financé une importante partie de ce travail doctoral à travers l'obtention d'un projet SarDyn, coporté par Vincent Jomelli et Gilles Arnaud-Fassetta. En parallèle de cette thèse, il m'a été offert d'effectuer plusieurs missions d'enseignement. Je remercie l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne de m'avoir permis de bénéficier d'une mission d'enseignement

de deux ans (2018-2020) avant de pouvoir continuer en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) en 2021-2022. Je remercie également l'UFR de géographie de Sorbonne-Université qui me permet d'enseigner actuellement en tant qu'ATER (2022-2023). Cette aventure doctorale n'aurait pas été si riche sans la découverte des joies de l'enseignement.

A travers ces remerciements, je souhaite vous partager ma pensée admirative envers Paul Mougin. Ce visionnaire inspecteur général des eaux et forêts et pionnier de la science des avalanches a notamment mis en place dès le début du XXème siècle l'Enquête Permanente des Avalanches (EPA). 120 ans plus tard, une importante partie de cette thèse repose sur l'utilisation de cette précieuse base de données. Je tiens donc à remercier les très nombreux agents de l'ONF-RTM et de l'INRAE qui contribuent encore actuellement à faire perdurer le fonctionnement de l'EPA.

Ma passion pour la géographie physique puise en partie ses sources dans mon parcours universitaire. Arrivant avec ce doctorat, au point final de mes études, j'ai une pensée émue pour l'ensemble des enseignants de l'UFR de géographie de l'université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, et plus particulièrement l'équipe enseignante du master DYNARISK. Ils ont su partager avec excellence et passion leurs connaissances et me guider le long de mon parcours. J'aimerais plus particulièrement remercier Emmanuèle Gautier, Marie Chenet et Frédéric Gob ; Il y a des rencontres qui aiguillent nos vies. Depuis les cours de licence, en passant par les stages de terrain de master, par les relations que nous avons tissées ainsi que la confiance que vous m'avez accordée durant mon parcours doctoral, je ne peux que vous remercier pour tout ce que ces rencontres m'ont apporté.

J'ai eu la chance d'effectuer l'essentiel de ma thèse au sein du Laboratoire de Géographie Physique (LGP). Le LGP m'a offert l'opportunité d'effectuer ce travail de thèse avec un soutien humain, matériel et financier important. La salle des doctorants a représenté pour moi un espace de travail parfait, alliant sérieux, convivialité, solidarité et bonne humeur. J'aimerais notamment remercier Emmanuèle Gautier en tant que directrice du laboratoire, elle a su mettre en place un espace de travail

particulièrement sain pour les doctorants, d'autant plus durant une pandémie. J'ai également pu profiter du soutien financier du laboratoire pour l'achat de matériel ou pour participer à des colloques. Mes plus sincères remerciements vont également aux ingénieurs du LGP sur qui j'ai pu m'appuyer. J'exprime ma grande gratitude envers Delphine Grancher pour son écoute, ses conseils et le temps qu'elle a su consacrer à mes travaux. Un grand merci pour m'avoir aiguillé face à mes déboires statistiques au point d'éveiller en moi une réelle appétence ! Je remercie également Claude Legentil et Julien Cavero pour m'avoir accompagné sur mes missions de terrain et m'avoir apporté leurs expertises pour le traitement des données.

Mes prochains remerciements sont destinés à l'armée de doctorants du LGP. J'ai vu plusieurs générations de doctorants défiler, la qualité des rapports d'amitié, de solidarité et de convivialité ainsi que des échanges scientifiques n'ont fait que se renforcer. Je commence par remercier mes "copines de galères" qui m'ont accompagné tout au long de ma thèse : Lucile, Laurence, Sarah et bien sûr Melody. Je pense également aux plus anciens, présents lors de mon arrivée. Vous m'avez d'abord impressionné puis vous avez su rapidement me guider et me soutenir : Yohan, Anaëlle, Louis, Marc, Valentina, Ludo, David et Marion. J'ai aussi eu grand plaisir à voir régulièrement de nouveaux visages intégrer la salle des doctorants pour rapidement créer de fortes amitiés : Audrey, Elise, Manon, Stoil, Quentin, Evan, Gabriel, Tristan et Aurélien. Des doctorants sont arrivés plus récemment : Idea, Léa, Marina, Salomé et Amaury, j'espère vite apprendre à mieux les connaître et leur souhaite une aventure doctorale aussi enrichissante que la mienne.

Enfin je souhaite remercier l'ensemble des membres du LGP, qu'il serait trop fastidieux de citer sans prendre le risque d'en oublier quelques-uns. J'ai apprécié tout du long vos discussions, vos passions scientifiques respectives, votre solidarité et vos encouragements. Il fait bon vivre au LGP et c'est avec une tristesse non dissimulée que j'envisage mon futur sans croiser l'ensemble des membres au coin d'un couloir ou en salle café.

Si j'ai passé l'essentiel de mon temps de travail effectif au LGP, je remercie au même titre l'INRAE, et plus particulièrement l'unité ETNA (Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches) pour l'accueil qui m'y a été réservé. Je souhaiterais tout

particulièrement remercier Michael Deschartes mais aussi Emmanuel Thibert et Sylvain Pech. La qualité des échanges scientifiques, le temps accordé, l'aide sur le terrain et leur sympathie ont été des apports essentiels à mes travaux. En plus d'avoir beaucoup appris à vos côtés, les différentes missions de terrains représentent les plus beaux souvenirs de mon doctorat, tant scientifiquement qu'humainement. Je n'aurais jamais imaginé que creuser des trous dans la neige à vos côtés dans un froid mordant m'apporterait tant de satisfaction. Par ailleurs, l'INRAE a été pour moi un parfait lieu d'échange scientifique. J'ai une grande gratitude pour l'ensemble des personnes qui m'ont apporté leurs aides, leurs soutiens et leurs encouragements : Thierry, Taline, Robin, Florie et Mylene. Enfin, l'INRAE m'a apporté un soutien financier essentiel à la mise en place de ce travail doctoral.

Je tiens également à remercier le photographe Thibaut Vergoz, qui nous a accompagnés sur le terrain et pris certaines des très belles photographies qui illustrent ce travail. Je suis reconnaissant envers data-avalanche.fr pour nous avoir autorisé à utiliser des photographies provenant de leur site.

Je remercie l'ensemble de mes amis pour les innombrables discussions qui m'ont encouragé et stimulé ces dernières années. J'ai bien entendu une pensée particulière pour mes amis rencontrés sur les bancs de Tolbiac en licence de géographie. Vous savoir toujours à mes côtés 10 ans après me remplit de joie. J'ai une pensée émue pour mes copains de toujours Batiste et Victor. Qui aurait cru quand nous nous sommes rencontrés au lycée que nous finirions par chacun faire une thèse dans des domaines bien différents mais entouré par une passion commune pour la science. J'ai toujours su trouver en vous une oreille attentive face à mes joies et déboires scientifiques.

Je souhaiterais enfin remercier mes plus proches, à commencer par ma maman. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir encouragé à traverser la difficile étape du secondaire pour pouvoir m'émanciper à l'université. Tes innombrables conseils et relectures, les nombreuses discussions et ton soutien moral sans faille ont été des éléments essentiels à ma qualité de vie et à mon

développement personnel durant mes années d'études puis de thèse. Je tiens également à remercier ma sœur pour son soutien, sa bienveillance et sa gentillesse. Malgré ton départ dans un plat pays bien éloigné des montagnes, tu as toujours su te montrer curieuse et impliquée dans mes activités.

Je souhaiterais conclure ces remerciements en exprimant ma gratitude et mon affection envers Mélody, qui est vite devenue bien plus qu'une collègue doctorante. Durant ces dernières années, par ton soutien, ta motivation et ta bonne humeur sans faille, tu as bien souvent été ma boussole face à l'immensité du travail doctoral.

Sommaire

RESUME	4
REMERCIEMENTS	7
SOMMAIRE	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE/CONTEXTE	19
PARTIE I CONTEXTUALISATION DE LA RECHERCHE	23
CHAPITRE 1 : LES AVALANCHES : ORIGINES, DYNAMIQUES ET CONSEQUENCES	25
1.1 NEIGE : TYPOLOGIE, TRANSFORMATION ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	25
1.2 LES DYNAMIQUES AVALANCHEUSES : GÉNÉRALITÉS ET TYPOLOGIES	26
1.3 ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ AVALANCHEUSE	31
1.4 LES CHRONIQUES AVALANCHEUSES : SOURCES DE DONNÉES ET UTILISATIONS SCIENTIFIQUES.....	33
1.5 AVALANCHE ET VULNÉRABILITÉ	37
CHAPITRE 2 : LES DEPOTS D'AVALANCHES	39
2.1 VOLUME ET GÉOMÉTRIE DES DÉPÔTS D'AVALANCHES	39
2.2 CARACTÉRISTIQUES NIVOLOGIQUES ET STRATIGRAPHIQUES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	41
2.3 FACTEURS DE CONTRÔLE DES CARACTÉRISTIQUES VOLUMÉTRIQUES ET NIVOLOGIQUES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	45
2.4 VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU ROUTIER ET DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	47
CHAPITRE 3 PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS DE LA THESE	55
3.1 MANQUES DE CONNAISSANCE ET VERROUS	55
3.2 OBJECTIFS DE THÈSE	56
3.3 ORGANISATION DES SECTIONS SUIVANTES DE LA THÈSE	56

PARTIE II : DONNÉES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE **59**

CHAPITRE 4 : ÉTUDE DE LA GEOMETRIE ET DE LA COMPOSITION DES DEPOTS *IN-SITU* **61**

4.1 ORGANISATION DES MISSIONS DE TERRAIN..... 61

4.2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE 61

**CHAPITRE 5 DÉTERMINATION DES VARIABLES RESPONSABLES DES VOLUMES DES DEPOTS DEPUIS UNE
UNIQUE BASE DE DONNEES EVENEMENTIELLE RELATIVE AUX AVALANCHES** **65**

5.1 CONSTITUTION D'UNE UNIQUE BASE DE DONNÉES ÉVÉNEMENTIELLES RELATIVES AUX AVALANCHES 65

5.2 PRÉSENTATION DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES 75

5.3 DÉTERMINATION DES VARIABLES RESPONSABLES DES VOLUMES DES DÉPÔTS 78

PARTIE III : PRÉSENTATION DES TERRAINS D'ÉTUDE **85**

CHAPITRE 6 : ZONES D'ETUDE : SPECIFICITES DES TERRAIN ET ACTIVITE AVALANCHEUSE **87**

6.1 VALLÉE DE LA HAUTE MAURIENNE 87

6.2 MASSIF DU QUEYRAS 94

PARTIE IV RÉSULTATS **103**

**CHAPITRE 7 : CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES, STRATIGRAPHIQUES ET GRANULOMETRIQUES DES
DEPOTS D'AVANCHES** **105**

**7. ETUDE *IN-SITU* DE CARACTERISTIQUES VOLUMETRIQUES ET NIVOLOGIQUES DES DEPOTS D'AVANCHES
: METHODOLOGIE ET PREMIERS RESULTATS** **107**

7.1 INTRODUCTION 108

7.2 LOCALISATION ET PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDE 110

7.3 SITUATION MÉTÉOROLOGIQUE ANTÉRIEURE AUX AVALANCHES ÉTUDIÉES..... 116

7.4 MÉTHODOLOGIE 117

7.5 RÉSULTATS 124

7.6 DISCUSSION 138

7.7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES 146

**CHAPITRE 8 : VOLUME DES DEPOTS D'AVANCHES : VARIABILITES SPATIO-TEMPORELLE ET RELATIONS
AVEC LA GEOMORPHOLOGIE DES COULOIRS** **149**

8.1 VARIABILITE DES VOLUMES DES DEPOTS D’AVALANCHES ET RELATIONS AVEC LA MORPHOLOGIE DES COULOIRS D’ECOULEMENT (BESSANS, SAVOIE, FRANCE)	151
8.1.1 INTRODUCTION	154
8.1.2 PRÉSENTATION DU TERRAIN D’ÉTUDE	156
8.1.3 DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE	160
8.1.4. RÉSULTATS	168
8.1.5 DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES	180
8.2 BRIEF COMMUNICATION: WEAK CONTROL OF SNOW AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES BY AVALANCHE PATH MORPHOLOGY	185
8.2.1 INTRODUCTION	185
8.2.2 DATA AND METHODOLOGY	186
8.2.3 RESULTS	192
8.2.4 DISCUSSION, CONCLUSION, AND OUTLOOK	196
CHAPITRE 9 : VOLUMES DES DEPOTS D’AVALANCHES : RELATIONS AVEC LE CLIMAT ET LA VULNERABILITE DU RESEAU ROUTIER	201
9. INFLUENCE OF SNOW AND METEOROLOGICAL CONDITIONS ON SNOW-AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES AND CONSEQUENCES FOR ROAD-NETWORK VULNERABILITY	203
9.1 INTRODUCTION	204
9.3 STUDY AREA	205
9.3 DATA AND METHODS	207
9.4. RESULTS AND INTERPRETATIONS	216
9.5. DISCUSSION, CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	223
<u>PARTIE V DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	<u>227</u>
CHAPITRE 10 : SYNTHÈSE ET APPORT DU TRAVAIL DE THESE	229
10.1 RAPPEL DU CONTEXTE DE RECHERCHE ET DES OBJECTIFS DE LA THÈSE.....	229
10.2 CONTRÔLE SAISONNIER DES CARACTÉRISTIQUES DES VOLUMES DES DÉPÔTS D’AVALANCHES	229
10.3 APPORT DE CES RECHERCHES SUR LA VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU ROUTIER ALPIN FACE AUX AVALANCHES	233

10.4 PERSPECTIVES	234
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	239
LISTE DES FIGURES	267
LISTE DES TABLEAUX	275
TABLE DES MATIERES	279
ANNEXES	285

Introduction générale/contexte

Les avalanches représentent l'un des principaux aléas dans les zones de montagne. Les avalanches sont définies comme un transfert rapide d'une masse de neige le long d'un versant (Hopfinger, 1983 ; Ancey et Charlier, 1996 ; Schweizer et al., 2003). Les caractéristiques de déclenchement et d'écoulement sont très variables et vont déterminer le volume de neige mobilisé (McClung et Shaerer, 1980 ; Rabin, 2002). Ces caractéristiques sont dépendantes d'un grand nombre de facteurs tels que les conditions climatiques et nivologiques (température, vent, profondeur et composition du manteau neigeux etc...), les caractéristiques morphologiques des couloirs (pente, superficie, exposition etc...) et l'occupation du sol (présence de forêt, mesure de protection active, etc...). L'aspect soudain du phénomène ainsi que les nombreuses interactions entre les facteurs responsables de l'ampleur de l'avalanche expliquent la vulnérabilité des personnes (Techel et al., 2013), des biens et des infrastructures (Leone et al., 2014).

Plusieurs avalanches ont provoqué des dégâts de grande ampleur ces dernières décennies en France. En février 1970, une vaste avalanche frappe un centre UCPA implanté sur la commune de Val d'Isère. La catastrophe provoque la mort de 39 personnes et entraîne une refonte du système de gestion du risque lié aux avalanches (Ancey, 2009). En 1999, une avalanche détruit une partie du village de Montroc et provoque la mort de 12 personnes. En Europe, l'Italie, la Suisse et l'Autriche connaissent régulièrement des avalanches mortelles. En 2017 en Italie, l'avalanche du Rigopiano détruit un hôtel et entraîne la mort de 29 personnes (Tedim et Leone, 2018 ; Frigo et al., 2020). Les avalanches provoquent également d'importants dommages sur les infrastructures, notamment routières. Les routes sont régulièrement affectées, entraînant des coupures de routes avec des durées de perturbations variables. Ces dernières entraînent des dommages indirects difficilement quantifiables et identifiables (Leone et al., 2010 ; Leone et al., 2014) dans des zones où l'accessibilité routière revêt un caractère économique primordial pour les activités liées à la pratique des sports d'hiver (Boudières et al., 2010 ; Leone et al., 2014).

L'importance des dommages provoqués par les avalanches a entraîné dès le début du 20^{ème} siècle la mise en place de mesures de gestion et de protection active des sites particulièrement vulnérables (Suzlée, 1950). Des mesures passives de réduction du risque avalancheux ont également vu le jour avec notamment l'implantation de systèmes paravalanches ou par des politiques de reforestation. La réduction de la vulnérabilité passe aussi par une meilleure connaissance des mécanismes responsables des phénomènes avalancheux et de leur ampleur par un suivi régulier de l'activité avalancheuse, recensée au sein de chronique d'événements. Dans ce domaine, la France va être pionnière et va mettre en place dès la fin du 19^{ème} siècle un système général d'observation et de recensement des avalanches, d'abord en Savoie puis dans l'ensemble des massifs français (Mougin, 1922). On retrouve la mise en place de systèmes similaires en Suisse ou encore au Canada plus tardivement. La richesse des informations récoltées en France sur plus d'un siècle a notamment permis d'améliorer la connaissance sur les liens entre climat et activité avalancheuse (Eckert et al., 2010a) ou bien encore sur l'analyse des distances d'arrêt (Eckert et al., 2010b).

Cependant, jusqu'ici, les études se sont essentiellement concentrées sur les dynamiques de déclenchement ainsi que sur les mécanismes d'écoulement et d'arrêt des avalanches. Les dépôts d'avalanches, résultat final de l'écoulement, sont restés des objets peu étudiés. Seules quelques études se sont penchées sur la forme des dépôts (e.g McClung et Schaerer, 2006 ; Kolher et al. 2018) ou leurs caractéristiques nivologiques (e.g Jomelli et Bertran, 2001 ; Issler et al., 2019a ; Hao et al, 2021). Les variables responsables des variations spatio-temporelles des volumes des dépôts ainsi que de leurs caractéristiques géométriques et nivologiques restent à ce jour mal connues. Or, ce sont les caractéristiques du dépôt, avec en premier lieu ses dimensions, qui vont directement conditionner l'ampleur des dommages, notamment infligés aux réseaux routiers.

C'est sur la base de ce constat que ce projet de thèse s'est construit. Ainsi, le principal défi consiste à améliorer la connaissance scientifique sur les dépôts d'avalanches en se concentrant sur l'identification des variables de contrôle géomorphologique et météorologique. Cet objectif nécessite d'améliorer parallèlement nos connaissances sur les caractéristiques nivologiques et

volumétriques des dépôts d'avalanches et d'identifier leurs liens avec les caractéristiques d'écoulement. La visée de cette thèse est également d'exploiter les données récoltées et les résultats produits pour apporter des connaissances inédites sur la vulnérabilité du réseau routier aux avalanches.

Partie I Contextualisation de la recherche

Cette première partie présente un état de l'avancée scientifique concernant les dynamiques responsables des caractéristiques des volumes des dépôts d'avalanches. Le premier chapitre se concentre sur les connaissances fondamentales des propriétés physiques de la neige et des avalanches, les risques liés aux avalanches ainsi que sur la présentation de chroniques d'avalanches, précieuses pour leur étude. Puis le chapitre deux se concentre sur les connaissances relatives aux propriétés géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches, ainsi qu'aux variables de contrôle de leurs caractéristiques volumétriques et nivologiques. Le chapitre 3 résume les connaissances scientifiques, précise les objectifs de la thèse et présente l'organisation du manuscrit.

Chapitre 1 : Les avalanches : origines, dynamiques et conséquences

1.1 Neige : typologie, transformation et propriétés physiques

Les cristaux de neige se forment dans l'atmosphère par condensation solide de la vapeur d'eau. Plusieurs types de cristaux peuvent se former selon les caractéristiques de température et d'humidité de l'atmosphère lors de leur chute jusqu'à la surface. Au long de l'hiver, les chutes de neige successives vont former un manteau neigeux stratifié. Les différentes couches du manteau neigeux vont subir des transformations, appelées métamorphoses, qui vont modifier les caractéristiques des différentes couches du manteau neigeux. Ces transformations sont le fruit d'effets mécaniques (vent, compression du manteau neigeux) et thermodynamiques qui sont pilotés par les conditions météorologiques extérieures (nébulosité, précipitation, température, etc.) et les caractéristiques du terrain (altitude, orientation, etc.).

On décrit classiquement les étapes d'évolutions de la neige par six types de grains : neige fraîche, particules reconnaissables, grains fins, grains à face plane, gobelets et grains ronds. Cette typologie correspond à l'importance de la métamorphose de la neige depuis le flocon initial entièrement gelé et sous forme de cristaux vers des types de neige caractérisés par la présence d'eau liquide et une température égale à 0°.

Les caractéristiques de la neige vont donc grandement évoluer, la métamorphose entraînant une modification des propriétés physiques de la neige et notamment de la cohésion des différentes couches composant le manteau neigeux, primordiale pour le déclenchement des avalanches (Gaume et al., 2012 ; 2013).

Les propriétés physiques de la neige sont dépendantes de 3 caractéristiques : la masse volumique, la teneur en eau liquide et la porosité. La masse volumique de la neige est le rapport entre la masse (kg) d'un volume de neige et ce volume (m³) exprimé en kg/m³. La masse volumique de la neige fraîche est comprise entre 50 et 200 kg/m³ et dépend de la température de l'atmosphère et de la présence de vent. La masse volumique de la neige au sol est comprise entre 50 et 500 kg/m³ et dépend du

type de neige, de l'importance de son tassement et de son humidité. Des neiges extrêmement transformées peuvent atteindre 600 kg/m^3 en fin de saison. La glace présente une masse volumique de 917 kg/m^3 . L'humidité du manteau neigeux est définie par sa teneur en eau liquide et est exprimée en pourcentage. Lorsque le manteau neigeux contient de l'eau liquide, sa température est proche de 0° , température d'équilibre du mélange glace, eau et air. La porosité est relative à l'importance de la présence de particules d'air dans le manteau neigeux et est exprimée en pourcentage. De petits espaces d'air sont soit présents directement entre les grains soit présents dans des quantités plus importantes entre des couches denses de neige (Fig. 1)

Les propriétés physiques de la neige vont en partie déterminer les caractéristiques de déclenchement et d'écoulement des avalanches (Steinkogler et al., 2015).

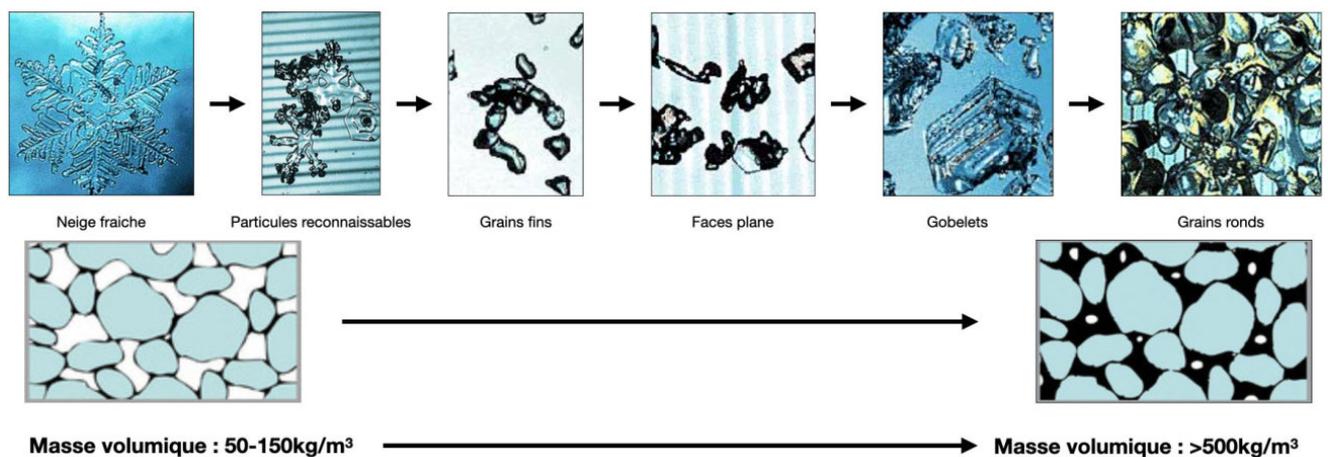


Figure 1 : Phase de métamorphose de la neige, porosité et masse volumique associée (source photos : International Association of Cryospheric Sciences)

1.2 Les dynamiques avalancheuses : généralités et typologies

Les avalanches peuvent prendre des formes et des dimensions très variées. Leur description et leur classification reposent sur de nombreux facteurs.

Une avalanche se déclenche lorsque l'équilibre du manteau neigeux est rompu, la résistance du manteau neigeux devient inférieure aux cisaillements induits par le poids des couches de neige (Schweizer et al, 2003). Le départ de l'avalanche va se

produire au niveau de la zone de rupture, le départ est soit ponctuel, la rupture part d'un point et s'élargit progressivement en créant une forme de poire, soit en plaque, le long d'une cassure linéaire perpendiculaire à la pente. Le départ et son ampleur sont souvent liés aux limites de résistance de manteau neigeux, conditionnés par la composition, l'épaisseur et la stratigraphie du manteau neigeux ainsi qu'à la morphologie des zones de départ (Gaume et al., 2012 ; Li et al., 2020). L'avalanche se déclenche soit sur l'ensemble de l'épaisseur du manteau neigeux et est alors appelé avalanche de fond, soit le déclenchement s'opère au niveau d'une couche spécifique en fonction de la position de la couche la plus fragile, appelé avalanche de surface (Clarke and McClung, 1999 ; Bartelt et al., 2012 ; Schweizer et al., 2021). Le départ de l'avalanche peut être déclenché par un élément extérieur au manteau neigeux entraînant une surcharge, comme un humain, le passage d'un animal ou bien une explosion dans le cadre de déclenchement préventif, ou spontané lorsque les causes de départ sont liées aux conditions météorologiques ou aux transformations intrinsèques du manteau neigeux.

On retrouve ensuite différents types et régimes d'écoulements qui sont grandement déterminés par le type de neige mise en mouvement. Dans la communauté scientifique et en ingénierie paravalanche, il est privilégié d'utiliser une classification basée sur la dynamique des écoulements. On estime qu'il est suffisant de dégager deux types d'écoulement distincts établis dès les débuts des recherches scientifiques sur les dynamiques des avalanches : les avalanches en aérosol et les avalanches denses (Voellmy, 1955).

Les avalanches denses sont caractérisées par un écoulement monophasique, uniquement composé de neige en contact direct avec le sol, et par des vitesses d'écoulement variables, pouvant atteindre 150km/h (Hopfinger, 1983 ; Ancey, 2016). Cependant, les avalanches denses peuvent prendre une grande variété de formes. Cette grande variété est due à la grande diversité de neige dans le manteau neigeux : neige sèche, neige humide, neige frittée, etc. (Kolher et al, 2018). On distingue deux types d'avalanches denses particulièrement présentes : les avalanches de neige sèche et froide et les avalanches de neige humide (Hopfinger, 1983). Les avalanches denses de neige sèche et froide mobilisent une neige avec une faible masse

volumique, appelée pulvérulente. Ces avalanches revêtent deux caractéristiques essentielles : des vitesses importantes (100-150km/h) et une capacité à s'écouler assez loin sur des faibles pentes. Les avalanches denses de neige humide mobilisent une neige avec une teneur en eau liquide plus élevée, supérieure à 3% et une température proche de 0°C (McClung and Schaerer, 2006). L'activité des avalanches de neige humide est liée à la teneur en eau liquide du manteau neigeux, à la température de l'air, et au rayonnement solaire (Mitterer et Schweizer, 2013 ; Ancey et Bain, 2015). Une fois initié, leur écoulement est soit granulaire et rapide soit sous forme d'écoulement pâteux et lent. La vitesse atteinte par l'avalanche de neige humide est moins importante (50km/h, Mc Clung et Gauer, 2018) que pour les avalanches de neige sèche et froide réduisant les distances d'arrêt (Issler, 2003). La vitesse d'écoulement est directement dépendante de l'importance de la teneur en eau : plus la neige transportée est humide, plus l'écoulement est lent. Leur pouvoir destructeur est essentiellement lié à la masse volumique et à l'épaisseur de l'écoulement qui peut provoquer des pressions très importantes ($>100 \text{ t/m}^2$) (Sovilla et al., 2008) et parallèlement entraîner une forte érosion du manteau neigeux préexistant (Issler et al., 2008). De plus, leur trajectoire est difficilement prévisible puisque le moindre relief ou obstacle peut entraîner une modification de la direction de l'écoulement.

Les écoulements en aérosol sont caractérisés par un écoulement biphasique, composé de neige peu dense et d'air formant un nuage turbulent, constitué des particules de neige en suspension. La vitesse d'écoulement peut atteindre les 350 km/h et l'écoulement peut atteindre des zones situées en dehors de la zone préférentielle d'écoulement. Pour perdurer, il faut que l'aérosol entraîne de la neige au cours de sa descente, sinon il se dilue rapidement. Même si au cœur de l'écoulement, des zones de très fortes pressions existent, le pouvoir destructeur des avalanches en aérosol est lié à la vitesse élevée du souffle (Sovilla et al, 2015). Le plus souvent on retrouve la présence d'un aérosol qui surmonte et dissimule la partie dense de l'avalanche en contact avec le sol, on parle alors d'avalanche mixte.

Néanmoins, des travaux récents ont mis en avant l'existence de 7 types d'écoulement différents, questionnant l'utilisation de la dichotomie de classification dense/aérosol actuelle (Köhler et al., 2018 ; Faug et al., 2018)

La phase d'arrêt des avalanches correspond au ralentissement plus ou moins rapide de l'écoulement et à la mise en place du dépôt final. Les caractéristiques de la phase d'arrêt sont dépendantes de la morphologie de la zone d'arrêt et du type d'écoulement et vont en partie déterminer les caractéristiques du dépôt. La distance d'arrêt, c'est-à-dire la distance atteinte par l'avalanche dans la zone d'arrêt, est la variable critique utilisée pour la prédétermination du risque avalancheux, en établissant des scénarios de référence en fonction d'un temps de retour donné (Eckert et al., 2010d).

Les avalanches se déclenchent, coulent et s'arrêtent au sein de couloirs d'avalanches. La morphologie et les dimensions des couloirs sont extrêmement variables, d'un dénivelé d'une cinquantaine de mètres à plus de 2000 mètres, voire plus. La zone de départ, située dans la partie la plus amont du couloir, se caractérise par une combinaison de variables qui vont favoriser le déclenchement des avalanches. L'altitude, la surface et la pente de la zone de départ sont les principaux facteurs de contrôle des déclenchements d'avalanche. La pente doit généralement être supérieure à 25°, mais des avalanches de neige humide peuvent occasionnellement se déclencher sur des pentes plus douces. L'orientation de la zone de départ peut favoriser une accumulation de neige par transport lié au vent et par la métamorphose du manteau neigeux en fonction de l'orientation par rapport au soleil. La présence de couvert forestier et d'une forte rugosité du sol peut favoriser une stabilisation du manteau neigeux ou au contraire créer des zones de contraintes importantes dans les couches du manteau neigeux.

La zone d'écoulement correspond à la zone située en aval de la zone de départ, il s'agit de la zone d'accélération maximale de l'avalanche dans la partie amont et de la zone de décélération dans la partie aval. Les ruptures de pentes importantes vont favoriser ces deux phénomènes. Les zones d'écoulement sont globalement classifiées en deux configurations : ouverte (versant plat et dégagé, vaste talweg) et confinée (couloir resserré, gorge etc...), mais on retrouve régulièrement une combinaison des deux configurations au sein d'une même zone d'écoulement. La pente moyenne se situe généralement entre 15 et 30° (Mears, 1992).

La zone d'arrêt correspond à la zone dans laquelle s'opère le ralentissement et la mise en place du dépôt final. Il n'existe pas de typologie puisque les caractéristiques peuvent être extrêmement variées (cône de déjection, fond de vallée plat, etc...). Cependant, la pente moyenne γ est généralement inférieure à 15° , la vitesse d'écoulement des avalanches se réduisant drastiquement en dessous de 10° . Des ruptures de pente brutales vont favoriser une réduction soudaine de la vitesse d'écoulement avec une accumulation de neige transportée localisée. Des zones d'arrêt avec une pente régulière ou avec une diminution progressive vont favoriser l'écoulement et le dépôt va être plus facilement étendu.

Les services européens de prévision d'avalanche (EAWS) ont réparti les tailles d'avalanches en cinq classes selon une classification basée entre autres sur leur potentiel de destruction, la longueur de leur écoulement et le volume de neige transporté (EAWS, 2022).

Tableau 1 : Classes de taille des avalanches créées par l'EAWS (EAWS, 2022)

Taille	Longueur	Volume	Potentiel de dommages et de destructions
Taille 1 : coulée	<50 m	100m ³	Minime
Taille 2 : avalanche moyenne	50-200m	1000m ³	Risque d'ensevelissement de personne
Taille 3 : avalanche moyenne	200-1000m	10 000m ³	Endommagement des voitures, des petites constructions et des arbres
Taille 4 : Très grande avalanche	1km - 2km	100 000m ³	Peut détruire des bâtiments et des petites surfaces de forêt

Taille 5 : Avalanche d'ampleur exceptionnel	>2km	>100 000m ³	Potentiel de destruction catastrophique
---	------	------------------------	---

1.3 Évolution de l'activité avalancheuse

L'activité avalancheuse est dépendante de plusieurs facteurs. Ce sont en premier les conditions météorologiques et nivologiques qui vont la conditionner (Armstrong et Armstrong, 1987 ; Mock, 1995 ; Mock and Birkeland, 2000). On note cependant des facteurs de contrôle différents entre les différents types d'écoulement. La probabilité d'occurrence d'une avalanche de neige sèche est surtout conditionnée par l'importance des précipitations dans les quelques jours précédant le déclenchement et par la présence de couches fragiles persistantes en profondeur alors que l'activité des avalanches de neige humide est également dépendante de la température de l'air le jour du déclenchement et de l'occurrence de précipitations liquides (e.g Jomelli et al., 2007). Plusieurs études ont indiqué des diminutions au cours des dernières décennies des chutes de neige, de l'épaisseur et de la durée du manteau neigeux dans de nombreux pays de l'arc alpin (Laternser et Schneebeli, 2003 ; Durand et al., 2009a,b ; Marty et Meister, 2012, Rousselot et al., 2012). Ces changements météorologiques ont entraîné des modifications de la dynamique avalancheuse dans les dernières décennies (Castebrunet et al., 2012). On remarque notamment une réduction de l'activité avalancheuse et des distances d'arrêt (distance parcourue par une avalanche dans la zone d'arrêt) des avalanches en France depuis 1980 malgré une forte variabilité interannuelle (Eckert et al., 2010a, b, 2013). On remarque également une augmentation des avalanches de neige humide en lien avec le contexte de changement climatique particulièrement marqué dans les zones de montagnes (Pielmeier et al., 2013) et notamment en France (Naaïm et al., 2016).

L'activité avalancheuse est également dépendante de l'occupation du sol et de ses dynamiques. Les zones de montagnes alpines ont connu depuis la fin du 19ème siècle de nombreuses modifications socio-environnementales. L'activité économique principale est passée d'une agriculture intensive à des activités de services, notamment tournés autour du tourisme de sports d'hiver, entraînant un important

phénomène d'exode rural (MacDonald et al., 2000 ; Statuto et al., 2017). Cet exode s'est accompagné d'une modification environnementale majeure : les versants, anciennement occupé par des parcelles agricoles ou des arbustes ont connu une reforestation (Mather et al., 1999 ; Bebi et al., 2009), amplifiée par la politique de reboisement lancée par le service de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) dès 1860. Cet important reboisement favorise une réduction de l'activité avalancheuse (Bebi et al., 2009 ; Giacona et al., 2018 ; Hock et al., 2020). En effet la présence d'arbres sur les versants favorise une réduction du nombre de déclenchement d'avalanche par une stabilisation accrue du manteau neigeux dans la zone de déclenchement (Salm, 1978 ; Viglietti et al., 2010), notamment dans les Alpes françaises (Mainieri et al., 2020 ; Zgheib et al. 2020, 2022a, 2022b), et réduit l'importance des dégâts associés (García-Hernández et al., 2017).

Les projections climatiques pour les prochaines décennies indiquent que les précipitations neigeuses extrêmes devraient réduire en intensité (Le Roux et al., 2022). Cependant l'augmentation de la température, en interaction avec la topographie, contraindra l'évolution des variables liées à la neige vers une augmentation de la présence de manteau neigeux humide (Beniston et al., 2003 ; Lopez Moreno et al., 2009, 2011 ; Piazza et al., 2014) et une réduction continue du manteau neigeux, notamment aux altitudes basses et moyennes (Giacona et al., 2021). De ce fait, l'activité avalancheuse devrait réduire de 20 à 30% dans les Alpes françaises, avec une grande variabilité en fonction de l'altitude et sans exclure l'occurrence ponctuelle d'avalanche de grande ampleur atteignant des altitudes basses. Cependant, cette réduction de l'activité avalancheuse sera vraisemblablement accompagnée d'une augmentation continue de la proportion d'avalanches de neige humide, y compris pendant les mois d'hiver à haute altitude (Martin et al., 2001 ; Lazar et Williams, 2008 ; Castebrunet et al., 2014 ; Hock et al., 2020).

1.4 Les chroniques avalanches : sources de données et utilisations scientifiques

L'utilisation de chroniques événementielles, pour l'étude des aléas hydrologiques (Pichard et al, 2017), gravitaires (Lopez Saez et al, 2012) et plus spécifiquement des avalanches (e.g. Laternser et Schneebeli, 2002) est relativement courante et précieuse, car elle permet d'étudier les dynamiques sur la longue période. Concernant les avalanches, la compréhension des variations temporelles de l'activité avalancheuse régionale ainsi que de ses facteurs d'influence sont une condition préalable à l'amélioration de la gestion du risque d'avalanche. De plus, l'identification et la quantification des modifications de l'activité des avalanches (intensité/fréquence) en lien avec les changements climatiques est facilitée par l'étude de ces chroniques.

De ce fait, certains pays exposés à l'aléa avalanche effectuent un enregistrement régulier de l'activité avalancheuse sous plusieurs formes et selon différentes méthodologies pour obtenir des séries de type instrumentales (Bonneyoy Demongeot et al., 2014 ; Bourova et al., 2016). La Suisse a été pionnière dans le domaine et a mis en place un système de collecte d'informations sur les avalanches dès la fin du 19ème siècle dans quelques zones réduites. Actuellement, les informations sont désormais centralisées au sein de deux bases de données, une première se concentrant sur l'activité avalancheuse et une seconde recensant les avalanches ayant provoqué des dégâts (Laternser et Schneebeli, 2002 ; Techel et Zweifel, 2013). Cependant les protocoles utilisés et les différentes informations récoltées restent peu décrits dans la littérature, de ce fait la donnée reste difficilement accessible. Aux Etats-unis, l'activité avalancheuse a commencé à être répertoriée à l'échelle locale dès les années 60 (Frutiger, 1964 ; Miller et al., 1976 ; Armstrong and Armstrong, 1977 ; 2006). Un système plus généralisé est mis en place en 1967, recensant des informations journalières sur les conditions météorologiques et l'activité avalancheuse (Birkeland et Mock, 2001a). Au Canada, un système similaire est mis en place en 1991 et géré par l'Association Canadienne des Avalanches (Haegeli and McClung, 2007 ; Haegeli et al., 2014). En Europe, on trouve également des recensements précis des couloirs d'avalanches dans les Pyrénées espagnoles (Oller et al., 2006), les Alpes Italiennes (Debernardi and Segor, 2013) et, depuis les années

2000, au Japon par de la photo-interprétation (Akiyama and Ikeda, 2013). Récemment, des systèmes participatifs de récolte de données utilisant des services web ont aussi vu le jour en France notamment (e.g. Duclos et al., 2008).

En France, la base de données EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches) constitue un inventaire des avalanches survenues sur des sites français des Alpes et des Pyrénées (Deschâtres et al., 2010 ; Bourova et al., 2016). Elle a été créée à la fin du 19ème siècle par Paul Mougin, ingénieur des Eaux et Forêts pour améliorer la connaissance scientifique sur les avalanches et évaluer les dommages aux forêts (Mougin, 1922), avec comme inspiration le système utilisé en Suisse. Le premier système d'observation des avalanches est créé en Savoie en 1899 afin d'obtenir une chronique des événements avalancheux. Depuis la création de l'EPA, le système de récolte de données, l'emprise spatiale ainsi que les éléments descriptifs pris en compte ont largement évolué. L'EPA centralise en 2022 des données pour plus de 100 000 avalanches réparties dans environ 3 900 couloirs identifiés et délimités, sur une période de 124 années civiles, ce qui correspond à 123 années avalancheuses (les campagnes de relevés ont lieu entre octobre et juin). Les données sont librement consultables sur www.avalanche.fr .

La qualité des données de l'EPA, qui offre une exceptionnelle couverture temporelle et spatiale, peut être considérée comme plus élevée que dans les autres exemples internationaux cités précédemment. Le protocole a également évolué pour améliorer les informations récoltées. Les couloirs d'avalanches EPA sont délimités et cartographiés. Chaque avalanche qui dépasse un seuil d'altitude prédéfini au sein des couloirs fait l'objet d'un "relevé d'événement" qui comprend de nombreuses informations dont les dimensions du dépôt.

En France, les données issues de l'EPA ont été utilisées pour de nombreuses recherches, incluant l'étude des fluctuations spatio-temporelle des avalanches (e.g Eckert et al, 2007b) et des liens entre le climat et l'activité avalancheuse (e.g Jomelli et al., 2007; Lavigne et al., 2012 ; 2015). Les auteurs cités ont participé plus précisément à des études centrées sur la réponse des avalanches aux fluctuations climatiques (Castebrunet et al 2012) ou la prévision à long terme de l'occurrence d'événements extrêmes (Eckert et al., 2010c). Les données de l'EPA ont aussi été utilisées pour des études se concentrant sur le risque avalancheux, avec notamment

l'analyse des distances d'arrêt (Eckert et al., 2010b), des analyses de risque (Eckert et al., 2008, Eckert et al., 2009) et de son évolution spatio-temporelle (Zgheib et al., 2020 ; 2022a). Des études basées sur l'utilisation combinée de l'EPA et de chroniques issues d'analyse dendrochronologique (Schlappy et al., 2014) ont notamment mis en avant des liens entre les processus de reboisement et l'activité avalancheuse (Mainieri et al., 2020).

Il existe en France d'autres bases de données sur les avalanches qui présentent certaines similitudes avec l'EPA. La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanches (CLPA) est une cartographie systématique des avalanches dans les Alpes et les Pyrénées. C'est une carte descriptive des phénomènes observés ou historiques. Son but est d'informer sur l'existence de couloirs d'avalanches, représentés par leur enveloppe extrême. Créée après la catastrophe de Val d'Isère qui avait fait 39 victimes en 1970 dans un chalet UCPA, elle constitue un outil incontournable pour la prise en compte du risque avalanche dans l'aménagement et la gestion des territoires de montagne. Le recueil des données se fait par deux modes de collecte différents : photo-interprétation et recueil de témoignages, clairement distingués par deux couches cartographiques indépendantes. En plus de la cartographie, on retrouve une base de données événementielle, recensant certaines des avalanches, notamment celles ayant entraîné une modification de l'emprise de la CLPA, avec des informations sur l'avalanche et le dépôt associé (Bonney et al, 2010).

Également créé après l'avalanche de Val d'Isère sur le chalet de l'UCPA en 1970, l'Observation Permanent des Avalanches (OPA) a pour objectif de délimiter pour chaque commune présentant une exposition aux avalanches un périmètre dans lequel l'emprise maximum des avalanches serait calculée. L'OPA s'appuie sur des relevés d'une grande précision effectués au théodolite pour mesurer l'emprise de l'avalanche pour chaque événement important dans des zones particulièrement vulnérables. Si le but premier est de mesurer l'emprise de l'avalanche, chaque relevé est accompagné d'une fiche événement, comparable à celle de l'EPA, avec notamment des informations sur les dimensions du dépôt. Les premiers relevés sont effectués en Maurienne à partir de l'hiver 1972-73, mais le programme va assez rapidement connaître des problèmes de financement et va s'arrêter en 1985.

La base de données du service Restauration de Terrain de Montagne (RTM) de l'Office National des Forêts (ONF) recense un certain nombre d'événements avalancheux, principalement depuis 1950 dans les Alpes et les Pyrénées mais avec occasionnellement des événements plus anciens, notamment issus de recherches en archive. Ne sont présents dans cette base que des événements considérés comme « significatifs ». Dans le cas des avalanches, il s'agit des événements ayant fait des victimes, provoqués des dégâts importants ou ayant largement dépassé le seuil d'alerte CLPA. On y retrouve des informations similaires à celles présentes dans l'EPA. Des descriptions plus détaillées des dommages et des dépôts peuvent y figurer. La donnée est publique et en accès libre sur le site internet du RTM : <http://rtm-onf.ifn.fr/>.

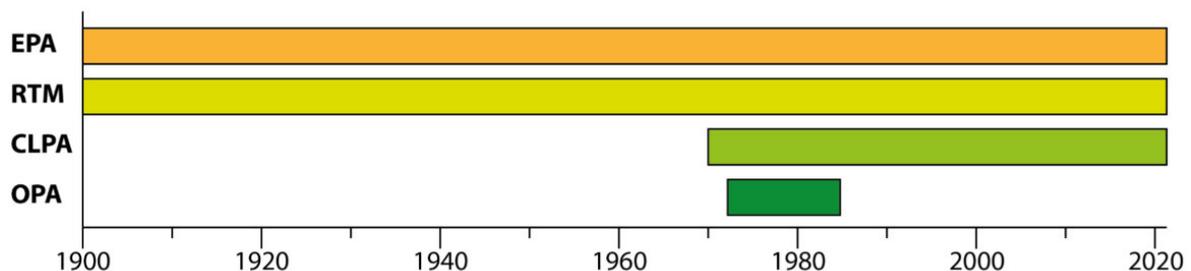


Figure 2 : Couverture temporelle des différentes chroniques avalancheuses en France depuis 1900

En matière d'analyse des risques naturels, parallèlement aux séries instrumentales, on retrouve régulièrement l'utilisation de chronologies d'événements fondées sur des sources historiques, notamment dans le but de compléter des séries instrumentales (Pigeon et Rebotier, 2019). L'événement historique est défini par Giacona et al. (2017) comme un phénomène qui a été répertorié par l'écrit, la mémoire orale, l'image ou un objet matériel et/ou dont on a trouvé la trace écrite, orale, iconographique ou sur le terrain. L'utilisation de chroniques historiques nécessite un travail de contextualisation pour appréhender au mieux les différences entre réalité objective et subjective des données historiques (Giacona et al., 2022). Dans le domaine des avalanches, on trouve des chroniques historiques en Islande (Decaulne, 2004 ; 2005), dans les Pyrénées espagnoles (Garcia Hernandez et al., 2017), dans le massif des Vosges (Giacona 2014, Giacona et al., 2017 ; 2019), en Suisse (Latenser

et Pfister, 1997) et dans les îles Sakhaline et Kouriles en Russie (Podolskiy et al., 2014).

1.5 Avalanche et vulnérabilité

Les dégâts liés aux avalanches sont liés à la puissance exceptionnelle que peuvent développer les écoulements avalancheux. La puissance des avalanches et les dégâts qui en résultent sont liés à deux processus. Le premier est la pression développée par l'aérosol localisé à l'avant d'une avalanche de neige sèche qui peut présenter un fort potentiel de destruction. Le second est lié aux pressions exercées par l'écoulement avalancheux sur les infrastructures présentes dans la zone d'écoulement. Les très fortes pressions, atteignant les 100t/m² (Sovilla et al., 2008), s'expliquent à la fois par la vitesse d'écoulement, la masse volumique de la neige mise en mouvement et par l'importance de la masse de neige transportée. La présence de débris ou de végétation dans l'écoulement augmente les potentiels dommages provoqués par une avalanche (Bründl et al., 2010). L'exposition aux avalanches concernent trois éléments : les personnes (Barbolini et al., 2004 ; Favier et al., 2014b), les zones de bâti (Bertrand et al., 2010 ; Favier et al., 2014a) et les infrastructures, notamment routières (Hendrikx et Owens, 2008 ; Leone et al., 2014). Concernant l'exposition des personnes, on estime à 500 victimes liées aux avalanches par an dans le monde, 95% des victimes sont liées à des activités de loisir. Si les avalanches de grandes ampleurs provoquent régulièrement des dégâts considérables, les avalanches mortelles sont souvent de faible ampleur et déclenchées au sein de petits couloirs (Hétu et al., 2011). Les avalanches entraînent régulièrement d'importantes perturbations ainsi que des dommages structurels aux infrastructures routières. Cette vulnérabilité spécifique et son lien avec les dépôts d'avalanches, au cœur de ce travail, seront présentés plus en détail dans la partie 2.4.

Chapitre 2 : Les dépôts d'avalanches

2.1 Volume et géométrie des dépôts d'avalanches

Les dépôts d'avalanches sont le résultat final de l'écoulement et sont localisés au sein de la zone d'arrêt. Comme évoqué précédemment (voir paragraphe 1.2) à propos de la classification des tailles des avalanches de l'EAWS, le volume de neige transporté et déposé est extrêmement variable et dépend en partie de la taille de l'avalanche. La masse de neige transportée dépend de la masse de neige libérée lors du déclenchement additionné à la masse de neige qui est entraînée lors de l'écoulement de l'avalanche. Il est possible qu'une avalanche puisse entraîner plus de 10 fois la masse de neige initialement libérée (Sovilla et al., 2006).

Le calcul simplifié du volume final du dépôt est dépendant de la géométrie globale simplifiée du dépôt calculé selon la longueur maximale, la largeur moyenne et l'épaisseur moyenne :

$$\text{Volume du dépôt} = \text{Longueur maximale} \times \text{Largeur moyenne} \times \text{Hauteur moyenne}$$

Une seconde formule peut être utilisée pour respecter la forme classiquement triangulaire d'un dépôt :

$$\text{Volume du dépôt} = (\text{Longueur maximale} \times \text{Largeur moyenne} \times \text{Hauteur moyenne})/2$$

Si la forme classique d'un dépôt est similaire aux formes liées à des processus gravitaires, c'est-à-dire triangulaire avec un élargissement dans la zone aval, les géométries des dépôts sont extrêmement variables. Des dépôts de grande importance peuvent présenter plusieurs branches et s'étendre sur plusieurs centaines de mètres, rendant complexe la description de leur géométrie (Fig. 3).

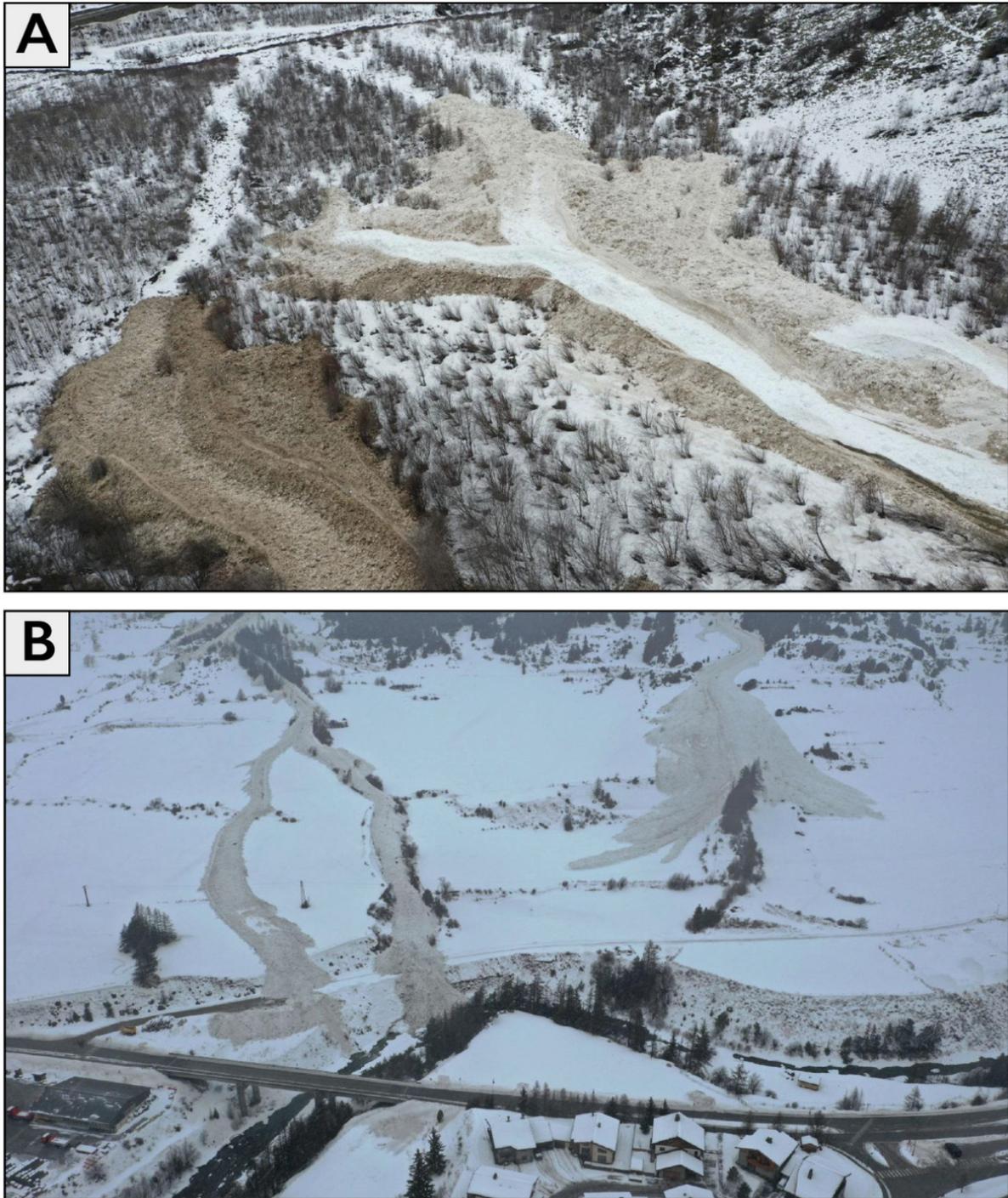


Figure 3 : Exemples de vastes dépôts avec plusieurs branches d'écoulement. (A) Partie frontale d'un dépôt de février 2021, Oisans (© data-avalanche.org). (B) Dépôts du 29 janvier 2021, Haute-Maurienne (© data-avalanche.org).

Classiquement, la géométrie des dépôts est classée selon les types d'écoulement. Il résulte des avalanches avec aérosol un dépôt diffus, peu marqué et assez étendu qui peut rapidement disparaître. Le noyau dense de l'avalanche forme

souvent un dépôt identifiable. Le dépôt est alors plus complexe, la langue recouvrant souvent une partie du dépôt diffus issue de l'aérosol. Les dépôts issus des avalanches denses de neige froide se présentent sous la forme de langues parfois épaisses avec des limites latérales franches. S'ils sont souvent constitués d'agrégats facilement identifiables, un aspect parfois peu rugueux peut les rendre peu visibles et difficilement identifiables. Les dépôts d'avalanches de neige humide sont le plus souvent rugueux, souillés de débris et avec parfois la présence de blocs de plusieurs mètres (Schweizer et al, 2003). Ils sont composés d'une ou de plusieurs langues qui peuvent s'enchevêtrer avec des limites franches et identifiables.

Récemment Kolher et al. (2018) ont enrichi cette classification par la détection de trois types de mécanismes d'arrêt des avalanches entraînant des géométries des dépôts spécifiques grâce à l'utilisation de radar Doppler (Brennan et al., 2009). Ils suggèrent que les différents mécanismes d'arrêt identifiés sont principalement contrôlés par la température de la neige et la teneur en eau liquide. Les avalanches de neige froide et sèche ont tendance à s'arrêter depuis la queue de l'avalanche alors que le front continue à s'écouler. Les dépôts d'avalanches sont généralement lisses et étendus (Issler, 2003) et les hauteurs des dépôts inférieures à la hauteur de l'écoulement (Sovilla et al., 2010). Au contraire, les avalanches de neige plus chaude et humide ont tendance à s'arrêter d'abord dans la zone frontale, puis à s'empiler progressivement (développement d'une onde de choc se propageant vers l'arrière). Certaines avalanches peuvent même s'arrêter instantanément sur toute leur longueur (arrêt brutal). Généralement, les dépôts de ces écoulements sont rugueux et granuleux et présentent une succession de lobes emboîtés (Jomelli et Bertran, 2001). Dans le cadre des mécanismes d'arrêts brutaux, les dépôts peuvent être confinés latéralement par des levées et présenter des limites clairement définies et pentues (Issler, 2003). Plusieurs mécanismes d'arrêt peuvent coexister au sein d'un même écoulement, formant des dépôts avec une typologie géométrique complexe.

2.2 Caractéristiques nivologiques et stratigraphiques des dépôts d'avalanches

Il existe peu de connaissances sur la composition nivologique des dépôts d'avalanches. Les dépôts d'avalanches sont généralement constitués d'agrégats

solides de particules de neige. Ils se forment lors de l'écoulement de l'avalanche pendant lequel on observe une perte de la structure granulaire de la neige favorisant la mise en place de mécanismes d'agglomération (Naaim et al., 2013 ; Steinkogler et al., 2014 ; Sovilla et Bartelt, 2002). Les agrégats présentent des dimensions variables (Bartlet et McArdell, 2009 ; Sovilla et al., 2010) et le dépôt final de neige est plus ou moins compact et homogène. Les avalanches de neige humide vont mettre en mouvement un manteau neigeux propice à la formation d'agrégats. Cependant, durant l'écoulement de neige froide avec la présence d'un aérosol, la neige plus chaude près du sol peut régulièrement former des agrégats (Sovilla et al., 2015). Toutefois, les avalanches de neige humide ont tendance à produire des agrégats avec des dimensions plus importantes et souvent arrondis (Kobayashi et al., 2000 ; Bartelt et McArdell, 2009 ; Steinkogler et al., 2014). La structure en agrégats du dépôt est facilement identifiable puisque celle-ci est généralement visible à la surface du dépôt ou sur les marges du dépôt (Fig. 4).

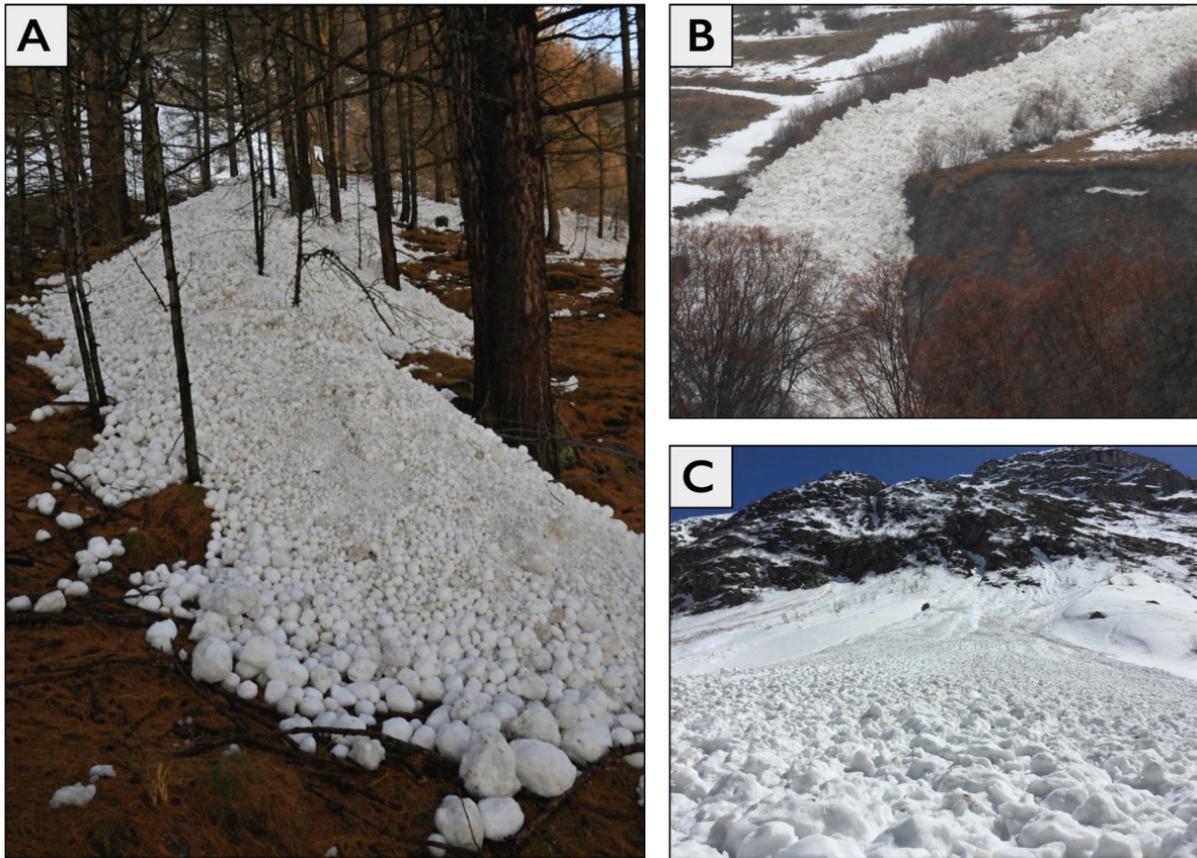


Figure 4 : Exemple de dépôts d'avalanches avec une structure en agrégats. (A) Dépôt de neige humide avec des agrégats sphériques présentant des dimensions centimétriques, Haute-Maurienne, 16 novembre 2021 (© data-avalanche.org). (B) Dépôt de neige humide avec des agrégats présentant des dimensions métriques, Haute-Maurienne, 24 novembre 2016 (© data-avalanche.org). (C) Dépôt de neige sèche avec des agrégats présentant des dimensions centimétriques, Haute-Maurienne, 24 février 2018 (© Hippolyte Kern)

La neige compactée au sein du dépôt final présente une masse volumique variable. La porosité du dépôt, c'est-à-dire le rapport des volumes des vides présent dans le dépôt est également variable. La porosité est relative à l'importance des éventuels espaces d'air laissés libres entre ou au sein des agrégats ou du manteau neigeux composant le dépôt. La masse volumique de la neige varie généralement entre 20 et 500kg/m³. Ces variations de masse volumique s'expliquent en partie par la structure poreuse du manteau neigeux : plus la porosité est élevée, plus la masse volumique du manteau neigeux va être faible.

Les masses volumiques relevées dans les dépôts sont généralement plus importantes que celles du manteau neigeux initial dans la zone de départ (Dent et al.,

1998). Plusieurs études se sont concentrées sur les masses volumiques présentes au sein des dépôts d'avalanches (Figure 2) en utilisant des méthodes de mesures différentes. Une étude basée sur l'utilisation de capteurs de pression au sein d'un couloir rapporte des valeurs de masse volumique comprises entre 200 et 600 kg/m³ en fonction du type d'écoulement, les avalanches de neige humide présentant des valeurs approchant régulièrement les 600 kg/m³ (McClung et Schaerer, 1985). Une étude similaire basée sur l'utilisation de sonde capable de mesurer les masses volumiques pendant l'écoulement et lors de la mise en place du dépôt a mis en avant une augmentation de la masse volumique pendant l'écoulement avant qu'une forte augmentation s'opère lors de la mise en place du dépôt (Dent et al., 1998). Vallet et al. (2001) ont mis en avant des mesures de masses volumiques plus élevées dans la zone frontale des dépôts issus d'avalanches de neige froide à écoulement dense provenant du couloir instrumenté de la Sionne (Suisse) avec des valeurs relevés comprises entre 300 et 500 kg/m³, contre 200 kg/m³ au cœur des dépôts. Des valeurs similaires ont été rapportées (300-400 kg/m³) lors d'investigation sur le même site pour des avalanches avec des écoulements mixtes denses et aérosols (Sovilla et al., 2006). Une étude fondée sur des mesures de masses volumiques *in-situ* effectuée sur 3 dépôts distincts en Suisse a mis en avant des variations importantes, avec des masses volumiques relevées de 300 à 600 kg/m³. De plus, plusieurs structures de dépôts ont été identifiées avec des différences de valeurs significatives : une structure composée de neige sèche non agglomérée, de neige fraîche avec la présence de quelques agrégats et une structure essentiellement composée d'agrégats, présentant des dimensions moyennes comprises entre 20 et 30cm, au sein d'une matrice de neige sèche (Isller et al., 2019). Récemment des travaux réalisés par Hao et al. (2021) ont mis en avant des différences de masse volumique entre différents types d'écoulement au sein d'une même zone. Les masses volumiques relevées *in-situ* sur des dépôts issus d'avalanches humides présentent des masses volumiques bien plus élevées que pour des dépôts issus d'avalanches de neige sèche, avec des valeurs maximales qui atteignent respectivement 700 et 350 kg/m³. Malgré des méthodes de mesures différentes, une comparaison des masses volumiques relevées dans les différents travaux présentés ci-dessus au regard des types d'écoulement associés confirme cette constatation (Fig. 5).

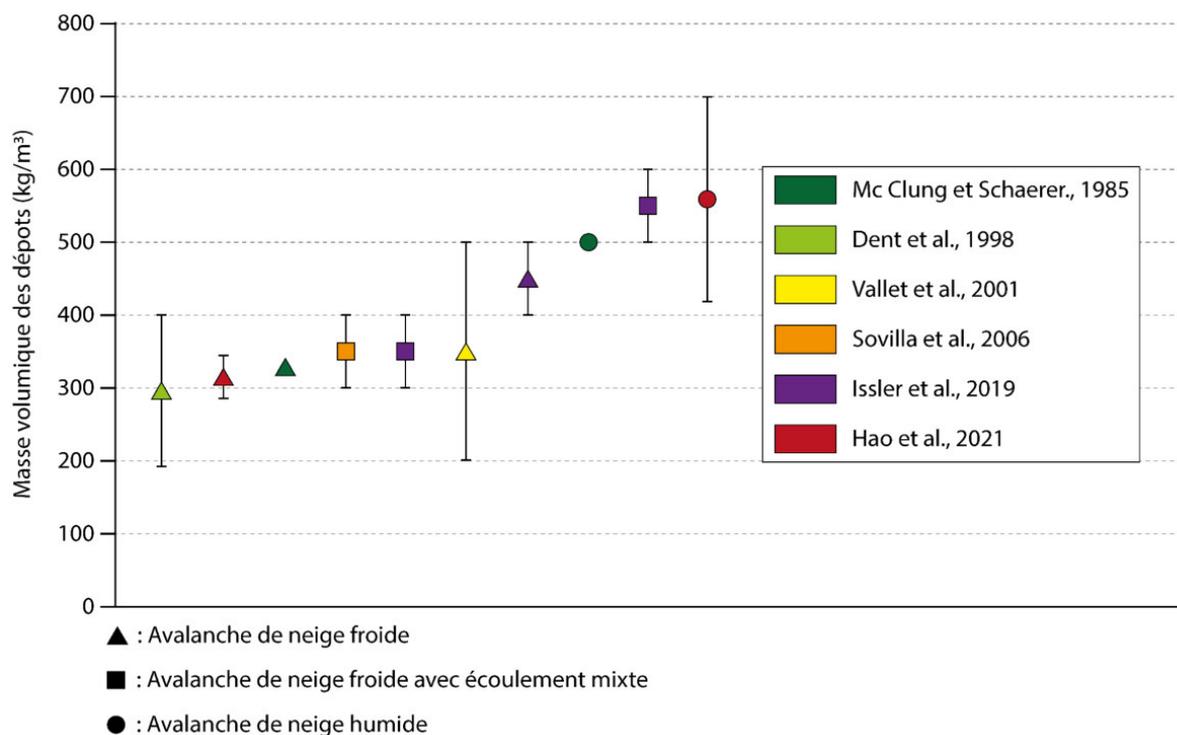


Figure 5 : Comparaison des valeurs de masse volumique relevées dans des dépôts d'avalanches en fonction du type d'écoulement associé

2.3 Facteurs de contrôle des caractéristiques volumétriques et nivologiques des dépôts d'avalanches

Il a été montré que certaines variables comme la pente et l'altitude jouent un rôle majeur dans le déclenchement et l'écoulement des avalanches. Cependant, les facteurs de contrôle des caractéristiques volumétriques et nivologiques des dépôts d'avalanches sont encore mal connus et peu étudiés.

Intuitivement, on peut statuer sur l'influence de certaines variables sur les volumes des dépôts : la surface et l'altitude des couloirs vont conditionner l'accumulation de neige qui va *in fine* partiellement déterminer le volume de neige présent dans les dépôts d'avalanches. Récemment, des travaux ont mis la lumière sur l'existence de liens entre la pente du couloir et les caractéristiques volumétriques du dépôt. Pour des avalanches déclenchées au sein du site instrumenté de la Vallée de la Sionne (Suisse), la phase d'arrêt de l'avalanche, qui correspond à la phase de mise en place du dépôt final, commence à s'opérer sur des pentes comprises entre 21 et 33° (Sovilla et al., 2010). Ces résultats sont similaires à ceux issus de l'étude des

variables de contrôle de l'activité avalancheuse au Svalbard qui pointe également une relation entre la pente des zones d'arrêt et les dimensions des dépôts (Eckerstorfer et Christiansen, 2011). De plus, l'augmentation de l'épaisseur du dépôt est directement liée à une réduction de la pente au sein de la zone de dépôt. Mc Clung et Gauer (2018) ont mis en avant la présence de liens complexes entre la pente, la vitesse d'écoulement et les volumes des dépôts propres aux avalanches de neige froide. En effet, si la vitesse d'écoulement augmente en fonction de l'augmentation de la pente, on observe l'effet inverse avec les volumes des dépôts : ceux-ci réduisent avec l'augmentation de la pente. Mc Clung et Gauer statuent donc que les dépôts présentant des volumes importants sont issus d'écoulement rapide ($>40\text{m/s}$) au sein de couloirs avec une pente moyenne faible ($20\text{-}30^\circ$).

L'influence de la météorologie, de l'importance des chutes de neige et des caractéristiques du manteau neigeux sur le déclenchement et dans l'écoulement des avalanches ont également été démontrées (Gaume et al., 2013 ; Steinkogler et al., 2014 ; Reuter et al., 2015). De plus, l'importance des chutes de neige et/ou l'épaisseur du manteau neigeux reflète le rôle de l'accumulation de neige qui va partiellement conditionner le volume du dépôt final. Les conditions météorologiques influencent directement les caractéristiques nivologiques du manteau neigeux initial qui vont ensuite conditionner le type d'écoulement et les caractéristiques nivologiques du dépôt associé (Mitterer et Schweizer, 2013 ; Ancey et Bain, 2015 ; Sovilla et al., 2015). Cependant, si certaines relations entre les conditions météorologiques, notamment l'importance de l'accumulation neigeuse, et les volumes des dépôts paraissent intuitives, elles n'ont pas encore été directement investiguées. Seuls quelques rares travaux se concentrent sur l'influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques volumétriques des dépôts d'avalanches. Les résultats d'une étude réalisée au Svalbard montrent l'importance de la direction et de la force du vent pour l'importance de l'activité avalancheuse et des volumes des dépôts par la création de vastes systèmes de corniches (Eckerstorfer et Christiansen, 2011).

Malgré les travaux présentés ci-dessus, on note un manque de connaissance important sur les variables contrôlant les volumes des dépôts. L'influence des variables morphologiques n'ont été que très peu explorée, notamment l'altitude ou l'orientation des couloirs qui n'ont jamais été considéré. On constate le même manque

de connaissance pour l'influence des conditions météorologiques, certaines constatations intuitives existent entre les volumes des dépôts et les variables météorologiques, comme avec l'épaisseur du manteau neigeux. L'existence de seuil de profondeur de déclenchement, influençant directement le volume final n'ont jamais été exploré. De même, l'influence combinée de variables morphologiques et des conditions météorologiques sur les volumes des dépôts n'ont jamais été étudiés.

2.4 Vulnérabilité du réseau routier et dépôts d'avalanches

Les réseaux routiers sont le support d'échanges entre différents lieux et sont composés d'objets linéaires immobiles. La vulnérabilité du réseau routier est définie comme l'étude des dégradations potentielles du système de transport routier et leurs impacts sur la société (Jenelius et Mattsson, 2015). La vulnérabilité des réseaux routiers est présente sous plusieurs formes dépendantes de multiples facteurs : vulnérabilité physique de l'infrastructure routière, vulnérabilité fonctionnelle, perte d'accessibilité routière entraînant une dégradation de l'accès aux enjeux vitaux (circulation de la population, accès au centre de secours, dégradation de l'activité économique, etc...). En conséquence de l'altération de la fonction d'usage du réseau routier, on peut définir les dommages comme directs et indirects. Les dommages directs concernent l'intégrité physique de l'infrastructure routière (Léone, 1996a). Les dommages indirects portent atteinte aux activités et aux fonctions associées du réseau routier impacté, notamment en obstruant une partie de son emprise rendant impossible ou dégradant son utilisation. Trois types de vulnérabilité indirecte sont distingués (Utasse, 2015) : la vulnérabilité fonctionnelle qui traduit les perturbations fonctionnelles des tronçons impactés, la vulnérabilité territoriale qui se rapporte aux conséquences du dysfonctionnement du réseau sur le territoire et la vulnérabilité institutionnelle qui s'exerce essentiellement dans le cadre de retours d'expérience associée à l'analyse de la capacité de réponse des institutions face à la crise (Léone, 2008). La quantification et l'évaluation des dommages d'une dégradation d'un réseau routier par des perturbations fonctionnelles et des dysfonctionnements sont complexes, car difficiles à identifier et principalement immatérielles (Manche, 2000).

L'implantation des routes en montagne en fond de vallée ou à flanc de versant les expose particulièrement aux avalanches. Cependant, c'est l'organisation du réseau et les possibilités de contournement qui conditionne la vulnérabilité des territoires aux avalanches. Or, les réseaux routiers implantés en zone de montagne et notamment dans les Alpes françaises présentent généralement une organisation arborescente avec de nombreuses voies sans issues, les itinéraires alternatifs étant rares et souvent non praticables en hiver. L'isolement de certains territoires est donc facilité dans les Alpes de par la présence de vallées longues et étroites avec des routes de cols fermés en hiver (Leone et al., 2014).

Les conséquences de l'exposition des routes aux phénomènes avalancheux sont en premier lieu directes, qui sont provoqués par l'écoulement, parfois aggravé par la présence de blocs rocheux ou de végétations et repose sur les dommages physiques subis par les différentes composantes d'une infrastructure routière. Si la chaussée peut aisément être comblée et donc obstruée, il est assez rare que la chaussée soit endommagée, ce sont les équipements annexes (équipements de sécurité, de signalisation...) qui sont le plus à même de subir des destructions. Une hiérarchisation des dommages maximum (DPmax) d'un axe routier a été proposée par Leone en 1996 (Leone, 1996b).

Tableau 2 : typologie des dommages physiques maximum sur réseau routier (source : Leone, 1996b)

DPmax	Mode d'endommagement physique de la route
SD	Sans dommage observé
D1	Dégradation de la chaussée
D2	Affaissement de la plate-forme
D3	Obstruction de la chaussée
D4	Destruction de la plate-forme sans rupture de pont
D5	Destruction de la plate-forme par rupture de pont

Les dommages et leur ampleur sont issus de 3 processus d'endommagement : des phénomènes de pressions, des poussées latérales qui affectent essentiellement les équipements annexes et plus rarement des ablations liées à de larges avalanches de fond. Il est à noter que les véhicules et personnes en mouvement sont très rarement affectés par des avalanches. Il est cependant plus courant que des véhicules stationnés soient endommagés par des avalanches.

Les conséquences indirectes de l'exposition des routes aux phénomènes avalancheux reposent sur des perturbations fonctionnelles. Une typologie des perturbations maximales (Pmax) pour des mouvements de terrain a été proposée par Leone en 1996 (Leone, 1996b).

Tableau 3 : typologie des perturbations liées à l'endommagement de la route (source : Leone, 1996b)

Pmax	Perturbation liée à l'endommagement de la route
SP	Sans perturbation décrite
P1	Limitation de gabarit nécessaire
P2	Interruption momentanée du trafic routier (heures)
P3	Interruption prolongée du trafic routier (jours)
P4	Interruption durable à définitive du trafic routier (en semaines ou mois)

Les perturbations liées aux mouvements de terrain diffèrent avec celles liées aux avalanches, les coupures de routes liées aux avalanches ne sont pas seulement dûes à l'obstruction de la route, mais aussi à des décisions de pouvoirs publics prises en fonction de l'importance du risque de déclenchement avalancheux. Des fermetures temporaires de tronçons routiers sont régulièrement décidées préventivement lorsque les conditions nivologiques et météorologiques sont propices à des déclenchements d'avalanches. De même, lorsqu'une route est coupée par un dépôt d'avalanche, la réouverture du réseau est décidée uniquement lorsque la suspicion d'un nouveau phénomène avalancheux est dissipée. Cependant, la typologie proposée par Leone indique des durées de perturbations pouvant être directement utilisées dans l'étude

des phénomènes avalancheux. On peut notamment prendre comme exemple l'avalanche du 8 janvier 2018 qui a obstrué la route départementale 902 entre Bonneval-sur-Arc et Bessans, en Savoie, sur 200 mètres de long et près de sept mètres de haut. La route a été complètement fermée pendant 4 jours et la circulation perturbée pendant plusieurs semaines, isolant le village de Bonneval-sur-Arc (Fig.6).



Figure 6 : Obstruction de la RD 902 le 8 janvier 2018, A) : dépôt coupant la route, B) : déblaiement de la route (© data-avalanche.org)

Les conséquences indirectes des coupures de routes sont larges. Concernant, les conséquences économiques, elles sont difficilement quantifiables et directement liées à la dégradation ou à la perte d'accessibilité d'un territoire. Une grande partie de l'activité économique hivernale des zones de montagne alpine repose sur le tourisme des sports d'hiver (Boudières et al., 2010). L'accès aux stations de sports d'hiver durant la période d'affluence touristique revêt alors un caractère primordial, en particulier le samedi, forte période d'affluence routière. En cas de coupure de route, le manque à gagner pour l'économie touristique peut être très important.

Des études récentes se concentrent sur les conséquences spatiales des perturbations liées aux avalanches en utilisant la théorie des graphes (Erath et al., 2009), en considérant les propriétés structurelles du réseau (Tacnet et al., 2014) ou en opérant une analyse cartographique des pertes ou des dégradations d'accessibilité du réseau routier (Léone et al., 2014). Cependant ces études restent en grande partie déconnectées des caractéristiques physiques des avalanches et notamment du dépôt final. Or, les caractéristiques de l'écoulement et du dépôt final vont directement conditionner les dommages subis par le réseau routier. En effet, l'intensité de la perturbation, dépendante du volume et de l'emprise spatiale du dépôt, est étroitement

liée aux caractéristiques de l'aléa (Kristensen et al., 2003 ; Zischg et al., 2005 ; Wastl et al., 2011). Hao et al. (2021) ont proposé, depuis l'étude de plusieurs dépôts entre 2015 et 2019 le long d'une section de route en Chine, une classification des dommages en fonction de la typologie des dépôts. En considérant la fréquence avalancheuse et les caractéristiques du dépôt (volume, masse volumique, et masse du dépôt), le degré d'endommagement des dépôts d'avalanches sur le réseau routier en fonction de 4 types d'écoulement a été classé dans l'ordre suivant : avalanche de neige sèche de surface > avalanche de neige humide de fond > avalanche de neige humide de surface > avalanche de neige sèche de fond.

Dans les Alpes cette classification n'est pas directement applicable puisque le climat est différent du climat continental chinois, marqué par des températures très basses et une épaisseur de manteau neigeux faible, favorisant les avalanches de neige sèche. En France, de par leur fort pouvoir de propagation, les avalanches de neige sèche en aérosol et/ou dense représentent une menace sur un grand nombre de tronçons routiers, et entraînent des dommages extrêmement variables. Cependant, ce sont les avalanches de neige humide qui représentent le risque de dommage le plus important. Si elles affectent moins de tronçons, elles affectent régulièrement les axes principaux de fond de vallée et leurs caractéristiques nivologiques et volumétriques entraînent la majeure partie des coupures de routes (Fig. 7).



Figure 7 : Déblaiement d'un dépôt de neige humide ayant coupé une route sur la commune de Bonneval-sur-Arc, 25 avril 2018 (© Hippolyte Kern)

Dans le détail, les durées d'inaccessibilité, les dommages et les coûts de déneigement sont directement dépendant du volume du dépôt et de ses caractéristiques. A l'échelle de la commune, il est compliqué d'estimer les coûts de déneigement pour des événements isolés, car l'entretien de la voie après un événement avalancheux est considéré comme une mission de service public au même titre que la remise en fonction du réseau à la suite de chutes de neige. Cependant, lors d'événements de grande ampleur, des entreprises privées sont missionnées pour le déneigement des axes, il est alors possible d'estimer les coûts de déneigement. Le coût moyen d'un déneigement, calculé depuis quelques événements avalancheux de communes des Alpes du sud, est de $1,30\text{€}/\text{m}^3$ (Garcin, 2011). Ce coût souligne l'importance des caractéristiques volumétriques des dépôts dans les coûts nécessaires à une remise en fonction du réseau routier. De plus, les caractéristiques nivologiques du dépôt peuvent fortement compliquer le déneigement.

Le déneigement d'un dépôt constitué de neige humide, plus dense, va nécessiter des engins de déneigements puissants et le temps nécessaire va être plus long que pour de la neige froide et peu dense. L'importance des dommages à la chaussée ou aux équipements annexes est également dépendante de la typologie et de l'intensité de l'aléa (Léone et Deymier, 2011). Dans le cas des avalanches, ce sont la présence d'un gros aérosol, d'un écoulement avec une forte cinétique ou d'un dépôt avec un important volume qui vont provoquer des dommages structuraux aux ouvrages routiers et aux infrastructures annexes.

Chapitre 3 Problématiques et objectifs de la thèse

3.1 Manques de connaissance et verrous

L'état de la connaissance scientifique présenté dans les chapitres ci-dessus met en évidence certaines lacunes au sujet des dépôts d'avalanches. Les études centrées sur les avalanches, se concentrant notamment sur l'étude de leurs dynamiques et leurs conséquences, négligent largement les caractéristiques des dépôts.

Les volumes des dépôts, leur évolution spatio-temporelle, ainsi que leurs caractéristiques nivologiques internes et de surfaces sont mal connus et n'ont pas été directement considérés par la communauté scientifique comme des objets d'étude spécifiques. De ce fait, l'évolution spatio-temporelle et les facteurs de contrôle des volumes des dépôts et des leurs caractéristiques nivologiques sont peu connus. L'influence de certaines variables morphologiques des couloirs sur les volumes des dépôts apparaît comme intuitive, mais n'a été que pauvrement investiguée ou quantifiée. Le constat est similaire pour l'influence de la météorologie et des caractéristiques du manteau neigeux initial sur les volumes des dépôts. De plus, les interactions complexes entre la morphologie des couloirs, la météorologie et les caractéristiques du manteau neigeux sur les volumes des dépôts n'ont également jamais été identifiées. Il apparaît alors comme essentiel de valider des influences intuitives et d'identifier plus largement l'ensemble des facteurs de contrôle.

Enfin, les caractéristiques des dépôts, notamment volumétriques, déterminent l'ampleur des dommages et plus spécifiquement des perturbations infligées aux réseaux routiers. Le réseau routier alpin est régulièrement affecté par des coupures de routes entraînant des conséquences directes et indirectes importantes. Or, il n'existe aucune information sur les liens entre les caractéristiques des dépôts et la vulnérabilité du réseau routier.

3.2 Objectifs de thèse

Compte tenu des lacunes évoquées ci-dessus, les objectifs de cette thèse sont les suivants :

1. Étudier la variabilité spatio-temporelle des volumes des dépôts d'avalanches depuis une base de données événementielle.
2. Identifier les variables de contrôle géomorphologique et météorologique des volumes des dépôts.
3. Analyser les caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches en fonction de différents types d'écoulement à travers la création d'un protocole reproductible.
4. Identifier les caractéristiques géomorphologiques des couloirs et les conditions météorologiques favorables à des coupures de routes.

Cette thèse se concentre sur deux vallées de hautes montagnes des Alpes françaises, en premier lieu la vallée de la Haute-Maurienne et, dans une moindre mesure, le massif du Queyras avec le bassin-versant du Guil. Ces deux terrains d'étude présentent une forte activité avalancheuse ainsi qu'une bonne accessibilité à des données relatives aux avalanches. Les deux terrains sont largement présentés dans le chapitre 4. Après une étude détaillée des données sur la période 1900-2017, ce travail se concentre spécifiquement sur la période 2003-2017.

3.3 Organisation des sections suivantes de la thèse

A la suite des chapitres introductifs de la partie 1, la **partie 2** présente les différentes méthodologies appliquées dans le cadre de cette thèse. Le **chapitre 4** présente le protocole mis en place pour l'étude des caractéristiques des dépôts *in-situ*. Le **chapitre 5** présente les bases de données utilisées ainsi que les protocoles de regroupement et de correction des données nécessaires à leurs utilisations ainsi que les traitements statistiques utilisés pour l'identification des variables de contrôle des volumes des dépôts.

La **partie 3**, composée du **chapitre 6**, présente les caractéristiques géographiques et météorologiques ainsi que l'activité avalancheuse des deux terrains d'étude considérés.

La **partie 4** qui présente les résultats est composée de quatre articles scientifiques répondant aux différents objectifs susmentionnés.

Le **chapitre 7** est composé d'un article prochainement soumis à une revue scientifique. Il s'agit ici de proposer une méthodologie, essentiellement constituée de mesures nivologiques, pour analyser les caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches, en se concentrant notamment sur la composition nivologique, la masse volumique et la porosité des différentes couches. L'approche inclut la caractérisation de la forme du dépôt, la caractérisation de sa surface et enfin une analyse nivologique de profils verticaux. Les investigations ont porté sur deux dépôts formés pendant l'hiver 2019 et 2020 et issues de deux types d'écoulement différents : de neige sèche et de neige humide.

Le **chapitre 8** comprend deux articles publiés. Le **chapitre 8.1** correspond à un article publié en juin 2020 dans la revue *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. La compilation et l'analyse statistique de données historiques recensant des informations sur un grand nombre d'avalanches et des dépôts associés sont effectuées sur la commune de Bessans, dans la vallée de la Haute-Maurienne entre 1903 et 2018. Le **chapitre 8.2** est composé d'un article scientifique publié en octobre 2021 dans la revue *The Cryosphere*. L'article se concentre sur l'influence des variables géomorphologiques des couloirs sur plus de 1450 dépôts issus de 77 couloirs de 3 communes de la vallée de la Haute-Maurienne entre 2003 et 2018.

Le **chapitre 9** est composé d'un article soumis à la revue *Land Degradation and Development*. Cette étude porte sur l'influence des conditions météorologiques et du manteau neigeux sur les dépôts d'avalanches et la vulnérabilité du réseau routier à partir des volumes de dépôts de 1986 avalanches issues de 182 couloirs situés dans les vallées du Guil et la vallée de la Haute-Maurienne.

Enfin, dans la **partie 5** composée par le **chapitre 10**, nous récapitulons les principaux résultats et conclusions de la thèse, puis nous proposons des perspectives possibles pour les futurs développements.

Partie II : Données et cadre méthodologique

La seconde partie du manuscrit est consacrée à la présentation du cadre méthodologique global. Ce chapitre résume les données utilisées ainsi que les méthodologies appliquées. Les approches méthodologiques complètes et concrètes sont présentées au sein des différents articles scientifiques composant la partie résultats. De ce fait, quelques redondances sont inévitables.

Chapitre 4 : Étude de la géométrie et de la composition des dépôts *in-situ*

Ce chapitre résume les méthodologies mis en application pour caractériser la géométrie et les caractéristiques nivologiques des dépôts d'avalanches. La méthodologie complète est présentée dans au sein du chapitre 9.

4.1 Organisation des missions de terrain

Cette thèse s'appuie en partie sur des missions de terrains réalisées sur des dépôts d'avalanches uniquement localisés dans la vallée de la Haute-Maurienne. Le choix du site d'étude s'est fait en fonction d'une bonne accessibilité, d'une forte activité avalancheuse associée à la qualité des relevés EPA et de l'existence de connaissances issues de travaux scientifiques réalisés avant ce doctorat. Deux missions de terrain ont été organisées pour réaliser des mesures nivologiques et volumétriques sur deux dépôts d'avalanches.

4.2 Approche Méthodologique

L'originalité de notre approche repose essentiellement sur des profils verticaux de neige obtenus par sondage. Quatre indicateurs sont considérés pour chaque profil vertical : la granulométrie de surface, la typologie nivologique (les différents types de grains de neige), la masse volumique et la porosité.

La caractérisation de la forme et l'évaluation du volume du dépôt sont des étapes préalables nécessaires et obtenus depuis l'analyse de modèles numériques de terrains (MNT). Ces MNT sont constitués de nuages de points d'une très haute résolution (centimétrique) obtenues par l'utilisation d'un laser-scan et d'un drone. La comparaison d'un MNT du sol nu avec un MNT du dépôt permet de finement calculer le volume du dépôt.



Figure 8 : Mise en place du Laser-scan pour obtenir le nuage de point nécessaire à la création du MNT d'un dépôt (© Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019)

La surface du dépôt est composée d'un enchevêtrement d'agrégats. La distribution granulométrique des agrégats est mesurée à la surface de chaque profil vertical. La méthode de Wolman (Wolman, 1954) consiste à mesurer la longueur de l'axe perpendiculaire à l'axe principal des agrégats de neige de différentes formes et tailles pour un échantillon minimal de 50 agrégats sélectionné aléatoirement.

La caractérisation des couches internes est effectuée à différents points du dépôt, la répartition spatiale des points de mesure est déterminée en fonction des caractéristiques géométriques du dépôt. Les mesures sont effectuées depuis des sondages, réalisés soit à l'aide d'un carottier de glaciologie soit depuis des puits de neige creusés à la main. Trois indicateurs sont considérés pour chaque profil vertical : la typologie nivologique (les différents types de grains de neige), la masse volumique et la porosité.

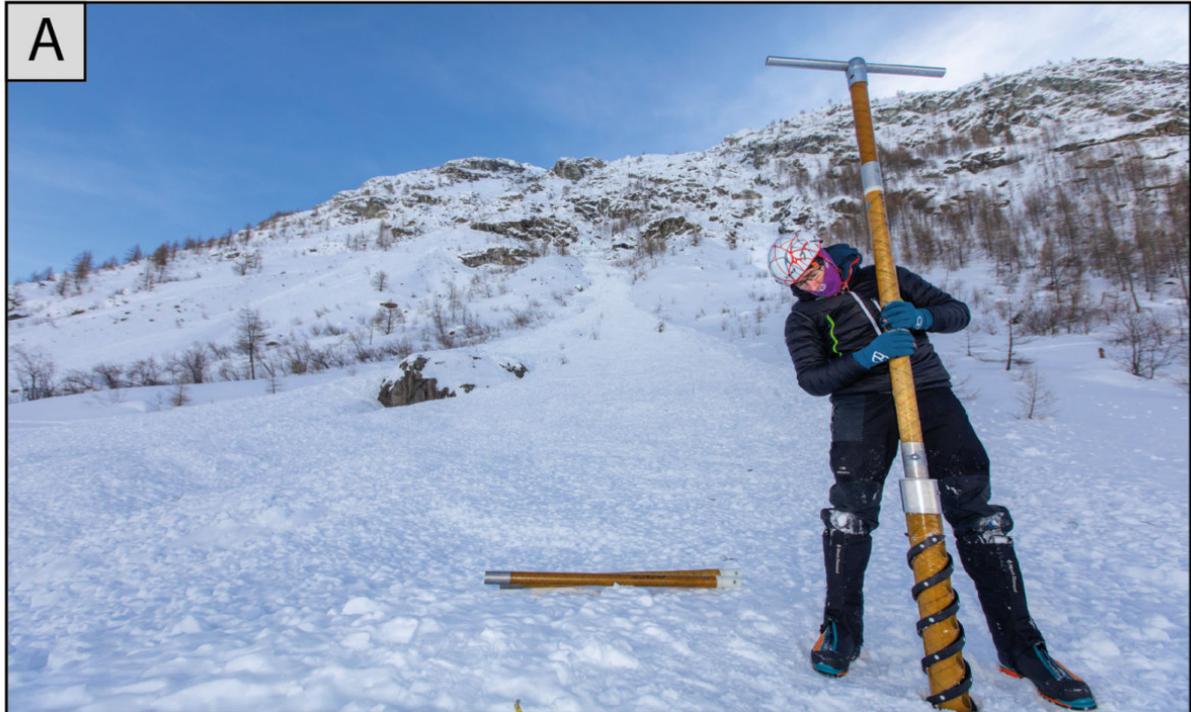


Figure 9 : Caractérisation nivologique des dépôts d'avalanches, (A) Sondage réalisé à l'aide d'un carottier, (B) Mesures nivologiques depuis un puit de neige (© Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019)

Chapitre 5 Détermination des variables responsables des volumes des dépôts depuis une unique base de données événementielle relative aux avalanches

Dans le cadre de cette thèse, afin d'obtenir une base de données unique, de bonne qualité et la plus complète possible, plusieurs sources de données ont été compilées. Les données ont été aussi parfois corrigées et plus particulièrement les éléments permettant de décrire les dépôts d'avalanches et les éventuels dégâts associés. L'Enquête Permanente sur les Avalanches constitue la principale source de données utilisée dans ce travail. En complément, un travail de recherche d'archives a permis d'accéder à plusieurs sources d'informations complémentaires.

Différentes analyses statistiques ont été utilisées pour déterminer les liens entre les caractéristiques morphologiques des couloirs d'avalanches, les conditions météorologiques locales et les volumes des dépôts. L'approche statistique est ici uniquement résumée, l'application complète et concrète de chaque méthodologie aux différents jeux de données est présentée au sein des différents articles scientifiques composant la partie résultats.

5.1 Constitution d'une unique base de données événementielles relatives aux avalanches

5.1.1 L'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA)

Les données sur lesquelles s'appuie principalement cette étude sont rassemblées par un inventaire des avalanches survenues sur des sites français des Alpes dans la base de données EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches) (Deschâtres et al., 2010 ; Bourova et al., 2016). Les documents utilisés pour mettre en place cette base de données sont des carnets forestiers dans lesquels les événements ont été répertoriés jusqu'à la mise en place d'un système numérique au début des années 2000.

Les carnets vont évoluer au fil du temps, utilisant des variables parfois différentes. Trois générations de carnet ont été utilisées depuis la mise en place des EPA dans les deux massifs étudiés. Elles correspondent à des protocoles différents de récolte et de saisie des données.

Les premiers carnets (Fig. 10) ont été utilisés depuis la mise en place du système, en 1900 et vont être utilisés jusqu'en 1975. Dans ces carnets, les variables de date, d'heure et d'altitude de départ et d'arrivée des événements sont notées. Ces variables restent inchangées lors de l'évolution des carnets. Les seules variables permettant de décrire l'événement sont réduites à une colonne intitulée « genre de l'avalanche » qui permet de choisir entre quatre types d'avalanches : « de poussière, de fond, superficielle ou de glacier », ainsi qu'une colonne qui précise si l'avalanche s'est déclenchée en amont ou en aval d'une zone forestière. Si les trois premiers types d'avalanches correspondent plus ou moins à la classification actuelle, l'avalanche de glacier est définie par Mougin comme une avalanche créée par « la cassure du glacier à une rupture de pente qui libère souvent une masse considérable » (Mougin, 1931, p.3). La dernière colonne de ces carnets apporte des précisions, des informations complémentaires sur l'événement (durée de l'événement, éventuels dégâts aux forêts, aux constructions ou aux voies de communication et aux victimes humaines ou animales, dimensions du cône créé par l'avalanche).

Année	Date et Heure de l'avalanche	Genre de l'avalanche de poussière ? de fond ? superficielle ? de glacier ?	Altitude du		Le point de départ est		Renseignements sur l'avalanche :
			point de départ	point d'arrivée	en dessus de la zone forestière	en dessous de la zone forestière	
1	2	3	4	5	6	7	8
1902	30 mars à 8 ^h	de fond			Presque		Sans dégâts
1903	28 do	do			do		do
1904	12 Février	de suspension			do		Plus des Moulins barré pendant 3 heures
1907	28 Mars à 16 ^h	superficielle	2350	1780	do		Cône 110 x 30 x 3 m
1909	12 do à 16 ^h	de fond	2200	1900	do		100 x 29 x 2 m
	do 19 do à 14 ^h	do			do		70 x 25 x 2 m
1910	21 Février à 9 ^h	do	3100	1750	do		Plusieurs poteaux PTT cassés
1920	12 Janvier à 16 ^h	do	3000	1880	do		Sans dégâts
1922	20 Avril à 11 ^h	de fond	2300	1800	do		un poteau P.T.T. cassé
1929	14 Février à 11 ^h	do	3100	1790	do		Sans dégâts
1930	19 Février à 11 ^h	superficielle	2900	1850	id.		1 poteau 100 x 100
1938	30 Mars à 7 ^h	do	2900	1790	do		do
1942	29 Janvier, nuit	do	2850	1450	id.		Sans dégâts
1961	du 4 au 5 Janv.	do	3000	1790	id.		traverse l'axe recouvert la R.N. cassé des poteaux P.T.T.
1974	18.3.74	Neige sans cohésion	2200	1850			80 x 100 x 2 200 x 180 x 0.50
1974	21.3	neige sans cohésion	2300	1850			
1974	30.11	neige sans cohésion	3100	1800			
1975	20-4	plaque de neige	2800	1860			
1977	22 Février soir	plaque neige moule	1950	1820			sans dégâts

Figure 10 : Exemple d'un carnet EPA utilisé entre 1900 et 1975, page issue du carnet forestier de la commune de Bonneval-sur-Arc

Les seconds carnets utilisés (Fig. 11), l'ont été brièvement, au début des années 1970. Si très peu d'événements y ont été recensés, ils témoignent de l'évolution du système de l'EPA. Les seuls événements recensés dans ces carnets se situent entre 1972 et 1975. Certains événements sont présents à la fois dans ces carnets et dans ceux du début du XXème siècle. Les variables classiques de date et d'altitude sont maintenues. L'évolution constatée dans ces carnets se fait dans la description de l'événement et de la configuration du couloir. Une nouvelle variable concerne l'état de la neige mise en mouvement par l'avalanche, ainsi que des informations sur la zone de départ (état du terrain, exposition, situation topographique). La colonne « autres renseignements » du carnet reste quasiment inchangée : il est encore demandé de renseigner les dimensions ou le volume du cône et les dommages causés. La nouveauté réside dans la demande de renseignement d'éventuels frais engagés pour la réparation des dégâts. Dans les faits, la colonne « autres renseignements » a été très peu utilisée dans ces carnets pour ce qui est des terrains traités dans cette thèse.

ANNEE (1)	DATE et heure de l'avalanche (2)	ALTITUDE		GENRE DE L'AVALANCHE			RENSEIGNEMENTS SUR LA ZONE DE DEPART				AUTRES RENSEIGNEMENTS Dimensions ou volume du cône Dommages divers causés Frais engagés pour la réparation des dégâts (11)	
		de point de départ (3)	de point d'arrivée (4)	1/ de neige sans cohésion 2/ de plaque de neige (5)	Intéressant : a/ toute la couche b/ une partie de la couche (6)		Etat de la neige appelée par l'avalanche : S : sèche M : mouillée Bb : fragmentée en blocs (7)		Etat du terrain : 1/ nu 2/ engazonné 3/ embroussaillé 4/ boisé (8)			Exposition : N, NE, E, SE, S, SO, O, NO (9)
* 1974	3.5.74	2000	1780	1	b	S	2	S	227	a	300 x 300 x 6	
* 1974	17.2.74	2900	1800	1	b	S	2	S	a			
* 1974	21.3.74	2300	1850	1	a	M	2	S	a			
1975	20.4.75	2400	1900	2	a	Bb	2	S	a			

Figure 11 : Exemple d'un carnet EPA utilisé entre 1972 et 1975, page issue du carnet forestier de la commune de Bonneval-sur-Arc

Les troisièmes et derniers carnets utilisés (Fig.12) ont été mis en place durant l'hiver 1975-76 et ont été utilisés jusqu'en 2003, date de mise en place du système numérique. Les premières pages des carnets comportent une nouveauté : pour chaque couloir est créée une fiche de site d'avalanche, qui permet de présenter le couloir. Sont précisées les coordonnées du site, les altitudes maximales approximatives de départ et d'arrivée, une description topographique du site et une partie pour des remarques. Ces fiches servent à limiter les erreurs d'appréciation ou de saisie de l'agent. Pour la saisie des événements, ces carnets présentent un grand nombre d'évolutions que l'on retrouve dans l'organisation de la base de données actuelle. La première évolution est que l'événement est maintenant décrit par les six grandes classes de caractéristique de A à F, (A : type de neige et de départ, B : présence de sol visible, C : neige sèche ou humide, D : avalanche limitée à un couloir, E : présence d'un aérosol, F : présence de neige humide). La seconde évolution est

la prise en compte des conditions météorologiques au moment du déclenchement et dans les trois jours précédents. La troisième évolution est la prise en compte de la cause du déclenchement et d'éventuels dégâts. La dernière évolution témoigne d'un changement important dans la prise en compte du phénomène avalancheux, les dimensions ou volumes de dépôts ne sont plus notés.

COMMUNE de BESSANS		Site n° 11		Code avalanche		Nom ou lieu dit SUR LE PLS... COULOIR DES... FICHETTES																									
ANNEE	DATE et heure de l'avalanche	ALTITUDE		CARACTERISTIQUES						METEO DANS LES 3 JOURS PRECEDENTS			METEO AU MOMENT DU DECLICHEMENT					CAUSE DE DECLICHEMENT				VICTIMES			DEGATS				REMARQUES		
		du point de départ	du point d'arrivée	A	B	C	D	E	F	Neige fraîche (mm)	Vent fort	Pluie	Neige	Vent fort	Pluie	Ciel clair	Enneigement	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité	Humidité		Humidité	Humidité
<	1977	06.02.77	Soir	2700	1750	2	3	2	2	2	2	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
-	1977	21.2.77	Jour	2300	1750	3	3	5	2	5	5	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
*	1978	26.1.78	Matin	2350	1750	2	2	1	2	1	1	50	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1978	12.4.78	Soir	2300	1850	2	4	2	5	2	2	10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1983	8.3.83	Soir	2950	1950	3	4	2	5	2	2	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1984	16.3.84	Soir	2900	1700	4	4	1	2	2	1	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
*	1985	17.1.85	Soir	3000	1750	4	4	1	2	1	1	80	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
*	1986	30.12.86	Jour	2100	1800	4	4	1	5	5	1	10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1988	19.03	Jour	2400	1800	2	4	2	5	2	2	30	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1991	7.01	Jour	2900	1700	2	2	2	1	2	2	30	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1992	2.11	Jour	2900	2000	4	4	2	2	2	2	40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1993	05.03	Jour	3120	1700	4	4	1	2	1	1	80	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1994	11.01	Jour	3000	1750	2	2	1	2	1	1	20	S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1994	6.02	Jour	3100	1740	4	2	1	2	2	1	100	E	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1994	11.03	Jour	3120	1700	4	4	5	2	2	2	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1994	17.04	16h45	3000	1700	4	2	2	2	2	2	100	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1995	27.02	Jour	2470	1720	4	2	2	2	2	2	100	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1996	2.01	Jour	2750	1750	4	4	5	2	2	2	20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	1996	16.12	Matin	2200	1750	4	4	5	5	5	5	40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2001	05.03	Jour	3120	1700	2	4	2	2	2	2	20	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	2002	25.02	Jour	3120	2500	2	2	1	5	2	1	30	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

Figure 12 : Exemple d'un carnet utilisé entre 1975 et 2003, page issue du carnet forestier de la commune de Bessans

Depuis 2003, les données sur les événements sont toujours récoltées depuis des observations sur le terrain et les informations compilées à l'aide de fiches manuscrites, mais qui sont directement numérisées et saisies en ligne par les observateurs eux-mêmes depuis 2009. Pour chaque couloir, les opérateurs de l'EPA utilisent systématiquement le même point d'observation prédéfini, afin de maximiser la précision des observations. Les relevés sont opérés par le RTM et l'ONF.

La base de données numérisée EPA actuelle gérée et administrée par l'INRAE pour le compte du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) est constituée de plusieurs variables, réparties en plusieurs catégories, qui permettent de décrire chaque évènement avalancheux répertorié. Les premières variables notent la

date et l'heure de l'événement. La seconde catégorie de variables décrit les caractéristiques de l'avalanche, les altitudes de point de départ et d'arrivée, et 6 variables, notées de A à F, précédemment présentées. La troisième catégorie de variables renseigne sur les conditions météorologiques au moment du déclenchement et dans les 3 jours qui précèdent l'événement. La quatrième catégorie se concentre sur la cause du déclenchement (naturelle, humaine volontaire, humaine involontaire...). La cinquième catégorie de variables donne accès à des informations sur d'éventuelles victimes et/ou dégâts, en précisant bien une éventuelle atteinte au réseau routier. La dernière catégorie consiste en des remarques qui apportent des précisions sur l'importance des dégâts ou d'autres informations.

De plus, pour chaque avalanche, les dimensions géométriques du dépôt sont à nouveau documentées, sur la base d'une estimation visuelle effectuée par des opérateurs ONF ou RTM du réseau EPA. Pour chaque dépôt, la longueur, la largeur et la profondeur moyenne sont visuellement estimées, ce qui fournit ultérieurement une estimation du volume. Les opérateurs de l'EPA, des agents ONF affectés à la zone concernée, ont une connaissance précise des couloirs étudiés, y compris de leur morphologie sans neige. L'utilisation systématique du même point d'observation prédéfini maximise la précision de l'estimation, notamment pour la profondeur du dépôt. Cependant, la profondeur du dépôt reste difficile à estimer, car pour des raisons de sécurité, elle n'est pas fondée sur des mesures directes sur le dépôt. Ceci est particulièrement problématique dans le cas de dépôts successifs se superposant. Les observateurs essaient de limiter cette incertitude en effectuant des relevés après chaque chute de neige afin d'effectuer des estimations visuelles avant que le dépôt ne puisse être à nouveau recouvert par de la neige fraîche ou un nouveau dépôt.

5.1.2 Correction et ajouts depuis les carnets forestiers

Les trois générations de carnets manuscrits ont été numérisées dans les années 2000. Des choix méthodologiques et des erreurs de saisie expliquent qu'il est important de vérifier et de corriger la base de données EPA émanant de cette numérisation pour qu'elle soit la plus fiable possible.

Sur les terrains ciblés, une vérification ligne par ligne de l'ensemble des informations notées dans la base de données a été effectuée dans le cadre de cette thèse pour que les informations numérisées correspondent avec celles notées dans les carnets. La source principale des différences à corriger est due à des choix méthodologiques faits lors de la numérisation. Par exemple, pour tous les événements émanant des premiers carnets, il a été décidé de noter les mêmes altitudes de départ et d'arrivée pour les événements d'un même couloir. Généralement les altitudes choisies étaient celles du premier événement noté. A ces choix méthodologiques s'ajoutent des erreurs et des oublis de saisie. Il peut s'agir d'une faute de frappe, d'une erreur dans la case de saisie ou d'un oubli. Seules les données comprises entre 1901 et 2003 ont pu être vérifiées, les fiches permettant de noter les événements après 2003 n'étant pas en notre possession.

De plus, les changements opérés au cours du temps dans l'organisation de l'EPA ont également entraîné une perte d'informations sur la localisation de certains couloirs, ce qui explique que certains couloirs ne soient pas actuellement cartographiés. Le travail d'archives a en grande partie permis de retrouver la localisation exacte des couloirs.

Sur les 7233 avalanches comprises dans la base de données relative aux deux terrains d'étude, 1573 avalanches ont fait l'objet de corrections et 252 avalanches ont été ajoutées.

5.1.3 Corrections et ajouts depuis les bases de données complémentaires

La base de données CLPA est numérisée et les couloirs CLPA sont associés à des couloirs EPA si une correspondance est possible. L'échelle spatiale considérée par la CLPA est plus fine, on retrouve donc régulièrement plusieurs emprises CLPA au sein d'un même couloir EPA. Une fine étude des correspondances a été effectuée afin d'éviter d'insérer des doublons d'informations.

L'analyse des informations des 95 avalanches recensées dans la CLPA pour les terrains d'études ont permis de recenser 13 avalanches qui n'étaient pas référencées dans la base de données EPA et ont pu être ajoutées. Il y a une

correspondance EPA/CLPA entre 69 avalanches pour lesquelles les informations ont pu être comparées et modifiées.

5.3.2.b OPA

L'étude des archives OPA a permis d'étudier, de numériser et de créer une nouvelle base de données avec 179 comptes rendus d'avalanches uniquement sur les communes de Lanslevillard, Bessans et Bonneval situées dans le vallée de la Haute-Maurienne. Les fiches OPA utilisant les numéros de couloir de la CLPA, la bonne correspondance des couloirs EPA et CLPA a permis d'éviter d'insérer des doublons d'informations. Sur l'ensemble des avalanches étudiées dans le cadre de l'OPA, 80 n'étaient pas présentes dans la base de données EPA et ont pu être ajoutées, 99 correspondances entre des avalanches ont été trouvées. Certaines informations ou commentaires ont pu être ajoutés ou modifiés.

5.3.3.c RTM

La base de données RTM étant déjà numérisée, il n'a pas fallu effectuer de numérisation ou de traitement sur cette dernière. 51 avalanches non répertoriées dans l'EPA ont pu être ajoutées depuis la base de données RTM. L'analyse des correspondances avec l'EPA a permis de trouver des correspondances entre 242 événements. Certains commentaires ont été ajoutés ou modifiés grâce aux informations de la base de données RTM, qui s'avère précieuse par la richesse des descriptions des caractéristiques des dépôts et des dégâts occasionnés, notamment sur le réseau routier.

5.1.4 Présentation de la base de données

Le résultat du travail de recherche, de correction et d'ajout de données est la création d'une base de données d'événements avalancheux de la vallée de la Haute-Maurienne et du Queyras. Les 7233 avalanches recensées dans la base de données sont essentiellement issues des données de l'EPA. Le travail de recherche d'archives

et de corrections a permis d'effectuer des modifications sur 1983 avalanches et d'ajouter 396 avalanches (Tab.4).

Tableau 4 : Récapitulatif du nombre d'avalanches, de dépôts et d'ajouts effectués

Période	Nombre d'avalanches	Nombre de dépôts	Nombre de corrections effectuées	Nombre d'avalanches ajoutées
1900-2017	7233	3485	1983	396
1900-1975	2379	1469	1536	99
1976-2002	2375	29	210	281
2003-2017	2479	1987	212	16

L'intérêt de cette base de données est sa grande couverture temporelle : 117 ans. Cependant il n'y a pas d'unicité de protocole de relevés dans le temps, 3 périodes sont distinctes (1900-1975, 1976-2002, 2003-2017)

Les seules périodes sans relevés sont les deux guerres mondiales. Les 3 périodes (3 protocoles) ont enregistré un nombre d'évènements comparables malgré leur étendue différentes (75 ans, 26 ans, 14 ans) (Tab.4). Cette différence ne témoigne pas d'une évolution temporelle de la dynamique avalancheuse mais plutôt des améliorations des protocoles EPA permettant progressivement un meilleur suivi de l'activité avalancheuse. Le nombre de corrections ou d'ajouts que nous avons dû réaliser pour la période 1900-1975 et pour la période 1976-2002 par rapport à la période 2003-2017 en est un bon indicateur. Les corrections nécessaires ne sont pas réparties de manière homogène selon les vallées. La qualité des enregistrements y est donc différente, en particulier la grande majorité des corrections et ajouts ont été opérés pour le massif de la Haute-Maurienne (Tab.5).

Enfin, le principal intérêt de cette base de données finale est de décrire les dimensions des dépôts d'avalanches et les dommages associés. Sur la période 1900-2017 3485 dimensions de dépôts sont enregistrées, soit 48% de l'ensemble des avalanches, ce pourcentage monte à 80% pour la période 2003-2017. Seuls 29 dépôts ont été décrits durant la période 1976-2002, cette lacune est due au protocole utilisé pour cette période. Étant issu d'une estimation visuelle, le volume final calculé est donc un résultat qui a une valeur indicative, qui permet d'effectuer des comparaisons et des analyses selon des ordres de grandeur. Pour certains dépôts, une des dimensions n'a pas pu être estimée visuellement, notamment à cause d'une visibilité dégradée, et n'est donc pas présente dans la base de données. Dans ce cas de figure, les dépôts concernés ne sont pas pris en compte dans notre étude.

Tableau 5 : Récapitulatif détaillé de la base de données événementielle des avalanches pour le massif du Queyras, le massif de la Haute-Maurienne et pour les deux massifs

Période	Nombre d'avalanches	Nombre de dépôts	Nombre de corrections depuis EPA	Nombre de corrections depuis CLPA	Nombre de corrections depuis OPA	Nombre de corrections depuis RTM	Nombre d'avalanches ajoutées depuis EPA	Nombre d'avalanches ajoutées depuis OPA	Nombre d'avalanches ajoutées depuis CLPA	Nombre d'avalanches ajoutées depuis RTM
Haute-Maurienne										
1900-2017	5774	2868	1449	38	99	206	182	7	80	31
1900-1975	1737	1326	1369	11	12	7	31	3	25	11
1976-2002	1950	12	79	30	87	14	151	4	55	10
2003-2017	2087	1530	1	0	0	185	0	0	0	10
Queyras										
1900-2017	1459	617	124	31	0	36	70	6	0	20
1900-1975	642	143	121	5	0	11	22	0	0	7
1976-2002	425	17	2	7	0	19	48	4	0	9
2003-2017	392	457	1	19	0	6	0	2	0	4
Total										
1900-2017	7233	3485	1573	69	99	242	252	13	80	51
1900-1975	2379	1469	1490	16	12	18	53	3	25	18
1976-2002	2375	29	81	37	87	33	199	8	55	19
2003-2017	2479	1986	2	19	0	191	0	2	0	14

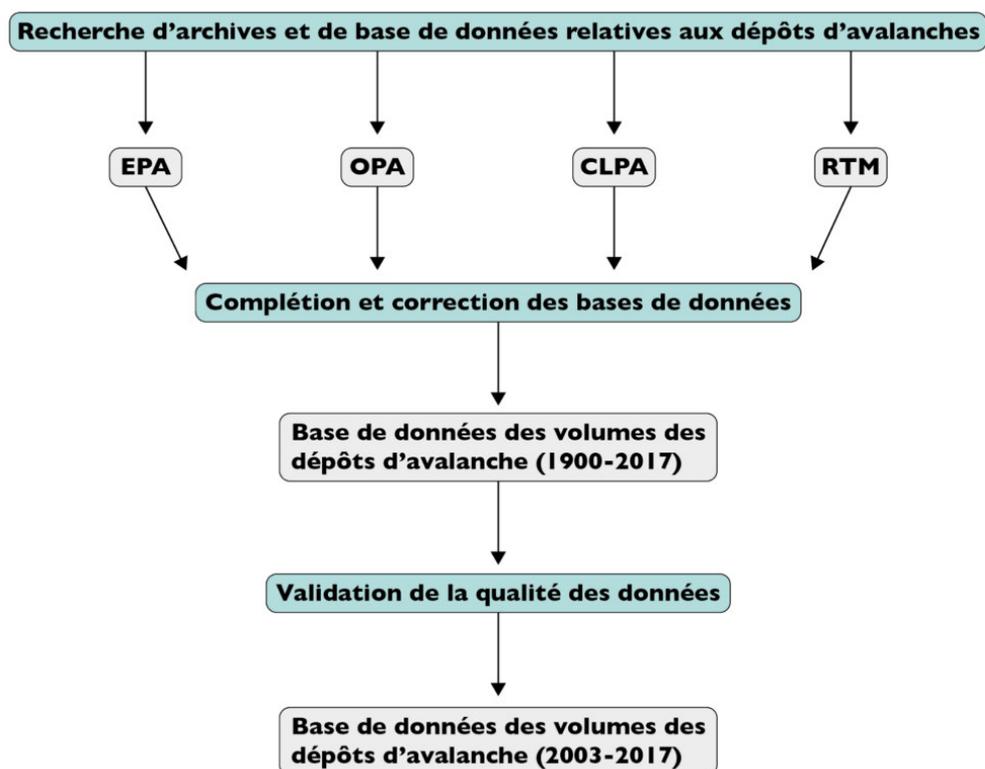


Figure 13 : Schéma récapitulatif de la méthodologie appliquée pour la constitution de la base de données événementielles relatives aux avalanches

5.2 Présentation des données météorologiques

Les données météorologiques utilisées dans ce travail de thèse sont de deux types : des mesures *in-situ* et des données de réanalyses. L'analyse des données mesurées issues de stations Météo France de la vallée de la Haute-Maurienne entre 2003 et 2017 permettent d'identifier deux saisons météorologiques distinctes entre novembre et mai : hivernale (novembre-février) et printanière (mars-mai). Les caractéristiques météorologiques des deux saisons sont présentées pour chaque terrain dans les chapitres 6.1.2 et 6.2.2. Les données de réanalyses opérées par Météo France ont été utilisées pour relier les conditions météorologiques et les volumes des dépôts pour chaque saison météorologique ; les résultats sont présentés au sein du chapitre 9.

5.2.1 Données météorologiques issues de mesures *in-situ*

Les données récoltées proviennent de deux stations météorologiques de Météo France situées sur la commune de Bessans (Fig. 14). La première est une station météorologique située dans la vallée à 1715 m d'altitude, et la seconde une nivose localisée à 2740 m, au sud-est de la commune, à proximité de Bonneval-sur-Arc.

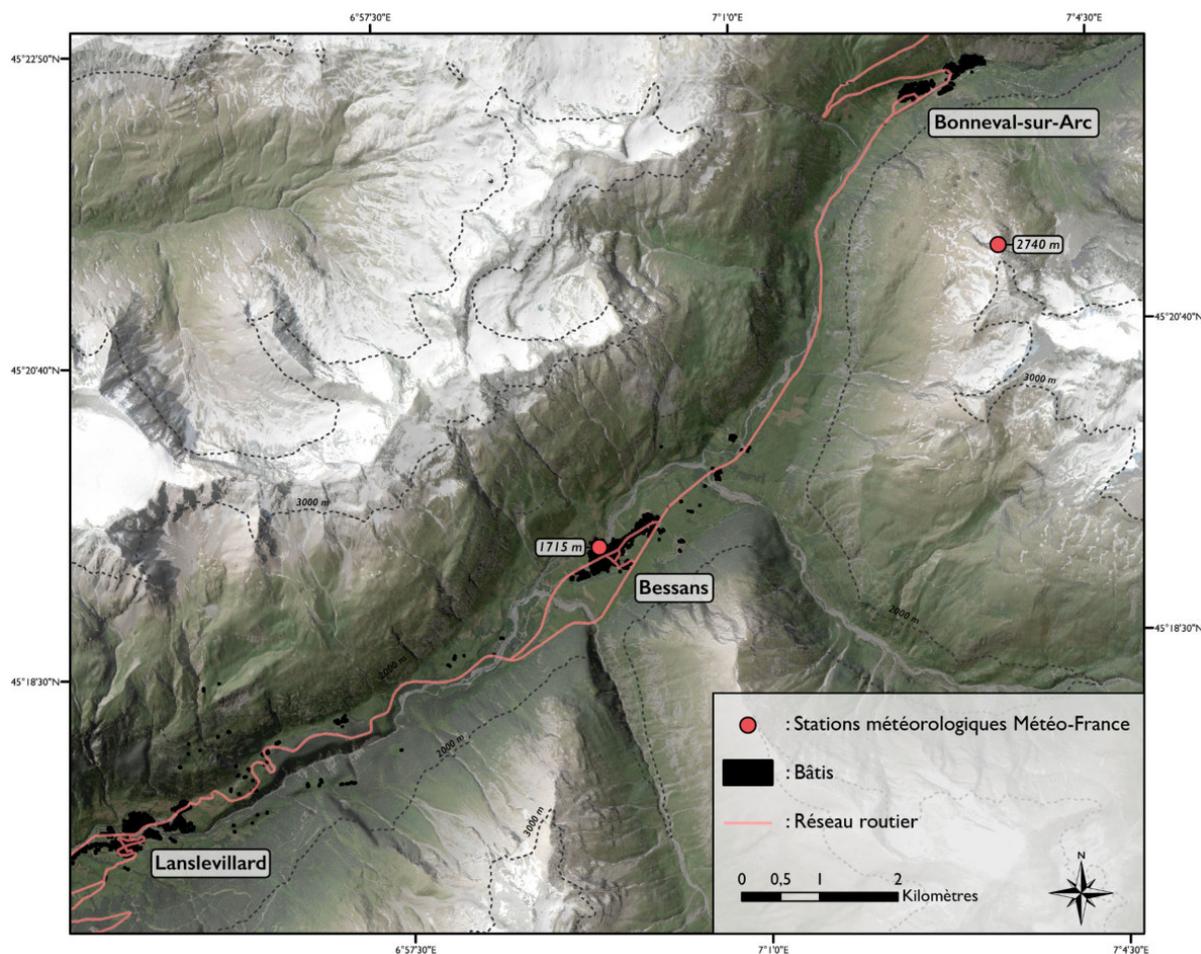


Figure 14 : Localisation et altitudes des deux stations météorologiques Météo-France de la vallée de la Haute-Maurienne exploitées dans le cadre de la thèse

Ces stations enregistrent quotidiennement : les hauteurs et la durée des précipitations quotidiennes, les températures minimale, maximale et moyenne sous abri, la durée des températures minimale et maximale, l'amplitude thermique journalière, la vitesse des vents moyens, la vitesse maximale des rafales, la direction du vent, la hauteur de neige tombée en 24h, l'épaisseur de neige totale et le maximum des épaisseurs de neige. Cependant, toutes ces variables ne sont pas mesurées dans les deux stations, la nivôse située en altitude se concentrant sur des mesures propres aux caractéristiques du manteau neigeux. La nivôse de Bessans n'a pas été opérationnelle en novembre 2009 et aucune information n'a pu être récolté entre janvier et avril 2017 à la suite de chutes de neige exceptionnelles qui ont complètement enseveli la nivôse.

5.2.2 Données météorologiques issues de réanalyses

Les données météorologiques et nivologiques issues des réanalyses sont produites par la chaîne de modélisation SAFRAN et Crocus exploitée par Météo-France. SAFRAN est un système d'analyse de l'atmosphère qui fournit des données pour les paramètres atmosphériques ayant une influence sur les caractéristiques de la neige au sol en fonction de différentes altitudes espacés par des pas d'altitude de 300 m. Crocus est un schéma physique de neige multi-couches unidimensionnel qui simule l'évolution des caractéristiques de la couverture neigeuse en fonction du transfert d'énergie et de masse entre les différentes couches de neige en utilisant le même pas d'altitude que SAFRAN pour une orientation non définie (terrain plat) et 8 différentes orientations spécifiques : nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest et nord-ouest sur des pentes de 40°. Crocus utilise les sorties de SAFRAN pour simuler les variables représentant les caractéristiques de la neige au sein de chaque couche (masse de neige, masse volumique, température) et leurs évolutions (Vernay et al., 2022). Les données de vitesse et d'orientation du vent ne sont pas prises en compte, il n'y a donc pas d'effet d'exposition des variables météorologiques issues de SAFRAN. Cependant, l'effet de l'orientation est reflété indirectement à travers les variables de Crocus, le manteau neigeux étant influencé par les bilans énergétiques et les effets de métamorphose propres à chaque exposition.

Le modèle SAFRAN a été régulièrement utilisé dans des études opérées dans des régions alpines françaises (Durand et al., 1999 ; Dupire et al., 2017) et dans l'analyse des processus périglaciaires et leur relation avec le climat (Pavlova et al., 2014 ; Jomelli et al., 2015). Les réanalyses SAFRAN et Crocus ont également souvent été utilisées avec les données de l'EPA (Castebrunet et al., 2012 ; 2014 ; Evin et al., 2021 ; Sielenou et al., 2021). La validation des réanalyses SAFRAN et Crocus ainsi qu'une comparaison avec d'autres modèles de neige peuvent être trouvées dans Etchevers et al. (2004) et Vernay et al. (2022).

SAFRAN et Crocus proposent en sortie de nombreuses variables descriptives des conditions météorologiques et nivologiques. Dans notre étude, une première sélection de prédicteurs potentiels des caractéristiques des dépôts d'avalanches a donc été effectuée parmi les nombreuses variables potentiellement disponibles. Nous

avons conservé 10 variables pour les deux vallées pour quatre altitudes : 2100, 2400, 2700 et 3000 m d'altitude. Les variables sélectionnées issues de SAFRAN sont : température moyenne journalière, nombre de jours avec une température supérieure à 0°C, chute de neige journalière moyenne, épaisseur de neige accumulée depuis le début de la saison avalancheuse, nombre de jours avec des chutes de neige, nombre de jours avec des chutes de neige importantes (supérieur à 75% des chutes de neige moyennes). Les variables sélectionnées issues de Crocus sont : épaisseur moyenne et maximale du manteau neigeux, épaisseur moyenne et maximale de résistance du manteau neigeux. Les valeurs de résistance du manteau neigeux correspondent à une profondeur de pénétration du capteur de résistance et sont exprimées en mètres. En raison d'une corrélation élevée ($\rho > 0,98$) entre les données de résistance du manteau neigeux et les données d'épaisseur de neige humide, ces dernières n'ont pas été utilisées.

5.3 Détermination des variables responsables des volumes des dépôts

5.3.1 Préparation des données

Afin d'identifier les facteurs responsables des volumes des dépôts, plusieurs échelles temporelles et spatiales ont été considérées. Si les campagnes EPA sont organisées pour une année avalancheuse (novembre-mai), il a été choisi de considérer parallèlement deux échelles saisonnières délimitées selon les caractéristiques météorologiques locales et présentées dans le chapitre 6 : hivernale (novembre-février) ou printanière (mars-mai). Pour vérifier que la variabilité des volumes ou de la météorologie varie en fonction de la saison, et donc des conditions météorologiques et nivologiques dominantes, des analyses de la variance (ANOVA) ont été effectuées pour évaluer la significativité de la partition en deux sous-échantillons considérant les dépôts hivernaux et printaniers.

Lors de l'étude des relations entre les volumes des dépôts et les caractéristiques morphologiques des couloirs, l'échelle spatiale privilégiée est celle du couloir. Les cumuls des volumes des dépôts de chaque couloir ont donc été moyennés

par année et par saison sur la période 2003-2017. Les variables géomorphologiques de chaque couloir sont préalablement calculées via un SIG depuis un MNT métrique. Ces variables caractérisent deux éléments du couloir : le chemin supposé préférentiel d'écoulement (CSPE) de l'avalanche au sein du couloir décrit par des variables calculées sur un linéaire, et le couloir lui-même décrit par des variables calculées sur l'ensemble de la surface du couloir. Afin de mieux identifier les liens entre les variables des couloirs et les volumes des dépôts au sein d'un massif, les couloirs sont également regroupés selon des caractéristiques géomorphologiques communes (pente, altitude, orientation etc...) ou selon l'importance de leur activité avalancheuse moyenne. Pour évaluer la significativité de la partition en deux sous-échantillons considérant l'importance de l'activité moyenne des couloirs entre les couloirs avec une fréquence de déclenchement élevée (avec deux ou plus de deux événements par an) et les couloirs avec une fréquence de déclenchement faible (avec moins de deux événements par an), des analyses de la variance ont également été effectuées.

Lors de l'étude des relations entre les volumes des dépôts et les conditions météorologiques ou nivologiques, les volumes des dépôts et les covariables sont donc moyennés annuellement en fonction de la saison considérée : hivernale (novembre-février) ou printanière (mars-mai). Lorsque les deux terrains d'études sont simultanément considérés, des moyennes pondérées en fonction de l'activité avalancheuse de chaque terrain sont utilisées afin de considérer les différences dans le nombre de dépôts enregistré entre les deux zones. Pour combiner les données de volume avec les variables météorologiques et nivologiques des deux zones, des moyennes multi zones, dérivées des moyennes locales propre à chaque massif considéré, ont été évaluées pour les deux saisons. Comme les différences d'activité avalancheuse entre les deux zones sont importantes (cf. Chapitre 6), des analyses ont été effectuées en utilisant la moyenne saisonnière pondérée des volumes des dépôts et des variables météorologiques et nivologiques propres aux périodes considérées pour traiter les disparités régionales selon la formule suivante :

$$\overline{X}_{\omega}^t = \omega_{HM}^t X_{HM}^t + \omega_{GV}^t X_{GV}^t$$

$$\text{avec} \begin{cases} \omega_{HM}^t = \frac{N_{HM}^t}{N_{HM}^t + N_{GV}^t} \\ \omega_{GV}^t = \frac{N_{GV}^t}{N_{HM}^t + N_{GV}^t} = 1 - \omega_{HM}^t \end{cases}$$

X_{HM}^t et X_{GV}^t sont les volumes de dépôts moyens ou la moyenne de l'une des covariables considérées pour respectivement, l'année t dans la vallée de la Haute-Maurienne et l'année t dans la vallée du Guil. N_{HM}^t et N_{GV}^t sont le nombre de volumes de dépôts de l'année pour respectivement, la vallée de la Haute-Maurienne et la vallée du Guil. Les résultats issus de l'utilisation de la pondération de volumes des dépôts selon l'activité avalancheuse locale peuvent être retrouvés dans le chapitre 7.

5.3.2 Traitements statistiques

L'influence des variables morphologiques des couloirs, météorologiques et nivologiques sur les volumes des dépôts a été testée en utilisant des modèles linéaires et des réseaux de neurones. Ces traitements sont ici brièvement présentés, leur méthode d'application est présentée au sein de chaque article scientifique composant la partie résultats et l'approche globale représentée dans la figure 15. Les résultats découlant de l'utilisation de modèles linéaires peuvent être retrouvés au sein des chapitres 10 et 11. Les résultats issus de l'utilisation de réseaux de neurones sont présentés dans le chapitre 10.

Une analyse d'exploration de l'influence des variables morphologiques des couloirs sur les volumes des dépôts a été opérée en utilisant des corrélations bivariées. Nous avons calculé des corrélations de Spearman entre chaque variable descriptive de la morphologie des couloirs et les données des volumes des dépôts. Une table de corrélation (Saporta, 1990) permet de constater que, dans le cadre de l'étude des dépôts de 46 couloirs d'avalanches, la relation est significative sur un seuil de 5% si le coefficient de spearman est inférieur à -0,3 ou supérieur à 0,3. Cette

méthode a été utilisée dans cette étude, car elle est recommandée pour des distributions dissymétriques avec la présence de valeurs extrêmes.

Des régressions linéaires pas à pas (stepwise) ont été menées afin de déterminer la combinaison de variables morphologiques ou météorologiques et nivologiques qui explique le mieux la variabilité des volumes moyens des dépôts à plusieurs échelles temporelles (annuel, hiver et printemps). Avec une procédure pas à pas, l'ensemble des variables prédictives retenues est sélectionné par une séquence automatique de tests F de Fisher. Le modèle part d'un modèle initial nul sans covariable et compare ensuite le pouvoir explicatif des modèles de plus en plus incluant ou excluant. Cette méthode combine donc la sélection par ajout et suppression progressive de variables sur la base de la valeur p de la statistique F. Nous avons utilisé les seuils de probabilité classiques de 0,05 pour l'ajout de variables et de 0,01 pour la suppression. Cependant, une présélection des variables a été effectuée avant d'exécuter la régression linéaire pas à pas. Cela a été fait pour éviter trop de redondance dans les prédicteurs potentiels, ce qui peut conduire à des masques et à des instabilités numériques pendant la sélection pas à pas. Dans ce but, la corrélation de Pearson ρ a été calculée entre toutes les paires de variables morphologiques. Parmi les variables fortement corrélées ($\rho > 0,8$ et $P < 0,001$), nous n'avons conservé comme prédicteur potentiel que celles présentant la corrélation marginale la plus élevée avec les volumes de dépôts.

Par ailleurs, afin de prendre en compte des relations potentiellement non linéaires entre les variables morphologiques des couloirs et les volumes des dépôts, des modèles de réseaux neuronaux, plus flexibles que les régressions pas à pas, ont été développés. Des réseaux neuronaux standards à trois couches et des réseaux avancés à huit couches (apprentissage profond) ont été utilisés. Les modèles ont été entraînés en utilisant 70% des données sélectionnées aléatoirement à partir des échantillons analysés avec l'algorithme de Levenberg-Marquardt (Moré, 1978). La validation des modèles a été effectuée avec 15% des données utilisées, et les tests des modèles ont été effectués avec les 15% restants des données. Cette approche typique de l'apprentissage automatique permet à la fois d'améliorer progressivement le modèle grâce à des validations croisées et de limiter le sur-ajustement. Pour tenir compte de la variabilité des relations obtenues, 100 itérations boot-strap ont été

réalisées, en faisant varier la partition des données en sous-échantillons d'étalonnage, de validation et de test et les conditions initiales pour l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

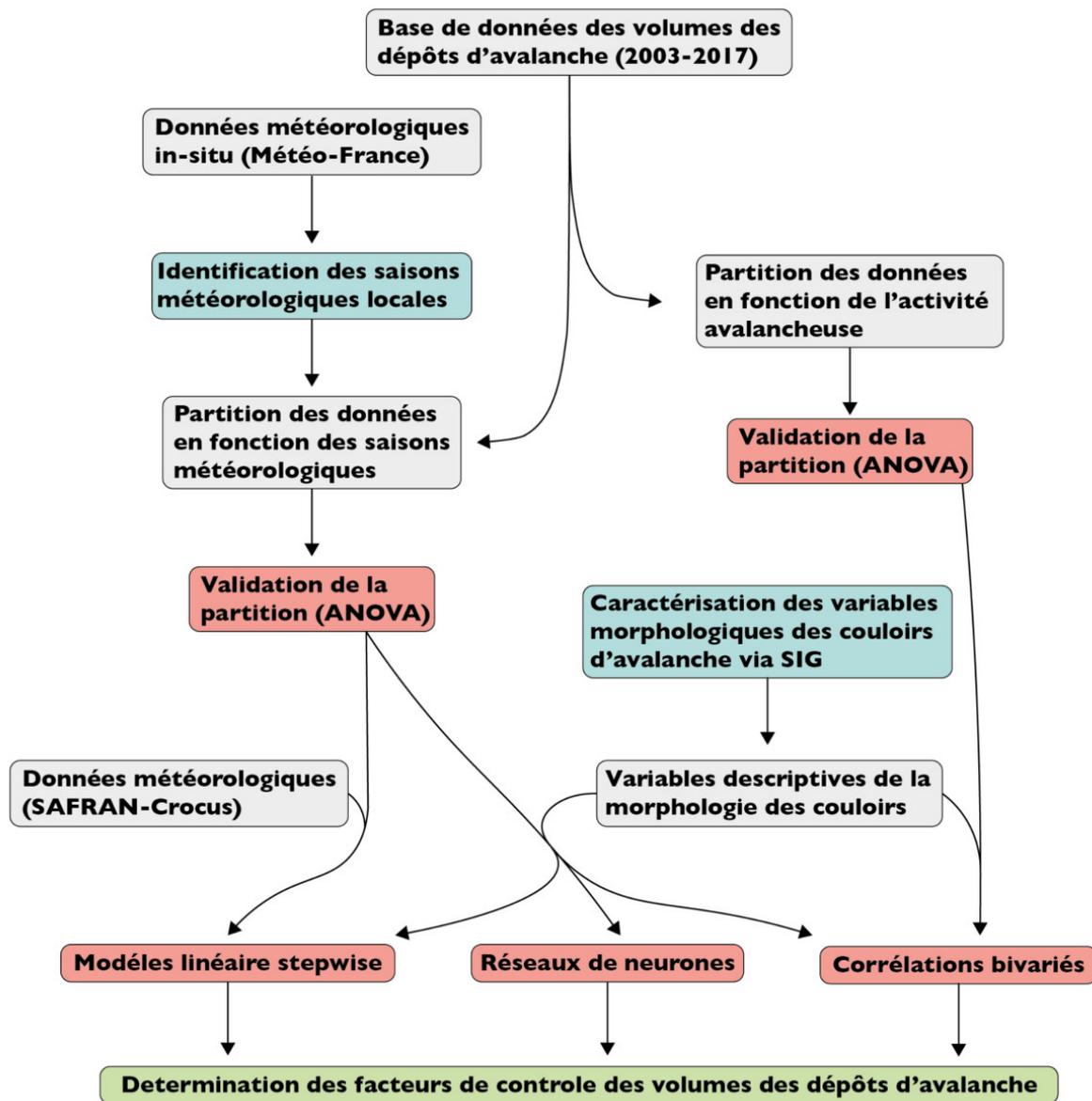


Figure 15 : Schéma récapitulatif de la méthodologie mise en oeuvre pour la détermination des facteurs de contrôle des volumes des dépôts d'avalanches

Partie III : Présentation des terrains d'étude

La présentation du cadre géographique est premièrement consacrée à la description du contexte physique du principal terrain d'étude de cette recherche doctorale, à savoir le massif de la vallée de la Haute-Maurienne. Dans un second temps, le contexte physique de la vallée du Guil, le massif du Queyras, propre aux résultats présentés dans le chapitre 9, sera présenté. Bien que ces deux massifs fassent déjà l'objet d'une brève description contextuelle dans les différents chapitres de ce travail, leur cadre géographique est abordé ici de manière plus approfondie. L'accent est mis sur la présentation du contexte physique, de la géomorphologie et du climat de ces massifs, directement en lien avec l'activité avalancheuse, mais aussi des particularités du réseau routier, directement menacé par les avalanches.

Chapitre 6 : Zones d'étude : spécificités des terrain et activité avalancheuse

6.1 Vallée de la Haute Maurienne

6.1.1 Présentation du terrain d'étude

Le massif de la Haute-Maurienne, situé en Savoie, correspond à la partie amont du bassin versant de l'Arc, rivière torrentielle à forte pente qui prend sa source à proximité du col de l'Iseran et de la frontière italienne et qui se jette dans l'Isère 127 kilomètres en aval. Selon la délimitation du massif utilisé par Météo-France, le massif comprend une quinzaine de communes sur une surface de 29000 hectares. Cependant, le terrain considéré dans cette thèse, appelé "vallée de la Haute-Maurienne", se limite dans les faits aux trois communes situées dans la partie amont de la vallée de l'Arc : Lanslevillard, Bessans et Bonneval-sur-Arc.

D'un point de vue géologique, le massif est essentiellement constitué de roches cristallines issues du « *Domaine briançonnais* » comme le granite. La vallée présente une orientation ouest-sud-ouest et est marquée par une topographie typique des vallées glaciaires héritées des glaciations du Quaternaire. La vallée, en auge, comprend de nombreux cirques glaciaires et l'inclinaison des versants dépasse régulièrement 30°, favorisant la présence de nombreux couloirs d'avalanches. Le fond de vallée est situé à une altitude comprise entre 1500 et 1800 mètres et le point culminant du massif atteint 3752 mètres d'altitude au niveau de la Pointe de Charbonnel. "La cuvette de Bessans" est une des particularités géomorphologiques de la vallée de la Haute-Maurienne. Cette cuvette, peu affectée par les avalanches en son centre, s'étend sur 9 kilomètres de longueur, du Rocher du Château au col de la Madeleine, et forme une large plaine alluviale, de plus de 1000 mètres de large au niveau du village de Bessans. Cette cuvette est subdivisée en plusieurs niveaux de terrasses formées par des sédiments d'origines lacustres, glaciaires et gravitaires (Hugonin, 1988). En amont de cette cuvette, la vallée se resserre fortement, au niveau du village de Bonneval-sur-Arc où le fond plat de la vallée ne mesure plus qu'une

cinquantaine de mètres de large. Les deux versants situés au-dessus de ce resserrement topographique sont particulièrement pentus, de ce fait cette zone enregistre un grand nombre d'avalanches qui atteignent le lit de la rivière et plus rarement le versant opposé.

Concernant la végétation, on trouve des pins sylvestres sur les versants adrets et des pins à crochets sur les versants ubac dans la partie basse des versants. On notera que bien souvent, soit l'ensemble du couloir est localisé en dehors des zones forestières, soit les zones d'accumulation et de départ se situent à l'amont des zones forestières. Il est donc rare que la forêt soit en mesure de constituer un ancrage pour le manteau neigeux ou bien d'empêcher la propagation des avalanches.

L'histoire et l'implantation humaine de la vallée de la Haute-Maurienne sont liées à sa situation permettant le passage entre la France et l'Italie. Si les communes de la vallée sont faiblement peuplées (469 habitants pour Lanslevillard, 343 pour Bessans et 231 pour Bonneval en 2014 d'après les relevés de l'INSEE) le tourisme y est particulièrement développé. En effet, une partie du Parc national de la Vanoise est englobée dans le massif de la Haute-Maurienne et en termes d'aménagement du territoire on peut noter la présence des stations de ski de Bonneval-sur-Arc, Bessans et Val Cenis. La commune de Bessans dispose également d'un important domaine de ski nordique. Le domaine recense plus de 130 kilomètres de pistes de ski de fond, localisés en fond de vallée, essentiellement au niveau de la cuvette de Bessans. Les portions de pistes situées en bas de versant sont particulièrement exposées aux avalanches. Le développement de l'activité touristique a entraîné la multiplication du bâti et des infrastructures. Le réseau routier est essentiellement constitué de la route départementale RD 902 qui remonte la vallée depuis Lanslebourg en alternance entre les deux rives de l'Arc jusqu'au col de l'Iseran en direction de la vallée de l'Isère. La section de la RD 902 entre Bonneval sur Arc et le col de l'Iseran est coupée à la circulation tous les hivers. La desserte de la partie amont du massif de la Haute-Maurienne n'est alors plus que possible par la RD 902 en remontant la vallée de l'Arc.

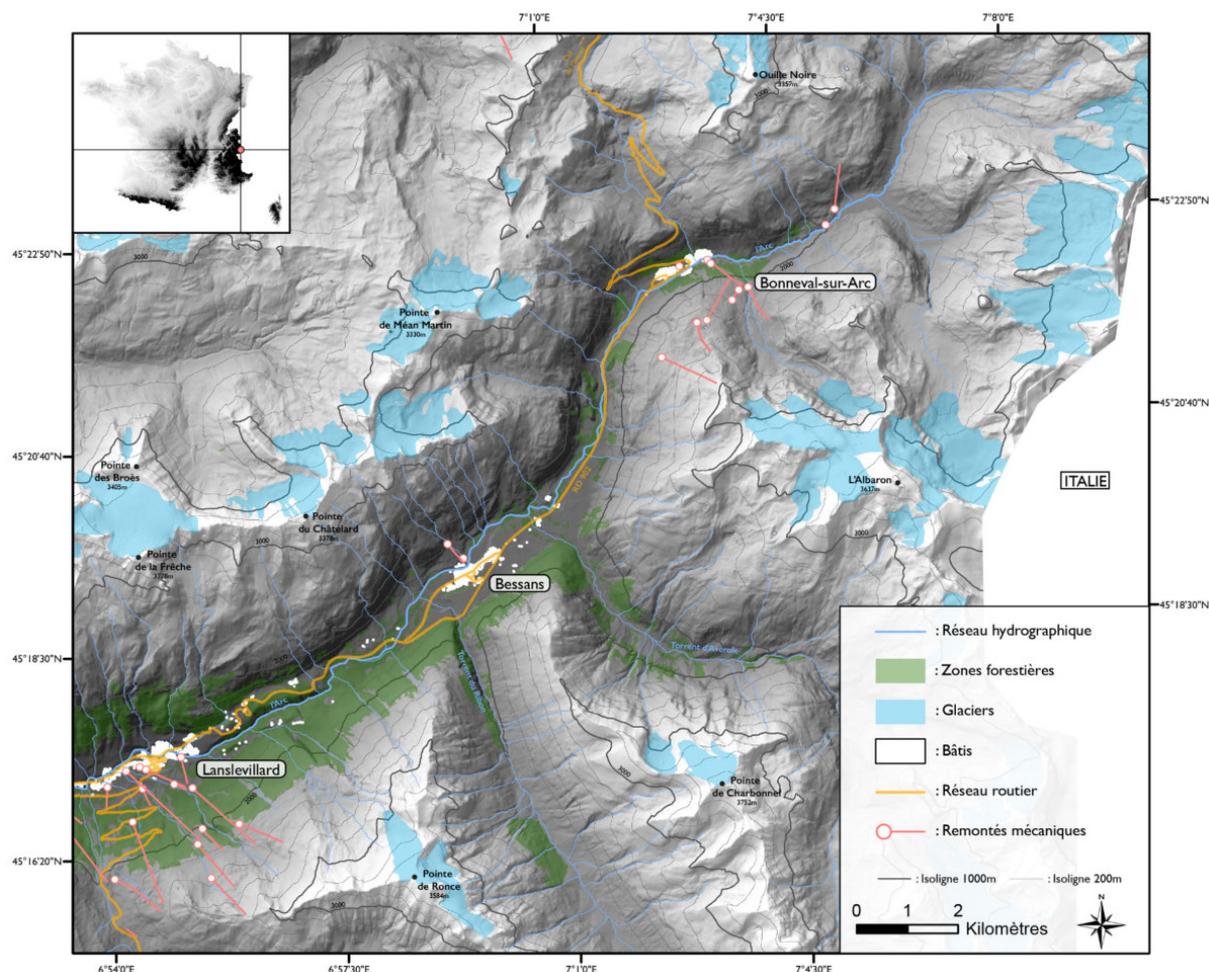


Figure 16 : Carte de localisation et de présentation du massif de la Haute-Maurienne

6.1.2 Météorologie propre à la période d'activité avalancheuse (novembre-mai)

La vallée de la Haute-Maurienne, de par sa position géographique et son altitude élevée, connaît un fort enneigement et des températures froides, favorables à une forte probabilité de déclenchement d'avalanches. Le massif possède un enneigement moins important et plus incertain que certains autres massifs alpins du fait que l'enneigement est partiellement conditionné par des situations météorologiques particulières appelées "retour d'Est". Il s'agit de courants atmosphériques de sud-est qui entraînent de fortes précipitations souvent accompagnées du vent dit "de Lombarde", parfois violent sur les crêtes et cols frontaliers avec l'Italie. C'est par ce type de circulation atmosphérique que le massif de la Haute-Maurienne connaît ses plus importantes précipitations, parfois durant deux à trois jours consécutivement. C'est dans ces situations que les cumuls de neige

fraîche en 24 h peuvent atteindre des valeurs exceptionnelles, qui sont plus rares dans les autres massifs (par exemple 180 cm à Bonneval-sur-Arc en avril 1969 ou 78 cm en février 2002 à Bonneval-sur-Arc). Le massif connaît régulièrement un meilleur enneigement que les autres massifs savoyards en début de saison (octobre/novembre), ainsi qu'au printemps (avril/mai), à cause de la survenue de ce phénomène plus fréquent durant ces deux périodes, et de l'excellente préservation de l'enneigement dans la cuvette de Bessans du fait de son altitude élevée et de phénomènes thermiques liés à sa topographie particulière." (CLPA, 2016a).

Plus précisément, une étude approfondie des données météorologiques de la période 2003-2017, période principalement considérée dans ce travail de thèse, a mis en avant l'existence de deux saisons météorologiques propices aux phénomènes avalancheux avec des conditions météorologiques et des caractéristiques de manteau neigeux distinctes. La saison « d'hiver » s'étend de novembre à février et la saison de « printemps » s'étend de mars à mai. Les moyennes saisonnières annuelles présentées dans la figure XX, issues des données de réanalyses de Météo-France (présentées dans la partie 5.2.2 du manuscrit) permettent de dresser les caractéristiques météorologiques globales des deux saisons pour la période 2003-2017.

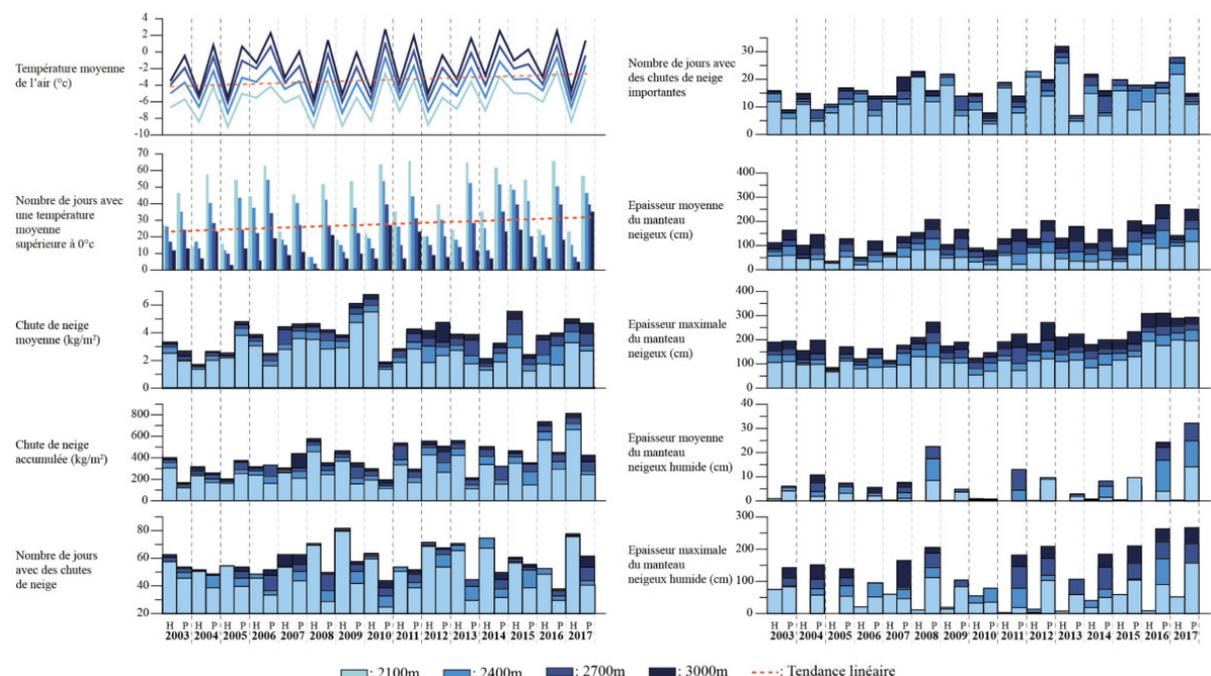


Figure 17 : Conditions météorologiques et nivologiques moyennes pour l'hiver (H) et le printemps (P) entre 2003 et 2017 dans le massif de la Haute-Maurienne : température moyenne de l'air (la tendance linéaire est de +0,12°C par an, $R^2 = 0,04$, évalués à une altitude de 2400 m), nombre de jours avec une température supérieure à 0°C (la tendance linéaire est de +0,6 jour par an, $R^2 = 0,03$, évalués à une altitude de 2400 m), chute de neige moyenne, chute de neige accumulée, nombre de jours avec des chutes de neige, nombre de jours avec des chutes de neige importantes, épaisseur moyenne du manteau neigeux, épaisseur maximale du manteau neigeux, épaisseur moyenne du manteau neigeux humide et épaisseur maximale du manteau neigeux humide.

On observe une forte variabilité de la température de l'air durant la saison hivernale (température moyenne de -2°C à 2400m en 2005 et -6,5°C en 2008) alors qu'elle est plus stable au printemps. Cependant, la température de l'air au printemps alterne fréquemment entre des valeurs positives et négatives. De plus, l'isotherme 0°C atteint régulièrement les 3000m, les 35 jours avec une température supérieure à 0° au sein d'un même printemps sont régulièrement dépassés. Sur la période 2003-2017 on constate une augmentation de la température moyenne de l'air (+0,12°C par an à 2400m) et du nombre de jours avec une température supérieure à 0°C (+0,6 jour par an à 2400m).

On observe également une forte variabilité des précipitations neigeuses. On relève les chutes de neige cumulées les plus importantes en hiver (jusqu'à 800 kg/m² en 2017), ce qui s'explique en partie par la fréquence de jours avec des précipitations neigeuses élevées (jusqu'à 80 en 2009 et 2017). Les précipitations neigeuses printanières ne sont pas aussi régulières et les chutes de neige accumulées dépassent rarement 400 kg/m². On observe pour les deux saisons de fortes variations en dessous de 2400m puisque ces altitudes sont plus souvent affectées par des variations de l'isotherme 0°C que pour des altitudes plus élevées (ici 2700 et 3000 m).

Du fait des importantes précipitations neigeuses, le manteau neigeux est généralement épais et caractérisé par une forte variabilité interannuelle et inter-saisonnière. Les années 2016 et 2017 enregistrent des épaisseurs maximales de neige élevées pour les deux saisons (>250 cm) alors que 2009 enregistre une épaisseur maximale de neige particulièrement faible (<150 cm). En hiver, le manteau neigeux augmente généralement tout au long de la saison, entrecoupé de courts épisodes de fonte. Le manteau neigeux présente une faible présence d'humidification qui ne dépasse pas les 70 cm. Le manteau neigeux printanier se caractérise par deux phases distinctes : une première phase durant laquelle l'épaisseur du manteau

neigeux augmente continuellement et une phase ultérieure caractérisée par une réduction de l'épaisseur due à sa fonte. De ce fait, on constate régulièrement d'importantes épaisseurs de manteau neigeux humide (> 200 cm).

6.1.3 Activité avalancheuse

L'activité avalancheuse de la vallée de la Haute-Maurienne est importante. Elle l'est plus particulièrement dans les communes de Bessans et Bonneval-sur-Arc. Eckert et al (2010c) relève une fréquence avalancheuse moyenne à l'échelle communale supérieure à 0,6 avalanche par couloir sur la période 1946-2005, contre une moyenne de 0,368 événement par site et par an à l'échelle des Alpes du Nord. La vallée recense 77 couloirs EPA. Sur la période 2003-2017, l'EPA enregistre 1456 avalanches dont les volumes des dépôts sont décrits. Le nombre moyen d'avalanches par an et par couloir EPA est de 1,35 avalanches, confirmant la forte activité avalancheuse locale sur la période 2003-2017. Les couloirs EPA sont principalement localisés sur les versants en amont des villages ou de la route départementale. Du fait de l'orientation de la vallée, la plupart des couloirs présente une orientation sud ou nord-ouest. La surface moyenne des couloirs est de 39 hectares et atteint au maximum 172 hectares, les dénivelés peuvent être particulièrement élevés, dépassant les 1800 mètres. Les couloirs EPA présentent une pente moyenne de 39° et sont souvent caractérisés par la présence de parois rocheuses approchant les 90°.

Le réseau routier est implanté en fond de vallée, régulièrement placé directement en contrebas des versants, et est donc particulièrement vulnérable. La connexion de la RD 902 en fond de vallée avec la vallée de la Tarentaise étant fermée l'hiver, les coupures de route liées à des avalanches isolent régulièrement les villages du massif de la Haute-Maurienne. La section de la RD 902 entre Bessans et Bonneval constitue un point critique compte tenu de la situation de "cul-de-sac" de Bonneval. La RD 902 passe en rive gauche de l'Arc au niveau d'un resserrement topographique de la vallée et est régulièrement exposée aux avalanches du versant nord ainsi qu'aux avalanches, parfois gigantesques, du versant sud. Une des avalanches issues du versant sud a déjà déplacé en janvier 1981 le pont construit sur l'Arc, estimé à 400

tonnes. Du fait de l'implantation du bâti et de l'existence de système paravalanche installé autour des villages, le bâti n'est que peu exposé aux avalanches.

Cependant, plusieurs événements marquants ont touché la Haute-Maurienne ces dernières décennies. Le 24 février 1970 une vaste avalanche se déclenche dans le couloir EPA n°5 de Lanslevillard après d'importantes chutes de neige. Elle emprunte son trajet habituel, mais animée d'une grande vitesse, elle ne peut suivre la combe remplie de neige et se déporte vers l'est. Elle franchit alors un léger dôme pour emprunter le couloir n°205 et frappe la partie Est du hameau provoquant la mort de 8 personnes (Jail, 1970). En 2004, une avalanche issue du couloir EPA n°26 de Bessans a détruit le bâtiment du camping situé en fond de vallée. Enfin, début janvier 2017, après des chutes de neige exceptionnelles, une importante crue avalancheuse provoque de nombreuses coupures de routes le long de la RD 902, parfois sur plusieurs centaines de mètres (cf figure 6).

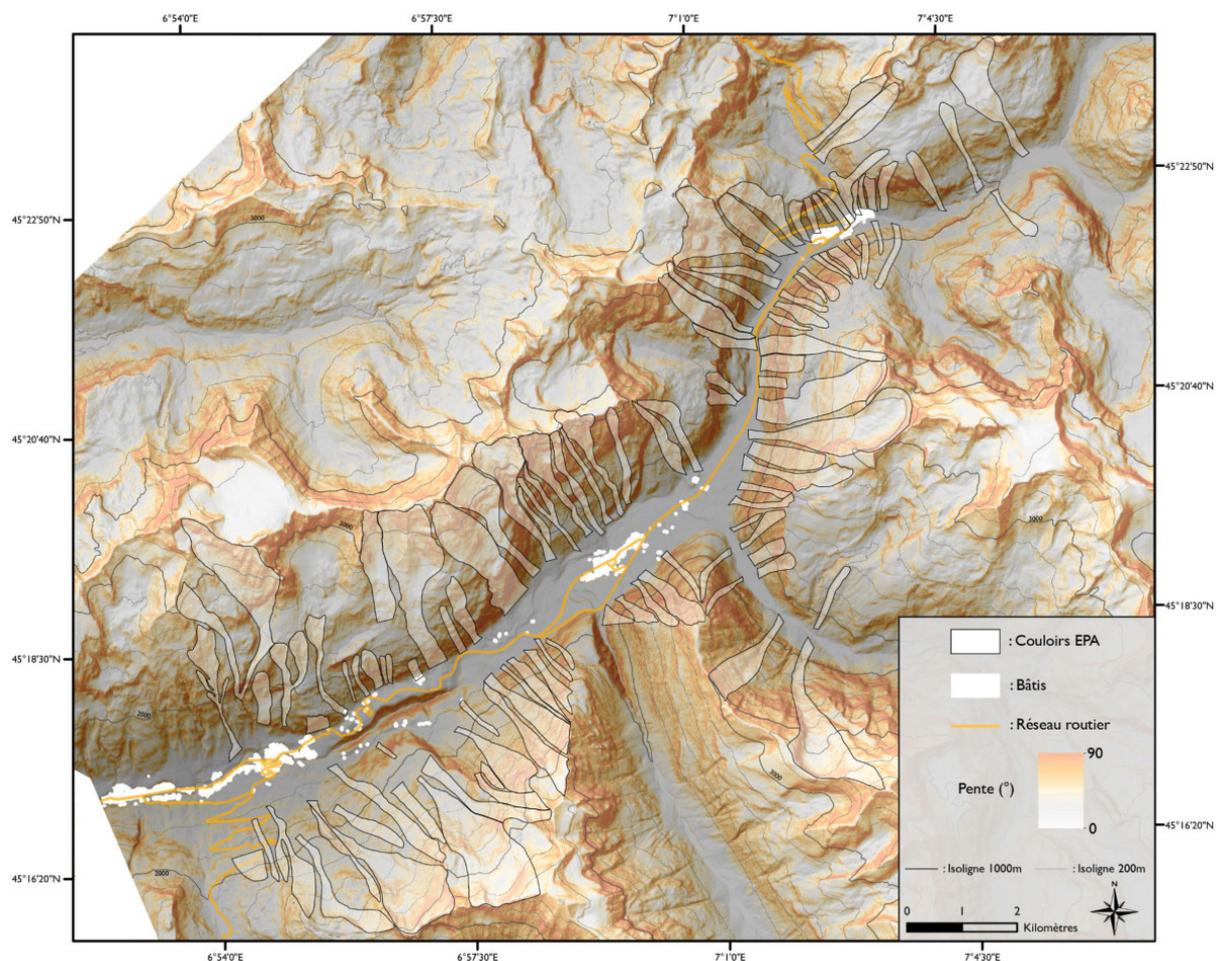


Figure 18 : Localisation des couloirs EPA du massif de la Haute-Maurienne et carte des pentes

6.2 Massif du Queyras

6.2.1 Présentation du terrain d'étude

Le massif du Queyras, situé dans les Hautes-Alpes, correspond principalement au bassin versant du Guil. Ce bassin versant présente un réseau hydrologique et topographique dendritique, avec notamment la présence du torrent de l'Izoard en rive droite et du Mélézet en rive gauche. La surface du massif est de 36000 hectares et comprend 14 communes, dont Ceillac et Saint-Véran.

Le Queyras, massif cristallin des Alpes occidentales, appartient à la zone interne ou pennique de la chaîne alpine. Dans le détail, il est constitué de deux zones géologiques différentes. L'Ouest du Queyras correspond à la zone Briançonnaise où

dominant des falaises calcaires et dolomitiques. L'est du Queyras correspond à la zone piémontaise caractérisée par la présence de roches sédimentaires métamorphisées et schisteuses appelées schistes lustrés. A l'image de l'ensemble de la chaîne alpine, le massif a été marqué par les glaciations de l'ère quaternaire. Aujourd'hui les glaciers ont disparu, il ne reste que quelques petits glaciers rocheux. On retrouve cependant de nombreux vestiges glaciaires comme des vastes systèmes morainiques. Les processus de versants y sont particulièrement forts, provoquant une forte production sédimentaire, formant un paysage typique du massif. Les mouvements de versants et les éboulements sont particulièrement présents du fait de la présence de roche tendre et argileuse et des versants adrets conformes au pendage des schistes ($\sim 30^\circ$), ce qui tend à favoriser les glissements translationnels le long des plans de schistosité. De ce fait, les versants adrets ont été nivelés pour former des pentes relativement modérées, de l'ordre de 30° alors que les versants ubacs sont beaucoup plus raides, avec des pentes moyennes comprises entre 45° et 50° , 70° à proximité des sommets. De ce fait, les vallées ont perdu le profil en auge pour acquérir des profils en V dissymétriques et on retrouve plus de couloirs d'avalanches sur les versants ubacs raides. Les héritages glaciaires modifient également les écoulements des avalanches. En effet, les systèmes morainiques dévient une partie des écoulements qui s'écoulent préférentiellement au niveau des faiblesses topographiques comme au sein des combes ou des tracés torrentiels.

Concernant la végétation, les versants adrets sont essentiellement recouverts de landes ou de pelouses, alors que les versants ubacs sont caractérisés par une forte présence de mélèzes et de quelques espèces de pins aux étages montagnard et subalpin. Le pourcentage de forêt est passé de 30 % en 1855 à 44,1% en 2017 (Zgheib et al., 2022). Sur les versants forestiers, les avalanches sont généralement limitées au talweg. La présence de la forêt participe à la stabilisation du manteau neigeux dans les zones de départ forestières, des avalanches peuvent cependant se déclencher à plus haute altitude, dans l'étage subalpin ou dans l'étage alpin, sans être perturbées par la forêt en contrebas pour ce qui est des mécanismes de déclenchement.

Les 14 communes présentes dans le Queyras sont rassemblées dans la communauté de communes du Guillestrois et du Queyras qui recense en 2019 une

population de 7968 habitants, dont 2312 dans la commune de Guillestre. En termes d'aménagement du territoire, notons la présence de stations de ski alpin et nordique dans les communes d'Abriès, Arvieux, Ceillac, Molines et Saint Véran. La majeure partie du Parc Naturel Régional du Queyras est incluse dans le massif du Queyras. Le réseau routier est vaste et réparti de manière arborescente entre les différentes vallées du massif. L'axe principal, la RD 902 puis la RD 947, remonte la vallée du Guil en desservant 5 communes et finit en cul de sac en amont de Ristolas. La RD 60 dessert Ceillac, la RD 5 dessert Moline en Queyras et Saint-Véran. Il existe également un important réseau secondaire qui dessert l'ensemble des hameaux situés sur les versants.

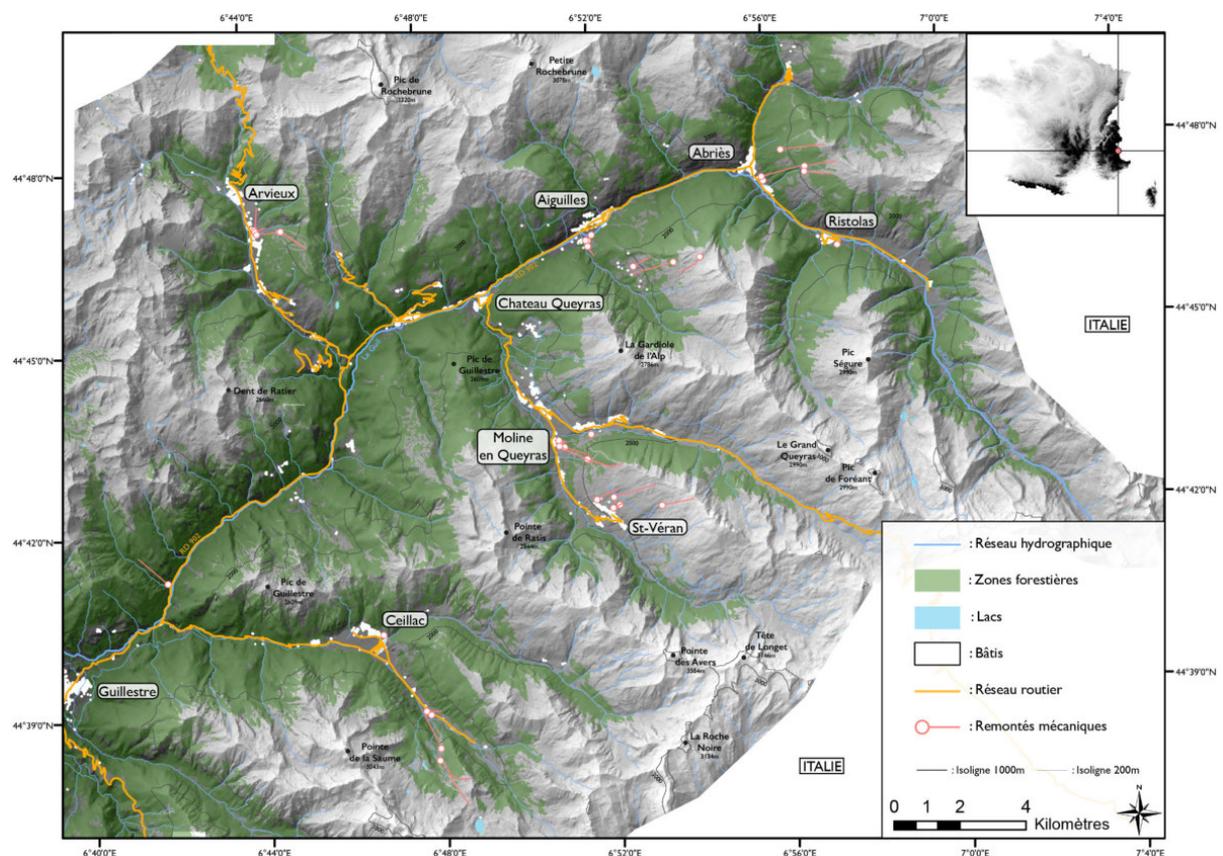


Figure 19 : Carte de localisation et de présentation du massif du Queyras

6.2.2 Météorologie propre à la période d'activité avalancheuse (novembre-mai)

Le climat du massif Queyras est marqué par un fort ensoleillement et un enneigement caractérisé par une forte variabilité inter-annuelle. Le massif montagneux des Ecrins faisant écran aux perturbations d'origine atlantique, l'essentiel

de l'enneigement du massif du Queyras est dépendant de l'occurrence de "retours d'est", qui peuvent apporter de grandes quantités de neige en peu de jours. Les communes situées à l'est du massif recueillent plus de précipitations (Abriès, Ristolas). Ceillac, dans l'ouest du massif, connaît généralement des précipitations neigeuses deux fois moins intenses qu'à Abriès. La majorité des situations avalancheuses remarquables sont le fait de retours d'est (e.g : janvier 1978 : près de 4 mètres de neige en 48 heures, décembre 2008 : 2 mètres de neige en 24 heures). Il n'y a pas vraiment de période de l'hiver plus favorisée : l'arrivée d'un retour d'Est constitue généralement le pic d'enneigement annuel. Les nombreuses nuits claires et froides en hiver permettent en général une bonne conservation du manteau neigeux.

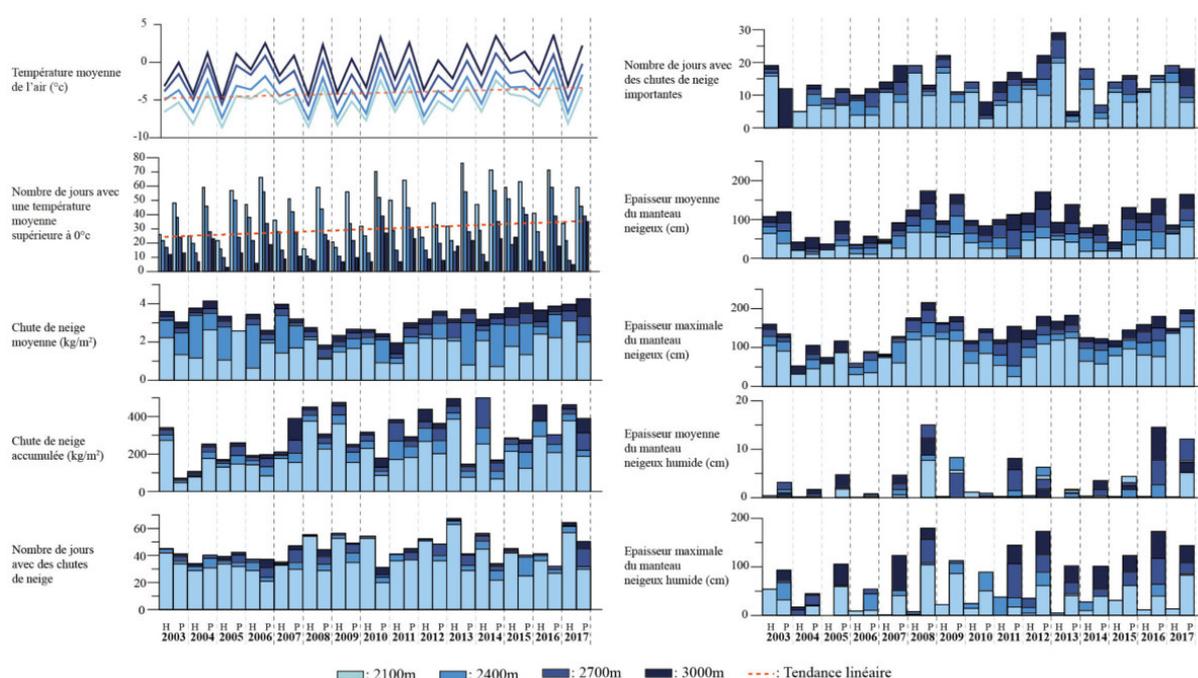


Figure 20 : Conditions météorologiques et nivologiques moyennes pour l'hiver (H) et le printemps (P) entre 2003 et 2017 dans le massif du Queyras : température moyenne de l'air (la tendance linéaire est de $+0,1^{\circ}\text{C}$ par an, $R2 = 0,02$, évalués à une altitude de 2400 m), nombre de jours avec une température supérieure à 0°C (la tendance linéaire est de $+0,7$ jour par an, $R2 = 0,07$, évalués à une altitude de 2400 m), chute de neige moyenne, chute de neige accumulée, nombre de jours avec des chutes de neige, nombre de jours avec des chutes de neige importantes, épaisseur moyenne du manteau neigeux, épaisseur maximale du manteau neigeux, épaisseur moyenne du manteau neigeux humide et épaisseur maximale du manteau neigeux humide.

Les données de réanalyses de Météo-France pour la période 2003-2017 permettent de dresser les caractéristiques météorologiques globales du massif du

Queyras pour les deux saisons météorologiques délimitées précédemment et d'identifier les principales différences avec le massif de la Haute-Maurienne.

On observe une forte variabilité de la température de l'air entre l'hiver et le printemps, sur la période considérée la température moyenne hivernale est de -4°C contre $-0,2^{\circ}\text{C}$ au printemps à 2400m. Parallèlement, on observe logiquement un nombre plus élevé de jours avec une température supérieure à 0°C au printemps. Les températures sont dans l'ensemble plus froides que pour le massif de la Haute-Maurienne. On constate une augmentation de la température moyenne de l'air ($+0,1^{\circ}\text{C}$ par an à 2400m) et du nombre de jours avec une température supérieure à 0°C ($+0,7$ jour par an à 2400m) dans des ordres de grandeur similaire au massif de la Haute-Maurienne.

Les précipitations neigeuses présentent une variabilité et une intensité moindre que dans le massif de la Haute-Maurienne. On constate notamment, contrairement au massif de la Haute-Maurienne, une faible différence entre les précipitations neigeuses printanières et hivernales (moyenne de $6,7 \text{ kg/m}^3$ en hiver contre $5,7 \text{ kg/m}^3$ au printemps à 2700m). Cependant, les chutes de neige cumulées sont plus variables, avec par exemple plus de 450 kg/m^3 à l'hiver 2014 et moins de 100 kg/m^3 au printemps 2004. Cette forte variabilité s'explique en partie par la présence de saisons marquées par une forte fréquence de jours avec des précipitations neigeuses importantes (supérieur à 25 en 2013). Ces fortes précipitations journalières sont souvent liées à l'occurrence de "retours d'Est".

L'épaisseur du manteau neigeux présente logiquement une variabilité intersaison importante, il est plus épais pendant la saison printanière. Toutefois, il présente une épaisseur moyenne et maximale plus faible que dans le massif de la Haute-Maurienne, dépassant rarement les 200 cm (printemps 2008 et printemps 2017). Plusieurs années présentent des épaisseurs de manteau neigeux particulièrement faibles, ne dépassant pas les 50 cm (2004, 2005 et 2007). Concernant l'évolution du manteau neigeux, on retrouve la même situation que dans le massif de la Haute-Maurienne : en hiver le manteau neigeux augmente et présente une faible présence d'humidification, puis, au printemps, le manteau neigeux continue d'augmenter et connaît des périodes de fonte augmentant son humidification.

6.2.3 activité avalancheuse

L'activité avalancheuse du massif du Queyras est importante, mais plus faible que dans le massif de la Haute-Maurienne. La vallée recense 86 couloirs EPA et l'EPA enregistre 442 avalanches dont les volumes des dépôts sont renseignés sur la période 2003-2017. Le nombre d'avalanches par couloir et par an sur cette période est de 0,36, très inférieur à la moyenne de la Haute-Maurienne.

Les couloirs EPA du massif du Queyras sont localisés en amont du réseau routier. Les orientations des couloirs sont variées, mais on note une surreprésentation des couloirs exposés nord et nord-est. La surface moyenne des couloirs est similaire à celle de la Haute-Maurienne avec 43 hectares, cependant les dénivelés sont faibles et ne dépassent pas les 1300 mètres. Les couloirs présentent une pente moyenne de 29°, plus faible que dans le massif de la Haute-Maurienne. Le massif du Queyras est un terrain d'étude privilégié pour la reconstruction de l'activité avalancheuse depuis des études dendrochronologiques (e.g de Bouchard d'Aubeterre et al., 2019 ; Manieri et al., 2020) avec notamment la plus longue chronologie avalancheuse existante actuellement au monde, pour le couloir de l'Echalp (Corona et al., 2013).

Le vaste réseau routier arborescent du massif du Queyras, réparti entre les différentes vallées composant le massif, est particulièrement exposé aux avalanches (Leone et al, 2014). Les différents villages localisés dans les vallées sont régulièrement isolés par des coupures de routes provoquées par des avalanches. Le bâti est également particulièrement exposé. On retrouve dans les archives de nombreux événements ayant entraîné des dégâts considérables. On peut notamment citer l'avalanche du 7 janvier 1681 qui détruit 57 maisons du hameau des Granges à Abriès, tuant 11 personnes, celle du 18 janvier 1885 à Ristolas qui détruit 3 maisons et entraîne la mort de 8 personnes ou bien celle du 2 mars 1993 qui endommage plusieurs chalets dans la commune de Molines. Plus récemment on note la présence de plusieurs situations nivo-météorologiques remarquables. Du 14 au 17 décembre 2008, un épisode de « retour d'Est » remarquablement actif entraîne des cumuls de neige fraîche extrêmement importants sur le massif. S'ensuit une activité avalancheuse exceptionnelle avec de nombreuses avalanches de grande ampleur (Eckert et al., 2010f). Les villages et hameaux d'Abriès et de Ristolas, au nord-est du

massif, sont totalement isolés, avec routes, réseaux électriques et téléphoniques coupés. Des habitations sont également touchées à Abriès et Ristolas. En décembre 2011, une forte activité avalancheuse isole plusieurs hameaux et détruit plusieurs chalets d'alpage. En mars 2013, un flux de sud-ouest entraîne de fortes chutes de neige et une importante activité avalancheuse, la RD 902 est coupée en différents lieux le long de la vallée du Guil, isolant Aiguilles, Abriès et Ristolas.

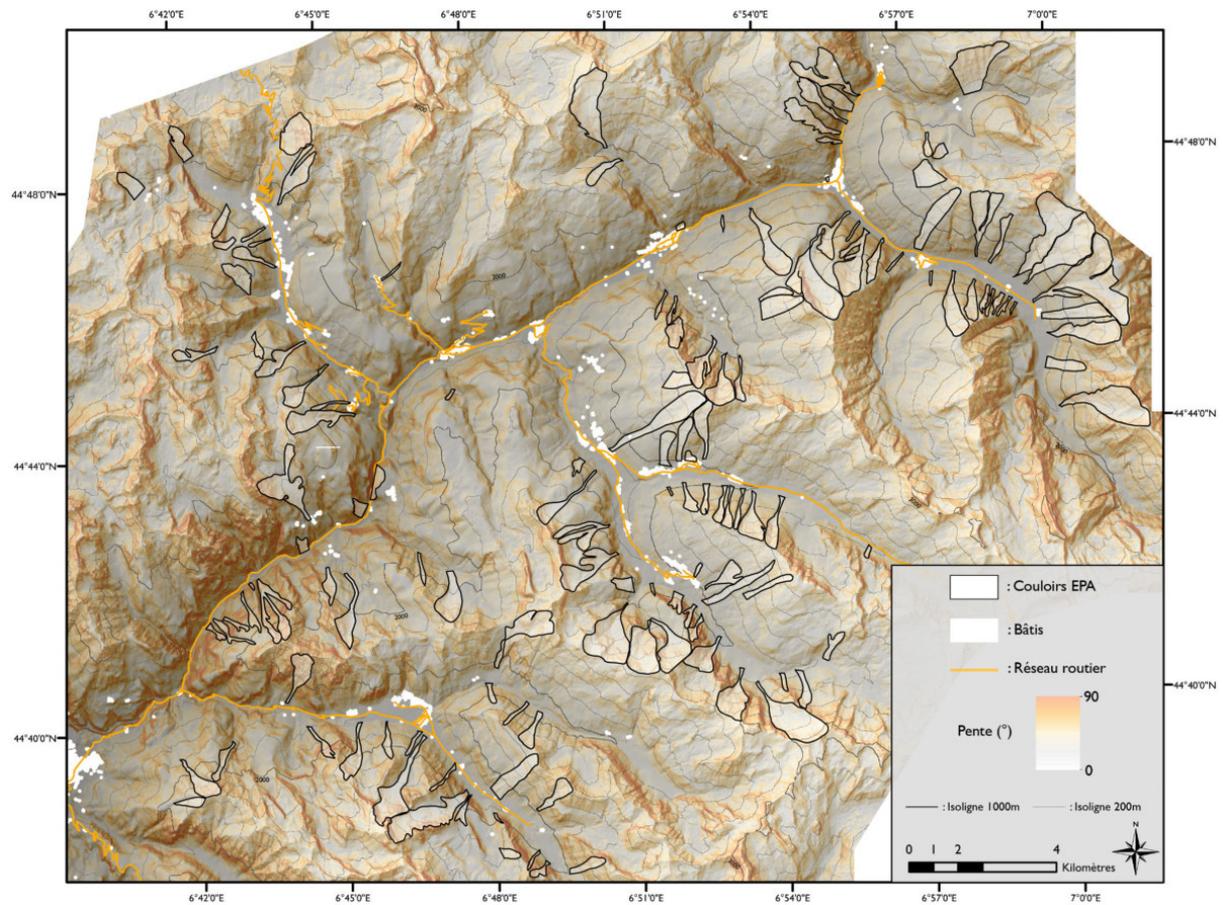


Figure 21 : Localisation des couloirs EPA du massif du Queyras et carte des pentes

Partie IV Résultats

Chapitre 7 : Caractéristiques géométriques, stratigraphiques et granulométriques des dépôts d'avalanches

Les caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches présentent une grande diversité et leurs variables de contrôle sont mal connues. Pour apporter de nouvelles connaissances sur les caractéristiques des dépôts, deux dépôts d'avalanches avec des caractéristiques d'écoulement différentes ont été investigués. Ce chapitre se concentre sur la caractérisation *in-situ* de la géométrie des dépôts, de la granulométrie des agrégats de surface, de la masse volumique et de la porosité des couches internes du dépôt ainsi que de la puissance érosive de l'écoulement avalancheux. Ces résultats sont ensuite discutés en regard des connaissances sur la dynamique avalancheuse et des types d'écoulement associé aux dépôts.

Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article scientifique non soumis, néanmoins, il est ici présenté sous sa forme définitive. Ce chapitre s'appuie des missions de terrains réalisées sur des dépôts d'avalanches uniquement localisés dans la vallée de la Haute-Maurienne. Deux missions de terrain ont été organisées pour réaliser des mesures nivologiques et volumétriques sur deux dépôts d'avalanches. L'équipe ayant participé à l'ensemble des missions est constituée de Michael Deschatres (ingénieur d'étude, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE), Emmanuel Thibert (ingénieur de recherche, INRAE), Sylvain Pech (ingénieur d'étude, INRAE) et moi-même. Durant les deux missions principales de terrain l'équipe était en plus constitué de Vincent Jomelli (Directeur de Recherche au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement (CEREGE) et anciennement au laboratoire de Géographie Physique (LGP), CNRS – Université Paris 1), Julien CAVERO (ingénieur de recherche, anciennement LGP-CNRS), Claude Legentil (ingénieur d'étude, LGP-CNRS). Enfin, j'ai rédigé et mis en forme le texte principal, les figures et les tableaux, tout en étant en contact avec les co-auteurs pour améliorer la discussion autour des résultats.

7. Etude *in-situ* de caractéristiques volumétriques et nivologiques des dépôts d'avalanches : méthodologie et premiers résultats

Hippolyte Kern^{*a}, Vincent Jomelli^a, Nicolas Eckert^b, Michael Deschâtres^b, Emmanuel Thibert^b, Sylvain Pech^b, Julien Caverio^a, Thierry Faug^b

^aUniversité Paris 1 Panthéon-Sorbonne, LGP-CNRS – 1 place Aristide Briand, Meudon, France

^bINRAE, Université Grenoble Alpes, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France

Les dépôts d'avalanches présentent des dimensions, des formes, des caractéristiques nivologiques et des distributions granulométriques variables mais les processus et les paramètres physiques qui les contrôlent restent mal connus. L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthodologie d'analyse géométrique et nivologique des dépôts d'avalanches *in-situ* avec un protocole reproductible et d'analyser les résultats issus de premières mises en pratique. L'approche inclut la caractérisation de la forme du dépôt, de sa surface et enfin une analyse nivologique de profils verticaux.

Les investigations ont porté sur deux dépôts formés en février 2019 et en février 2020. Si les dates calendaires de relevés *in-situ* sont similaires, les conditions météorologiques et d'écoulement des deux avalanches qui les ont produits sont différentes, rendant leur comparaison informative. Les résultats montrent que les dépôts présentent des caractéristiques géométriques et nivologiques différentes, directement conditionnés par les conditions météorologiques et la composition du manteau neigeux initial. Le premier dépôt étudié est typique d'une avalanche de neige sèche caractérisée par un écoulement avec une forte énergie cinétique : des valeurs de masse volumique hétérogène avec une porosité variable, mais parfois très forte et une érosion importante du manteau neigeux initial. Le second dépôt est typique d'une avalanche de neige humide caractérisée par un écoulement avec une faible énergie cinétique : des valeurs de masse volumique élevées et homogènes, une forte présence d'agrégats avec une granulométrie variable et une absence d'érosion du manteau neigeux initial.

Ces résultats apportent des informations très détaillées sur les caractéristiques des dépôts d'avalanches, potentiellement précieuses pour la validation et la calibration des modèles numériques d'écoulement. Les résultats pourraient être renforcés par une multiplication des relevés et une optimisation de la méthodologie pour, *in fine*, établir des liens entre la dynamique des écoulements et les caractéristiques des dépôts.

7.1 Introduction

Les dépôts d'avalanches sont le résultat final de l'écoulement avalancheux. Ils présentent des volumes, des formes, des distributions granulométriques et des caractéristiques nivologiques internes variables. Ces différents éléments permettent la caractérisation des dépôts et sont considérés dans la présente étude.

Le volume du dépôt dépend i) de la masse de neige libérée lors du déclenchement additionnée à la masse de neige entraînée lors de l'écoulement de l'avalanche et, ii) de l'intensité de la compaction de la neige au sein du dépôt. Le potentiel érosif des avalanches, notamment de neige humide (Gardner, 1983 ; Jomelli et Bertran, 2001 ; Issler et al, 2008), peut causer une mobilisation importante de neige pendant l'écoulement. Ainsi le dépôt peut avoir un volume jusqu'à 10 fois supérieur à la masse de neige initialement mobilisée (Sovilla et al., 2006). En fonction de la forme du couloir d'avalanches, et, au sein d'un même couloir, du volume et du type de neige mobilisé ainsi que de la localisation du déclenchement et des zones d'érosion, le faciès et la morphologie du dépôt peuvent varier. La forme des dépôts d'avalanches est dépendante des types d'écoulement avalancheux (Voellmy, 1955 ; McClung et Schaerer, 2006). Récemment Kolher et al. (2018) ont développé une classification enrichie grâce à l'utilisation de radar Doppler (Brennan et al., 2009) et par l'identification de trois types de mécanismes d'arrêt des avalanches entraînant des formes des dépôts spécifiques dépendant de la température et de la teneur en eau liquide de la neige transportée. Les dépôts d'avalanches sont généralement constitués d'agrégats solides et parfois arrondis de particules de neige (Jomelli et Bertran, 2001 ; Bartlet et McArdell, 2009). Ces agrégats se forment lors de l'écoulement de l'avalanche (Naaïm et al., 2013 ; Steinkogler et al., 2014 ; Sovilla et Bartelt, 2002),

avec des dimensions variables (Bartlet et McArdell, 2009 ; Sovilla et al., 2010), et s'agglomèrent lors de la phase de mise en place du dépôt. Il en résulte un dépôt final de neige plus ou moins compacte et homogène avec une distribution granulométrique variable. La surface du dépôt est donc régulièrement composée d'un enchevêtrement d'agrégats cohésifs. Des études précédentes ont notamment mis en évidence que les avalanches de neige humide ont tendance à produire des agrégats avec des dimensions plus importantes (Kobayashi et al., 2000 ; Bartelt et McArdell, 2009 ; Steinkogler et al., 2014). Cependant, ces études n'ont pas renseigné les caractéristiques internes des dépôts, et notamment l'évolution des caractéristiques nivologiques selon un profil vertical.

A contrario, des études se sont concentrées sur les masses volumiques présentes au sein des dépôts d'avalanches en utilisant des méthodes de mesures différentes. Ces études ont rapporté des valeurs de masse volumique variables en fonction du type d'écoulement : entre 200 et 500 kg/m³ pour des avalanches de neige froide (Dent et al, 1998 ; Vallet et al, 2001 ; Issler et al 2019a ; Hao et al, 2021), entre 300 et 600 kg/m³ pour des avalanches de neige froide avec écoulement mixte (Sovilla et al, 2006 ; Issler et al, 2019b) et entre 400 et 700 kg/m³ pour des avalanches de neige humide (Mc Clung et Schaerer, 1985 ; Hao et al, 2021). D'autres études se sont penchées sur les masses volumiques internes des dépôts en effectuant des mesures à l'aide de puits de neige creusés à la main (Issler et al 2011, Issler et al 2018) pour étudier les mécanismes d'écoulement, démontrant notamment la présence de mécanismes de pression dispersive lors de l'écoulement, provoquant des zones de basse masse volumique à la base de certains dépôts d'avalanches. Un mécanisme déjà constaté dans de nombreuses expériences portant sur la dynamique des avalanches (Bartelt et al, 2007, Buser et Bartlet, 2011, Bartelt et Buser, 2016).

On observe donc une importante variabilité des éléments permettant une description et une caractérisation des dépôts. La compréhension des variables responsables des volumes, des formes, des distributions granulométriques et des caractéristiques nivologiques internes des dépôts d'avalanches est un sujet sur lequel de nombreuses lacunes perdurent. Si les variabilités des caractéristiques entre des dépôts issus de différents types d'écoulement ont commencé à être investiguées, la connaissance sur des variations au sein d'un même dépôt est faible. On peut

également noter l'absence de connaissance sur la variabilité et les facteurs de contrôle de la porosité des dépôts, c'est-à-dire du rapport du volume des vides au volume total. Ces absences de connaissance sur les dépôts d'avalanches sont d'autant plus surprenantes que les nombreux modèles numériques d'écoulement d'avalanches existant et/ou en développement nécessitent des connaissances approfondies sur les facteurs de contrôle des dépôts afin d'être validés et/ou calibrés pour, notamment, produire des emprises d'avalanches et des profils de pression réalistes. Ces derniers sont notamment primordiaux pour évaluer l'ampleur des dommages potentiels sur les bâtiments ou les infrastructures.

Dans ce travail, l'objectif est de présenter une méthodologie d'analyse géométrique et nivologique des dépôts in-situ avec un protocole reproductible. L'originalité de notre approche repose sur l'utilisation de différentes méthodes de terrain, dont des sondages nivologiques réalisés à l'aide d'un carottier de glaciologie qui permet d'obtenir un plus grand nombre de mesures qu'avec des puits de neige creusés à la main, méthode plus chronophage. Nous nous concentrons sur la caractérisation géométrique du dépôt, de la granulométrie des agrégats de surface, de la masse volumique et de la porosité des couches internes du dépôt ainsi que de la puissance érosive de l'écoulement avalancheux associé au dépôt. La méthodologie appliquée a pour but d'étudier les liens avec les types d'écoulement avalancheux associé aux dépôts. La méthodologie de relevés a été développée et mise en application dans le cadre de ce travail de recherche et elle a été ajustée progressivement à chaque séance de terrain.

L'analyse et la comparaison des résultats apportent des informations inédites concernant les mécanismes de mise en place des dépôts et les caractéristiques du manteau neigeux initial lié aux conditions météorologiques en fonction de deux grands types d'écoulement : de neige sèche et de neige humide.

7.2 Localisation et présentation des sites d'étude

Le terrain d'étude sélectionné pour effectuer une caractérisation des volumes, des formes, des distributions granulométriques et des caractéristiques nivologiques internes des dépôts d'avalanches est la partie amont de la vallée de la Maurienne

dans le département de la Savoie, dénommée Haute Maurienne ci-après. Cette dernière présente une topographie héritée de la glaciation quaternaire, une vallée glaciaire avec une orientation sud-ouest à nord-ouest, marquée par des versants à forte pente.

Le nombre important de couloirs associé à une forte activité avalancheuse fait de la Haute Maurienne un terrain particulièrement privilégié pour l'étude des phénomènes avalancheux (par ex., Ancey et al., 2004 ; Eckert et al., 2009 ; Favier et al., 2014 ; Zgheib et al, 2020 ; Kern et al, 2020 ; 2021 ; Viallon-Galinier et al., 2022). Concernant l'étude des dépôts d'avalanches, elle présente des conditions qui favorisent la préservation des dépôts dans le temps. En effet, les couloirs et les zones de dépôt y présentent des altitudes élevées en comparaison aux autres massifs alpins et l'orientation générale de la vallée favorise une faible altération thermique des dépôts. En outre, un grand nombre de couloirs d'avalanches y est suivi par l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) et par la (CLPA). Le système de l'EPA, inventaire des avalanches survenues sur environ 3 900 couloirs connus et délimités des Alpes et des Pyrénées, recense en 2022 plus de 100 000 avalanches (Deschatres et al., 2010 ; Bourova et al., 2016). La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanches (CLPA) est une cartographie systématique des emprises maximales des avalanches dans les Alpes et les Pyrénées. C'est une carte descriptive des phénomènes observés ou historiques qui a pour but d'informer sur l'existence de couloirs d'avalanches, représentés par leur enveloppe extrême. Les relevés effectués au cours de ce travail sont réalisés sur des dépôts les plus récents possibles, dans les jours suivants leur mise en place, limitant ainsi leur altération. Les investigations ont porté sur deux dépôts formés en février 2019 et en février 2020 (Fig. 22).

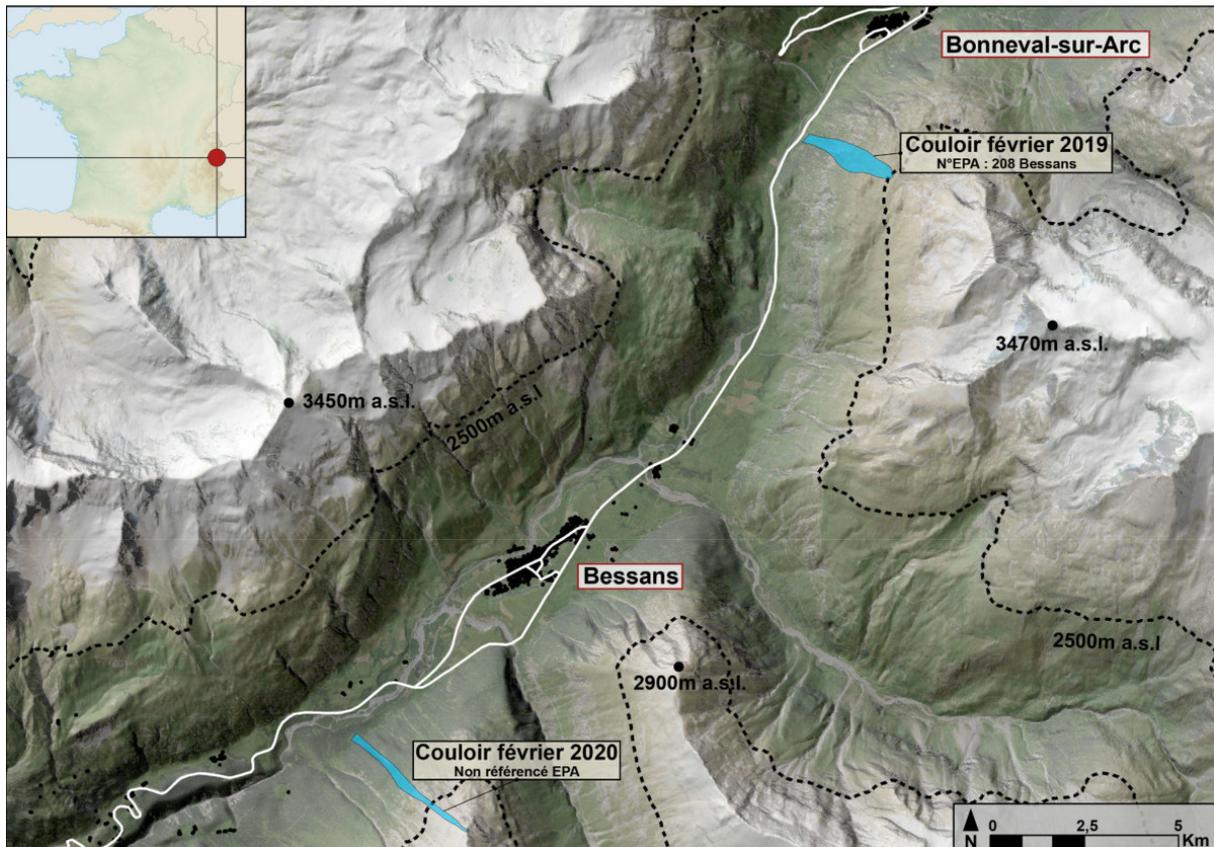


Figure 22 : Localisation des deux couloirs dans lesquels les dépôts étudiés se sont produits.

7.2.1 Localisation et présentation du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc et de la mission réalisée en février 2019

La mission de février 2019 a été réalisée sur un dépôt issu du couloir EPA 208 de Bessans et localisé en amont de la route RD902 entre les communes de Bessans et de Bonneval-sur-Arc. Selon les relevés EPA, la fréquence de déclenchement du couloir est de 3,1 avalanches par an entre 2003 et 2017, ce qui en fait un couloir avec une activité avalancheuse forte. Le volume de dépôt moyen estimé par l'EPA entre 2003 et 2017 est relativement faible, avec $13\,000\text{m}^3$. Une analyse opérée sur un modèle numérique de terrain (MNT) avec une précision métrique permet de mesurer une surface de $197\,000\text{m}^2$, dimension plutôt faible comparée aux autres couloirs EPA de la vallée. Selon des mesures réalisées depuis le MNT sur l'emprise EPA du couloir, l'altitude maximale de la zone d'accumulation et de départ se trouve à 2580 m et l'altitude minimale de dépôt à 1800m, le couloir présente donc un dénivelé maximal de 780m, en dessous de la moyenne de la vallée. La pente moyenne du couloir est de 38° et atteint 79° au maximum. Le tracé du couloir est rectiligne, aucune zone de

forêt n'est présente dans le couloir. En l'absence de rupture topographique majeure ou d'obstacle, l'axe supposé préférentiel d'écoulement est également rectiligne. La partie amont du couloir est relativement large et peu pentue, même si elle présente quelques zones de fortes pentes. La zone d'écoulement est beaucoup plus pentue et resserrée et débouche sur une étroite zone de dépôt en légère pente. Le couloir provoque régulièrement des coupures de routes. (Fig. 23).

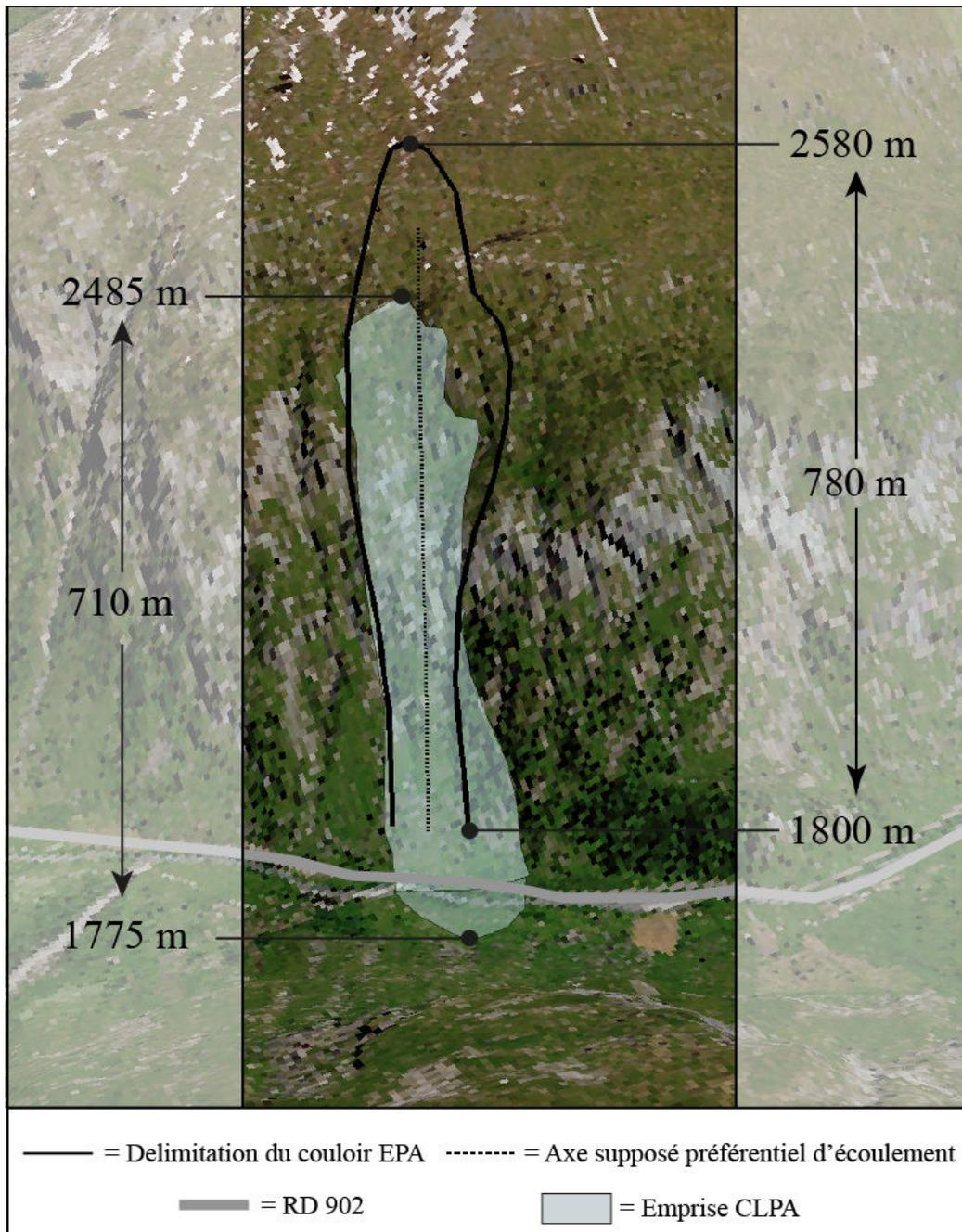


Figure 23 : Limite d'emprise EPA et CLPA, altitudes et dénivelés du couloir EPA 208

7.2.2 Localisation et présentation du couloir non référencé de Bessans et de la mission réalisée en février 2020

Le dépôt étudié en février 2020 est issu d'un couloir non référencé que ce soit au sein de l'EPA ou dans le cadre de la CLPA. Il est situé en aval de Bessans, éloigné de la route, mais en amont d'une des pistes de ski de fond de la station de Bessans, sans directement la menacer. Il est entouré de plusieurs couloirs EPA plus larges avec

des zones de dépôt plus vastes et visibles, ce qui explique sûrement la non prise en compte du couloir dans l'EPA. Le tracé du couloir a été défini via une analyse de cartes, d'images satellites et de prises de vue par drone. Selon des mesures réalisées depuis le MNT, l'altitude maximale de la zone d'accumulation est à 2800 mètres et l'altitude minimale de la zone de dépôt est à 1700m ; le couloir présente donc un dénivelé de 1100m et traverse dans sa partie aval une partie boisée. Le tracé du couloir est très rectiligne et est caractérisé par une faible largeur. On observe la présence de plusieurs barres rocheuses avec des pentes supérieures à 45°. La zone de dépôt se situe dans une zone boisée et facilement délimitable grâce à l'absence de végétation. La pente de la zone de dépôt est moins importante que sur le reste du couloir et est située en contrebas direct d'une barre rocheuse de quelques mètres (Fig. 24).

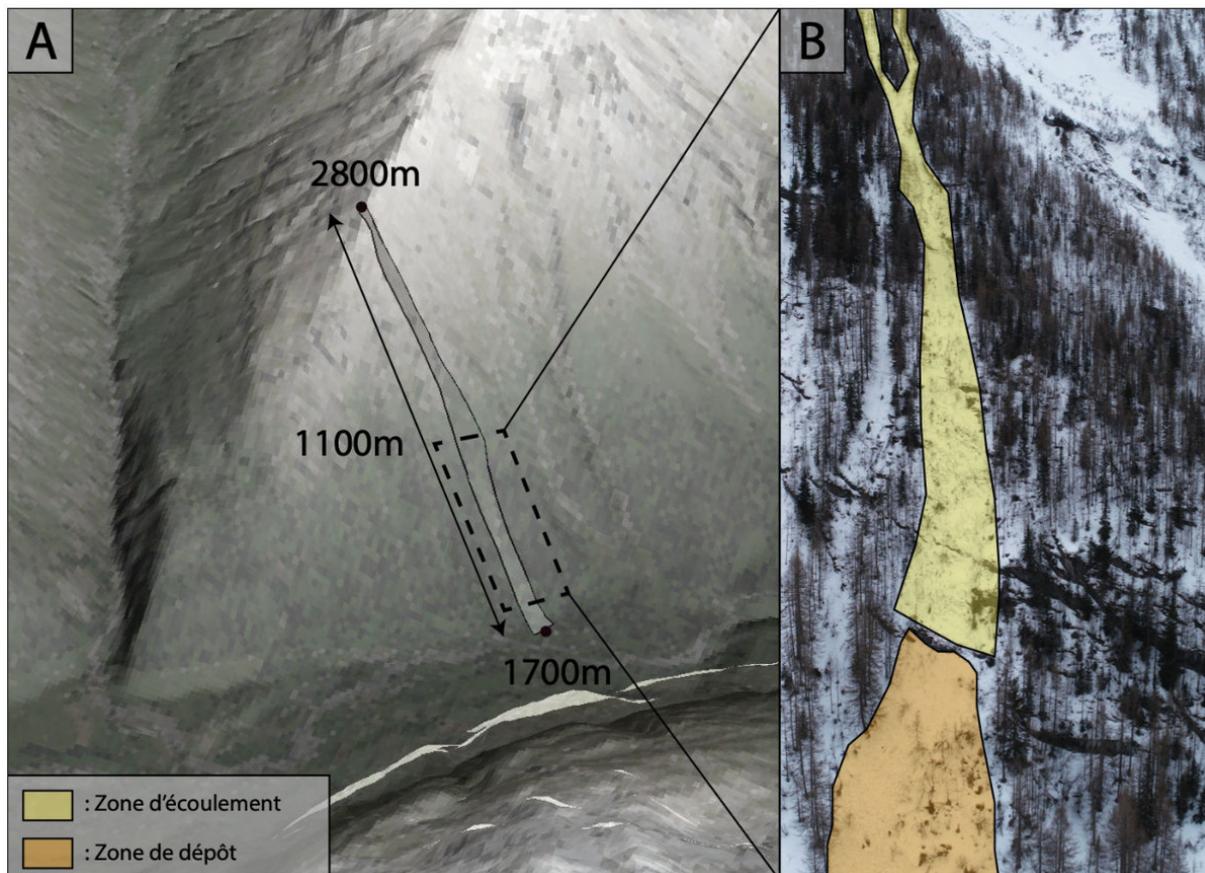


Figure 24 : Présentation du couloir de la mission de février 2020 sur la commune de Bessans : (A) Altitude et dénivelé du couloir, (B) photographie de la partie aval du couloir (prise de vue drone, février 2020)

7.3 Situation météorologique antérieure aux avalanches étudiées

7.3.1 Dépôt de février 2019 du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc

La date de l'avalanche ayant créé le dépôt étudié est daté par l'EPA au 2-3 février 2019. Des données issues d'une station Nivose Météo-France localisée au-dessus de Bonneval à 2700m d'altitude nous permettent de dresser la situation météorologique et nivologique des semaines et jours précédant l'écoulement. La situation météorologique antérieure à l'avalanche est caractéristique d'un début d'hiver froid, avec une température moyenne de l'air au niveau de la Nivose de $-12,1^{\circ}$ dans les 7 jours précédant l'avalanche. Sur ces 7 derniers jours, 6 ont connu des précipitations neigeuses, avec un cumul de 52 cm de neige fraîche. Le manteau neigeux est de 190 cm le 4 février. La chaîne de modélisation SAFRAN et Crocus, exploitée par Météo-France, reproduit les conditions météorologiques et nivologiques à différentes altitudes et orientations pour chaque massif montagneux (Vernay et al., 2020). Les données issues des réanalyses SAFRAN-Crocus du massif de la Haute-Maurienne à des altitudes comprises entre 2100 et 3100m confirment un manteau neigeux propre à un hiver froid avec notamment l'absence de couche de neige humide.

7.3.2 Dépôt de février 2020 du couloir non référencé de Bessans

La date de l'avalanche ayant créé le dépôt étudié est comprise entre le 1 et le 8 février 2020. Des données issues de la nivose Météo-France localisée au-dessus de Bonneval à 2700m d'altitude nous permettent de dresser la situation météorologique et nivologique des semaines et jours précédant l'écoulement. La situation climatique antérieure à l'avalanche est caractéristique d'un début d'hiver doux, avec une température moyenne de $-4,7^{\circ}$ entre le 23 janvier et le 8 février. Sur cette période, 2 jours ont connu des précipitations neigeuses, avec un cumul de 40 cm de neige fraîche. Le manteau neigeux est au maximum de 224 cm le 2 février. On note ensuite un phénomène d'altération du manteau neigeux assez important puisque l'épaisseur se réduit à 202 cm le 8 février.

7.4 Méthodologie

7.4.1 Caractérisation de la forme du dépôt et évaluation du volume

Les technologies de levé à haute résolution (e.g., GPS différentiel, scanner laser, LiDAR aéroporté) sont devenues au fil des dernières décennies des outils incontournables pour obtenir des relevés topographiques de haute précision. Nous avons utilisé certains de ces outils dans le cadre de l'étude des dépôts d'avalanches afin d'obtenir une caractérisation fine de la forme des dépôts et de *in fine* évaluer les volumes totaux des dépôts avec une haute précision.

Les relevés topographiques effectués sur le terrain ont été réalisés avec un scanner laser et un drone. Ces deux outils combinés permettent de caractériser l'ensemble de la surface du dépôt par la constitution de deux nuages de points d'une très haute résolution (centimétrique). L'emprise du dépôt est délimitée via des mesures faites avec un GPS différentiel ce qui permet le géo-référencement. Le MNT obtenu par la combinaison des MNT issue de l'utilisation du laser-scan et du drone permet de finement connaître la forme du dépôt pour déterminer d'éventuels facteurs de contrôle comme la forme du chenal d'écoulement ou la présence de blocs rocheux.

Les relevés effectués à l'aide d'un drone permettent également de réaliser des clichés photographiques. Le MNT associé à la photogrammétrie réalisée à l'aide des clichés du drone permet d'observer et d'analyser visuellement la morphologie générale de la surface du dépôt, en identifiant par exemple des zones de fortes compressions.

Enfin, la différence entre le MNT du dépôt et le MNT du sol nu préalablement effectué permet de calculer le volume du dépôt.



Figure 25 : Méthodes utilisés pour les mesures du volume et de la forme d'un dépôt d'avalanche : (a) vol d'un drone pour la réalisation d'une photogrammétrie 3D du dépôt (b) utilisation du Laser Scan, (c) GPS différentiel utilisés pour géoréférencer l'emprise du dépôt. (© Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019)

7.4.2 Caractérisation de la granulométrie de surface du dépôt

La surface du dépôt est composée d'un enchevêtrement d'agrégats de neige de différentes formes et tailles.

L'estimation de la granulométrie des agrégats en surface est réalisée grâce à la méthode de Wolman. Cette méthode est couramment utilisée en hydrogéomorphologie pour caractériser la granulométrie des bancs de sédiments présents dans les cours d'eau (Wolman, 1954). Cette méthode consiste à mesurer (comme sur des galets) la longueur de l'axe perpendiculaire à l'axe principal des agrégats de neige. Ceux-ci sont prélevés de manière aléatoire sur différents secteurs de la surface du dépôt. Le nombre de points de mesures et leur répartition sont établies en fonction de la forme et de la dimension du dépôt. Pour chaque zone d'échantillonnage, un minimum de 50 mesures est effectué. La variabilité

granulométrique de la surface, par exemple le long du dépôt, permet d'établir des liens avec les caractéristiques de l'écoulement (Fig. 26) (e.g. Bartelt et McArdell, 2009).



Figure 26 : Mesure de la longueur de l'axe perpendiculaire à l'axe principal d'un agrégat à la surface d'un dépôt d'avalanche (© Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019)

7.4.3 Caractérisation verticale de la nivologie du dépôt

On observe d'importantes variations de l'épaisseur du dépôt. Des sondages sont réalisés au sein du dépôt afin de finement caractériser la structure interne du dépôt. En plus de la distribution granulométrique de surface, trois indicateurs sont considérés pour chaque profil vertical : la typologie nivologique (les différents types de grains de neige), la masse volumique et la porosité de sections du manteau neigeux composant le dépôt.

Un puits de neige est premièrement réalisé à proximité du dépôt pour disposer des caractéristiques du manteau neigeux initial dans la zone de dépôt. La masse volumique et les caractéristiques de chaque couche de neige constituant le manteau initial sont alors mesurées et caractérisées pour être comparées aux prélèvements effectués sur le dépôt. Cette étape préliminaire permet aussi de déterminer la limite entre le dépôt et le manteau neigeux initial conservé en dessous.

La répartition spatiale des points de mesure est établie en fonction de la forme du dépôt, de ses caractéristiques (par exemple la présence d'un obstacle), du temps imparti et enfin des conditions de sécurité, certaines zones du dépôt pouvant ne pas être accessibles. Différents plans de mesure ont été conçus dans le cadre de ce travail

et sont adaptés directement sur le terrain en fonction des caractéristiques des dépôts (Fig. 27).

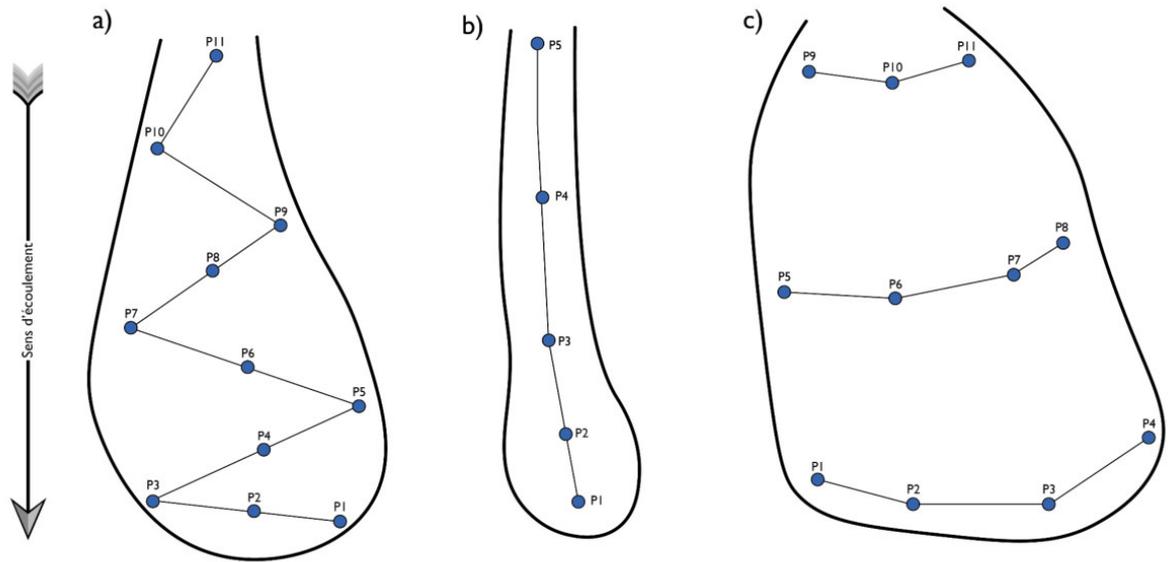


Figure 27 : Exemple de répartition des points de prélèvements en fonction de la forme du dépôt : a) répartition en escalier b) répartition linéaire c) répartition étagée le long de transects.

Un puits de neige est creusé dans la zone la plus profonde du dépôt afin d'établir une stratigraphie qui servira de référentiel. Ensuite, pour chaque point de prélèvement géoréférencé par GPS différentiel, une analyse du profil vertical est effectuée grâce à un carottier adapté à la glaciologie, soit grâce à des puits de neige en fonction de la composition du manteau neigeux. Les résultats sont exprimés en hauteur verticale depuis le sol.

Lorsque le carottage est possible, plusieurs passes sont effectuées entre la surface du dépôt et le sol. Pour chaque section verticale du profil, une mesure de profondeur est effectuée et la constitution nivologique de chaque couche est caractérisée. Les mesures permettent d'obtenir le volume de la section de la carotte selon la formule suivante :

$$\text{Volume de la carotte} = \frac{\text{longueur} \times \text{périmètre}^2}{4 \times \pi} \quad (1)$$

Ensuite, la masse de chaque section est pesée par une balance de précision pour obtenir la masse volumique de la section carottée :

$$\text{Masse volumique (Mv)} = \frac{\text{masse de la carotte}/1000}{\text{volume de la carotte}} \quad (2)$$

La masse volumique des agrégats situées à la surface du puits de carottage est également calculée. Les agrégats sont taillés pour être finement mesurés puis pesés.

Le prélèvement d'un segment de la carotte assez dense et homogène permet d'obtenir une mesure de porosité. La porosité est relative au pourcentage d'air contenu dans la section étudiée selon la formule suivante utilisée en glaciologie, Mv étant la masse volumique (Scheinder et Jansson, 2004 ; Thibert et al., 2008) :

$$\text{Porosité} = 1 - (\text{Mv de la carotte} / \text{Mv du segment de la carotte}) \quad (3)$$

Les valeurs de masse volumique et de porosité sont ensuite interpolées spatialement via le krigeage, qui tient compte de la distance entre les données et le point d'estimation mais également des distances entre chaque donnée. L'interpolation est réalisée sur les données rassemblées par intervalle de 50 cm depuis la surface du dépôt, seul le carottage permet d'obtenir suffisamment de points de mesure pour réaliser une interpolation spatiale.

7.4.4 Application de la méthodologie in-situ

La méthodologie présentée a été appliquée sur les deux dépôts considérés dans cette étude mais avec des différences liées aux caractéristiques des dépôts et des évolutions de la méthodologie. Le protocole présenté ci-dessus présente différentes contraintes en particulier matérielles, certaines situations entraînent donc une modification du protocole.

Pour le dépôt issu du couloir 208 de Bessans, l'ensemble de la méthodologie a été appliquée à l'exception des mesures des agrégats de surfaces. Un puits de neige caractérisant le manteau neigeux initial a été réalisé au nord de la zone de dépôt. Huit points de sondage ont été réalisés au carottier selon une répartition spatiale en escalier et un puits de neige a été creusé au niveau d'un point de sondage. La répartition spatiale des points de sondages suit une logique rectiligne de la partie aval

vers la partie amont (Fig. 27b). La partie la plus en amont du dépôt, marquée par une forte accumulation, n'a pas pu être investiguée pour des raisons de sécurité.

Concernant le second dépôt, investigué lors de la mission organisée en février 2020, les caractéristiques nivologiques du dépôt ont rendu l'utilisation d'un carottier impossible. Une température extérieure supérieure à la température de la neige entraîne un fort différentiel thermique qui provoque la formation d'une couche de glace sur les lames situées à la pointe du carottier et empêche complètement son utilisation. La méthodologie a alors été adaptée et repose uniquement sur des mesures réalisées le long de puits de neige répartis selon une logique linéaire en 3 zones distinctes : la partie la plus en amont (P3), la partie médiane (P2) et la partie frontale du dépôt (P1). Pour chaque puits de neige, une analyse de la stratigraphie et de la masse volumique est effectuée. Cependant l'impossibilité d'utiliser un carottier rend impossible des mesures de porosité. Les valeurs de masse volumique des agrégats situés à la surface du dépôt sont issues de la moyenne de mesures effectuées sur 3 agrégats distincts. La différence principale avec l'utilisation d'un carottier repose dans le fait que les carottes sont effectuées à l'aide d'un tube, préalablement mesuré, enfoncé horizontalement à l'épaisseur souhaitée. Des mesures des dimensions moyennes des agrégats ont été effectuées selon la méthode Wollman sur les 3 zones du dépôt (P1, P2 et P3).



Figure 28 : Caractérisation du profil vertical du dépôt : (a) carottage du dépôt, (b) mesure de la profondeur d'un puit de carottage, (c) mesure et pesée d'un segment de carotte, (d) prélèvement d'une carotte horizontale au sein d'un puit de neige (e) taille d'un agrégat de surface © Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019 et INRAE 2020

7.5 Résultats

7.5.1 Dépôt de février 2019 du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc

7.5.1.a Caractéristiques du manteau neigeux initial à proximité du dépôt

Un profil stratigraphique du manteau neigeux réalisé in-situ le 6 février 2019 à proximité du dépôt indique la présence d'un manteau neigeux typique d'un hiver froid. D'une épaisseur de 100 cm, il est constitué de trois couches homogènes composées de neige fraîche en surface et de neige transformée en profondeur (présence de grains fins, de faces planes et de gobelets). La masse volumique est de 160 kg/m³ en surface et atteint 312 kg/m³ dans la couche la plus profonde. Le profil ainsi que son analyse sont présentés en annexe (Figure supplémentaire 1).

7.5.1.b Forme et volume du dépôt

Le dépôt étudié présente des dimensions réduites pour la vallée. Des mesures effectuées depuis les relevés GPS et l'analyse du MNT indiquent une longueur maximale de 251 mètres, une largeur maximale de 40 mètres avec une largeur au front de l'avalanche de 23 mètres. L'épaisseur maximale approche les 3 mètres. La queue du dépôt est située directement en contre bas d'une paroi rocheuse verticale dans une partie encaissée. Le front du dépôt ayant atteint la route, une partie minime du dépôt a dû être dégagée pour libérer l'accès du fond de la vallée. La forme générale du dépôt est rectiligne avec un léger élargissement dans la partie la plus en aval, plus plane que la partie amont. Un large bloc rocheux est présent dans la zone de dépôt et a divisé l'écoulement dans la partie la plus en aval du dépôt (Fig. 29). Le relevé EPA ne précise ni le type d'écoulement ni la présence d'un aérosol. Cependant les caractéristiques du dépôt indique la présence d'un écoulement mixte typique d'un écoulement hivernale, avec au moins la présence d'une phase d'écoulement diluée.

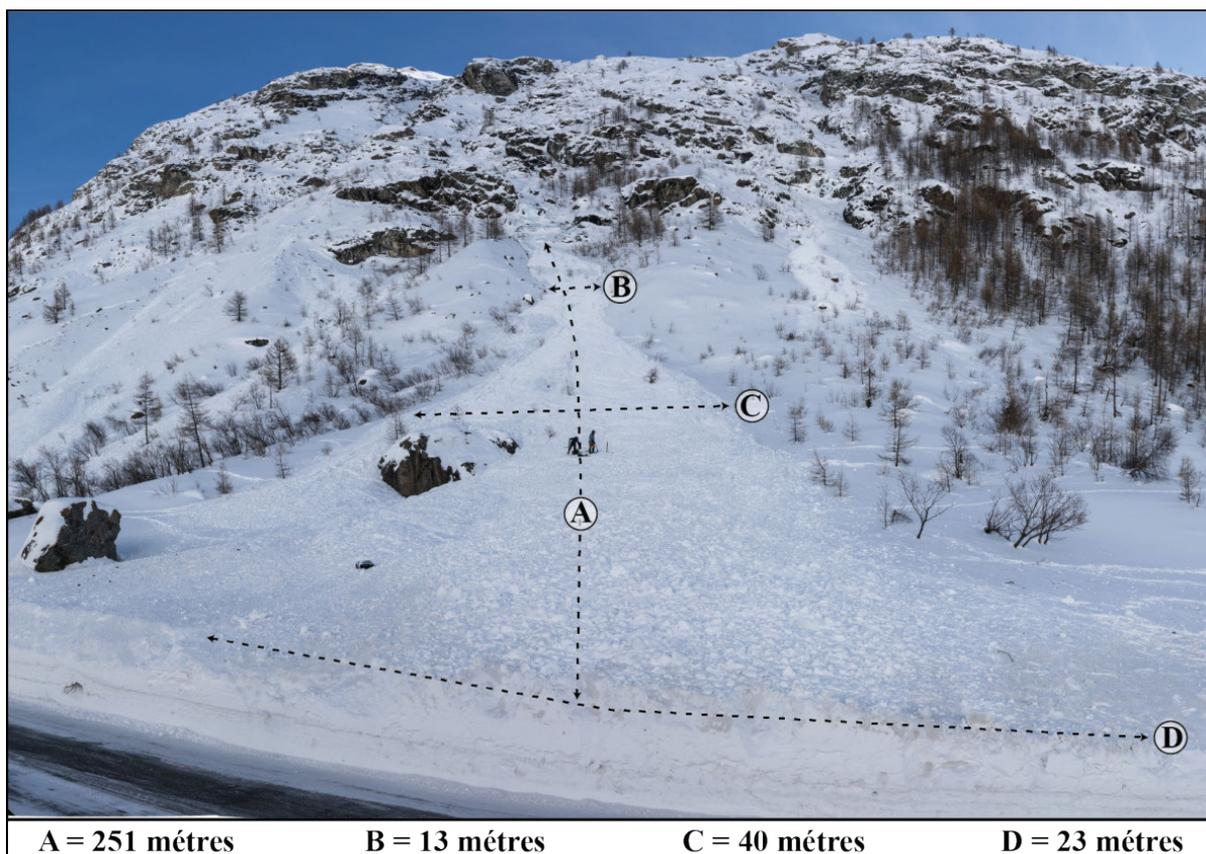


Figure 29 : Photographie et dimensions du dépôt du couloir 208 (© Thibaut VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS Photothèque / 2019)

Le calcul du volume via la comparaison du MNT du dépôt et du MNT du sol nu donne un volume total de neige accumulé de 16 850 m³. L'épaisseur du dépôt est comprise entre quelques centimètres et 3,75 mètres au maximum. On observe deux zones principales d'accumulation avec une accumulation supérieure à 3 mètres. La première est située dans la partie frontale du dépôt, au sud et en aval du bloc rocheux qui présente des épaisseurs mesurées élevées (2,73 m d'épaisseur maximale de sondage et 3,5 mètres via comparaison de MNT). La seconde est localisée dans la partie amont du dépôt, dans la partie chenalisée, où la neige s'est particulièrement accumulée le long du talweg. Cette partie présente des épaisseurs mesurées plus importantes allant de 1,71 à 1,85 m et jusqu'à 4 mètres via la comparaison des MNTs (Fig. 9). En contrebas, le dépôt s'élargit et l'épaisseur est moins importante. La partie médiane du dépôt présente des épaisseurs plus réduites, avec notamment S4 qui présente une épaisseur de moins d'1m. Cette faible épaisseur s'explique par la présence du bloc rocheux qui a formé une zone de compression bien

visible sur le MNT (Fig. 29) qui a dévié l'écoulement vers la gauche du bloc. On retrouve à la surface du dépôt des traces visibles de compressions, notamment sur les parties latérales et frontales du dépôt.

7.5.1.c Stratigraphie, masse volumique et porosité des couches internes du dépôt

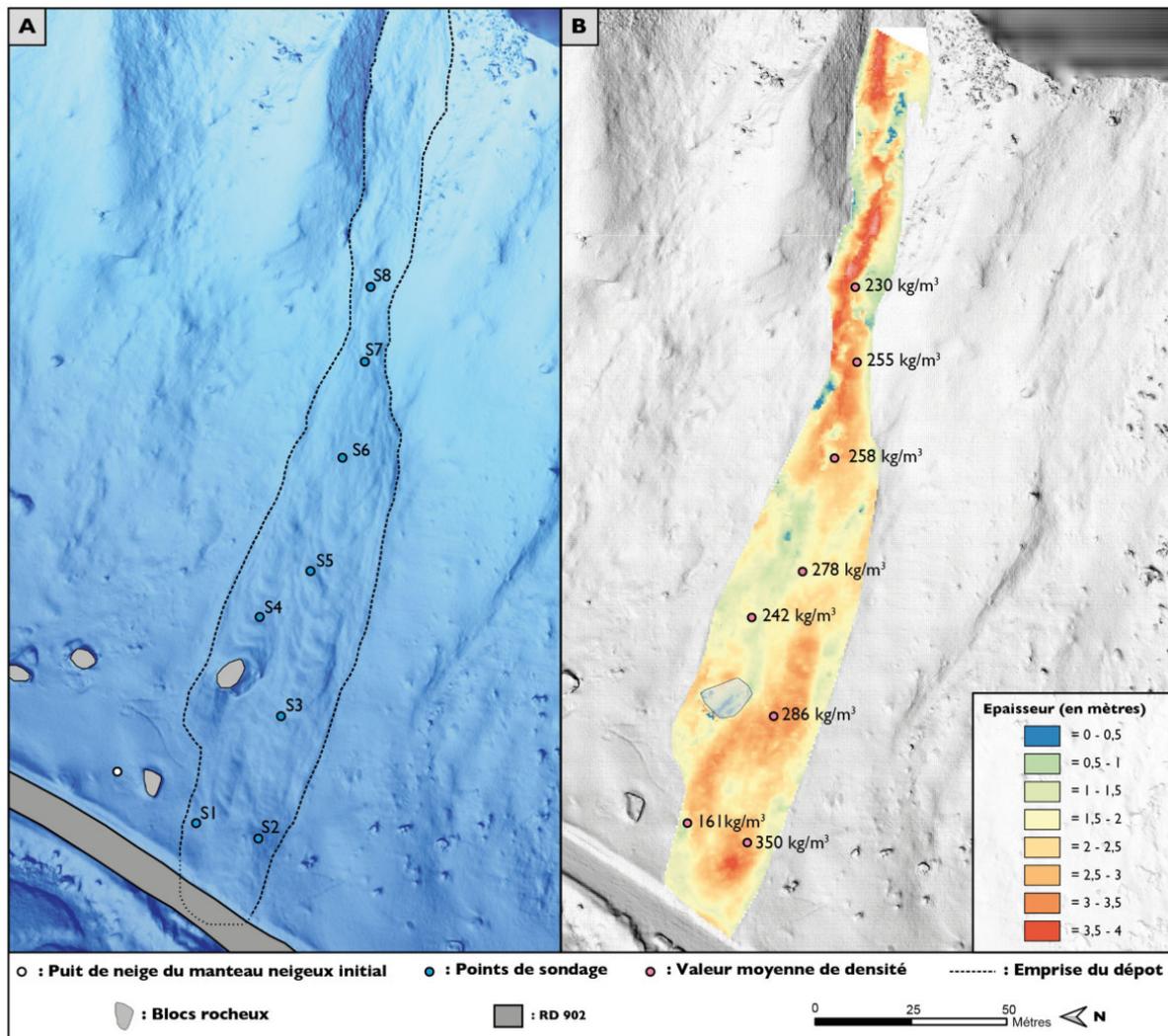


Figure 30 : A) MNT et orthophotographie via prise de vue drone du dépôt du couloir 208 et localisation des points de carottage et B) MNT et épaisseur du dépôt et moyenne de l'ensemble des mesures de masse volumique pour chaque point de carottage

On constate de fortes disparités entre les mesures de masse volumique et de porosité au sein des différents sondages. Le dépôt présente une structure stratifiée dans l'épaisseur avec des caractéristiques qui varient en fonction des secteurs du

dépôt, expriment une importante variabilité longitudinale. Les prélèvements effectués sur les carottes indiquent que, de S1 à S6, la porosité et la masse volumique sont faibles en surface et augmentent en direction de la partie médiane des sondages. On constate, au sein des premières sections des sondages, de fortes différences de valeur de masse volumique entre l'ensemble de la carotte et les quelques dizaines de centimètres situés à la base de la carotte. Les sondages S1 et S2 présentent des caractéristiques relatives à la zone frontale du dépôt (Fig. 29). S1 est situé directement en contrebas du bloc rocheux, les masses volumiques mesurées dans les deux sections réalisées sont faibles (122 et 200 kg/m^3) et les porosités élevées (entre 30 et 65% d'air). La porosité dans la partie supérieure de la carotte est plus forte. Il persiste 19 cm du manteau neigeux initial sous forme d'un mélange de gobelets et de face plane. Sur l'ensemble des mesures effectuées sur le dépôt, les valeurs de masse volumique et de porosité les plus élevées ont été mesurées sur la partie frontale du dépôt (S2) dans l'axe direct de l'écoulement du couloir et dans une zone de forte accumulation. L'épaisseur du sondage y est beaucoup plus importante que pour S1, avec 2,73 m d'épaisseur maximale. On constate que la masse volumique et la porosité sont très faibles en surface (206 kg/m^3 et 52% d'air), les agrégats sont peu comprimés et sont espacés les uns des autres. La partie médiane de la carotte présente des mesures de masse volumique et de porosité élevées (452 kg/m^3 et 2-3% d'air), synonyme d'une forte compression lors de l'écoulement, faisant disparaître les espaces entre les agrégats jusqu'à former une couche homogène et compacte. Dans la partie la plus profonde du sondage, la masse volumique baisse légèrement (313 kg/m^3) et la porosité augmente pour atteindre 11%. On retrouve 20 centimètres de manteau neigeux initial sous forme de gobelets.

Le sondage S3 présente une masse volumique importante (309 kg/m^3) de la surface jusqu'à 0,85 m de profondeur. La masse volumique mesurée de la dernière section, de 0 à 0,85 m d'épaisseur, est de 241 kg/m^3 . Seule une mesure de porosité a pu être effectuée au sein de la première section proche de la surface, elle indique 26% d'air. On constate une absence complète de manteau neigeux initial. Le sondage S4, avec une épaisseur de 96 cm est le sondage le plus court effectué, il est situé dans l'axe de l'écoulement et en amont du bloc rocheux (Fig. 29). La seule carotte réalisée présente une masse volumique de 242 kg/m^3 et une porosité de 38%. Le

sondage S5 présente une masse volumique entre 0,63 de profondeur et la surface de 262 kg/m^3 et augmente légèrement entre le fond et 0,63 m d'épaisseur (293 kg/m^3). Concernant la porosité, entre 0,63 m et 0,87 m d'épaisseur, la porosité est de 0,38, puis réduit entre 0 m et 0,53 m d'épaisseur avec 27% d'air. Le sondage S6 présente une masse volumique entre 0,69 m d'épaisseur et la surface faible (207 kg/m^3) qui augmente entre 0 m et 0,69 m d'épaisseur (309 kg/m^3). Deux mesures de porosité ont pu être réalisées, entre 1,02 m et 1,24 m d'épaisseur, la porosité est de 40% et baisse entre 0,69 et 1,02m (35%). Il a seulement été possible d'isoler un segment de carotte entre 0,5 cm et 21 cm d'épaisseur, la porosité mesurée est bien plus faible que dans la première section avec une valeur de 19%. Entre S3 et S6, le manteau neigeux initial est très faible (> 5 cm) ou inexistant. Les différences de valeurs de porosité entre la surface et la partie inférieure des sections proches de la surface indiquent qu'une compression des agrégats et une réduction de l'espace les séparant a déjà lieu quelques dizaines de centimètres sous la surface.

Les sondages réalisés dans la partie amont du dépôt (S7 et S8) présentent des caractéristiques différentes (Fig. 31). En effet, on observe une inversion des valeurs entre les 6 premiers points de sondage et ces deux points. Si les mesures de masse volumique sont semblables, les valeurs de porosité présentent des caractéristiques différentes. Les valeurs de porosité les plus élevées sont observées en surface, tandis que l'espace compris entre les agrégats est plus important dans la partie inférieure des carottes, jusqu'à atteindre 64% d'air entre 13 et 45 cm d'épaisseur sur S8 contre 50% d'air entre 1,18 m et 1,42 m et 36% entre 0,46 et 0,74 m d'épaisseur.

Logiquement, on retrouve sur l'ensemble des points de mesures une forte corrélation entre les valeurs mesurées de masse volumique et de porosité ($R^2 = 0,81$).

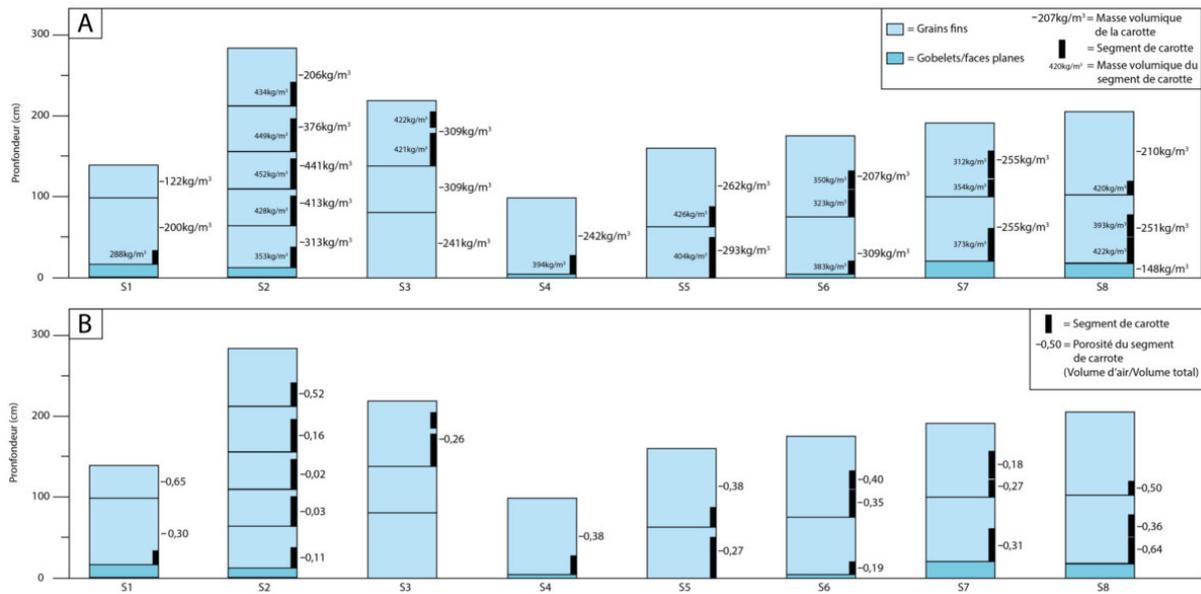


Figure 31 : Typologie nivologique, masses volumiques et porosités des profils de neige du dépôt du couloir 208 de Bonneval-sur-Arc (cf Fig. 30 pour la localisation des points)

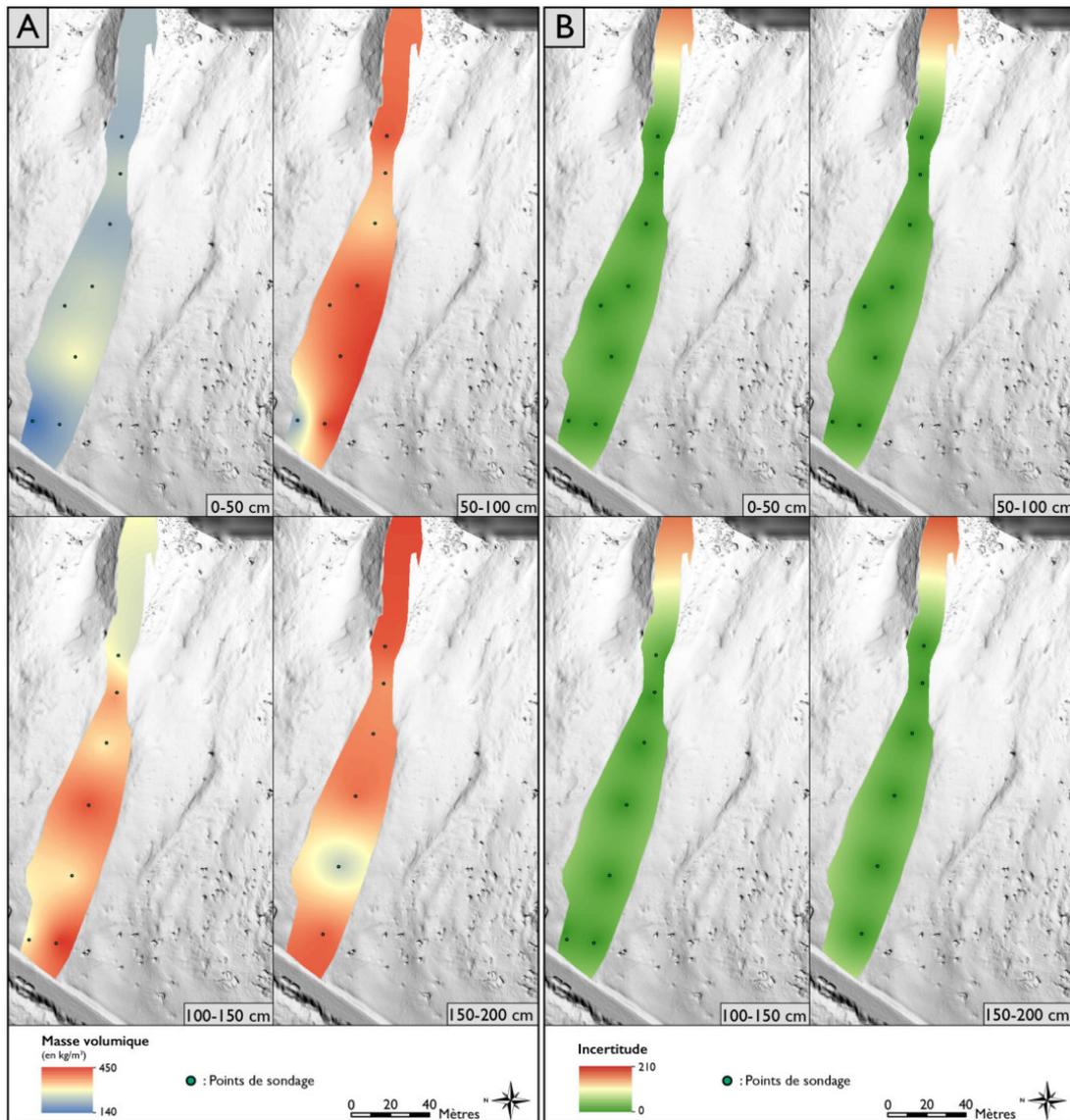


Figure 32 : A) MNT et interpolation par krigeage des mesures de masse volumique B) Incertitude associé à l'interpolation

Les interpolations spatiales réalisées par krigeage (Fig. 32 et 33) permettent de souligner une forte hétérogénéité des valeurs de masse volumique et de porosité entre les différents intervalles de profondeur du dépôt. Les valeurs de masse volumique sont importantes au fond du dépôt et augmentent avec l'épaisseur du dépôt. On retrouve les zones présentant les valeurs les plus élevées dans les zones les plus en amont et en aval du dépôt. Les valeurs de porosité sont plus hétérogènes, on remarque notamment que la porosité réduit avec la profondeur dans la zone frontale alors qu'on observe une augmentation de la porosité avec la profondeur dans la zone amont du dépôt. Du fait de l'absence de mesure, on remarque une incertitude

plus importante pour les valeurs de porosité entre 100 et 200 cm de profondeur, ainsi qu'une forte incertitude dans la zone amont du dépôt.

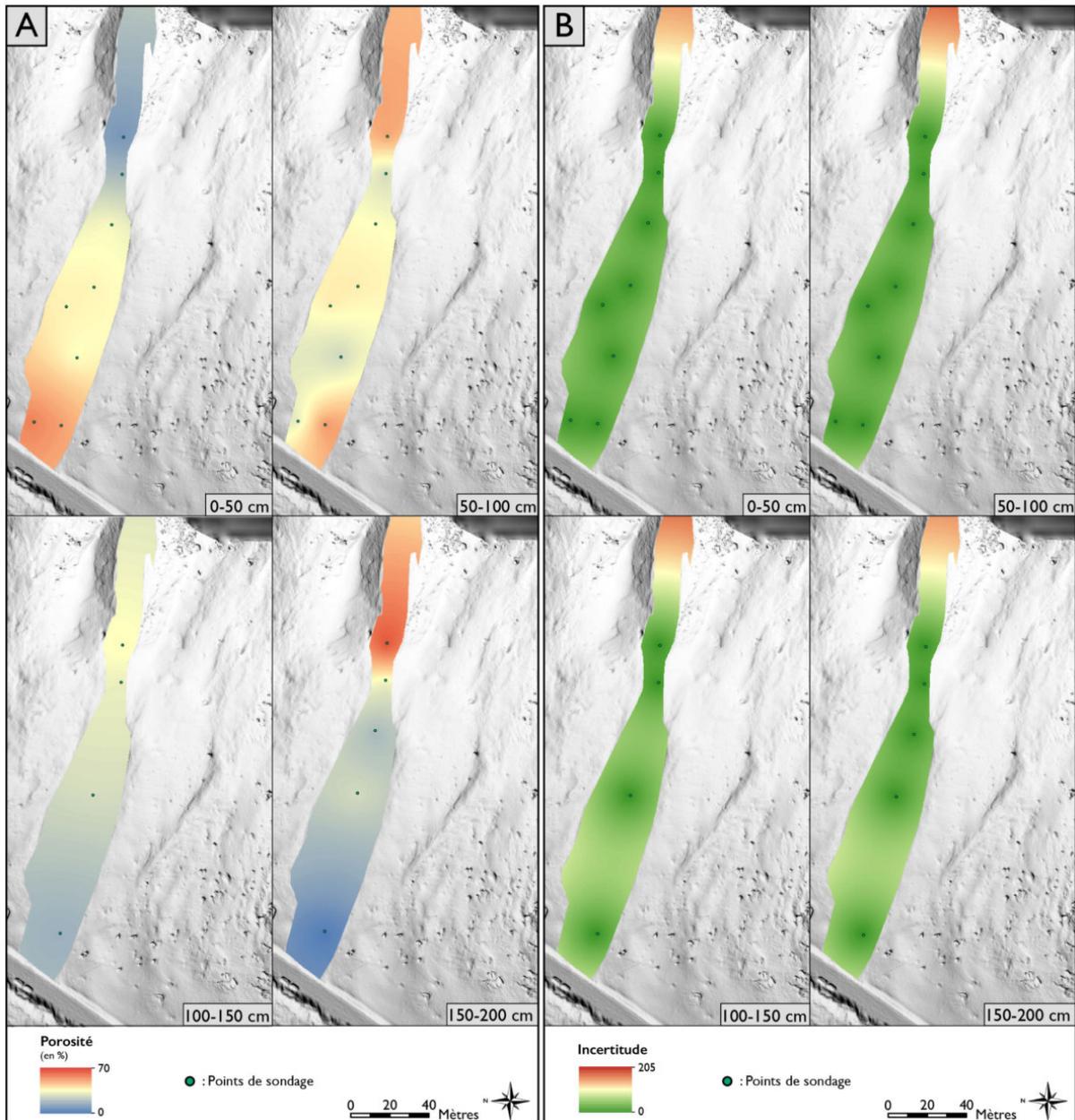


Figure 33 : A) MNT et interpolation par krigeage des mesures de porosité B) Incertitude associée à l'interpolation

7.5.2 Dépôt de février 2020 du couloir non référencé de Bessans

7.5.2.a Caractéristiques du manteau neigeux initial à proximité du dépôt

Un profil stratigraphique du manteau neigeux réalisé in-situ le 12 février 2020 à proximité immédiate du dépôt indique la présence d'un manteau neigeux typique d'un hiver avec de nombreuses phases de redoux et propre à des conditions printanières : le manteau neigeux a subi de nombreuses métamorphoses et on note l'absence de neige fraîche. Le manteau neigeux est uniquement composé de gobelets et de faces planes. Les valeurs de masse volumique diminuent avec l'épaisseur, on mesure une masse volumique de 304 kg/m^3 à 55 cm d'épaisseur et de 368 kg/m^3 à 13 cm d'épaisseur. Le profil ainsi que son analyse sont présentés en annexe (Figure supplémentaire 2).

7.5.2.b Dimensions et volume du dépôt

Le dépôt est court (75m), rectiligne et forme un léger arc de cercle. Il correspond à une phase de mise en place brutale du dépôt, en aval d'une barre rocheuse. Nos relevés ont mis en avant une variabilité faible de l'épaisseur du dépôt entre les trois puits de neige. Les parties frontale et médiane du dépôt présentent des épaisseurs similaires, respectivement 115 et 105 cm. Le relevé effectué sur la partie amont du dépôt relève une épaisseur de dépôt accrue : 175cm.



Figure 34 : Photographie aérienne et dimensions du dépôt du couloir non référencé de Bessans (Prise de vue drone, 12 février 2020)

7.5.2.c Granulométrie des agrégats de surface

On observe une augmentation de la granulométrie moyenne des agrégats de l'amont vers l'aval du dépôt. C'est dans la partie frontale que l'on retrouve les dimensions des agrégats moyennes (24 cm) et maximales (50 cm) les plus importantes. Le point de mesure P3 recense la granulométrie de surface la plus faible, mais présente un tri granulométrique moins homogène que le point de mesure P2 (Fig. 35).

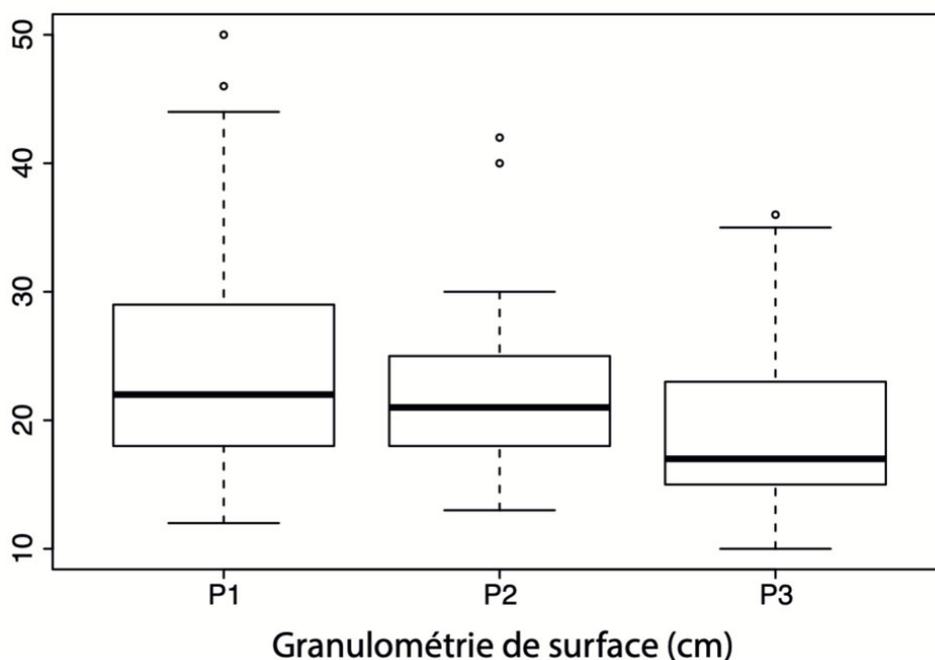


Figure 35 : Granulométrie des agrégats de surface mesurée au niveau des 3 points de mesure du dépôt, P1 : zone frontale, P2 : zone médiane, P3 : zone amont

7.5.2.d Stratigraphie, masse volumique et porosité des couches internes du dépôt



Figure 36 : Photographie aérienne du dépôt et localisation des points de prélèvements.

Le dépôt présente une structure peu stratifiée verticalement et particulièrement homogène. Le premier point de prélèvement est situé dans la zone frontale du dépôt. L'épaisseur du puits de neige est de 180 cm, 115 cm de dépôt et 65cm de manteau neigeux initial. Les agrégats situés en surface présentent une valeur de masse volumique moyenne de 525 kg/m^3 . La portion de dépôt étudiée est constituée d'agrégats de neige humide bien soudés ainsi que des petits blocs de glace issus de

la cascade de glace située en amont du dépôt. Les mesures de masse volumique baissent en direction de la base du dépôt, elles sont de 703 kg/m³ à 135 cm d'épaisseur, de 635 kg/m³ à 105 cm d'épaisseur et de 615 kg/m³ à 85 cm d'épaisseur, soit à 20cm de la base du dépôt. Le manteau neigeux initial est constitué de deux couches bien délimitées. Directement en dessous du dépôt, on observe une couche de 25cm constituée de grains fins humides regelés avec une masse volumique de 474 kg/m³. La base du manteau neigeux initial est constituée de gobelets et faces planes humides présentant des traces de regel avec une masse volumique de 360 kg/m³.

Le second point de prélèvement est situé dans la partie médiane du dépôt. L'épaisseur du puits de neige est de 275 cm, 105 cm de dépôt et 170 cm de manteau neigeux initial. Les agrégats situés en surface présentent une valeur de masse volumique moyenne de 583 kg/m³. La portion médiane du dépôt est constituée d'agrégats de neige humide. Contrairement au premier point de prélèvement, les mesures de masse volumique s'accroissent légèrement en direction de la base du dépôt. Les mesures sont de 654 kg/m³ à 240 cm d'épaisseur, de 667 kg/m³ à 200 cm d'épaisseur et de 716 kg/m³ à 185 cm d'épaisseur, soit à 15cm de la base du dépôt. Le manteau neigeux initial est constitué de 5 couches, une alternance de grains fins et de faces planes entre 25cm et 170 cm d'épaisseur et une couche de gobelets de 25 cm à la base du manteau neigeux. Les valeurs de masse volumique fluctuent peu: la porosité est de 512 kg/m³ à 25 cm sous le dépôt et les valeurs varient entre 462 et 488 kg/m³ dans les couches situées en contrebas.

Le troisième point de prélèvement est situé dans la zone amont du dépôt. L'épaisseur du puits de neige est de 360 cm, 175 cm de dépôt et 185 cm de manteau neigeux initial. Les agrégats situés à la surface du dépôt présentent une valeur moyenne de masse volumique de 611 kg/m³. La portion du dépôt située dans la zone amont est constituée d'agrégats de neige humide, on y observe une forte porosité dans les 45 centimètres situés à la base du dépôt. Cinq mesures de masse volumique ont été effectuées dans le dépôt. On observe des mesures plus hétérogènes que pour les deux premiers points de prélèvements. Quelques centimètres sous la surface la masse volumique est de 701 kg/m³, elle est de 710 kg/m³ à 300 cm d'épaisseur. On observe une nette baisse de la masse volumique à 250 cm d'épaisseur, avec une valeur de 555 kg/m³. Les valeurs augmentent ensuite en direction de la base du dépôt

: on mesure des masses volumiques de 658 kg/m^3 à 230 cm et de 592 kg/m^3 à 195 cm d'épaisseur, une dizaine de centimètres au-dessus de la base du dépôt. Le manteau neigeux initial est constitué de 4 couches. Entre 100 et 185 cm d'épaisseur, on retrouve des faces planes mélangées avec quelques grains fins. Les mesures de masse volumique sont similaires et autour de 465 kg/m^3 . Le dernier mètre est constitué de grains fins avec des masses volumiques très légèrement supérieures.

On constate donc une forte homogénéité dans les valeurs de masse volumique relevées, tant au niveau de la stratification longitudinale que de la stratification dans l'épaisseur du dépôt. Dans la partie frontale et médiane du dépôt (P1 et P2), les valeurs de masse volumique sont particulièrement homogènes. Le point de mesure situé dans la partie amont du dépôt (P3) est marqué par des valeurs plus hétérogènes et c'est dans la section centrale que l'on trouve les valeurs de masse volumique les plus faibles.

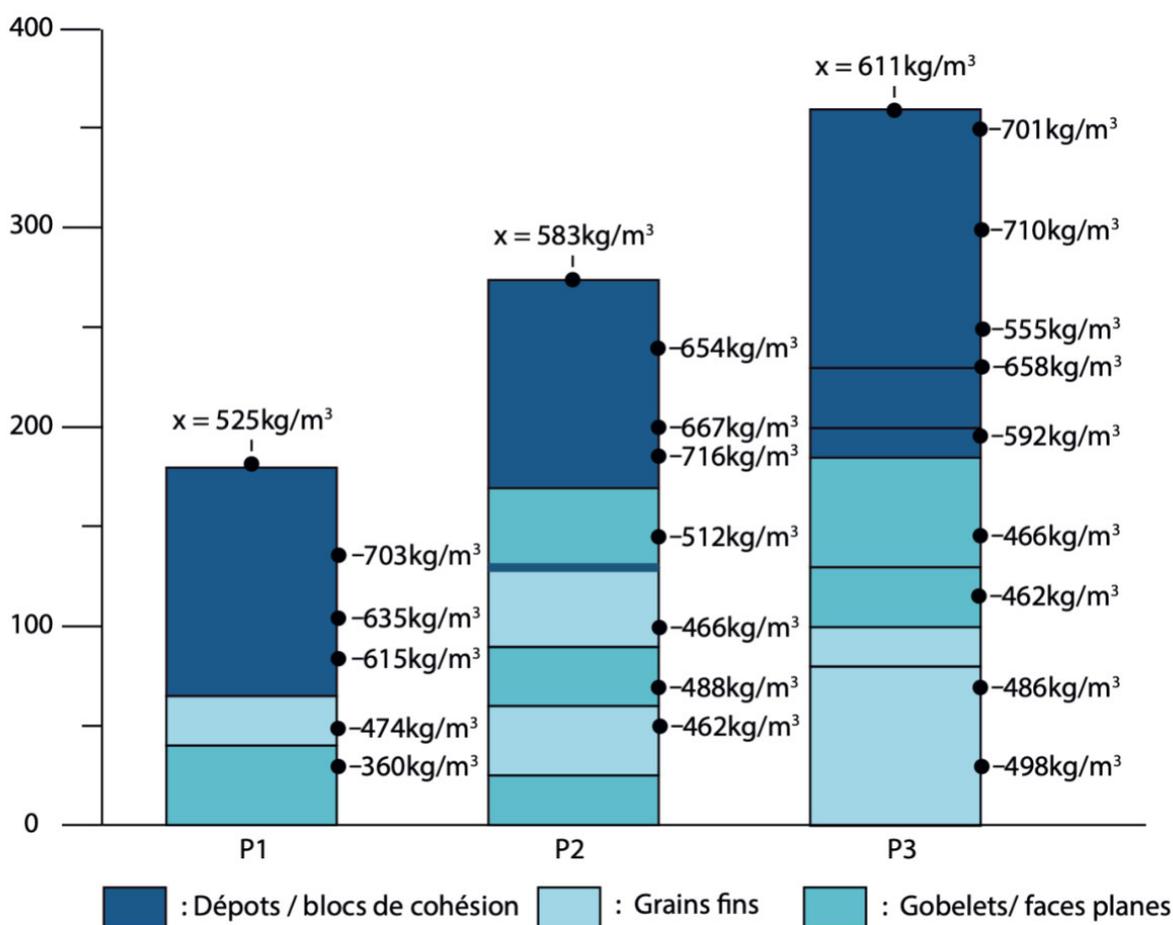


Figure 37 : Typologie nivologique et masses volumiques des profils de neige du dépôt du couloir non identifiés de Bessans (cf fig. 36 pour la localisation des points de sondages)

7.6 Discussion

Des mesures *in-situ* de certaines caractéristiques des dépôts ont déjà été réalisées dans le cadre de quelques travaux, se concentrant notamment sur la forme et les structures de surface des dépôts (Jomelli et Bertran, 2001 ; Bartelt et McArdell, 2009) ou sur les caractéristiques internes des dépôts (Issler et 2008 ; Issler et al, 2019, Hao et al, 2021). C'est toutefois la première fois qu'une méthode est mise en place pour étudier à la fois la forme, les caractéristiques de la surface ainsi que la structure interne des dépôts le long de profils nivologiques. L'analyse des résultats issue des manipulations réalisées sur le dépôt du couloir 208 de Bessans et du dépôt du couloir non référencé de Bessans apporte ainsi de nouvelles informations sur les caractéristiques des dépôts d'avalanches. La discussion des résultats permet d'établir certains liens entre les caractéristiques des dépôts et les mécanismes de mise en place des dépôts en fonction de deux grands types d'écoulement : de neige sèche et de neige humide. Les résultats de chaque dépôt sont discutés séparément, puis une analyse comparée et une critique méthodologique sont présentées.

7.6.1 Dépôt du couloir 208 de Bonneval

On constate de fortes disparités entre les mesures d'épaisseur, de masse volumique et de porosité au sein des différents sondages. Le dépôt présente une structure stratifiée dans l'épaisseur avec des caractéristiques qui varient en fonction des secteurs du dépôt le long de la pente (de la direction principale de l'écoulement). Le volume total de neige accumulé ($16\,850\text{ m}^3$) est similaire à la moyenne des dépôts estimés par l'EPA entre 2003 et 2017 ($13\,000\text{ m}^3$) pour le couloir 208 de Bonneval, il s'agit donc d'un dépôt présentant des dimensions classiques pour ce couloir.

Nous suggérons que les importantes épaisseurs de dépôt dans la zone frontale s'expliquent par une forte accumulation de neige due à sa compression lors de l'écoulement de l'avalanche. D'autre part, les importantes épaisseurs de la partie amont s'expliquent par des mécanismes d'écoulement propre à la queue des avalanches et à la morphologie de la zone de dépôt, avec un fort ralentissement de la vitesse d'écoulement favorisant une accumulation localisée dans un encaissement

topographique. De plus, on constate une inversion de l'organisation stratigraphique des valeurs de porosité dans la partie amont du dépôt, à partir de S7, qui peut s'expliquer par les mécanismes propres à la phase d'arrêt des avalanches. L'écoulement a réduit en intensité, la compression est plus faible et permet de conserver des espaces d'air dans la partie la plus profonde du dépôt. On retrouve également une présence plus importante du manteau neigeux initial, proche des 20 cm, signe d'une érosion moins présente. Cependant il n'a pas été possible d'aller investiguer l'ensemble de la partie amont, relative à la phase terminale de l'écoulement, pour confirmer ces observations et leur interprétation.

On retrouve sur la plupart des sondages une couche peu épaisse ou inexistante de manteau neigeux initial. Ce résultat indique que, très tôt lors de l'écoulement, le manteau neigeux initial est soufflé par l'aérosol ou bien érodé par l'écoulement plus concentré pour laisser place à une surface d'écoulement composée par la neige transportée et transformée lors de l'écoulement. Cette forte érosion permet d'obtenir une bonne fiabilité des résultats issus de l'analyse de l'épaisseur via comparaison de MNT, puisque les zones d'accumulation correspondent directement à des accumulations liées à l'écoulement avalancheux.

Les valeurs de masse volumique relevées sont en adéquation avec les relevés effectués par Mc Clung et Scharerer (1985), Issler et al (2008 & 2019) ou Hao et al (2021) qui ont relevé des valeurs maximales de 500 kg/m^3 pour des avalanches de neige sèche de grande ampleur, avec les épaisseurs les plus importantes relevées dans la zone frontale. De même, Dent et al (1998) ont mesuré grâce à des capteurs des masses volumiques maximales de l'ordre de 430 kg/m^3 dans la zone frontale (Fig. 38). Cependant, les profondeurs des prélèvements et les différences intra-dépôts ne sont pas mentionnées par ces travaux et des mesures de porosité n'ont pas été effectuées, empêchant une comparaison plus complète des résultats.

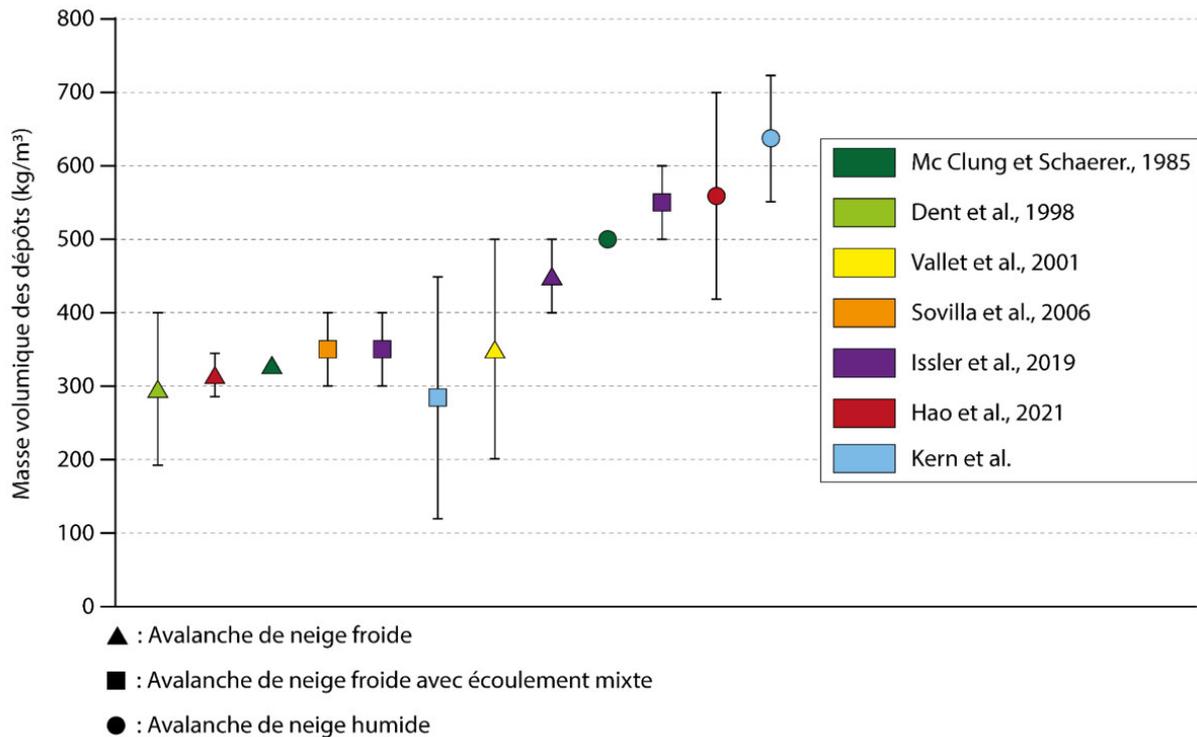


Figure 38 : Comparaison des valeurs de masse volumique relevées dans des dépôts d'avalanches en fonction du type d'écoulement associé

Des valeurs de masse volumique plus faibles et de porosité plus élevées au fond des sondages indiquent que les zones de fortes compressions se trouvent au cœur de l'écoulement et non dans sa partie la plus profonde. Cette configuration indique que des mécanismes de pressions dispersives se mettent en place lors de l'écoulement et de la mise en place du dépôt, avec la présence d'une partie moins dense à sa base. Lorsque l'écoulement se produit, il est accompagné d'une accélération du fluide granulaire perpendiculairement à la direction de l'écoulement. La pression associée aux déformations dilatatives élève le centre de masse de l'avalanche et réduit la résistance au cisaillement de l'écoulement sur le sol. Ce phénomène a été constaté dans de nombreuses expériences portant sur le fonctionnement des avalanches (Bartelt et al, 2007, Busser et Bartlet, 2011, Bartelt et Buser, 2016). De plus, malgré des écoulements et des matériaux transportés présentant des différences physiques notables, on retrouve des configurations similaires dans les dynamiques d'écoulement concentré de sédiments volcanique au sein de lahars (Lavigne et Thouret, 2000) ou bien encore d'avalanches de débris

(Cruden et Hungr, 2016), avec notamment la présence de granoclassements inverses et de semelles d'écoulement.

Les caractéristiques du dépôt du couloir 208 sont donc relatives aux avalanches de neige froide, typiques d'un fonctionnement hivernal et caractérisées par un écoulement rapide, concentré, avec la présence d'importantes zones de pressions dispersives et éventuellement accompagné d'un aérosol.

7.6.2 Dépôt du couloir non référencé de Bessans

Si la date des relevés effectués sur le couloir non référencé de Bessans au début de février 2020 correspond à un fonctionnement théorique d'écoulement hivernal, les caractéristiques météorologiques et nivologiques de l'hiver 2020 favorisent des écoulements de neige humide, typiques du printemps. Cette modification de la mécanique avalancheuse saisonnière classique, avec une recrudescence du nombre d'avalanches de neige humide et une occurrence accrue en hiver est constatée dans les Alpes depuis de nombreuses années (Eckert et al., 2013, Pielmeier et al., 2013, Naaim et al., 2016).

Les variations d'épaisseur au sein du dépôt, similaire entre la zone frontale et médiane du dépôt et plus importante sur la zone amont, s'expliquent par les caractéristiques d'écoulement des avalanches de neige humide : un écoulement dense à faible vitesse. Cette cinétique faible favorise l'accumulation de neige dans la partie amont directement située en contrebas de la paroi rocheuse. Cette accumulation est d'autant plus favorisée lors de la phase d'arrêt de l'avalanche marquée par une réduction de la vitesse d'écoulement.

Les masses volumiques mesurées sont élevées, et dépassent les 700 kg/m^3 . Ces valeurs correspondent à des masses volumiques de neige de névé et sont similaires à des relevés effectués par Hao et al (2021) sur des dépôts de neige humide. Cette forte masse volumique explique en grande partie l'impossibilité d'utiliser un carottier de glaciologie. Il n'a pas été possible d'effectuer des mesures de porosité, mais au regard des masses volumiques mesurées et de la structure interne, on peut intuitivement penser que celle-ci est particulièrement basse sur l'ensemble du dépôt.

La structure de la surface du dépôt présente des variations plus marquées entre les différents points de mesure. On retrouve une structure de surface présentant de nombreux agrégats. Les dimensions des agrégats sont plus élevées que pour des avalanches de neiges sèches pour lesquelles la taille médiane des agrégats varie typiquement entre 70 mm et 100 mm (Jomelli et Bertran, 2001 ; Bartelt et McArdell, 2009). Le tri granulométrique des agrégats situés en surface, marqué par une augmentation des dimensions de l'aval vers l'amont du dépôt, est similaire au tri granulométrique lié aux mécanismes des mouvements gravitaires que l'on retrouve notamment sur les cônes d'éboulis (Jomelli et Francou, 2000). A l'inverse, la masse volumique des agrégats situés en surface diminue dans le sens de la pente entre les trois points de mesure. Les valeurs de masse volumique moyenne dans la partie aval sont de 611 kg/m^3 , contre 525 kg/m^3 dans la partie frontale du dépôt. L'augmentation de la masse volumique des agrégats de surface de l'amont vers l'aval est intuitive au regard du tri granulométrique. En effet, plus les agrégats sont denses et donc compacts, plus leurs dimensions sont réduites et leur déplacement limité. Au contraire, les agrégats avec des dimensions plus importantes et moins denses vont rester dans la partie frontale ou à la surface de l'écoulement et seront plus à même d'atteindre la partie frontale du dépôt final. On remarque également que les valeurs de masse volumique des agrégats de surface sont systématiquement inférieures aux valeurs relevées au sein du dépôt. Ceci indique que les agrégats situés en surface ne se sont pas retrouvés au cœur de l'écoulement et sont restés en surface. On retrouve un tri granulométrique similaire lors d'écoulements de lave torrentielle caractérisés par une répartition granulométrique favorisant la présence de gros blocs dans le front et à la surface de l'écoulement.

On retrouve sous le dépôt d'épaisses couches de manteau neigeux initial, entre 65 cm et 175 cm. Cette constatation est étonnante au regard de la forte puissance érosive des avalanches de neige humide (Gardner, 1983 ; Jomelli et Bertran, 2001 ; Issler et al, 2008). Cependant cette constatation confirme les analyses précédemment évoquées, la mise en place du dépôt s'est faite dans un contexte d'écoulement très lent avec une cinétique faible. L'écoulement a donc superposé la neige transportée directement sur le manteau neigeux préexistant sans l'araser. On remarque également que le manteau neigeux initial est particulièrement dense et humide et est

donc moins facilement érodable que de la neige fraîche et peut facilement créer une surface de frottement réduisant le potentiel érosif de l'écoulement. Les typologies nivologiques et les masses volumiques du dépôt sont similaires au manteau neigeux initial, à l'exception des couches situées directement sous le dépôt qui présentent des masses volumiques légèrement plus élevées, signe d'un léger tassement et de l'absence de fortes zones d'érosion. Néanmoins, l'épaisseur du manteau neigeux conservée sous le dépôt est plus importante dans la partie médiane et en amont du dépôt. Cette constatation s'explique par la morphologie différente de la zone du dépôt en comparaison à la zone dans laquelle la caractérisation du manteau neigeux initial a été effectuée, qui favorise l'accumulation de neige, notamment transportée par le vent et par d'éventuelles purges du couloir lors de fortes chutes de neige.

Ces résultats confirment la présence d'un écoulement homogène. La structure interne est très homogène et dense, la structure en agrégat n'est visible qu'à la base du point de mesure situé en amont du dépôt. L'altération de la neige s'est principalement produite durant l'écoulement et non durant la phase de mise en place du dépôt. La zone de dépôt étant particulièrement courte (75m) et située directement sous une barre rocheuse, le dépôt s'est constitué par une accumulation très localisée. Les agrégats, formés lors de l'écoulement, sont venus se souder les uns aux autres lors de la mise en place du dépôt. Les caractéristiques du dépôt sont donc relatives aux avalanches de neige humide, typique d'un fonctionnement normalement printanier et caractérisé par un écoulement dense, lent (et sans aérosol ou écoulement dilué) avec la formation d'agrégats, avec des dimensions parfois importantes (>1m) .

7.6.3 Analyse comparée des deux dépôts

Les deux dépôts considérés sont le fruit de deux avalanches étant séparées l'une de l'autre d'une seule année calendaire. Si les dates de déclenchement sont proches (début février) et malgré des méthodes de mesure différentes, les résultats et l'analyse de l'étude des deux dépôts d'avalanches permettent d'observer quelques similitudes et de nombreuses différences entre les caractéristiques des deux dépôts, liés aux régimes d'écoulement.

Les deux dépôts présentent une structure de surface composée d'un enchevêtrement d'agrégats avec des dimensions variables. Même si la méthode de Wolman n'a pas été appliquée sur le dépôt aux caractéristiques hivernales, on constate que la granulométrie de surface est plus importante pour le dépôt issu d'une avalanche de neige humide. On retrouve dans le dépôt de neige fraîche une forte stratification avec une structure interne où l'on retrouve quelques agrégats contrairement au second dépôt qui présente une structure plus compacte et homogène, signe d'une compaction plus importante. Les mesures de masse volumique confirment cette constatation, en effet la masse volumique est plus élevée et homogène dans le dépôt de neige humide. Le dépôt de neige fraîche présente une importante stratification longitudinale et dans l'épaisseur, ce qui correspond à l'évolution dans le temps de l'écoulement entre les dynamiques propres au front, au corps et à la queue de l'avalanche. Étonnamment, c'est l'avalanche de neige sèche qui a provoqué l'érosion la plus importante du manteau neigeux initial, le dépôt de neige humide s'est constitué en se superposant au manteau neigeux déjà existant. La différence de cinétique et de puissance entre les deux écoulements, avec notamment la présence probable d'un aérosol pour l'avalanche de neige sèche, ainsi que les caractéristiques très différentes des deux manteaux neigeux initiaux expliquent cette importante différence d'érosion.

7.6.4 Méthodologie employée

Cette étude propose une première méthodologie pour étudier les caractéristiques des dépôts d'avalanches en combinant différentes méthodes dont l'analyse de profils de neige. Dans ce but, l'utilisation d'un carottier s'est avérée avantageuse car il est possible d'effectuer rapidement plusieurs points de mesure pour finement caractériser la stratigraphie en considérant une variable jusqu'à présent jamais étudiée : la porosité. Cependant, en fonction de la compacité de la neige, il peut être difficile d'effectuer les mesures de porosité puisqu'elle requiert la possibilité d'isoler un segment intact et de connaître précisément sa profondeur. Il peut être également plus complexe de caractériser finement la stratigraphie, car les couches peu denses et/ou non cohésives peuvent connaître une altération lors du forage.

La méthode a été adaptée pour être utilisée dans des configurations dans lesquelles l'utilisation d'un carottier n'est pas possible. L'utilisation de puits de neige, creusés à la main directement dans le dépôt, permet d'effectuer des mesures de masse volumique plus précises et à des intervalles de profondeur plus réguliers et de caractériser plus finement la stratification nivologique du dépôt. Cependant, cette méthode est plus chronophage, limitant le nombre de dépôts sur lesquels des mesures sont effectuées, et ne permet pas d'effectuer des mesures de porosité puisqu'elle exclut la possibilité de prélever de longues sections verticales.

La principale limite de cette approche repose dans l'important temps de manipulation nécessaire qui limite le nombre de points d'échantillonnage réalisés et donc la qualité de la couverture spatiale. Pour combler ce manque de données, des méthodes d'interpolation numérique ont été utilisées afin de simuler les valeurs de masse volumique et de porosité entre les différents points de mesure. Les premiers essais réalisés ont montré des résultats encourageants, mais ont mis en avant la nécessité d'obtenir des mesures sur l'ensemble du dépôt pour limiter les incertitudes dans les zones non investiguées et de maximiser les valeurs propres à des profondeurs précises et constantes entre les points de mesures pour favoriser des profondeurs de mesures communes.

Par ailleurs, il n'a pas été possible d'effectuer des mesures au sein des zones de départ, une meilleure caractérisation des conditions nivologiques initiales permettrait d'approfondir notre analyse. La zone amont du dépôt issue du couloir 208 de Bonneval n'a pas pu être investiguée, empêchant d'établir des analyses sur cette partie du dépôt, caractérisée par une forte accumulation dans une partie du couloir encaissée.

Concernant l'étude de la répartition des dimensions des agrégats de surface, il serait possible d'utiliser des méthodes de photogrammétrie depuis les clichés réalisés depuis le drone afin de caractériser la granulométrie des agrégats. Il serait alors possible d'obtenir les mesures de l'ensemble des agrégats et d'analyser plus finement leur répartition spatiale à la surface du dépôt.

7.7 Conclusion et perspectives

Dans cette étude, des mesures de terrains ont été utilisées pour documenter les caractéristiques géométriques, nivologiques et granulométriques de deux dépôts d'avalanches et étudier les liens avec les types d'écoulement avalancheux associés.

Le premier dépôt étudié est typique d'une avalanche de neige sèche. Le dépôt présente une forte stratification et d'importantes zones de compression et d'érosion, signe d'une forte énergie cinétique. Les valeurs de porosité et de masse volumique sont extrêmement variables entre et au sein des points de sondage et on remarque à la base de l'écoulement la présence de zones de faible masse volumique, signe d'importantes fluctuations spatio-temporelles de la masse volumique de l'écoulement durant la propagation et la phase de dépôt. Les caractéristiques du dépôt sont relatives à une transformation de la neige transportée ayant essentiellement lieu lors de la phase de mise en place du dépôt.

Le second dépôt présente des caractéristiques liées à un écoulement de neige humide. La structure générale du dépôt est très homogène et on relève des valeurs de granulométrie ou de masse volumique élevées, largement supérieures aux valeurs du premier dépôt ou aux rares travaux s'étant penché sur la composition des dépôts d'avalanches. Contrairement, au comportement typique des écoulements de neige humide, on relève une absence d'érosion du manteau neigeux initial. Les caractéristiques du dépôt d'avalanche sont relatives à une transformation de la neige transportée qui s'opère dès l'écoulement de l'avalanche et que l'on retrouve dans le dépôt.

Ces résultats permettent d'apporter des informations inédites sur la création des dépôts et leurs relations avec les caractéristiques du manteau neigeux initial et de l'écoulement. Ils illustrent l'importance des caractéristiques du manteau neigeux au moment du déclenchement de l'avalanche comme facteur de contrôles des caractéristiques du dépôt final. C'est notamment l'importance de l'humidité du manteau neigeux initial, dépendante des conditions météorologiques qui va conditionner le type d'écoulement et en dernier lieu les caractéristiques du dépôt final. Les différences constatées entre les deux dépôts apportent des informations

précieuses qui pourraient notamment être utiles au développement et à la validation des modèles numériques.

Cependant nos résultats ne sont relatifs qu'à deux avalanches présentant des dimensions réduites et une forme simple. Nous ne pouvons exclure que, avec des conditions de déclenchement et d'écoulement similaires, des dépôts issus d'avalanches d'ampleurs plus importantes et présentant des formes plus complexes présentent des caractéristiques de dépôt différentes. Il paraît donc précieux de répliquer cette approche sur un plus grand nombre de dépôts avec une diversité plus importante de caractéristiques géométriques et nivologiques. Dans ce but, une extension de notre approche pourrait être d'améliorer la qualité des mesures en les opérant sur un site instrumenté afin d'améliorer l'identification des liens entre les caractéristiques des dynamiques d'écoulement, la morphologie des couloirs et les caractéristiques géométriques, nivologiques et granulométriques des dépôts.

Chapitre 8 : Volume des dépôts d'avalanches : variabilités spatio-temporelle et relations avec la géomorphologie des couloirs

Afin d'identifier les variables morphologiques des couloirs d'avalanches responsable des volumes des dépôts nous avons constitué une base de données référençant des volumes de dépôts dans 3 communes de la vallée de la Haute-Maurienne. Différentes méthodes statistiques ont été utilisées à différentes échelles spatio-temporelles en se concentrant sur les variations saisonnières des variables de contrôle des volumes de dépôts. Ce chapitre est composé de deux articles.

L'article présenté dans le chapitre 8.1 a fait l'objet d'une publication publiée le 30 juin 2020 dans la revue *Géomorphologie : Relief, processus et environnement*. Cette partie explore la qualité des données issues de l'EPA sur la période 1902-2017, la variabilité spatio-temporelle des volumes des dépôts ainsi que l'identification de certaines variables de contrôle des volumes à l'échelle de la commune de Bessans.

L'article présenté dans le chapitre 8.2 a fait l'objet d'une publication publiée le 14 octobre 2021 dans la revue *The Cryosphere*. Cette partie se concentre sur l'identification des variables de contrôle morphologique des volumes des dépôts d'avalanches sur la période 2003-2017 à l'échelle de la vallée de la Haute-Maurienne. Une attention particulière est donnée à finement identifier et discuter les fluctuations entre les variables de contrôle hivernaux et printaniers.

Pour l'aboutissement de ces deux publications, j'ai effectué le travail de vérification et de complétion des données EPA. Vincent Jomelli, Nicolas Eckert, Delphine Grancher et moi-même avons effectué les analyses statistiques. Enfin, j'ai rédigé et mis en forme les textes principaux, les figures et les tableaux, tout en étant en contact avec l'ensemble des co-auteurs pour améliorer la discussion autour des résultats ainsi que la qualité rédactionnelle des deux articles.

8.1 Variabilité des volumes des dépôts d'avalanches et relations avec la morphologie des couloirs d'écoulement (Bessans, Savoie, France)

Hippolyte Kern^{*a}, Vincent Jomelli^a, Nicolas Eckert^b, Delphine Grancher^a, Michael Deschâtres^b

^aUniversité Paris 1 Panthéon-Sorbonne, LGP-CNRS – 1 place Aristide Briand, Meudon, France

^bINRAE, Université Grenoble Alpes, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères, France

Résumé

Les avalanches sont un des processus actifs les plus présents dans les Alpes françaises. Ce processus génère des dépôts neigeux plus ou moins volumineux et occasionnent des dégâts et des perturbations régulières aux réseaux de communication. Or les facteurs contrôlant le volume de ces dépôts sont encore très méconnus. Nous proposons une étude statistique de la variabilité temporelle et spatiale des volumes de dépôts d'avalanches ainsi que sur leurs relations avec la topographie des couloirs. L'étude porte sur 46 couloirs d'avalanche situés sur la commune de Bessans en Haute-Maurienne (Alpes françaises). Les données utilisées, et notamment les volumes des dépôts, sont principalement issues de l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) mise en place depuis 1899. Nos résultats mettent tout d'abord en avant une réduction importante des volumes des dépôts depuis le début du XXe siècle, attribuée à la qualité hétérogène des données dans le temps. Pour cette raison, l'analyse statistique des volumes des dépôts est réalisée sur la période 2003-2017. Sur cette période, la variabilité spatiale des volumes de dépôts entre les différents couloirs étudiés est importante. L'approche statistique montre que ce sont les variables liées à la dimension des couloirs et leur altitude qui influencent les volumes des dépôts. Cependant, ces relations s'appliquent seulement aux avalanches d'hiver (novembre-février). La météorologie pourrait être le facteur contrôlant les volumes de dépôts au printemps (mars-mai).

Mots clés : Avalanche - dépôt - volume - géomorphologie - EPA - Alpes françaises

Snow avalanche is one of the most common active processes in the Alps. They form snow deposits and cause regular damage and disruption to communications networks. However, little is known on factors controlling volume variability of snow avalanche deposits. We therefore focus on a statistical study of the temporal and spatial variability of avalanche deposits volumes as well as their relationship with corridor morphology. The case study includes 46 avalanche corridors located in Bessans, a French Alpine town. Data used, and particularly the volumes of deposits, are mainly from the EPA (Enquête Permanente des phénomènes Avalancheux) set up in 1898. Our first results highlight a significant reduction in deposit volumes since the beginning of the 20th century. However, the quality of the data is not uniform through time. The detailed analysis of deposit volumes can only be done over the period 2003-2017. Over this period, the spatial variability of deposit volumes from the different corridors studied is significant. Our statistical approach shows that the variables related to the size and the altitudes of the corridors control the deposit volumes. However, these relationships are only relevant for winter season (November-February). Meteorological factors could be responsible for deposit volumes variability in spring (March-May).

Keywords: Avalanche - Deposit - Volume - Geomorphology - EPA - French Alps

Abridged English Version

Snow avalanches are one of the most common active processes in the Alps. They form snow deposits and cause regular damage and disruption to communication networks. However, little is known about factors controlling volume variability of snow avalanche deposits. Some previous works were conducted in the late 1990s in Europe to document the sedimentological characteristics of snow avalanche deposits but links between avalanche deposits and avalanche corridor characteristics or flow types remain poorly documented. Therefore, this study provides a statistical analysis of the temporal and spatial variability of avalanche deposit volumes as well as of their

relationship with corridor morphology. The case study includes 46 avalanche corridors located in Bessans, a French Alpine town (Fig. 39).

Data used, and particularly the volumes of deposits, are mainly from the EPA (Enquête Permanente des phénomènes Avalancheux) set up in 1898 (Fig. 40). A correction and completion work has been carried out to develop the avalanche deposit database used in this paper. Every information contained in the database has been verified from the original documents. In addition, few other snow avalanche events were added to our database from three other datasets. For the 46 corridors defined by the EPA survey system, morphometric variables were calculated using GIS and a DEM including the presumed preferential avalanche flow path (PPFP) within the corridor and the extension of the corridor itself. Simple statistical methods were used to characterize the spatial and temporal distribution of deposit volumes. Relationships between corridor morphology and deposition volumes were analysed using the Spearman's rank correlation coefficient. This coefficient was useful in this analysis because the analyzed distributions are asymmetric with extreme values departing strongly from the mean.

Our first results highlight a significant reduction in deposit volumes since the beginning of the 20th century. However, the quality of the data is not uniform through time and the detailed analysis of deposit volumes can only be done over the period 2003-2017. Over this period, slightly less than half of the years have reported low deposit volumes (Fig. 41). Both the years 2014 and 2017 recorded particularly large deposit volumes.

Over the period 2003-2017, the spatial variability of deposit volumes among the different corridors studied is strong, with significant statistical correlation between avalanche deposit volumes and few morphometric variables. Positive correlation coefficients ($\rho > 0.25$ et $P < 0.05$) reflect a general response of snow avalanche deposit volumes to prevalent morphometric variables (Tab. 8). The variables related to size and elevation of the corridors principally influence deposit volumes (Tab. 8 & Tab 9). However, the weak correlations between slope variables, corridor aspect and deposit volumes suggest that scales finer than those considered here should be considered. The non-significant statistical relationship between aspect variables and deposit

volumes may also be partly due to the indirect influence of roughness, as suggested already by other works.

The seasonal subsampling analysis shows that winter deposit volumes (November-February) are significantly correlated with corridors morphometric variables (Tab. 7). On the contrary, the spring deposit volumes are not or only slightly correlated with morphometric variables. Therefore, we assumed that spring deposit volumes (March-May) may be more climate-controlled. Research indicates that meteorology is an important factor for the triggering and the flow of avalanches. Hence, our seasonal variations in correlations with deposit volumes are interpreted as changes in the nature of the flow related to the variations of the snow characteristics.

Our approach could easily be applied in other regions/contexts so as to confirm (or not) what was identified for this case study in terms of main corridor morphological variables having a significant influence on avalanche deposit volumes. An extension to our approach could be to take into account the influence of both geomorphological and meteorological variables altogether. This type of analysis combining climatic and geomorphological variables has, for example, been applied to the evolution of debris-flows in the French Alps demonstrating the relevance.

8.1.1 Introduction

Les avalanches sont des écoulements de neige le long d'un versant qui provoquent des dégâts importants ainsi que de nombreuses victimes chaque hiver. La connaissance sur les avalanches (Mougin, 1922 ; Bakkehöi, 1987 ; Schweizer, 1999 ; Birkeland et al., 2001 ; Jomelli et Bertran, 2001 ; Sovilla et al., 2015) a fortement progressé ces dernières années. Les chercheurs se sont focalisés principalement sur leur formation (Schweizer et al., 2003 ; Gaume et a., 2012), leur fréquence d'occurrence (Smith et Mc Clung, 1997), leur relation avec le climat en Europe (Durand et al., 2009 ; Eckert et al., 2010a ; Eckert et al., 2010b ; Castebrunet et al., 2012 ; Castebrunet et al., 2014 ; Naaim M. et al., 2016), en Amérique du nord (Mock, 1995 ; Hebertson et al., 2003) et en Asie (Ballesteros-Canovas et al., 2018). D'autres travaux ont porté sur les variables géomorphologiques contrôlant la fréquence (Mc Clung et Tweedy, 1993) et les distances d'arrêt des avalanches (Eckert et al., 2010b ; Favier

et al., 2016), notamment relatives aux événements extrêmes (Eckert et al., 2007 ; Eckert et al., 2013).

En revanche, certains aspects de l'activité avalancheuse restent moins connus. C'est notamment le cas du dépôt d'avalanche dont les caractéristiques nivologiques peuvent être différentes de celles de l'avalanche initiale (Jomelli, 1999 ; Jomelli et Bertran, 2001). Cette absence de connaissance sur le dépôt d'avalanche est d'autant plus surprenante que ses caractéristiques déterminent l'importance des dégâts et des perturbations infligées au bâti et aux réseaux de communication. Quelques études ont été réalisées à la fin des années 1990 en Europe ou dans l'Himalaya sur leurs caractéristiques nivologiques et sédimentologiques (Yanlong et Maoshuan, 1992 ; Jomelli, 1999 ; Jomelli et Bertran, 2001 ; Jomelli et Pech, 2004a ; Bartelt et McArdell, 2009). Plus récemment des recherches conduites sur un site expérimental en Suisse (Sovilla et al., 2010 ; Sovilla et al., 2015 ; Kölher et al., 2018) ou sur des sites canadiens (Mc Clung et Gauer, 2018) ont montré l'existence de liens ténus entre la mise en place des dépôts et les caractéristiques des couloirs d'avalanches ou les types d'écoulement. Cependant, il n'existe à ce jour aucune étude ayant pour but d'analyser les caractéristiques géométriques, notamment volumétriques des dépôts d'avalanches et d'identifier leurs relations avec les caractéristiques morphologiques des couloirs.

L'objectif de cet article est donc d'étudier les volumes des dépôts d'avalanches et d'analyser l'influence des caractéristiques morphologiques des couloirs sur la variabilité des volumes des dépôts sur la commune de Bessans dans les Alpes françaises. Cette commune est un terrain d'étude privilégié des phénomènes avalancheux. En effet, la topographie et les conditions météorologiques locales favorisent une forte activité avalancheuse et la commune subit régulièrement des coupures de routes et plus occasionnellement des dommages au bâti, voire des victimes.

Dans le détail il s'agira d'étudier (i) la répartition temporelle, (ii) la répartition spatiale des volumes des dépôts d'avalanches sur la commune de Bessans entre 1903 et 2017, ainsi que (iii) l'influence des caractéristiques morphologiques des couloirs d'avalanches dans la variabilité géométrique des dépôts à Bessans, cette fois entre 2003 et 2017. Après une description détaillée du terrain d'étude et des données

utilisées, nous présentons l'analyse statistique de données compilées. Les résultats produits par cette approche sont ensuite présentés, interprétés puis discutés.

8.1.2 Présentation du terrain d'étude

8.1.2.1 Cadre géographique

Bessans (Fig. 39) est située dans la vallée de la Haute-Maurienne, partie amont de la vallée de la Maurienne (Fig. 39), dans le département de la Savoie et traversée par la rivière l'Arc. Sur le territoire communal de Bessans, le fond de la vallée est situé à une altitude de 1 670 m d'altitude et la pointe de Charbonnel constitue le point culminant à 3 752 m impliquant des pentes importantes, propices aux avalanches. La vallée, de direction sud-ouest à nord-ouest, est marquée par une topographie héritée de la glaciation quaternaire : une vallée glaciaire en auge, des cirques glaciaires et des versants présentant des pentes régulièrement au-dessus de 30°. Sa structure géologique est typique de celle d'une vallée intra-alpine, où apparaissent la zone Briançonnaise interne, la zone des schistes lustrés ainsi que celle des massifs cristallins internes.

L'histoire et l'implantation humaine de la vallée de la Haute-Maurienne sont liées à sa situation permettant le passage entre la France et l'Italie. Aujourd'hui, le développement économique de la vallée repose essentiellement sur le tourisme avec notamment la présence du parc national de la Vanoise et de plusieurs stations de ski, dont le domaine de ski nordique présent sur la commune de Bessans, très exposé aux avalanches.

8.1.2.2 L'activité avalancheuse à Bessans

Le nombre important de couloirs associé à une forte activité avalancheuse fait de cette commune un terrain particulièrement privilégié pour l'étude des phénomènes avalancheux (Ancey et al., 2004 ; Eckert et al., 2009 ; Favier et al., 2014). Les 46 couloirs d'avalanches suivis par le protocole de « l'Enquête Permanente des Avalanches » (EPA que nous présenterons par la suite) et leurs dépôts sont l'objet de

notre étude (fig. 39). La fréquence avalancheuse moyenne à l'échelle communale est de 0,8 avalanche par couloir et par an entre 1946 et 2005. Cette fréquence est l'une des plus importantes des Alpes du nord (Eckert et al., 2010c). L'intérêt de ce terrain d'étude s'explique également par les formes et les dimensions des couloirs. Ceux-ci présentent des orientations d'ouest à nord-est en rive gauche et, en rive droite des orientations de sud-est à est. Les pentes moyennes sont comprises entre 30° et 43°, pour des dénivelés compris entre 430 et 2 400 m.

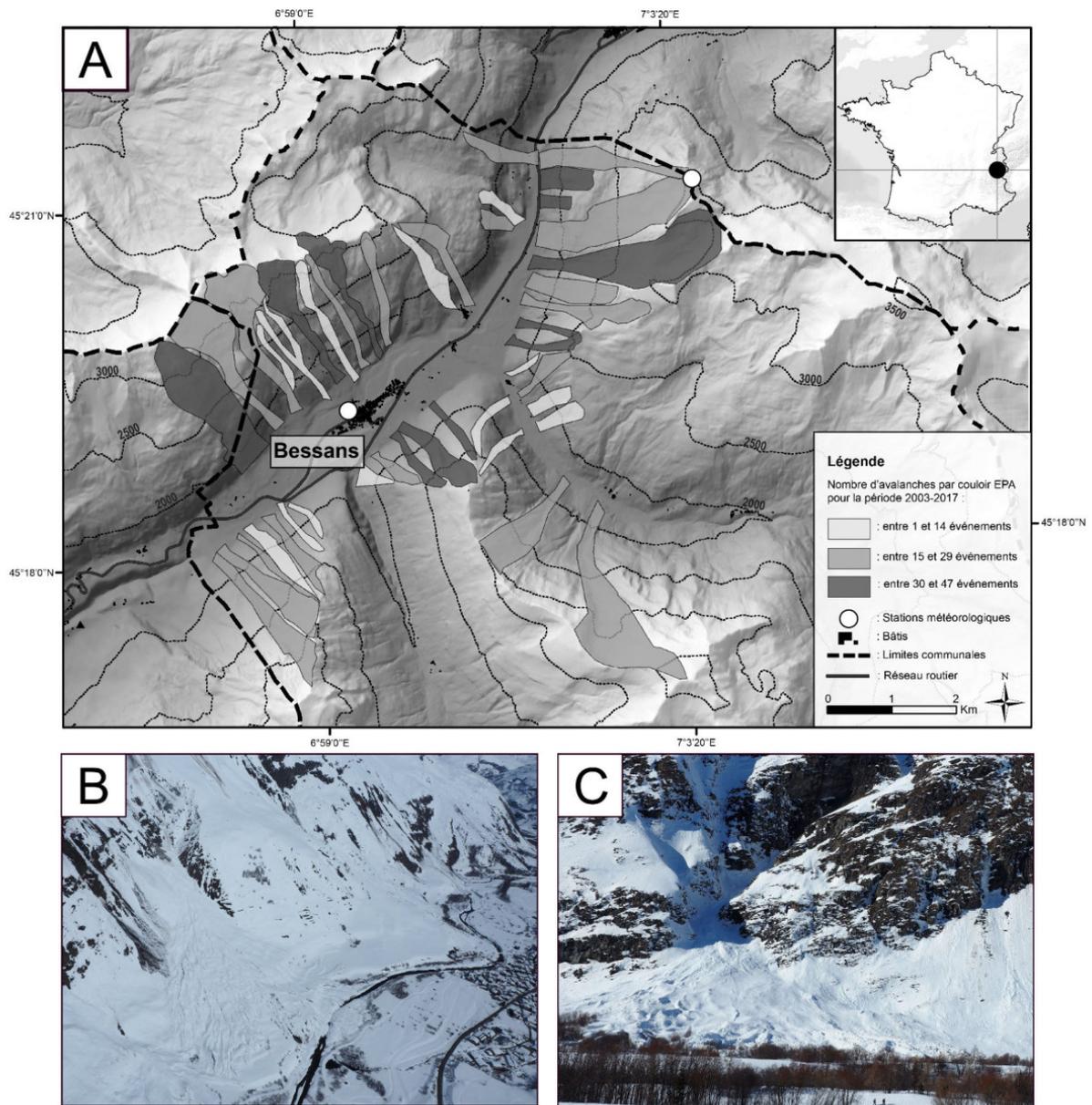


Figure 39 : Carte de localisation et photographies de dépôts en janvier 2017 (INRAE-ETNA, 2017)
A : Localisation et nombre d'avalanches répertorié par couloir pour la période 2003-2017.
B : Couloir EPA n°16 de Bessans
C : Couloirs EPA n°17 de Bessans

8.1.2.3 Caractéristiques météorologiques des saisons avalancheuses pour la période 2003-2017

Bessans, qui se situe au cœur de la vallée de la Haute Maurienne, jouit d'un climat d'abri froid. La barrière des Préalpes et les massifs centraux externes protègent la vallée des masses d'air venues de l'océan Atlantique. Cependant, la vallée reste

régulièrement soumise à des « retours d'est » venus d'Italie qui peuvent apporter d'importantes précipitations.

L'analyse de données issues de deux stations Météo-France situées à 1 715 m et 2 740 m d'altitude sur la commune de Bessans permet de dresser une synthèse météorologique des saisons avalancheuses pour la période 2003-2017 (Tab. 6). La saison avalancheuse ou « année avalancheuse » s'étend de début novembre à fin mai. À Bessans, cette période se caractérise tout d'abord par des températures froides, la température moyenne des saisons avalancheuses pour la période 2003-2017 est de -1°C à 1 715 m et de -4°C à 2 740 m d'altitude. Les précipitations neigeuses sont importantes et l'épaisseur du manteau neigeux dépasse régulièrement 50 cm à 1 715 m et 200 cm à 2 740 m d'altitude.

Il existe deux saisons météorologiques distinctes propices aux phénomènes avalancheux sur la commune de Bessans pour la période 2003-2017 (Tab. 6). La saison « d'hiver » s'étend de novembre à février, elle se caractérise par des températures moyennes froides avec des refroidissements brutaux pouvant atteindre -25°C pendant au moins 24 heures. L'épaisseur du manteau neigeux reste relativement faible avec une épaisseur moyenne pour cette période de 90 cm à 2 740 m d'altitude. La saison de « printemps » s'étend de mars à mai. Elle est marquée par des températures plus élevées et la présence de pics de chaleur journaliers importants (jusqu'à 25°C à 1 750 m). Les amplitudes thermiques journalières moyennes sont également plus importantes. Les précipitations sont environ deux fois moins importantes que pour la saison précédente avec une hauteur moyenne de neige fraîche journalière de 1,5 cm à 1 715 m. Cependant, à 2 740 m, l'épaisseur moyenne du manteau neigeux reste importante (170 cm en moyenne).

Tableau 6 : Statistiques descriptives des caractéristiques nivo-météorologiques moyennes à Bessans sur la période 2003-2017 selon deux stations météorologiques situées à 1715 m et 2740 m.

Altitude de la station	Saison	Temp. moy. journalière (°C)	Temp. moy. journalière (°C)	Temp. max. journalière (°C)	Amplitude thermique journalière	Hauteur de neige au sol (cm)
1 715 m	hiver-printemps	-1	-6	4	10.1	47.2
	hiver	-4	-9.1	-0.1	9.1	50.8
	printemps	-3.2	-2.1	9.4	11.5	43.6
2 740 m	hiver-printemps	-4	-6.6	-1.2	5.3	123
	hiver	-5.5	-8	-2.7	5.1	86
	printemps	-2.3	-4.8	0.6	5.5	169.9

8.1.3 Données et méthodologie

8.1.3.1 Présentation des données de description des avalanches

L'étude des volumes des dépôts d'avalanches ainsi que l'analyse de l'influence des caractéristiques morphologiques des couloirs sur la variabilité des volumes de dépôt nécessite l'usage de données fiables et précises.

8.1.3.1.a Avalanches issues de l'EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches)

La base de données EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches) est un inventaire des avalanches survenues sur des sites français des Alpes et des Pyrénées (Deschâtres et al., 2010 ; Bourova et al., 2016). Impulsée par Paul Mougin, ingénieur des Eaux et Forêts, au début des années 1900, l'EPA centralise aujourd'hui des données pour plus de 100 000 avalanches répartis dans environ 3 900 couloirs connus et délimités pour une période couvrant 122 années avalancheuses (campagnes de relevés étalées entre octobre et juin). Les couloirs EPA (Fig. 39) sont bien connus, délimités et cartographiés, chaque avalanche qui dépasse un seuil d'altitude prédéfini au sein des couloirs fait l'objet d'un « relevé d'événement ».

Les avalanches présentes dans la base de données EPA ont été répertoriées dans des carnets forestiers papiers jusqu'à la mise en place d'un système numérique au début des années 2000. Trois générations de carnets se sont succédées depuis la

création de l'EPA. Elles correspondent à des protocoles différents de récolte et de saisie des données.

Les premiers carnets (Fig. 40A) ont été utilisés dès 1899 et jusqu'en 1975. Les volumes estimés des dépôts ainsi que des descriptions complémentaires sur l'avalanche (éventuels impacts sur le couvert forestier, les constructions ou les voies de communication et sur les victimes humaines ou animales) sont renseignés en plus des informations de base permettant de décrire l'avalanche. Une seconde génération de carnets brièvement utilisée au début des années 1970 (Fig. 40B) n'a recensé qu'une centaine d'avalanches. La troisième et dernière génération de carnets a été mise en place durant l'hiver 1975-76 et utilisée jusqu'en 2003, date de mise en place du système informatique (Fig. 40C). Entre chaque génération de carnet, on observe des différences dans les éléments descriptifs relevés. Les informations récoltées sur les avalanches sont, depuis, plus précises et détaillées. Les relevés sont désormais opérés par les techniciens forestiers de secteur de l'Office National des Forêts (ONF) et centralisés par l'Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement (INRAE anciennement IRSTEA). Entre 2003 et 2006, l'IRSTEA a effectué un vaste travail de numérisation de l'ensemble des données issues des carnets EPA. Aussi, l'ensemble des tracés des couloirs a été numérisé sur fond topographique, le suivi des relevés a été amélioré et l'ensemble des données est devenu disponible librement sur la plateforme www.avalanches.fr.

Ce type de base de données n'existe que dans quelques autres pays comme la Suisse, mais avec une couverture spatiale nettement plus réduite. En France cette base a été utilisée pour de nombreuses recherches. Des études ont notamment porté sur les liens entre le climat et l'activité avalancheuse (Eckert et al., 2010a) ou bien sur l'analyse des distances d'arrêts (Eckert et al., 2010b). Cependant, nous avons procédé à un important travail correctif de la base de données EPA informatique pour la commune de Bessans en nous focalisant sur deux biais possibles : des erreurs de saisie ou des valeurs aberrantes. Les erreurs de saisie ou les oublis ont été identifiés en comparant les carnets papier aux informations contenues dans la base informatique tandis que les valeurs aberrantes ont été identifiées après critique des données. Par exemple, l'altitude de la zone d'accumulation ne pouvait pas être supérieure à celle du plus haut sommet de la zone. Ce travail systématique a permis

d'apporter des corrections à 653 avalanches et d'ajouter 185 avalanches issues des carnets papiers. Ce qui porte le total à 2295 avalanches à Bessans entre 1901 et 2017.

A Commune de *Bessans* n° 1 Avalanche de *Cubi à Guitain Evide*

Année	Date et heure de l'avalanche	Genre de l'avalanche	Altitude du point de départ		Le point de départ est	Requisites sur l'avalanche :
			point de départ	point d'arrivée		
1901	8 avril 1901	de fond	-	-	à l'ouest	1° Durée : 2° Dégrés aux forêts, aux constructions, 3° Nature de percussions ou de lésions de travail en avalanches, 4° Indication des routes, voies ferrées ou rivières interceptées, 5° Dimension du cônes formés par l'avalanche.
1902	24 avr	de	-	-	à l'ouest	Une quantité de feu sans commencement de fusion sans dépôt
1904	12 Juin	de	-	-	à l'ouest	de
1906	14 avril 1906	de	-	-	à l'ouest	19 ^m de hauteur. Cône 100 x 30 x 1.50
1907	16 mai 1907	de fond	1900	1870	à l'ouest	Sans dépôt
1912	8 mai 1912	de	2100	1700	à l'ouest	caisson (2.50 x 1.50 x 1.50) à 500 m
1918	30 Mars 1918	de	2700	1700	à l'ouest	Sans dépôt
1924	17 avril 1924	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1926	1 Mars 1926	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1927	1 Mars 1927	de	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1929	20 Mars 1929	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1932	15 Mars 1932	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1934	1 Mars 1934	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1935	1 Mars 1935	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1936	1 Mars 1936	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1937	1 Mars 1937	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1938	1 Mars 1938	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1939	1 Mars 1939	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1940	1 Mars 1940	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1941	1 Mars 1941	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1942	1 Mars 1942	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1943	1 Mars 1943	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1944	1 Mars 1944	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50
1945	1 Mars 1945	de fond	2200	1700	à l'ouest	à 350 x 1.50

B COMMUNE DE *Gonneval-sur-Arc*. COLLOIR D'AVALANCHE N° 18 DIT DU CLOT

ANNÉE	DATE DE L'AVANCHE	HEURE	NATURE	SOMME DE L'AVANCHE	SITUATION DE L'AVANCHE		SITUATION DE LA ZONE DE RISQUE		DÉSIGNATION DE LA ZONE DE RISQUE	REMARQUES
					1. altitude	2. nature	1. altitude	2. nature		
1972	28.12.72	19h30	1	a	M	2	SE	d	Sans dépôt	
1973	13.8.73	23h00	1	a	M	2	SE	d	Sans dépôt	
1975	20.4.75	11h00	2	a	b	2	SE	a	Sans dépôt 400 x 100 x 1	

C COMMUNE de *BESSANS* Site n° 2. Code avalanche *SPANDANE*

ANNÉE	DATE DE L'AVANCHE	HEURE	NATURE	SOMME DE L'AVANCHE	SITUATION DE L'AVANCHE						SITUATION DE LA ZONE DE RISQUE						REMARQUES			
					A	B	C	D	E	F	1	2	3	4	5	6				
1974	6.1.74	19h30	1	1350	1750	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1974	21.4.74	19h30	1	1600	1750	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1977	15.1.77	19h30	1	2200	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	17.2.78	19h30	1	2200	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	12.5.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400	1950	1	1	1	1	1	1	X	X	X	X	X	X	X	X	
1978	20.11.78	19h30	1	2400																

8.1.3.1.b Bases de données avalancheuses complémentaires à l'EPA de Bessans

Afin de disposer d'un inventaire aussi complet que possible, nous avons utilisé trois autres bases de données décrites sommairement ci-dessous afin d'ajuster les informations contenues pour chaque avalanche de la base de données EPA. Aucun ajout d'avalanches n'a été effectué depuis ces bases de données, il s'agissait ici uniquement de compléter ou de corriger des informations sur des avalanches présentes dans la base de données informatique EPA. Les bases de données complémentaires sont :

- La Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanches (CLPA), cartographie systématique des extensions d'avalanches dans les Alpes et les Pyrénées. C'est une carte-inventaire qui indique les sites d'avalanches en reportant l'emprise maximale actualisée des différentes avalanches survenues sur un même site en s'appuyant sur diverses méthodes. L'apport à la base EPA de données de la CLPA réside essentiellement sur la description d'éventuels dégâts et des dimensions de dépôts ;
- Les données de l'Observation Permanente des Avalanches (OPA), programme court (1972-1985) qui avait pour but de délimiter pour chaque commune présentant une vulnérabilité aux avalanches un périmètre dans lequel l'emprise maximum des avalanches serait calculée. L'étude des relevés OPA a permis d'ajouter des dimensions de dépôts dans la base EPA ;
- La base de données du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) de l'ONF, recense des avalanches ayant fait des victimes, provoqué des dégâts importants ou ayant largement dépassé le seuil d'alerte CLPA depuis les années 1950. La base de données RTM a permis de fournir des informations complémentaires sur les dégâts, perturbations et dimensions des dépôts pour quelques couloirs.

Au total, ce travail a permis de compléter ou d'apporter des corrections pour 273 avalanches.

8.1.3.1.c Les volumes des dépôts d'avalanches

Le principal intérêt de la base de données EPA pour notre travail est la présence d'estimations de volumes de dépôts. En effet, depuis 1899, les relevés EPA des avalanches sont accompagnés d'une estimation visuelle des dimensions des dépôts opérés par les observateurs de l'EPA. Mais, du fait des conditions d'observations, de la disponibilité des agents chargés des relevés et des différents protocoles EPA, toutes les avalanches n'ont pas fait l'objet d'estimation des dimensions des dépôts. On observe (fig. 41) que les estimations sur les dépôts n'ont pas été systématiques et, point essentiel pour cet article, durant la période 1975-2003 les volumes de dépôts ne sont plus notés dans les carnets. Ce n'est qu'à partir de 2003 que les volumes des dépôts sont de nouveau enregistrés. Cependant, sur la commune de Bessans entre 1904 et 2017 près de 80 % des relevés EPA contiennent une estimation des dépôts.

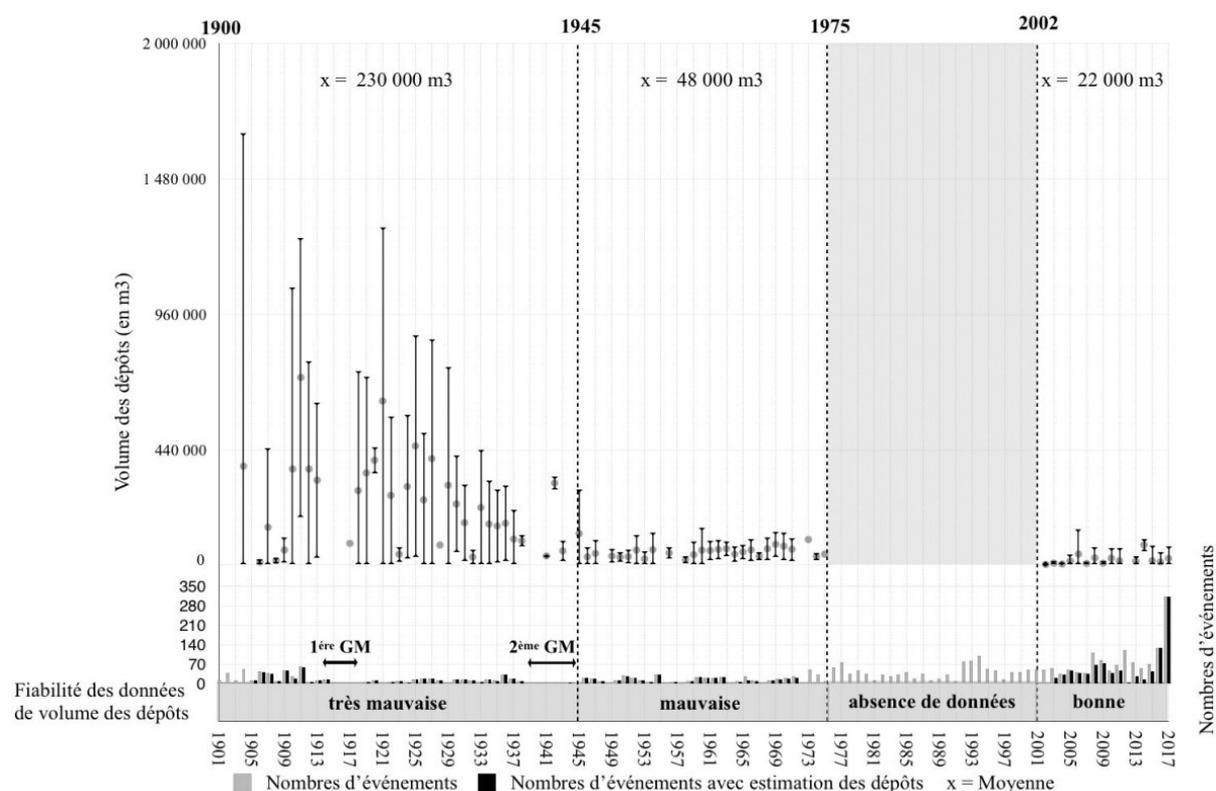


Figure 41 : Distribution temporelle des volumes moyens annuels cumulés des dépôts d'avalanches de la commune de Bessans.

Les protocoles d'estimation visuelle des dépôts ont évolué conjointement à ceux de l'EPA. Les points de contrôle visuel de l'activité avalancheuse, souvent éloignés du couloir, et le manque de formation des opérateurs ne permettaient pas

par le passé de réaliser une estimation fiable des dépôts. Sur la première moitié du XXe siècle, plusieurs volumes aberrants ont pu être identifiés pendant la correction de la base de données EPA. Il n'est cependant pas toujours possible de différencier les avalanches naturelles extrêmes de celles liées à une erreur d'estimation.

A la suite de l'identification de certains biais importants dans l'estimation des volumes des dépôts, un nouveau protocole d'observation a été mis en place à partir de 2003 par l'IRSTEA (actuellement INRAE). La consigne d'estimation des dimensions des dépôts a été explicitée de sorte que les valeurs enregistrées deviennent plus fiables et homogènes. Les estimations ne concernent alors plus que les dépôts d'avalanches clairement délimitables et sont réalisées depuis des points d'observations définis. Les situations complexes comme la présence de plusieurs branches d'écoulement au sein des dépôts sont également mieux prises en compte. Les estimations des dimensions des dépôts sont désormais directement intégrées à la base de données numérique.

Notre travail a ainsi permis d'ajouter les estimations des volumes de dépôts pour une partie des données de la période 1904-1975. Ces estimations étaient pour la plupart écrites dans les carnets papiers mais ne figuraient pas dans la base informatique. Ainsi, une estimation de la dimension des dépôts a été réalisée pour 1 788 avalanches entre 1904 et 1975. Cela n'a cependant pas permis de supprimer tous les biais inhérents à la méthode d'estimation visuelle des volumes de dépôts par un opérateur, et ce même pour la période 2003-2017. Par exemple, aucune estimation de volume n'a été réalisée pour l'année avalancheuse de 2012 sur la commune de Bessans.

8.1.3.2 Morphologie des couloirs

Pour chaque couloir défini par le système EPA à Bessans, nous avons calculé des variables morphométriques sous SIG depuis le MNT RGE ALTI de l'IGN d'une résolution d'un mètre. Ces variables caractérisent deux éléments du couloir : le chemin supposé préférentiel d'écoulement (CSPE) de l'avalanche au sein du couloir décrit par des variables calculées sur un linéaire, et le couloir lui-même décrit par des variables calculées sur une surface. Le CSPE correspond au talweg simplifié de

chaque couloir, déjà délimité dans la cartographie des couloirs EPA. Pour chaque CSPE ont été calculées : la longueur, la pente minimale, maximale et moyenne. On a également calculé pour l'ensemble du couloir l'altitude minimale, maximale et moyenne ainsi que le dénivelé. Des variables surfaciques ont aussi été prises en compte telles que : la surface, la pente minimale, maximale et moyenne. L'orientation moyenne des couloirs a été enfin ajoutée, exprimée entre 0° et 360° par rapport à l'axe de la vallée, permettant de différencier les deux versants principaux.

8.1.3.3 Traitement statistique des données

8.1.3.3.a Répartition spatiale et temporelle des volumes des dépôts d'avalanches

Le premier traitement concerne la répartition spatiale et temporelle des dépôts. Des méthodes statistiques simples ont été utilisées. Elles se basent sur des moyennes temporelles (par année avalancheuse) ou spatiales (par couloir) des volumes des dépôts représentées sous forme de boîtes à moustaches (réalisé sous RStudio). Cette représentation permet de résumer la distribution d'une variable de manière simple et visuelle, de comprendre la répartition des observations et d'identifier les valeurs extrêmes. La valeur centrale du graphique est la médiane, les bords du rectangle sont les quartiles. Les extrémités des « moustaches » sont calculées en utilisant 1,5 fois l'espace interquartile. Enfin, les valeurs extrêmes sont représentées par des points à l'extérieur des « moustaches »

8.1.3.3.b Relations entre la morphologie des couloirs et les volumes de dépôts

Les liens entre la morphologie des couloirs et les volumes des dépôts ont été analysés. Les valeurs des volumes des dépôts ont été dans un premier temps standardisées pour transformer les données en données centrées-réduites. Le principal avantage de cette méthode est de rendre comparables des variables qui ne le seraient pas directement du fait de moyennes et ou de variances trop différentes.

Elle consiste à opérer une double transformation de centrage et de réduction des valeurs.

Puis, nous avons travaillé avec les moyennes des cumuls des volumes standardisés des dépôts par couloir et par année avalancheuse. Nous avons ensuite calculé des corrélations de Spearman entre chaque variable descriptive de la morphologie des couloirs et les données standardisées des volumes des dépôts. Le coefficient de corrélation de rang (appelé coefficient de Spearman) examine s'il existe une relation entre le rang des observations pour deux caractères X et Y. Il permet de détecter l'existence de relations monotones croissantes ou décroissantes. Le coefficient de Spearman (noté r) varie entre -1 et +1 et permet de mettre en évidence des relations potentiellement non-linéaires positives ou négatives. Une table de corrélation (Saporta, 1990) permet de constater que dans le cadre de l'étude des dépôts de 46 couloirs d'avalanches, la relation est significative si le coefficient de spearman est inférieur à -0,3 ou supérieur à 0,3. Cette méthode a été utilisée dans cette étude car elle est recommandée pour des distributions dissymétriques avec la présence de valeurs extrêmes. La valeur-p (noté P) permet de considérer un résultat comme statistiquement significatif. La valeur seuil prise ici est : $P < 0,05$.

8.1.4. Résultats

8.1.4.1 Évolution des volumes et fiabilité des données entre 1904 et 2017

L'étude de l'évolution des volumes des dépôts entre 1904 et 2017 (fig. 41, tab. 7) montre l'effet des trois différents protocoles sur les estimations des volumes des dépôts. Le Tableau 1 résume les principales caractéristiques morphométriques des dépôts pour ces trois périodes. Les volumes moyens sont douze fois plus importants pour la période 1900-1945 que pour la période 2003-2017. Le décile supérieur correspondant aux 10 % des valeurs de volumes les plus importants et les écarts types sont en nette diminution entre ces trois périodes.

Tableau 7 : Statistiques descriptives des volumes annuels cumulés des dépôts (exprimé en m³) par période d'utilisation des différents protocoles EPA.

	1904-1944	1945-1975	2003-2017
Volume moyen des dépôts (en m ³)	230 000	48 000	22 000
Dernier décile supérieur des volumes de dépôts (en m ³)	< 1 000 000	< 112 000	< 30 000
Ecart type moyen (en m ³)	260 000	42 000	48 000
Nombre d'avalanches avec des données sur les dépôts	509	345	934

La période 1904-1945, qui recense 509 estimations de volumes de dépôts, est marquée par des volumes moyens élevés (230 000 m³) et des écarts types importants (260 000 m³), bien supérieurs aux deux autres périodes. Ces fortes valeurs ainsi que l'importance du dernier décile (> 1 000 000 m³) sont liées à la présence d'un grand nombre de valeurs extrêmes. Ces valeurs sont classées comme aberrantes au regard des valeurs proposées et de la hauteur de neige supposée mobilisée dans la zone de départ. Cette période ayant été marquée par les deux guerres mondiales, les relevés EPA n'ont pas été effectués pour sept années avalancheuses (1914-1917 et 1939-1943).

Concernant la période 1945-1975, 355 estimations de volumes de dépôts ont été réalisées. Le volume moyen des dépôts (48 000 m³) et l'écart type moyen (42 000 m³) sont en nette baisse par rapport à la période précédente, suggérant une meilleure fiabilité des données. Cependant, l'importance du dernier décile supérieur (> 112 000 m³) démontre encore la présence de valeurs extrêmes dans les relevés. Les relevés EPA n'ont pas été effectués pour 4 années avalancheuses. Ces éléments traduisent les biais dans le protocole qui ont été évoqués précédemment.

La taille des dépôts n'est pas renseignée de 1975 à 2002, suite au changement du protocole EPA. Concernant la période 2003-2017, le volume moyen (20 000 m³) et la valeur du dernier décile supérieur (< 30 000 m³) sont plus faibles, mais l'écart type

moyen (48 000 m³) reste comparable à la période 1945-1975. Avec 934 estimations de volumes de dépôts réalisées en quatorze ans, le nombre de dépôts estimés est largement supérieur. Cette augmentation est le reflet direct du changement de protocole EPA en 2003 qui a permis une plus grande régularité dans les relevés. Ces différences dans les volumes des dépôts entre les trois périodes s'expliquent par les changements de protocoles qui ont rendu les relevés et les estimations de volumes plus précis depuis 2003. Les différents changements de méthode d'acquisition des données effectués dans les protocoles EPA, énumérés précédemment, ont donc permis de rendre l'estimation des volumes plus fiable et plus systématique. Pour cette raison, l'analyse fine des volumes des dépôts a été réalisée sur la période 2003-2017.

8.1.4.2 Variabilité temporelle des volumes de dépôts pour la période 2003-2017

8.1.4.2.1 Description des volumes moyens

En représentant les valeurs sans les valeurs extrêmes (95% des données représentées) pour la période 2003-2017, on remarque des variations importantes entre les années (fig. 42A). Les valeurs minimales sont stables entre les différentes années et inférieures à 300 m³. On retrouve une importante hétérogénéité dans les seuils des derniers déciles supérieurs avec des valeurs variant entre 2 000 m³ (2004) et 38 000 m³ (2017) respectivement. Les années 2008, 2014 et 2017 se démarquent par une importante dispersion entre les déciles inférieur et supérieur (> 30 000 m³). On observe également une variation interannuelle entre les médianes, avec des valeurs comprises entre 1000 m³ pour 2004 et 7500 m³ pour 2017. La variation interannuelle des moyennes est plus importante avec des valeurs comprises entre 3000 m³ pour 2004 et 17 000 m³ pour 2008.

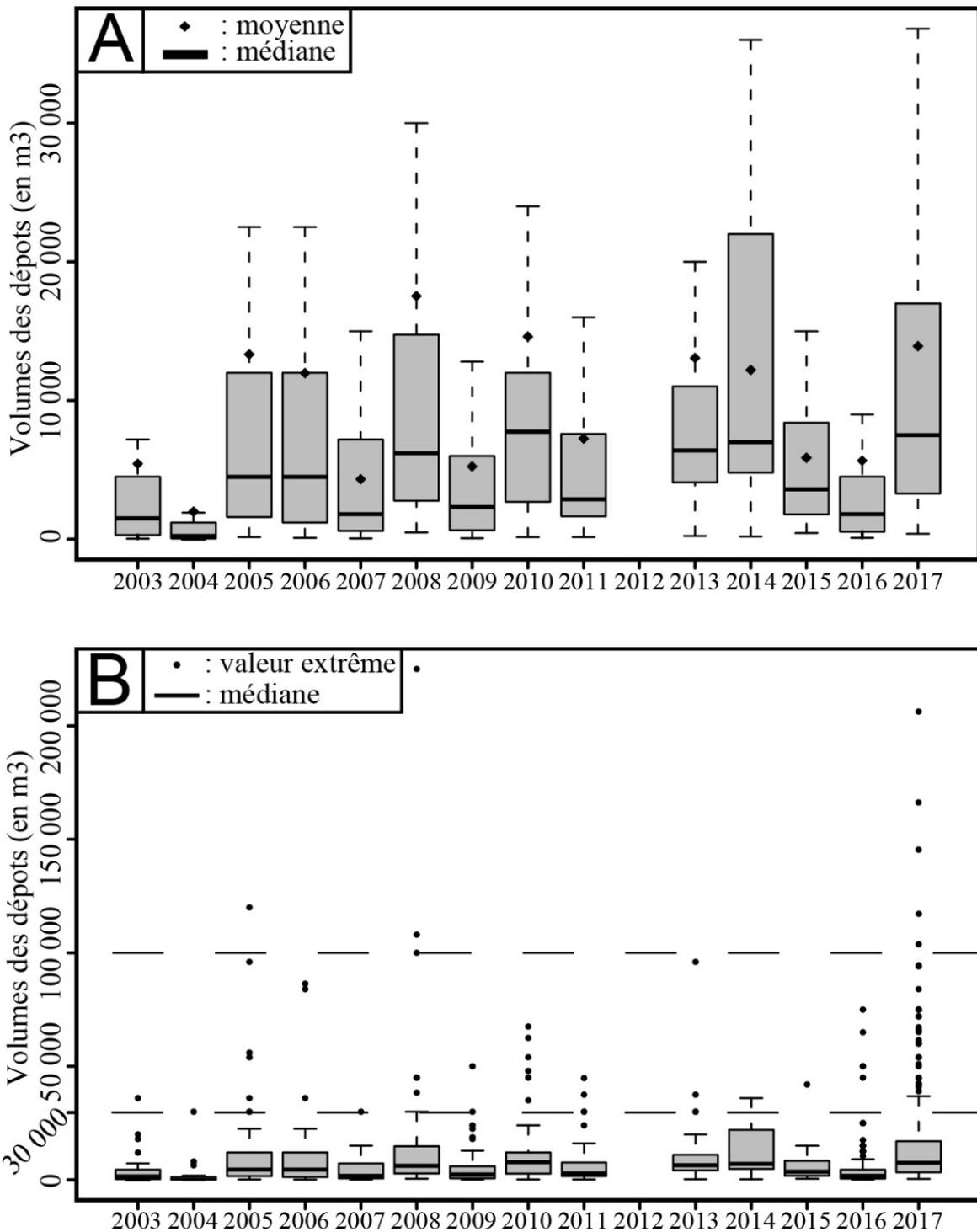


Figure 42 : Volumes des dépôts (exprimés en m³) par année avalancheuse de la commune de Bessans. A : représentés avec 95 % des valeurs en excluant les valeurs extrêmes B : représentés avec les valeurs extrêmes

Les années avalancheuses 2003, 2004, 2007, 2009, 2011, 2015 et 2016 se caractérisent par des volumes moyens de dépôts faibles ($<10\ 000\ \text{m}^3$ et médiane $< 4000\ \text{m}^3$). Avec des moyennes comprises entre $11\ 000$ et $19\ 000\ \text{m}^3$ et des médianes supérieures à $4000\ \text{m}^3$ les années avalancheuses 2005, 2006, 2008, 2010, 2013, et plus particulièrement 2014 et 2017 ont favorisé des avalanches générant des dépôts plus volumineux. On constate une plus grande dispersion des volumes et un plus grand écart entre les médianes et les valeurs, preuve d'une plus grande hétérogénéité des valeurs de volumes des dépôts pour ces années.

8.1.4.2.2 Analyse des valeurs extrêmes de volumes de dépôts relevés

La variabilité inter-annuelle des valeurs extrêmes supérieures au cours de la période 2003-2017 est importante (fig. 42B). En effet, les volumes dépassant les $30\ 000\ \text{m}^3$ ne sont observés qu'en 2004 et 2007 et trois années avalancheuses sont caractérisées par des volumes de dépôts supérieurs à $100\ 000\ \text{m}^3$ (2005, 2008 et 2017). Les années 2008 et 2017 sont marquées par des volumes de dépôts particulièrement importants, dépassant $200\ 000\ \text{m}^3$. L'année avalancheuse 2017 est à traiter à part du fait de son caractère exceptionnel. En effet des chutes de neige exceptionnelles, souvent proches de records dans les Alpes (Météo France, 2018), ont entraîné un grand nombre d'avalanches ; plus de 300 contre une cinquantaine en moyenne. Si la moyenne des volumes ($14\ 000\ \text{m}^3$) et la médiane ($8000\ \text{m}^3$) sont relativement fortes, mais similaires à 2008 ou 2014, c'est l'importance du nombre d'événements extrêmes qui est marquante. On y recense 33 dépôts dont les volumes sont compris entre $30\ 000$ et $100\ 000\ \text{m}^3$ et 5 dépôts avec des volumes supérieurs à $100\ 000\ \text{m}^3$.

8.1.4.3 Distribution spatiale

Les 931 avalanches pour lesquelles le volume de dépôts a été documenté entre 2003 et 2017 à Bessans sont réparties dans 43 couloirs (seul un couloir n'a connu aucune avalanche).

8.1.4.3.a Distribution des volumes moyens

L'analyse de la répartition des volumes des dépôts par couloirs sur la commune de Bessans (fig. 43A) met en avant plusieurs éléments. On retrouve une importante hétérogénéité entre les médianes, les moyennes et les dispersions des valeurs de volumes des différents couloirs EPA. On peut répartir les couloirs en 4 classes à effectifs égaux selon leurs volumes moyens (fig. 44). On retrouve une certaine homogénéité au sein des classes à l'exception de la classe des valeurs élevées, avec une étendue 10 fois plus importante que pour les trois autres. Cette variabilité beaucoup plus élevée que pour les trois autres classes est en partie due à la présence des couloirs 10 et 23 qui créent dans l'ensemble des volumes de dépôts très importants (46 000 m³ et 80 000 m³ en moyenne).

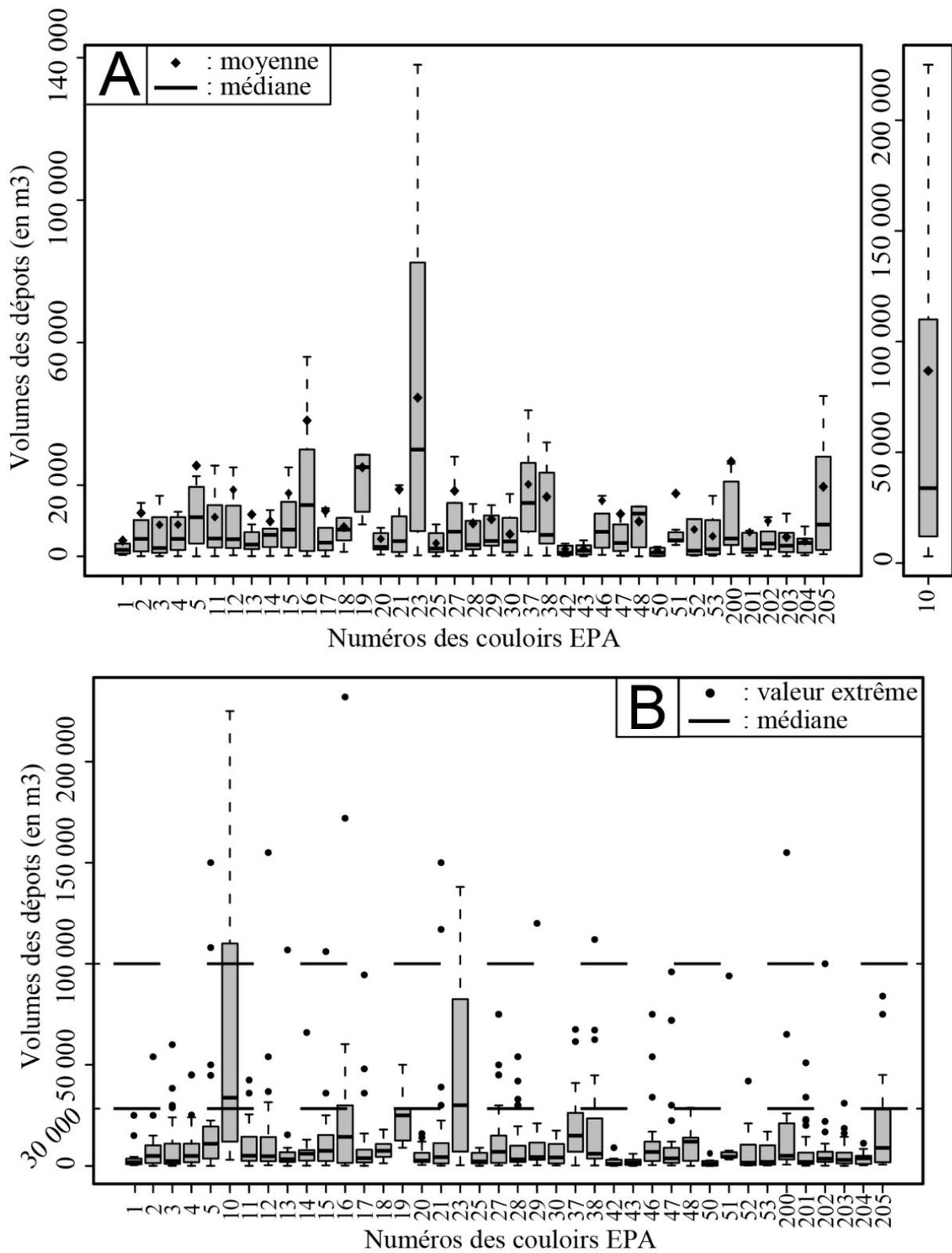


Figure 43 : Volumes des dépôts (exprimé en m³) par couloirs EPA de la commune de Bessans. A : représentés avec 95% des valeurs B : représentés avec les valeurs extrêmes

8.1.4.3.b Répartition spatiale des volumes moyens de dépôts

L'analyse de la répartition spatiale des 4 classes de couloirs selon les volumes moyens des dépôts (fig. 44) ne montre aucune relation simple. Aucune tendance n'apparaît entre l'orientation des couloirs et les volumes moyens de dépôts, avec notamment une absence de dichotomie claire entre les deux versants opposés de la vallée (fig. 44). Les couloirs présentant des dimensions et des dénivelés importantes ont pour la plupart des volumes moyens compris entre 20 000 et 142 000 m³ (en noir sur la figure 44). On retrouve une grande hétérogénéité dans la forme et la taille des couloirs pour les trois autres classes de volumes de dépôts inférieures à 20 000 m³. Forts de ces résultats nous nous sommes penchés sur les relations entre les variables morphologiques des couloirs et les volumes des dépôts.

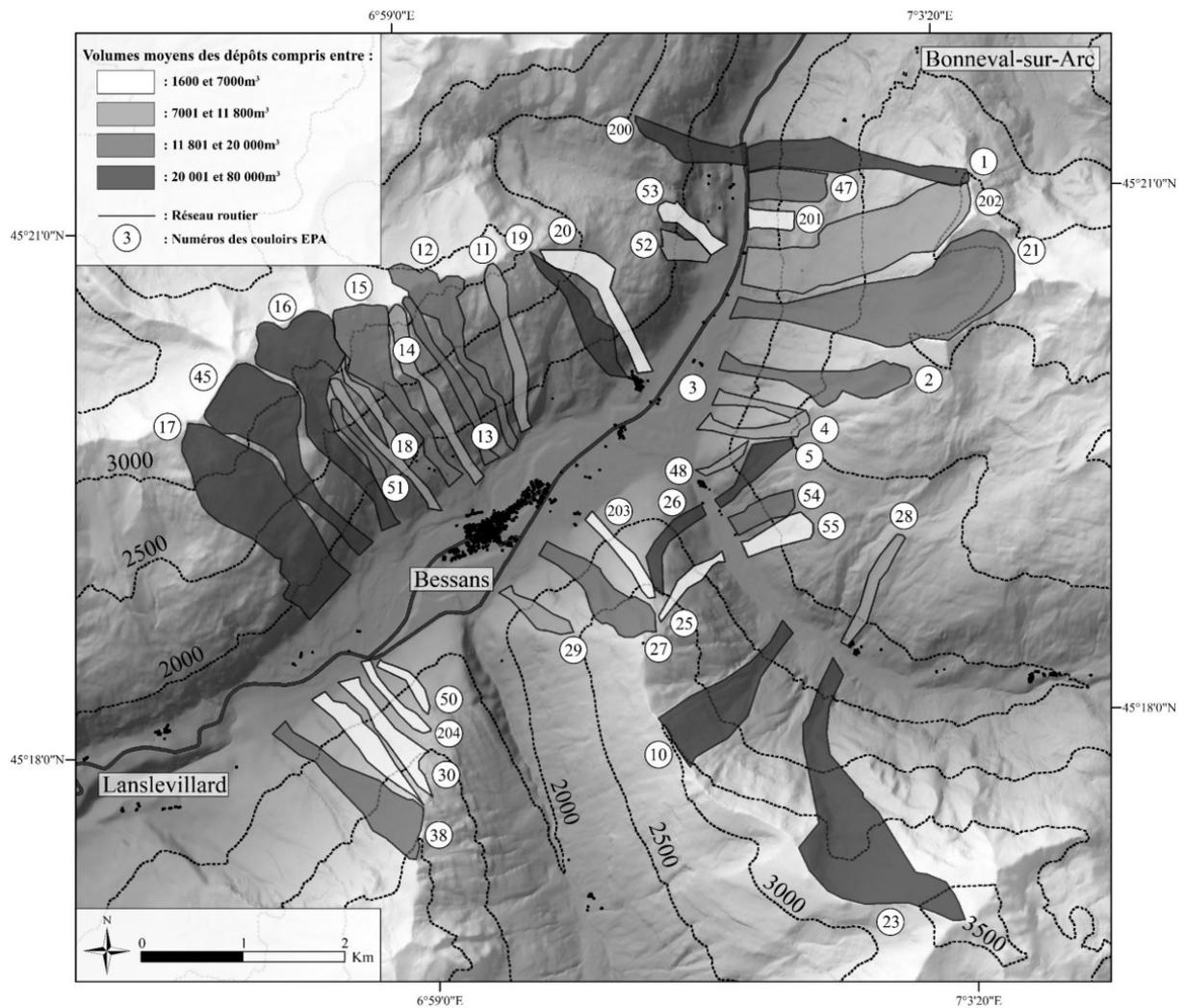


Figure 44 : Carte de la localisation des couloirs EPA de Bessans en fonction des volumes moyens de dépôts.

8.1.4.3.c Valeurs extrêmes des couloirs EPA de Bessans

L'analyse des valeurs extrêmes (fig. 43B) nous permet de constater que 10 couloirs ont produit des dépôts supérieurs à $100\,000\text{ m}^3$, que 18 couloirs ont produit des dépôts compris entre $100\,000\text{ m}^3$ et $30\,000\text{ m}^3$ et que 12 couloirs n'ont pas produit de dépôts supérieurs à $30\,000\text{ m}^3$. Certains couloirs, par exemple le couloir 12, ont des volumes de dépôts moyens faibles ($< 12\,000\text{ m}^3$) mais peuvent générer parfois de très gros dépôts ($> 100\,000\text{ m}^3$).

8.1.4.4 Relations entre les caractéristiques des couloirs et les volumes des dépôts

L'étude des relations entre les variables morphologiques des couloirs d'avalanches EPA et les volumes des dépôts a été réalisée à l'aide du coefficient de Spearman (r) entre chaque variable et les moyennes des cumuls des volumes standardisés des dépôts par couloirs (tab. 8).

Tableau 8 : Corrélations entre les volumes des dépôts d'avalanches et les caractéristiques morphologiques des couloirs EPA de la commune de Bessans

	longueur CSPE	pente min. CSPE	pente max. CSPE	pente moy. CSPE	surface	altitude min.	altitude max.	altitude moy.	dénivelé	pente surface min.	pente surface max.	pente surface moy.	orientation
volumes des dépôts (r)	0.4	0.114	-0.025	-0.307	0.572	0.295	0.367	0.364	0.364	0.019	0.079	-0.056	-0.088
p-valeur (P)	0.01	0.48	0.876	0.053	0.0001	0.064	0.019	0.02	0.02	0.903	0.625	0.73	0.586

On constate que les corrélations sont significatives ($r = [-1;-0,3[$ ou $[0,3;1]$ et $P > 0,05$) entre le volume des dépôts et les variables suivantes : la longueur du chemin supposé préférentiel d'écoulement (CSPE), la surface, l'altitude maximale, l'altitude moyenne et le dénivelé. Les corrélations sont particulièrement fortes entre les volumes des dépôts et les variables propres à la dimension globale des couloirs : la surface ($r = 0,572$ et $P = 0,0001$) et la longueur du CSPE ($r = -0,400$ et $P = 0,01$). Cette relation semble particulièrement intuitive. En revanche, les corrélations sont non significatives pour les variables suivantes : la pente minimale, maximale et moyenne du CSPE, la pente minimale, moyenne et maximale de la surface du couloir et l'altitude minimale. On note également une absence de corrélation significative entre les volumes des dépôts et la pente minimale de la surface du couloir ($r = 0,019$ et $P = 0,903$). Le constat est le même entre l'orientation du couloir et les volumes de dépôts ($r = -0,088$ et $P = 0,586$) (tab. 3). Ces résultats montrent donc que l'importance des volumes des dépôts d'avalanches est surtout liée aux dimensions du couloir (surface et longueur) ainsi qu'à son altitude et son dénivelé.

Afin d'approfondir ces résultats nous avons étudié les variables morphologiques moyennes des 4 classes de couloirs (fig. 44) selon leurs volumes moyens de dépôts présentés précédemment (tab. 8). Les relations sont significatives avec les variables descriptives des couloirs.

Tableau 9 : Variables morphologiques moyennes des 4 classes de couloirs selon leurs volumes moyens de dépôts.

Volume moyen de dépôts (en m ³)	Altitude moyenne (en m)	Longueur CSPE (en m)	Surface (en m ²)	Dénivelé (en m)	Pente moyenne CSPE	Pente moyenne surface
1 600 - 7 000 m ³	1 513	1 288	180 000	1 382	38°	32,5°
7 001 - 11 800 m ³	1 813	1 506	288 000	1 246	37,2°	31,6°
11 801 - 20 000 m ³	1 808	1 852	478 000	1 546	34,9°	34,7°
20 001 - 80 000 m ³	2 314	2 135	722 641	1 482	32,6°	34,6°

Plus les couloirs sont situés en altitude, plus la longueur du chemin supposé d'écoulement préférentielle est importante et plus la surface du couloir est étendue, plus les volumes de dépôts moyens des couloirs sont importants. Par exemple, les couloirs qui produisent les volumes de dépôts moyens les plus importants (20 001 m³ - 80 000 m³) sont ceux situés en moyenne à 2314 m d'altitude avec un CSPE long et une surface importante. La relation est moins évidente entre les classes de volumes de dépôts moyens et le dénivelé.

Bien que les corrélations soient non-significatives entre les variables de pentes moyennes et les volumes de dépôts, on note logiquement une relation entre les variables de pentes pour les 4 classes de couloirs et les volumes moyens de dépôts (tab. 8). Plus la pente moyenne du CSPE est forte, plus les volumes sont faibles. A l'inverse, plus la pente moyenne de la surface des couloirs est élevée plus les volumes sont importants.

L'analyse des relations entre l'orientation des couloirs et les classes de volumes de dépôts est présentée dans le tableau 9. L'orientation ouest présente les volumes moyens de dépôts les plus importants (33 000 m³), cependant cette forte valeur est due à la présence de deux couloirs avec des volumes moyens très importants (EPA 10 et EPA 23) couplée à un faible effectif. Les orientations nord et sud sont associées à un volume moyen de dépôts quasi semblable, indiquant une absence de dichotomie entre ces deux orientations. Enfin, c'est à l'est que le volume moyen est le plus faible.

Tableau 10 : Volumes moyens des dépôts en fonction de l'orientation moyenne des couloirs.

Orientation moyenne des couloirs	Volume moyen	Nombre de couloirs
Est	13 462	14
Nord	15 354	7
Ouest	33 000	5
Sud	15 540	17

8.1.4.5 Relations entre les volumes de dépôts et les caractéristiques géomorphologiques des couloirs au sein des deux saisons météorologiques

Les relations entre les volumes de dépôts et les caractéristiques géomorphologiques des couloirs ont été analysées pour les deux saisons météorologiques. L'objectif ici est d'approfondir les relations entre les facteurs topographiques et les volumes des dépôts en distinguant les dépôts de printemps et d'hiver (Tab. 13).

Tableau 11 : Corrélations entre les volumes des dépôts d'avalanches et les caractéristiques morphologiques des couloirs EPA de la commune de Bessans pour la période novembre-février et mars-mai.

	longueur CSPE	pente min. CSPE	pente max. CSPE	pente moy. CSPE	surface	altitude min.	altitude max.	altitude dénivelé	altitude moyenne	pente surface min.	pente surface max.	pente surface moy.	orientation
volumes des dépôts hiver (<i>r</i>)	0.481	-0.79	-0.313	-0.513	0.617	0.463	0.379	0.333	0.422	-0.256	0.215	-0.03	0.048
p-valeur (<i>P</i>)	0.001	0.63	0.84	0	0	0.002	0.017	0.03	0.007	0.114	0.188	0.855	0.77
volumes des dépôts printemps (<i>r</i>)	-0.022	0.269	-0.022	0.132	0.181	0.242	0.185	0.188	0.148	0.129	0.049	-0.006	-0.111
p-valeur (<i>P</i>)	0.892	0.102	0.891	0.427	0.247	0.142	0.263	0.255	0.373	0.438	0.766	0.971	0.503

La moyenne des volumes et la dispersion des dépôts est plus importante pour la période novembre/février que pour la période mars/mai. Cependant, l'activité avalancheuse est plus importante pour la période mars-mai (521 avalanches) que pour la période novembre-février (410 avalanches). L'analyse du tableau 5 permet clairement de distinguer ces deux saisons. On constate des corrélations significatives

($r > 0,3$) entre les volumes des dépôts pour la période novembre/février et la longueur et la pente moyenne du CSPE, la surface du couloir, et les variables d'altitude. Conduites à l'échelle saisonnière, ces valeurs sont plus significatives qu'à l'échelle annuelle. A l'inverse, les corrélations entre les variables des couloirs et les volumes des dépôts ne sont pas significatives pour la période mars/mai.

8.1.5 Discussion, conclusion et perspectives

Dans cette étude, des analyses statistiques ont été utilisées pour documenter la répartition spatio-temporelle des volumes des dépôts d'avalanches ainsi que leurs relations avec certaines caractéristiques des couloirs d'avalanches EPA sur la commune de Bessans. Pour cette étude, nous avons synthétisé plusieurs bases de données avalancheuses existantes pour créer une chronique événementielle renseignant également des volumes de dépôts, riche et aussi complète que possible.

Si des chroniques d'événements ont déjà été utilisées à plusieurs reprises pour l'étude des avalanches (Latenser et Schneebeli, 2002 ; Eckert et al., 2010a ; Eckert et al., 2010b ; García-Hernández et al., 2017) ou bien encore des laves torrentielles (Jomelli et al., 2004b ; Jomelli et al., 2007 ; Jomelli et al., 2019) c'est la première fois qu'une telle méthode est mise en place pour l'étude des dimensions des dépôts d'avalanches. Cette première utilisation a permis d'identifier des lacunes et des biais dans le système EPA depuis 1904. La confiance que l'on peut accorder aux données diffère donc en fonction des périodes. La période antérieure à 2003 a été considérée comme peu fiable et peu propice à des analyses statistiques. À l'inverse, les données acquises entre 2003-2017 sont apparues plus fiables, et il a été possible d'étudier les volumes des dépôts. Sur cette période 2003-2017, un peu moins de la moitié des années a connu des volumes faibles. Seules les années avalancheuses 2014 et 2017 se détachent soit par une moyenne et une dispersion importante des volumes des dépôts, soit par un grand nombre d'événements extrêmes et une dispersion importante des volumes. L'étude de la distribution spatiale des volumes des dépôts d'avalanches a pu mettre en avant une certaine variabilité entre les différents couloirs. Cet article montre donc que l'étude des dimensions des dépôts d'avalanches peut se faire à partir de la base de données EPA, sous conditions d'une critique préalable

approfondie de la donnée. En outre cela pourrait être comparé aux récents développements dendrochronologiques ayant permis de quantifier des distances d'arrêts au cours du XX^e siècle (Schläppy et al., 2013) ou encore ceux reposant sur des documents historiques non exploités jusqu'à présent dans l'EPA (Giacona et al., 2017).

Ce travail a également permis d'avancer dans la compréhension des relations entre le volume des dépôts et les variables morphologiques des couloirs. Les corrélations positives entre les dimensions et l'altitude des couloirs et les volumes des dépôts semblent intuitives. Les couloirs qui présentent une surface, un dénivelé et une altitude importante, combinaison favorisant une accumulation importante du manteau neigeux, créent, le plus souvent, des dépôts de grandes dimensions. Cependant, les faibles corrélations entre les variables de pentes, d'orientation et les volumes montrent que l'approche testée dans cette étude n'est pas suffisante pour caractériser une éventuelle influence. Il est possible que l'influence de la pente et de l'exposition se fasse à des échelles plus fines que celle considérée ici. Eckerstorfer et Christiansen (2011) soulignent par exemple le fait que la présence de sections verticales et des zones de dépôts planes sont des variables influençant la dimension des dépôts. Ces variations topographiques à une échelle métrique pourraient jouer un rôle sur la stabilité du manteau. Par ailleurs, l'influence de la pente dans le CSPE et les volumes, identifiée dans les pages précédentes, traduit sans doute un contrôle de la stabilité du manteau neigeux impliquant des mécanismes de purges régulières à la faveur de fortes pentes dans les CSPE. Ces purges régulières diminueraient l'accumulation de neige maximale potentielle dans les couloirs limitant la formation de dépôts de dimensions importantes. Ces résultats confortent les travaux de Sovilla et al. (2010) qui ont mis en avant des liens entre des volumes de dépôts et deux classes de pentes au sein d'un couloir ($21^\circ < \alpha < 34^\circ$ et $\alpha < 21^\circ$). Les travaux de McClung et Gauer (2018) observent également que les dépôts de grande taille peuvent être conditionnés par un écoulement rapide (plus de 40 m/s) au sein de couloirs relativement peu pentus (α compris entre 20° et 30°). De plus, la rugosité du sol qui a une influence connue sur la dynamique est difficile à caractériser finement. Ici on s'est concentré sur les variables morphométriques indépendamment de la rugosité. L'absence de relation statistique significative entre ces variables morphométriques et les volumes pourrait

être due en partie à l'influence de la rugosité. Cependant d'autres analyses seraient nécessaires pour valider ou réfuter cette hypothèse. Ce constat est partagé par d'autres travaux (Eckerstorfer et Christiansen, 2011 ; Laute et Beylich, 2014) qui soulignent eux aussi une absence de relation directe entre pente et orientation et volumes des dépôts à l'échelle du couloir d'avalanche.

Par ailleurs, il a été montré que la météorologie, l'importance des chutes de neige et le comportement mécanique de la neige jouent un rôle important dans le déclenchement et dans l'écoulement des avalanches (Gaume et al., 2013 ; Steinkogler et al., 2014 ; Reuter et al., 2015). Ici on interprète les variations de corrélation qui sont significatives entre les dépôts d'hiver et la morphologie des couloirs mais non significatives au printemps comme résultant des variations des caractéristiques du manteau neigeux influençant par la suite la nature

Une extension de notre approche pourrait être d'approfondir une meilleure délimitation des zones de fonctionnement des couloirs (zone de départ, de transport et de dépôt) qui dans l'EPA ne sont pas renseignées précisément pour chaque événement. Ces aspects pourraient être combinés à une caractérisation stratigraphique de l'évolution du manteau neigeux afin de prendre en compte simultanément l'influence de variables géomorphologiques et météorologiques. Ces résultats permettraient d'approfondir la connaissance des variables explicatives des volumes des dépôts. Ce type d'approche combinant variables géomorphologiques et climatiques a pu être par exemple mis en place au Svalbard (Eckerstorfer et Christiansen., 2011) ou encore pour l'étude des laves torrentielles (Jomelli et al., 2019). Ce type d'analyse semble d'autant plus justifié que plusieurs études ont mis en évidence des changements dans l'activité avalancheuse induits par le changement climatique, se traduisant notamment par une diminution du nombre d'avalanches denses en hiver et une augmentation de la proportion des avalanches de neige humide au printemps dans les Alpes françaises (Naaim et al., 2016).

8.1.6 Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du LabEx DynamiTe (ANR-11-LABX-0046) dans le cadre du programme « Investissement d'Avenir » et de l'INRAE au sein du LabEx OSUG @2020.

8.2 Brief communication: Weak control of snow avalanche deposit volumes by avalanche path morphology

Hippolyte Kern¹, Nicolas Eckert², Vincent Jomelli^{1,3}, Delphine Grancher¹, Michael Deschatres³, and Gilles Arnaud-Fassetta⁴

¹Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, LGP-CNRS, 1 place Aristide Briand, Meudon, France

²UR ETNA, INRAE, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

³Aix-Marseille University, CNRS, IRD, Coll. France, INRAE, CEREGE, 13545 Aix-en-Provence, France

⁴Université de Paris, UMR 8586 PRODIG, 8, rue Albert Einstein, 75013 Paris, France

Abstract. Snow avalanches are a major component of the mountain cryosphere, but little is known about the factors controlling the variability of their deposit volumes. This study investigates the influence of avalanche path morphology on ca. 1500 deposit volumes recorded between 2003 and 2018 in 77 snow avalanche paths of the French Alps. Different statistical techniques show a slight but significant link between deposit volumes and path mean elevation and orientation, with contrasted patterns between winter and spring seasons. The limited and partially non-linear nature of this control may result from the combined influence on the genesis of deposit volumes of mean path activity, climate conditions, and mechanical thresholds determining avalanche release.

8.2.1 Introduction

Snow avalanches are a major component of the mountain cryosphere (Beniston et al., 2018) that often put people, settlements and infrastructures at risk. These gravitational processes result in rapid and complex snow flows (Mc Clung and Gauer, 2018). Despite significant progress over recent years regarding the mechanical behavior of snow in motion and related flow regimes (Köhler et al., 2018), critical aspects of snow avalanche dynamics remain less known, such as the factors controlling deposit volumes. This limited knowledge is surprising as snow avalanche deposit characteristics determine the damage and disturbance to people,

buildings, and communication networks (Leone et al., 2014). Previous work documented the sedimentological characteristics of snow avalanche deposits (Jomelli and Bertran, 2001; Bartelt et al., 2009). It has also been observed that snow characteristics may vary from the starting zone to the deposit area (Jomelli, 1999; Jomelli and Bertran, 2001). Research conducted on experimental sites in Switzerland (Sovilla et al., 2015; Kölher et al., 2018) or from Canada, Japan, and the European Alps field surveys (Mc Clung and Gauer, 2018) showed weak links between avalanche deposit size, path slope, and avalanche maximum frontal speed. However, morphological factors driving the volumetric characteristics of avalanche deposits have never been explored in a systematic way on the basis of a large dataset. Here, the objective is to exclusively examine the relationship between avalanche path morphology and snow avalanche deposit volumes. Using an exceptional sample of 1491 snow avalanche deposits documented from 2003 to 2018 on 77 avalanche paths from the French Alps and using simple (descriptive) to advanced (deep learning) statistical techniques, we present the first detailed quantification of how avalanche path morphology impacts snow avalanche deposit volumes. Specifically, we show that the control of deposit volumes by path morphology is weak but significant.

8.2.2 Data and methodology

8.2.2.1 Avalanche deposit volumes

This research was conducted on the upper part of the Maurienne valley in the northern French Alps between the municipalities of Lanslevillard and Bonneval-sur-Arc (Fig. 45). Because of its important number of active avalanche paths, this study area is particularly relevant for our analysis (e.g., Eckert et al., 2009; Favier et al., 2014; Zgheib et al., 2020). The dataset of snow avalanche deposit volumes used in this study is primarily based on the Permanent Avalanche Survey (EPA), which was created at the beginning of the 20th century to document avalanche events as exhaustively as possible on more than 3000 avalanche paths in the French Alps. For each single avalanche event, the geometric size of the deposit is documented, based on a visual estimate carried out by devoted survey operators from the EPA network.

For each deposit, the length, the width, and the mean depth are estimated, which eventually provides a volume estimate. The EPA operators are very familiar with the studied paths, including their snowpack-free morphology, and systematically use the same predefined observation point, so as to maximize the accuracy of the estimation, especially the depth of the deposit. The depth of the deposit remains however difficult to estimate as for safety reasons this is not based on direct measurements on the deposit. This is especially problematic in the case of pre-existing successive deposits, but observers try to take such effects into account as much as possible when providing their visual estimates. For each path, EPA operators systematically use the same predefined observation point, so as to maximize the accuracy of the estimation, and each deposit is estimated individually in order to avoid carrying out an estimation on several stacked deposits. However, a further correction and completion work was carried out to develop a more comprehensive and error-free snow avalanche deposit database (Kern et al., 2020). Input errors or outliers introduced within the EPA when old records registered on paper archives were converted to numerical data were spotted and corrected. In addition, a few other snow avalanche events (less than 1% of the total number of events) that were not included in the EPA were added from other sources: operational services in charge of hazard management and a citizen science dataset (<http://www.data-avalanche.org>, last access: 10 October 2021).

From the entire deposit volume dataset available since the beginning of the 20th century (Kern et al., 2020), our study only uses data covering the period from November 2003 to June 2018 (15 “full” avalanche seasons). This limits the biases and inaccuracies induced by the estimation method which were much higher earlier due to less sharp topographical references available to the EPA operators and a less standardized observation protocol until the 2000s (Kern et al., 2020). Thus, our study includes 1491 single avalanche events and associated deposit volumes registered in 77 distinct paths (Fig. 45). A small part of the avalanches are preventively triggered to protect the road network. According to the EPA database only 53 of the 1491 avalanches were triggered by explosives. Also, a few defense structures are present in the studied paths but not enough to significantly affect our analysis. All in all, avalanche activity in the study area is among the most natural of its kind still existing in the French Alps.

To analyze the possible links between path morphology and deposit volumes, we first computed the interannual mean deposit volume in each of these paths. Then, the same operation was done for both the winter (avalanches that occurred between 1 November and 29 February) and spring (avalanches that occurred from 1 March to 31 May) sub-seasons. Eventually, in order to investigate the potential influence of avalanche activity on deposit volumes, we evaluated the interannual mean number of avalanches per year and path, including within the computation snow avalanche records for which we did not calculate volumes. Seasonal (November–February and March–June) avalanche occurrence rates were also evaluated.

The data from two weather stations handled by Météo-France and located at elevations of 1715 and 2740m a.s.l. in Bessans for the period 2003–2017, respectively (Fig. 45), were analyzed in order to determine climate conditions that locally prevailed over the study period. This showed that the depth of the local snowpack regularly exceeds 50 cm at 1715m a.s.l. and 200cm at 2740m a.s.l.. The winter (November–February) season is characterized by a cold mean air temperature ($-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 1715m a.s.l., $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 2740m a.s.l.), with heavy precipitation that nearly only falls in the form of snow, but the mean depth of the snowpack remains relatively thin (90 cm at 2740m a.s.l.). By contrast, the spring season is characterized by higher mean air temperatures ($3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 1715m a.s.l., $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 2740m a.s.l.) and the occurrence of significant daily warm spells (daily mean air temperature up to $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 1715m a.s.l.), which favors the occurrence of rain-on-snow events and wet snow avalanches. The mean daily fresh snowfall is half as much as during the winter season, but the mean snowpack remains thick (170 cm).

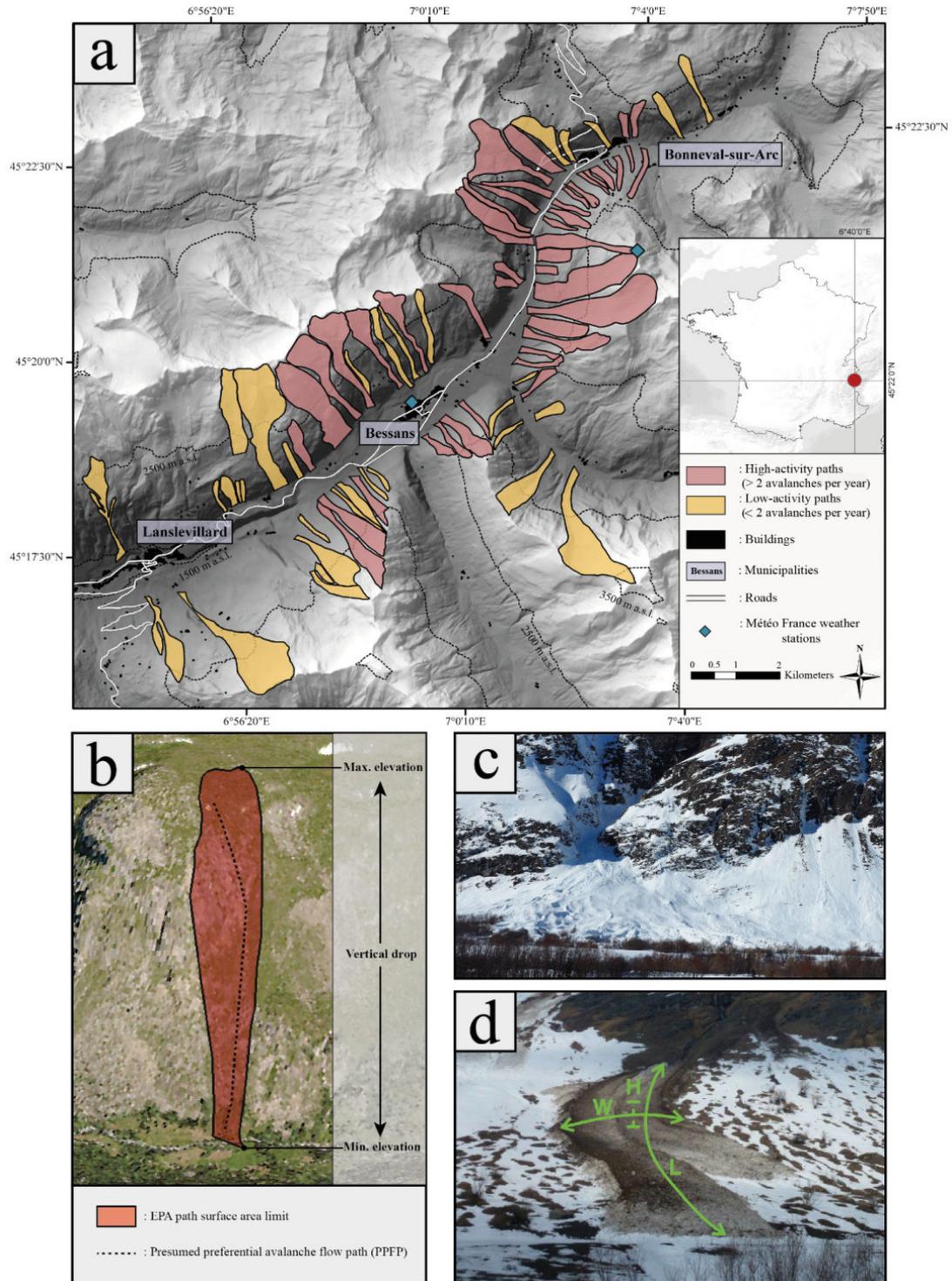


Figure 45: (a) Study area: snow avalanche paths from the EPA database and avalanche activity according to our completed database in the upper part of the Maurienne valley, French Alps, between 2003/04 and 2017/18; (b) Example of morphological characteristics of an avalanche path from the EPA database (path n°44, Bessans); (c) Snow avalanche deposit in Bessans (© INRAE ETNA, 2018); (d) Method for visually estimating the deposit volume, H: height W: width L: length (© INRAE ETNA, Bessans, 2019)

8.2.2.2 Avalanche path morphology and related volume samples

For each studied EPA path (Fig. 45), a large set of morphological variables was calculated from a 1m accuracy DEM. We first defined the presumed preferential avalanche flow path (PPFP) within the path. The PPFP is the simplified thalweg of each path. For each PPFP, the length, min, max, and average slope were calculated as well as the min, max, and average elevation and the vertical drop. From the whole extent of each EPA path, surface area, min, max and average slope were calculated (Supplementary Table 1). In addition, the primary orientation of each path was evaluated as a categorical variable with eight possible values corresponding to the eight cardinal directions: N, NE, E, SE, S, SW, W, and NW. For quantitative analyses, this categorical variable was further transformed into a vector of eight binary variables. Namely, a path got assigned 1 for the binary variable corresponding to its primary orientation (e.g., north) and 0 for the seven other binary variables corresponding to the seven other directions.

The studied paths are characterized by a mean elevation of 2281m a.s.l. varying from 1936 to 2942m a.s.l. Concerning the dimensions of the paths, the mean vertical drop is 950m a.s.l, and the surface area varies from 3 to 172 ha. The mean path slopes vary from 26 to 49° with a mean slope of 39° (Table S1 in the Supplement). The paths are mostly oriented either south or northwest. None of the paths present a northeast orientation. (Fig. S4 in the Supplement).

8.2.2.3 Statistical analyses

One-way analyses of variance (ANOVAs) were first conducted to evaluate the significance of the partition into two subsamples (winter and spring deposits, and “high-frequency paths” with more than two events per year versus “low-frequency paths” with fewer than two events per year). In other words, we investigated whether or not the variability of deposit volumes by path morphology varies (i) according to the season, and hence prevailing snow and weather conditions and related types of avalanche activity, and (ii) according to path mean activity.

To shed light on the control of deposit volumes by avalanche path morphology, Spearman correlation coefficients (r) were first calculated between each descriptive variable of path morphology and the annual (November–June), winter (November–February) and spring (March–June) deposit volume data series. This coefficient was chosen rather than the more classical Pearson one because the statistical distributions of deposit volumes are asymmetric, with extreme values strongly departing from the mean (Fig. 46). With a dataset of 77 individuals (one mean deposit volume per avalanche path), the relationship is significant at the 0.05 level if the Spearman coefficient is greater than 0.25 in absolute value.

Stepwise linear regressions were undertaken in order to determine the combination of morphological variables that best explain the variability of mean deposit volumes. This was done first using the complete database of 77 paths and 1491 deposit volumes. Afterwards, distinct linear models were fitted (i) on the 649 snow avalanche deposits recorded in 68 of these paths during the November–February winter season and (ii) on the 842 snow avalanche deposits recorded in 73 of these paths during the March–June spring season. With a stepwise procedure, the set of predictive variables retained is selected by an automatic sequence of Fisher F tests. Starting from an initial null model with no covariates and then comparing the explanatory power of incrementally larger and smaller models, it combines forward selection and backward elimination. Forward selection tests the variables one by one and includes them if they are statistically significant based on the p value of the F statistics, while back-ward elimination starts with all candidate variables and tests them one by one for statistical significance, deleting any of them that are not significant on the basis of the p value of the F statistics. We used the classical 0.05 and 0.01 probability thresholds for forward selection and backward elimination, respectively. However, before running the stepwise regression, a variable preselection was completed. This was made to avoid too much redundancy within potential predictors, which can lead to masks and numerical instabilities during the stepwise selection. To this aim, Pearson's correlation ρ was calculated between all pairs of potential morphological variables (Table S2 in the Supplement). Among the strongly correlated variables ($\rho > 0.8$ and $p < 0.001$), we kept as a potential predictor only the one with the highest marginal correlation with deposit volumes.

Eventually, in order to account for potential nonlinear relationships between morphologic variables and snow avalanche deposits, more flexible neural network models were constructed, again both for the full dataset and for the winter-spring sub-seasons. For the three datasets, the full set of 16 morphological variables previously presented was used as potential covariates (eight quantitative variables and the eight binary variables corresponding to orientations). Both standard three-layer and advanced eight-layer (deep learning) neural networks were developed. Models were trained using 70% of the data randomly selected from the analyzed sample of paths/mean deposit volumes with the Levenberg–Marquardt algorithm (Moré, 1978). Validation was carried out with 15% of the data, and model testing was carried out with the remaining 15% of the data. This typical machine learning approach allows both progressive improvement of the model with cross validations and limitation of overfitting. To account for the variability of obtained relations, 100 boot-strap iterations were conducted, varying data partition into calibration, validation, and test subsamples and initial conditions for the Levenberg–Marquardt algorithm.

8.2.3 Results

8.2.3.1 High spatiotemporal variability of deposit volumes and avalanche activity

High spatial variability in deposit volumes is observed, with the path mean deposit volume over the study period varying from 1400 to 49 800m³, the “mean of the mean” path deposit volumes being 15 100m³ (Fig. 46). If one looks further in the distribution of mean deposit volumes, the sample mean and dispersion are significantly higher (one-way ANOVA $p = 0.010$) for the winter season (path mean deposit volume = 18100m³) than for the spring season (path mean deposit volume = 12847m³).

Concerning the temporal variability, both the years 2003 and 2004 recorded particularly small mean deposit volumes (< 4000m³). On the other hand, 2006 and 2014 recorded particularly large mean deposit volumes, with annual means of 35 800

and 47 900m³, respectively. Moreover, a substantial proportion of the largest deposit volumes occurred in 2017.

A strong variability in avalanche activity is observed between 2003 and 2017, with 30 low active paths (fewer than two avalanche events per year) and 47 active paths (more than two events per year). On average, about 96 events with documented deposit volumes are triggered per year in the study area. The avalanche year 2017 was particularly active, with 526 events with documented deposits. Some of the paths are particularly active and show more than 35 events over the studied period. Paths located at Bonneval-sur-Arc and Bessans show more avalanches than those at Lanslevillard, in the lowest elevation part of the study area. Avalanche activity is more abundant in the spring season (860 avalanches with documented deposits) than in the winter season (631 avalanches with documented deposits). Considering the frequency indicates that the high-frequency paths show larger mean deposit volumes (16 800m³) than low-frequency paths (12 900m³). This observation is validated by a one-way ANOVA ($p = 0.029$). A significant relationship exists between winter deposit volumes and the mean annual frequency of each path ($r = 0.35$; $p < 0.001$).

8.2.3.2 Relationships between path morphology and deposit volumes

Avalanche deposit volumes are significantly correlated with several morphological variables and with a southeast orientation. For the full (annual) dataset, the best pairwise correlations are with path mean elevation ($r = 0.51$), surface area ($r = 0.48$), and max elevation ($r = 0.46$). However, a clear distinction between the two seasons is observed (Table 5). For the winter season, the correlations are significant ($r > 0.25$) between deposit volumes and seven morphological variables among which mean elevation and surface area are the best predictors. The winter deposits reveal a significant correlation with an east orientation. In addition, deposit volumes are also influenced by frequency, through the negative correlation of frequency with min slope ($r = -0.24$ $p < 0.05$) and positive correlation with max slope variables ($r = 0.51$; $p < 0.05$). By contrast, correlations between path morphological variables and deposit volumes are significant in the spring season for five variables only, and correlations

are lower. Slope variables are not significantly correlated with deposit volumes for the spring season.

Table 12: Spearman correlation r between morphologic variables and avalanche deposit volumes. Values in bold are significant at the 0.05 level.

	Min elevation	Max elevation	Vertical drop	Mean elevation	Min slope	Max slope	Mean slope	Surface area	N-W	N	N-E	E	S-E	S	S-W	W
Annual	0.31	0.46	0.41	0.51	-0.31	0.24	-0.05	0.48	-0.20	0.11		0.15	0.28	0.16	0.05	0.02
Winter	0.38	0.52	0.48	0.55	-0.40	0.25	-0.12	0.52	-0.21	-0.08		0.28	0.22	-0.17	-0.02	0.19
Spring	0.28	0.35	0.27	0.43	-0.24	0.19	0.10	0.34	-0.01	0.07		-0.05	0.19	0.16	0.06	-0.09

Stepwise linear regressions (Fig. 46) highlight the combined effects of morphological variables on deposit volumes. For the three analyzed datasets (annual, winter, and spring) none of the variables related to the PFP are selected because of low or non-significant correlation values. By contrast, all selected variables are relative to the path surfaces: min elevation, mean elevation, min slope, max slope, mean slope, surface area, and orientation. Max elevation and vertical drop were removed as they were too strongly correlated. For the annual dataset, the retained model includes three positive significant morphological variables increasing the deposit volumes: mean elevation and north and southeast orientation. However, R^2 remains low with only 30% of the deposit volume variability explained by these variables. The seasonal stepwise linear regression shows interesting differences between the two seasons. The retained models include four significant morphological variables increasing the deposit volumes for the winter season: mean elevation and east, southeast, and west orientation. Only one positive variable is retained in the model for the spring season: mean elevation. Resulting R^2 is higher for deposits in winter ($R^2 = 0.41$) than for spring deposits ($R^2 = 0.15$), which remain particularly low (Fig. 46).

Neural networks significantly enhance the predictive power, with higher R^2 values between the full set of morphological variables and deposit volumes, for both annual and seasonal datasets. With the three-layer models, depending on the bootstrap iteration, the best 2.5% of the models reach R^2 of 0.46 (Table S3 in the Supplement), and, again, the best fit is obtained for the winter season ($R^2 = 0.57$ for the 2.5% best models, versus 0.37 for the spring season). Switching to the even more flexible deep-learning-based eight-layer models even enhances these values to $R^2 = 0.76$ and 0.54 for the 2.5% best models in the winter and spring seasons, respectively.

However, on average for the 100 bootstrap iterations, retained neural network models do not reach high predictive power. For instance, the median R^2 value among the eight-layer models fitted on the annual sample is only 0.28. By contrast, as soon as a reasonably good agreement between observations and prediction is obtained (Fig. 46 in which models providing $R^2 = 0.61$, $R^2 = 0.58$, and $R^2 = 0.34$ are shown), discrepancies are low all over the calibration, validation, and test samples, with a nearly unbiased, Gaussian-like distribution of residuals (Fig. S5 in the Supplement). This all confirms the weak but significant control of deposit volumes by morphological variables. The increment in predictive power with regards to linear models also suggests that this control relies at least partially on non-linear relationships.

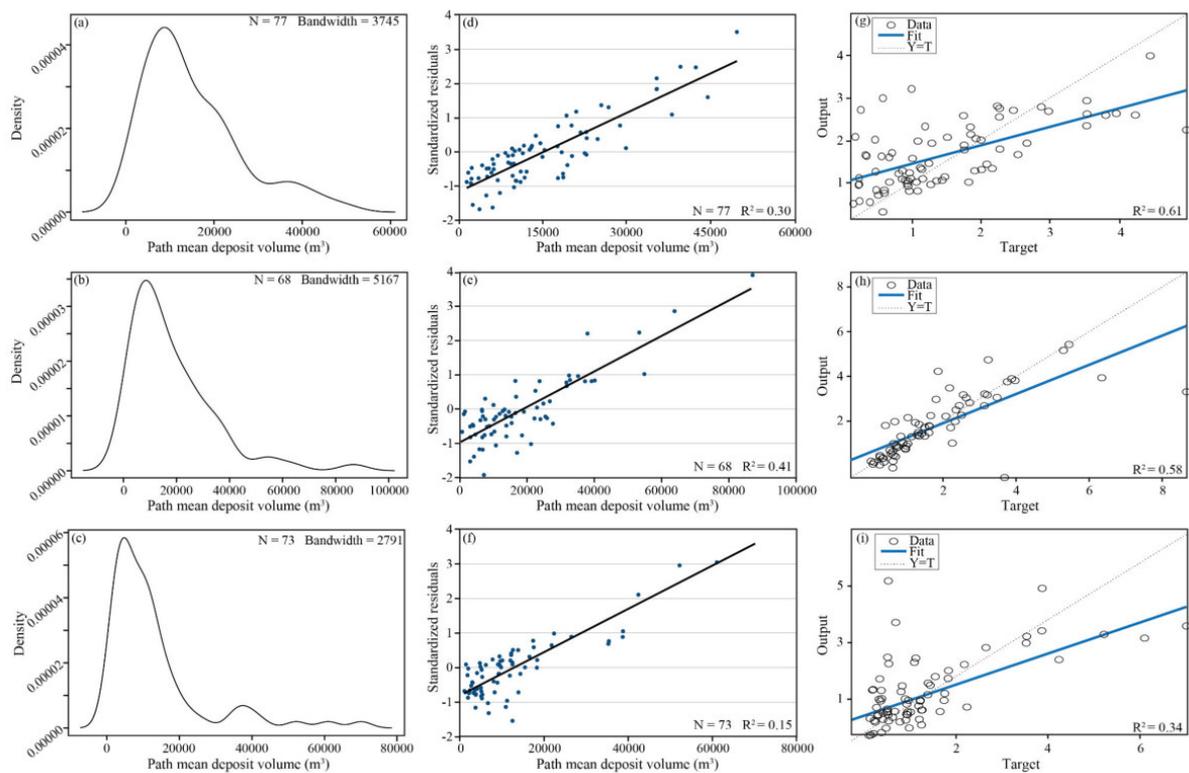


Figure 46: Statistical characteristics of snow avalanche deposit volumes. Kernel density estimation of mean path deposit volumes at the annual Nov-Jun. time scale (a), in winter, Nov-Feb. (b) and in spring, Mar-Jun. (c); Standardized residuals of stepwise linear regression results between path mean deposit volumes and path morphological variables for annual (d), winter, (e) and spring (f), linear correlation between observed deposit volume and values predicted by one neural network for the annual (g), winter (h) and spring (i) data set.

8.2.4 Discussion, conclusion, and outlook

In this study, using a unique dataset from 77 paths located in the upper part of the Maurienne valley, we explored the influence of snow avalanche path morphology on deposit volumes. Using descriptive statistics, we showed a significant positive relationship between avalanche path morphology and the mean deposit volume at the path scale. The best simple relationships were observed with path mean elevation ($r = 0.51$) and surface area ($r = 0.48$): a large surface at high altitude favors important snow accumulation and large deposits. The seasonal subsampling analysis revealed differences in the strength of the correlation between volume and path morphometric variables, with higher values for winter than for spring. This may be due to climate conditions that strongly control spring deposit volumes (e.g., wet snow avalanches are released as soon as cohesion drops within the snowpack due to the apparition of sufficient liquid water and rather independently of the snow mass. Only winter deposits show a weak correlation with an orientation: east ($r = 0.28$). This correlation shows that winter deposit volumes may be influenced by prevailing climatic conditions. Specifically, we suspect that the significant influence of orientation reveals wind impacts. Thus, a prevailing wind from the west during the winter season may cause large accumulations of snow on the east-oriented hillside, later favoring important deposit volumes. Such a hypothesis remains speculative however without direct wind measurements at high elevations.

Linear regression did not improve the relationships much, with no more than 30% of the annual deposit volume variability explained by a combination of morphological variables, increasing to 41% for winter deposit volume variability but decreasing to 15% of the spring deposit volume variability. In the three cases, mean elevation is retained as a relevant predictor, which underlines the relevance of snow availability in relation to elevation concerning the determination of deposit volumes. Orientation variables are only retained by the annual and winter deposit model. Winter deposits show a strong positive relationship with east, south-east, and west path orientations. This indicates how important the solar radiation and/or the path positioning with respect to the prevailing wind direction may be to generate the snowpack and then produce instabilities, later influencing volume deposits. However,

there are no reliable data on wind direction or speed at the scale of a massif, so it is not possible to precisely characterize the wind contribution to our study. The use of a more flexible neural network approach leads to significant improvements, notably with some deep-learning-based models, but, overall, the power of morphological variables to predict snow avalanche deposit volumes remains somewhat limited. In light of these results, we suggest that path morphology controls deposit volumes significantly but weakly, and at least partially on the basis of non-linear relationships. This could be confirmed (or not) with further studies in different mountain areas where topography and/or avalanche activity regime is different. Additional morphological descriptors, such as convexity or concavity of the starting zone, could slightly improve the predictive power of the models. However, we suspect that no matter which descriptors are used, the control of the deposit volume by path morphology remains weak.

Mean avalanche frequency appears as an important factor to explain these results. Indeed, slope variables partly influence the annual frequency and indirectly influence the deposit volumes. High-frequency paths (more than two events per year) present a steeper slope than low-frequency paths (fewer than two events per year) paths: 40 and 37°, respectively. Also, high-frequency paths show larger path mean deposit volumes (16 800m³) than low-frequency paths (12 900m³). These somewhat counterintuitive results are in line with those of Sovilla et al. (2010) that highlighted a negative correlation between slope angle and deposit depths, partly affected by the avalanche activity.

We interpret the weak relationship between mean path deposit volumes and morphological variables to be partly due to the predominant control of avalanche activity by snow mechanical behavior. This especially occurs through the mechanical thresholds involved in avalanche-triggering processes (Gaume et al., 2012, Li et al., 2020), which are primarily related to snow depth and stratigraphy in the release area as well as to the slope and ground roughness in the release area. This may explain why snow avalanche deposit volumes do not seem that much affected by avalanche path size, for example. Also, mechanical release thresholds may explain the significant variations we observed in the control of winter or spring deposits by path morphology, since, from one season to another, different snow depths and stratigraphy may lead to release for different slopes and elevations as soon as the critical stress value is

exceeded. Differences in the snowpack characteristics may also explain why the winter deposit mean volumes present more important values. Indeed, the winter snowpack is less stable and prone to large avalanche triggering, in other words snow storms are frequent in winter and favor major instabilities and large snow avalanches. Note that we did not take into account in our study the roughness of the ground, which was not possible to accurately document over the full sample of paths, but this could be an insightful perspective for further work.

More widely, we speculate that the weak relationship between volume and morphological variables may be due to an important control by climate conditions since variations in snowpack characteristics determine avalanche triggering and flow properties (Steinkogler et al., 2014, Kölher et al., 2018), and notably snow entertainment and deposition during the flow, which ultimately determines deposit volumes. Recent climate change thus impacts snow avalanche frequency, magnitude, seasonality, and localization, leading, e.g., to an increasing proportion of wet snow avalanches documented in the French Alps between 1958 and 2009 (Naaïm et al., 2016). Our approach should therefore now be extended to simultaneously take into account the control of deposit volumes by morphological and meteorological variables on a wider study area and how these controls evolve as climate change goes on. Such an approach combining morphological and climatic variables has, for example, already been applied in Svalbard (Eckerstorfer and Christiansen., 2011) or for debris flows in the French Alps (Jomelli et al., 2019).

Data availability. The whole EPA avalanche data are freely available at https://www.avalanches.fr/static/1public/epaclpa/EPA_listes_evenements/ (INRAE, 2021). The dataset of mean deposit volumes and morphological variables analyzed in this study can be requested from Hippolyte Kern.

Supplement. The supplement related to this article is available online at: <https://doi.org/10.5194/tc-15-4845-2021-supplement>.

Author contributions. VJ and NE designed this research. MD provided the EPA dataset. HK, VJ, NE, and DG performed the analyses. HK wrote the manuscript on the basis of the input of all co-authors.

Competing interests. The contact author has declared that neither they nor their co-authors have any competing interests.

Disclaimer. Publisher's note: Copernicus Publications remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations

Acknowledgements. Hippolyte Kern holds a PhD grant from Université Paris-1 Panthéon-Sorbonne. This work has received financial support from LabEx Dynamite (ANR-11-LABX-0046) as part of the "Investissement d'Avenir" program and from INRAE, member of Labex OSUG@2020. The numerous people from ONF-RTM and INRAE that contributed to the EPA survey with the financial support of the French Ministry of the Environment are acknowledged.

Review statement. This paper was edited by Alexandre Langlois and reviewed by Karl W. Birkeland and one anonymous referee.

Chapitre 9 : Volumes des dépôts d'avalanches : relations avec le climat et la vulnérabilité du réseau routier

La détermination des variables de contrôle géomorphologique des volumes des dépôts d'avalanches a mis en avant une importante variation saisonnière. Afin de mieux explorer les variables responsables des volumes des dépôts, nous avons ici considéré les conditions météorologiques et du manteau neigeux. L'influence de ces variables sur les volumes des dépôts a été considérée pour différentes altitudes et orientation de couloirs. Par ailleurs, nous avons effectué un regroupement de données et une comparaison entre deux massifs : la Haute-Maurienne et le Queyras. Enfin les liens entre les volumes des dépôts, leurs variables de contrôle et la vulnérabilité du réseau routier ont été explorés.

L'article présenté dans le chapitre 9 a fait l'objet d'une publication soumise à la revue *Land Degradation and Development* en septembre 2022. Pour l'aboutissement de cette publication, j'ai effectué le travail de vérification et de complétion des données EPA. Vincent Jomelli, Nicolas Eckert, Delphine Grancher et moi-même avons effectué les analyses statistiques. Enfin, j'ai rédigé et mis en forme les textes principaux, les figures et les tableaux, tout en étant en contact avec l'ensemble des co-auteurs pour améliorer la discussion autour des résultats ainsi que la qualité rédactionnelle des deux articles.

9. Influence of snow and meteorological conditions on snow-avalanche deposit volumes and consequences for road-network vulnerability

**Hippolyte Kern¹, Vincent Jomelli², Nicolas Eckert³, Delphine Grancher⁴,
Michael Deschatres³, Gilles Arnaud-Fassetta⁵**

¹*Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS-UMR 8591,
2 Rue Henri Dunant, 94320 Thiais, hippolyte.kern@lgp-cnrs.fr*

²*Aix-Marseille University, CNRS, IRD, INRAE, Collège de France, UMR 34 CEREGE, 13545 Aix-en-Provence,*

³*UR ETNA, Université Grenoble Alpes, INRAE Centre de Grenoble, 2 Rue de la Papeterie, 38402 Saint-Martin-d'Hères*

⁴*Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS-UMR 8591*

⁵*Université Paris Cité, UMR 8586 PRODIG, 8, rue Albert Einstein, Case postale 7001, 5, rue Thomas Mann, 75205 Paris Cedex 13*

Abstract

Snow avalanches are a major component of the mountain cryosphere that frequently create road obstructions. Deposit characteristics determine the extent of damage to the road infrastructures and the period of disruption of the road network, but the factors controlling snow-deposit volumes remain largely unknown. This study investigates the influence of meteorological and snowpack conditions on snow-avalanche deposits and road-network vulnerability based on 1986 deposit volumes from 182 paths located in two regions of the French Alps between 2003 and 2017: Guil and Haute-Maurienne valleys. During the period, 195 avalanches impacted the road network in these areas, leading to major disruptions. In Haute-Maurienne, correlations between deposit volumes and meteorological and snowpack conditions are high in winter. However, the relationships differ with path elevation and orientation. Results do not show any significant relationship between volumes and meteorological or snowpack conditions for the spring season. Focusing on deposits that disturbed the road network, winter and spring reveal a distinct influence of meteorological and snow variables compared to the overall data set, with snowfall intensity as the predominant control variable of deposit volumes leading to road cuts. When the same analysis is conducted by considering Guil valley separately or by aggregating Haute-Maurienne

with Guil valley area data, results do not show any significant relationship, highlighting the specific local nature of relations between deposit volumes and meteorological and snowpack conditions.

Key words: Snow avalanches - avalanches deposit - meteorological control - road network vulnerability

9.1 Introduction

Avalanches are defined by a rapid movement of snow within a path (Ancey et al., 2006). Avalanche characteristics are directly related to climatic, meteorological and geomorphological conditions (Mock and Birkeland, 2000; Schweizer et al., 2003; Gaume et al., 2012). The final avalanche deposit extent and volume is highly variable, driven by several factors, including snow depth, temperature and initial snowpack stratigraphy, modified by the avalanche flow and the path morphology.

Snow avalanches create a menace for people and settlements and create road obstructions (Rheinberger et al., 2009; Leone et al., 2014; Eckert et al., 2018; Sanz-Ramos et al., 2021). Avalanche deposits cause road obstructions and the volume of snow on the road directly determines the time of disruption and possible associated damages to road infrastructure (Bründl et al., 2004). In order to preserve the accessibility of mountain areas, different protection and warning systems are used (e.g., Stethem et al., 2003; Zischg et al., 2005; Vera Valero et al., 2016).

Knowledge of the factors driving snow deposit volume (SDV) remains limited while it is an important aspect to help to define effective protections to avoid reduction of territorial accessibility. Only a few studies have been dedicated to avalanche deposits, and none has examined their relationship with road network vulnerability. Research focused on the sedimentological characteristics of snow avalanche deposits (Jomelli and Bertran, 2001; Bartelt et al., 2009) or differences in the rounded granules structures associated with longitudinal and vertical sorting within the deposit area (Jomelli, 1999; Jomelli and Bertran, 2001). More recently, studies focused on the relationships between SDV and the geomorphological characteristics of avalanche paths. A weak relationship between path slope, maximum frontal speed and SDV was observed (Sovilla et al., 2015; Kölher et al., 2018; Mc Clung & Gauer, 2018).

Additionally, a weak but significant influence of avalanche paths mean elevation and orientation on winter SDV was evidenced (Kern et al., 2020; Kern et al., 2021). However, how meteorological and initial snowpack characteristics, such as snow depth, density or temperature, drive the volumetric characteristics of avalanche deposits has been rarely explored.

This work aims to examine the influence of meteorological and snow conditions on avalanche SDV. In addition, how this control varies with path orientation, elevation and from one area to another is also investigated using different sub-samples of data. Eventually, specific meteorological and snow conditions favourable to road cuts are analysed. The work grounds on a large record of 1456 natural avalanches and associated SDV registered in 77 distinct paths from the Haute-Maurienne (Northern French Alps) and 442 SDV from 86 paths from the Guil valley (Southern French Alps) between 2003 and 2017. Those are related using stepwise linear regressions to their best meteorological and snowpack drivers from SAFRAN and Crocus reanalyses in both winter and spring seasons.

9.3 Study area

The studied paths are primarily located in the upper Maurienne valley (Fig. 47). SDV in the Guil valley were also included (Fig. 47, 49). Previous studies have demonstrated that these areas are particularly relevant for studying avalanche activity and risk (e.g., Eckert et al., 2009; Favier et al., 2014; Kern et al., 2021; Zgheib et al., 2020; 2022; Viallon-Galinier et al., 2022).

The upper Maurienne valley is the upper part of the Arc watershed, located in the Savoie department. The Haute-Maurienne valley includes three municipalities: Lanslevillard, Bessans and Bonneval-sur-Arc. These municipalities are sparsely populated, yet tourism is particularly prevalent, notably due to the presence of several ski areas. The valley has a west-southwest orientation and presents a topography typical of glacial valleys: a symmetrical U-shaped valley with slopes that regularly exceed 30°. The valley base is located at an altitude between 1500 and 1800 m a.s.l. and the culminating point of the massif reaches 3752 m a.s.l.. The vegetation is sparse and all the avalanche paths are located away from the few forested areas.

The Queyras massif, located in the Hautes-Alpes department, is mainly part of the Guil watershed. This watershed is divided into several valleys with a dendritic hydrological and topographical structure. The massif surface area is 36,000 hectares and includes 14 communes, including Ceillac and Saint-Véran. Regarding land use, there are several alpine and Nordic ski resorts. The valley floor is at an altitude ranging from 1500 to 1700 m a.s.l and the peaks exceed 3000 m a.s.l.. The south-facing slopes have been flattened to create relatively moderate slopes, around 30°, whereas the north-facing slopes are much steeper, reaching an average slope of 45° to 50°. The valleys no longer have a U-shaped profile, but are rather asymmetrical V-shaped, with more avalanche paths on the steep north-facing slopes.

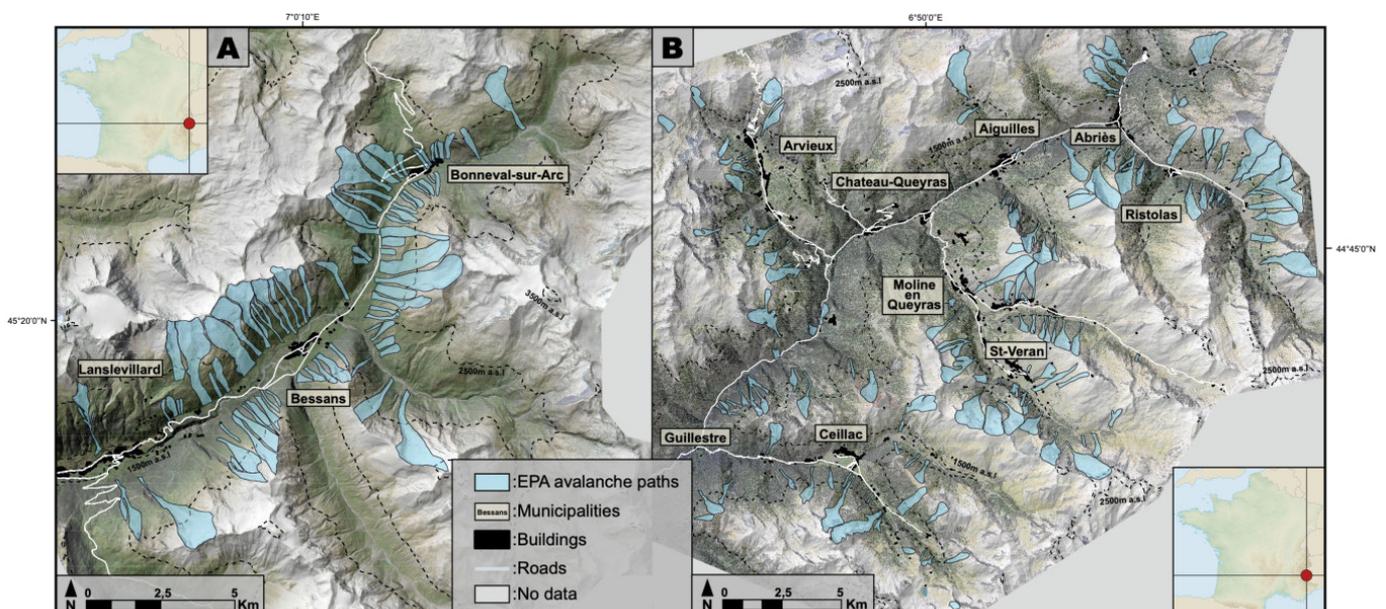


Figure 47: Location of the studied EPA avalanche paths located in (A) Haute-Maurienne Valley and (B) Guil valley (Queyras massif)

9.3 Data and methods

9.3.1 Data

9.3.3.1 Avalanche-deposit volumes

The analysis is based on SDV estimated from paths monitored by the Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) (Mougin, 1922), a system of descriptive reports on avalanche events. With 0.8 avalanches per path and per year between 1946 and 2005 (Eckert et al., 2010b), Haute-Maurienne region exhibits a high avalanche activity compared to other regions of the French Alps. The EPA monitors avalanches as exhaustively as possible on more than 3,000 avalanche paths in the French Alps since the beginning of the 20th century (Mougin, 1922). For each avalanche, a volume is provided by an estimation of the length, width, and mean depth of each deposit. However, to develop a more comprehensive SDV database, further corrections and completions works were completed until 2017 (Kern et al., 2020). Our study only uses data covering the 2003-2018 period (15 full avalanche seasons), e.g. since a major update, which considerably increased the reliability of the information (Bourova et al., 2016; Kern et al., 2020). Thus, the study includes 1456 avalanche events and associated SDV registered in 77 paths from Haute-Maurienne (Fig. 49) and 442 SDV from 86 paths located in the Guil valley.

To analyse the possible links between meteorological and snow conditions with SDV, the avalanche year (from 1st November to 31 May) was divided into two seasons. The winter season includes avalanches that occurred between 1st November and 28/29 February, and spring season from 1 March to 31 May.

The general path orientations determined via GIS tools from a metric DEM have been used to distinguish different subgroups of homogeneous avalanche paths according to their general orientation. Then, the seasonal mean SDV for both winter and spring season was evaluated for each sub group.

Finally, road disruptions, e.g. avalanche deposits obstructing the road network (from 1-10 m³ to thousands of m³) frequently occur on the RD902, the only road of the Maurienne valley. It has the particularity to be close to the runout zones of several paths. In winter, the northern part of the road is closed a few kilometres above Bonneval-sur-Arc. Consequently, any road disruption caused by an avalanche leading to a road closure will impact local communities with possible total road isolation. The spatial variability of avalanche-related road disruptions is important (Fig. 50). The number of road disruption per avalanche path over the period 2003 -2107 ranged from 1 to 12 with a mean of 2.8. Most of the paths regularly impacting the road are located between Bessans and Bonneval-sur-Arc. This section of the valley is characterised by an important topographic constriction, the valley floor, where the road is located, is only fifty meters wide and is bordered by steep slopes with a strong avalanche activity and important deposit volume. Between Lanslevillard and Bonneval, there is on average 1 path every 450 linear metres of road that generate deposits affecting the road. Those result from large avalanches (SDV along the road can exceed hundreds of thousands of cubic metres) and are analysed separately. Indeed, the 109 winter deposits and the 61 spring deposits that affected the road network display much larger extreme SDV than the rest of avalanche deposits recorded in the area (Fig. 49). Because information related to avalanches impacting the road network in Guil valley are too limited (Fig. 49), only data from Haute-Maurienne were considered for this specific analysis.

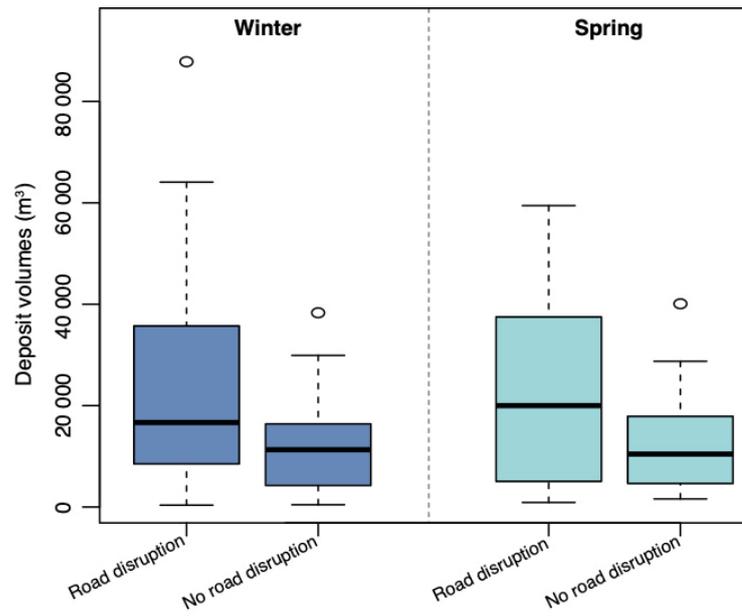


Figure 48: Boxplot of mean seasonal SDV per year from avalanches disrupting and not disrupting the road network in Haute-Maurienne. The median, two quartiles, the 10 and 90% deciles and the extreme values are represented.

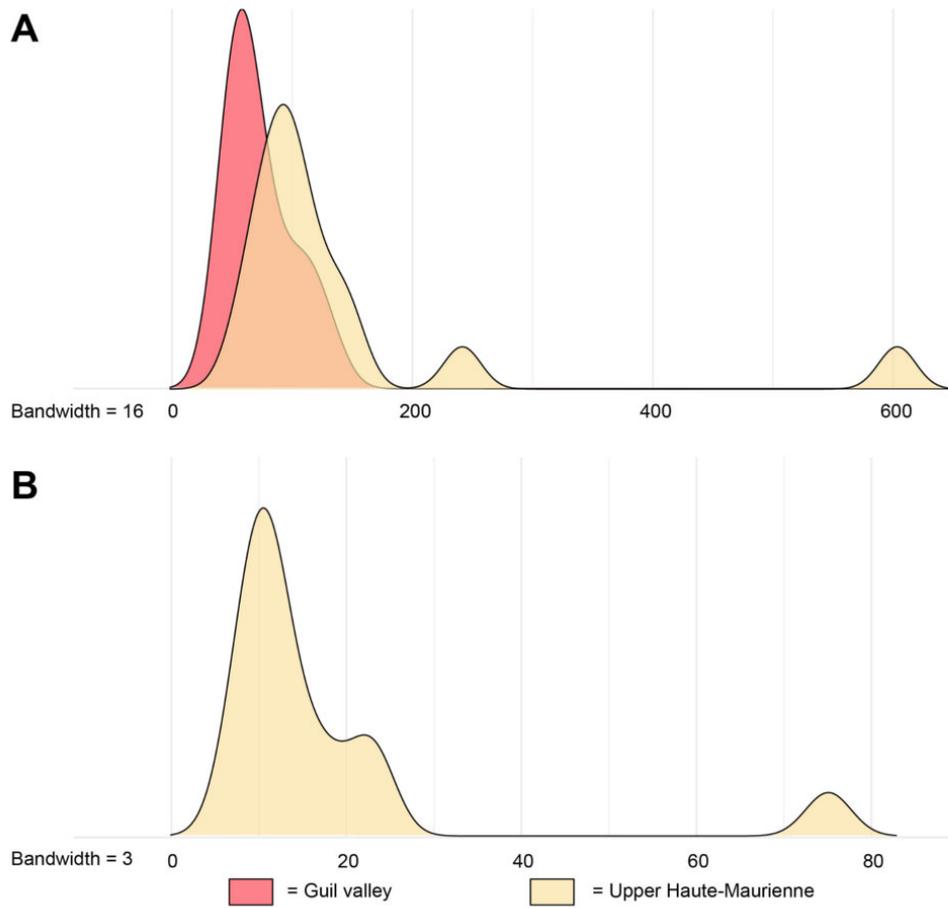


Figure 49: Kernel density estimation of (A) annual number of avalanches in Haute-Maurienne and Guil valley and (B) annual number of avalanches disrupting roads in Haute-Maurienne.

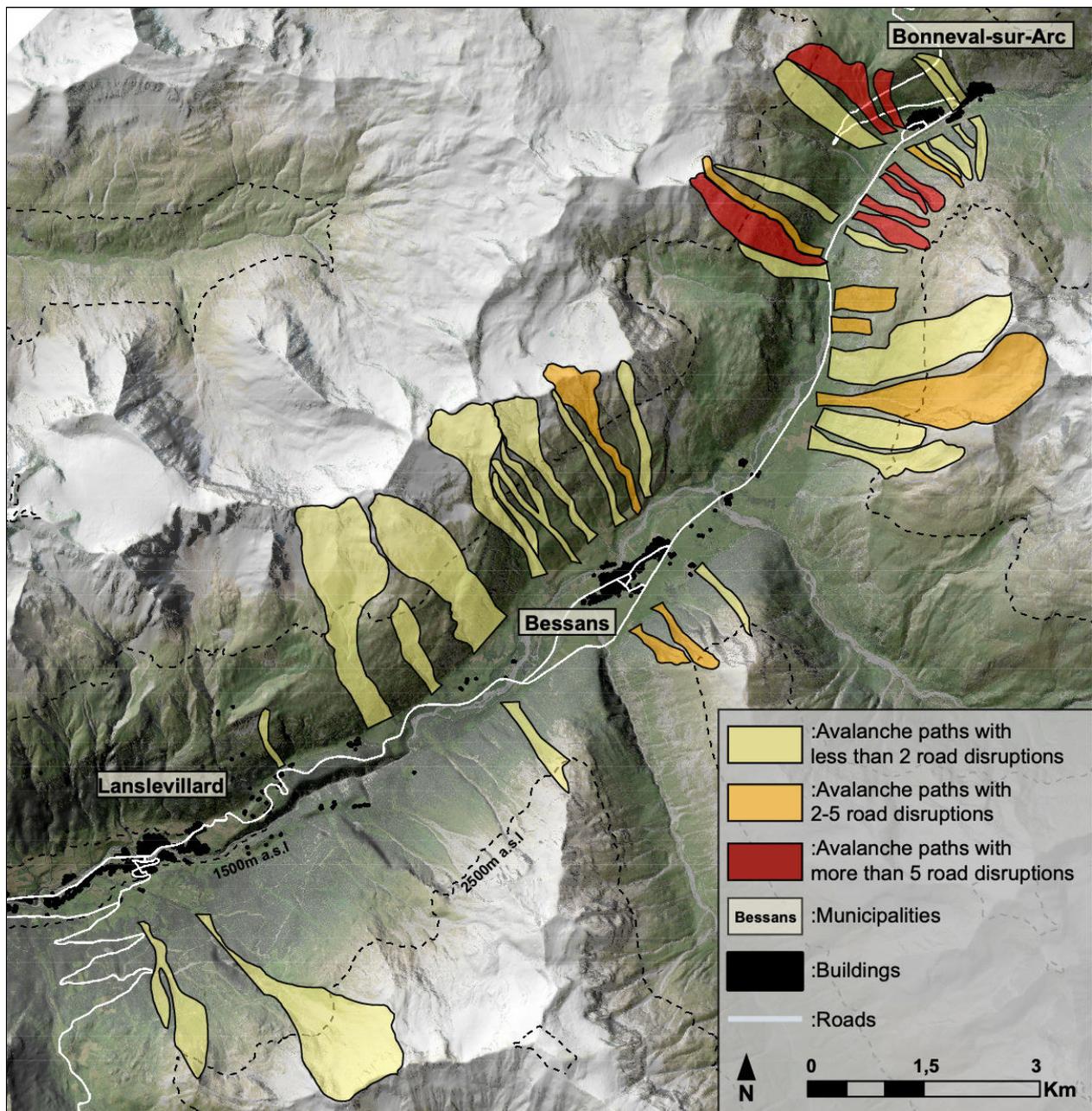


Figure 50: Number of road disruptions per avalanche path between 2003 and 2017 in Haute-Maurienne

9.3.3.2 Meteorological and snow conditions

9.3.3.2.a Meteorological and snow data

The meteorological and snow conditions are from reanalyses produced by the SAFRAN and Crocus modelling chain operated by Metro-France. SAFRAN is an atmospheric analysis system that provides data for atmospheric parameters relevant to snow on the ground over elevations and orientations. SAFRAN has been largely used in French Alpine regions (Durand et al., 1999; Dupire et al., 2017) and frequently

to analyse periglacial processes and their relation to climate (Pavlova et al., 2014; Jomelli et al., 2015). SAFRAN and Crocus reanalyses have also often been used with EPA data (Castebrunet et al., 2012; 2014; Evin et al., 2021; Sielenou et al., 2021), but never to analyse the variability of SDV so far. SAFRAN combines information from numerical weather prediction models and *in-situ* meteorological observations. Crocus is a one-dimensional multilayer physical snow scheme that simulates the evolution of the snow cover as a function of energy and mass-transfer between the snowpack. Crocus uses SAFRAN outputs to simulate snow variables for each layer (snow mass, density, temperature) and their evolutions (Vernay et al., 2022). Validation of SAFRAN and Crocus reanalyses and some comparisons with other snow models can be found in Etchevers et al. (2004) and Vernay et al. (2022). Used simulations were done for a flat topography and for a 40° slope considering 8 distinct orientations.

A first expert selection of potential predictors was carried out among the numerous outputs from the reanalyses. We kept 10 daily outputs for the two valleys over the considered period for four elevations: 2100, 2400, 2700 and 3000 m a.s.l. (Tab. 13) and are listed below: Mean daily air temperature, number of days with an air temperature higher than 0°C, mean daily snowfall (mean snowfall), accumulated snowfall from the start of the avalanche year (accumulated snowfall), number of snowfall days, number of high snowfall days (higher than 75% of the mean intensity), mean snow depth (mean depth), max snow depth (max depth), mean ramsond and max ramsond. As the wind data is not considered, there is no exposure effect on Safran variables. However, an effect of the orientation is reflected through energy balances and consequently different snow metamorphosis effects between each orientation, which leads to different Crocus snowpacks as function of orientation on the 40° slope. Ramsond values from Crocus correspond to a penetration depth of ram resistance sensor measurement and are expressed in metres. Because of a high correlation ($p > 0.98$) with ramsond data, wet snow depth data were not considered in our study.

The full Haute-Maurienne and Guil valley meteorological and snow data used for this study are detailed in supporting information (Fig. S5-8).

Table 13: Variables used to infer the influence of meteorological and snowpack conditions on SDV. Mean snowfall is the total seasonal snowfall divided by the number of days during which snowfall occurred.

Category	Name	Number of variables	
Meteo	Air temperature	Mean air temperature (°C)	1
		Number of days with temperature higher than 0°C	1
	Snowfall	Mean snowfall (mm)	1
		Accumulated snowfall (mm)	1
		Number of snowfall days	1
		Number of high snowfall days (higher than 75% of the mean intensity)	1
Snowpack	Mean and max snowdepth (m)	2	
	Mean and max ramsond (m)	2	

9.3.4 Statistical analyses

Firstly, stepwise linear regressions were undertaken in order to determine the combination of meteorological and snow variables that best explain Haute-Maurienne seasonal mean SDV variability. From the set of potential predictive variables (Tab. 13), the stepwise procedure selects those that are significant based on the p value of the F tests using forwards and backwards selection. Classical 0.05 and 0.01 probability thresholds for forward selection and backward elimination were respectively used. In order to properly integrate the influence of the same variable at different elevations, we primarily integrated the meteorological and snow mean conditions for the 4 bands of elevations from SAFRAN and Crocus reanalysis altogether. In a second time, each elevation band has been considered separately. This was distinctly done using the 648 winter and the 808 spring SDV. This was primarily done while mixing the data from avalanche paths whatever their orientation, and relating the corresponding deposits to Crocus snow variables simulated on a flat area (i.e. for which there is no orientation effect, leading to “average” conditions). We also applied the same methodology on different subgroups relative to path orientation and road network vulnerability. We had to compromise between the size of each subgroup and the explanatory power of our models. Special care was given to

only apply this statistical analysis to subgroups with a sufficient sample sizes, determined empirically:

- We only considered, to produce specific statistical orientation models, SDV from orientation that recorded an adequate number of avalanches from a sufficient number of paths. Therefore, only south, west and north-west orientations were considered, with at least 100 deposits from a minimum of 5 paths for both winter and spring seasons (Fig. 51). For these regressions, only snow predictors simulated for the same orientation on the 40° slope were considered. For each elevation, there is one value for SAFRAN meteorological variables relative to a flat topography and four values for Crocus snowpack variables, one relative to a flat topography and one for each considered orientations.
- Analyses on the avalanche events that affected the road networks were conducted separately from the rest of the dataset because of their very large volume as mentioned earlier. However, path orientation was not considered at this stage, because of a limited number of events. This causes an over-representation of certain orientations affecting the road networks. In detail, 58% of the corridors present a north-west or a south orientation.

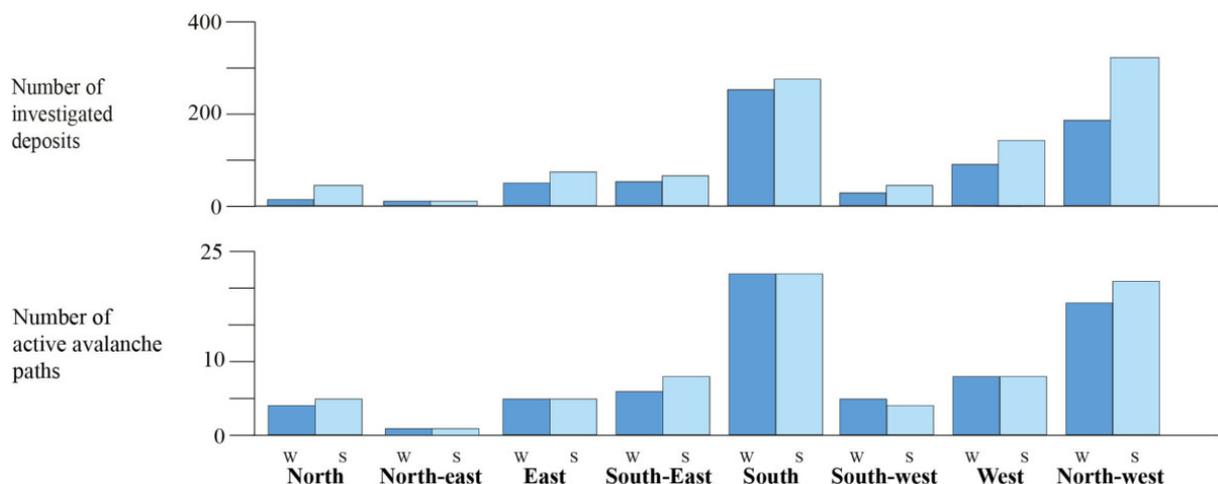


Figure 51: Number of investigated deposits and investigated avalanche paths for winter (W) and spring (S) seasons, depending on path orientations from Haute-Maurienne.

Finally, in order to test the relevance of the local nature of these results, they are compared and combined with data from the Guil valley that display a significant avalanche activity and a different geographical setting. Firstly, the stepwise procedure was applied exclusively to the Guil valley. Secondly, to combine the volume data with the meteorological and snowpack variables from the two areas, multi-area means, derived from local means, were evaluated for the two seasons. Because differences in avalanche activity between the two areas are important (Fig. 49), analyses were conducted using seasonal weighted mean SDV and covariates to address regional disparities for the two seasons as:

$$\overline{X}_{\omega}^t = \omega_{HM}^t X_{HM}^t + \omega_{GV} X_{GV}^t$$

$$\text{with } \begin{cases} \omega_{HM}^t = \frac{N_{HM}^t}{N_{HM}^t + N_{GV}^t} \\ \omega_{GV}^t = \frac{N_{GV}^t}{N_{HM}^t + N_{GV}^t} = 1 - \omega_{HM}^t \end{cases} \quad (1)$$

X_{HM}^t and X_{GV}^t are the mean seasonal SDV or the seasonal mean of any of the considered covariate for the year t in Haute-Maurienne and Guil valley, respectively. N_{HM}^t and N_{GV}^t are the number of SDV for the considered season of the year in Haute-Maurienne and Guil valley, respectively.

The path orientations differ widely between the two areas, preventing the consideration of orientation effects in the multi-area analysis. Hence only the whole data independently of their orientation is considered. Moreover, some seasons include only data for one of the two areas and are consequently not considered.

9.4. Results and interpretations

9.4.1 SDV variability

9.4.1.1 Changes in seasonal SDV over the 2003-2017 period in Haute-Maurienne

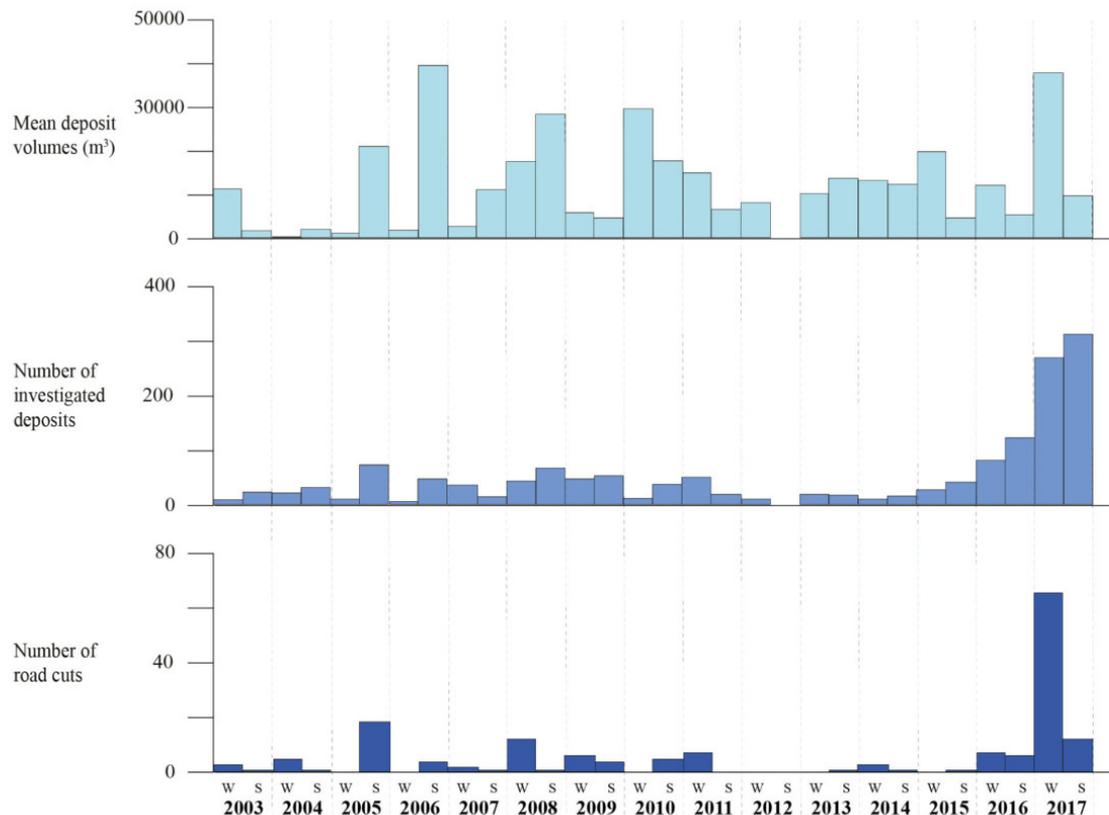


Figure 52: Mean inter-annual winter (W) and spring (S) SDV, number of investigated deposits and number of road cuts from Haute-Maurienne area for the period 2003-2017

Local SDV and avalanche activity show high variability on an inter-annual and inter-seasonal scale. Several years recorded particularly low SDV for both seasons (i.e 2004 and 2009, mean SDV <5000 m³ for both seasons). In contrast, 2008 and 2010 recorded large mean SDV for both seasons and up to 31,000 m³ during the 2010 winter) (Fig. 52). The avalanche activity is particularly high for 2016 and 2017.

We also note a significant variability between the seasons. The sample mean is higher for winter SDV (22 681m³) than for spring (12,556 m³). By contrast, the mean frequency is higher for the spring season (58 avalanches and 0.79 avalanches per

spring and per path) than for the winter season (43 avalanches and 0.63 avalanches per winter and per year). Only three winters recorded higher avalanche counts than the associated spring (2007, 2011 and 2013). The high spring avalanche activity may partly explain the differences between winter and spring mean SDV.

Our data reveal that 2017 was an exceptional year for both SDV and avalanche activity with 579 avalanches recorded, and a mean winter SDV of 38,300 m³ respectively. This resulted in significant disruptions to the road network. In 2017 (Fig. 53), almost half of the avalanches cutting roads were recorded. Most of the paths located downstream of Bessans were impacted in 2017 only.

SDV data relative to the Guil valley are presented in Figure S9.

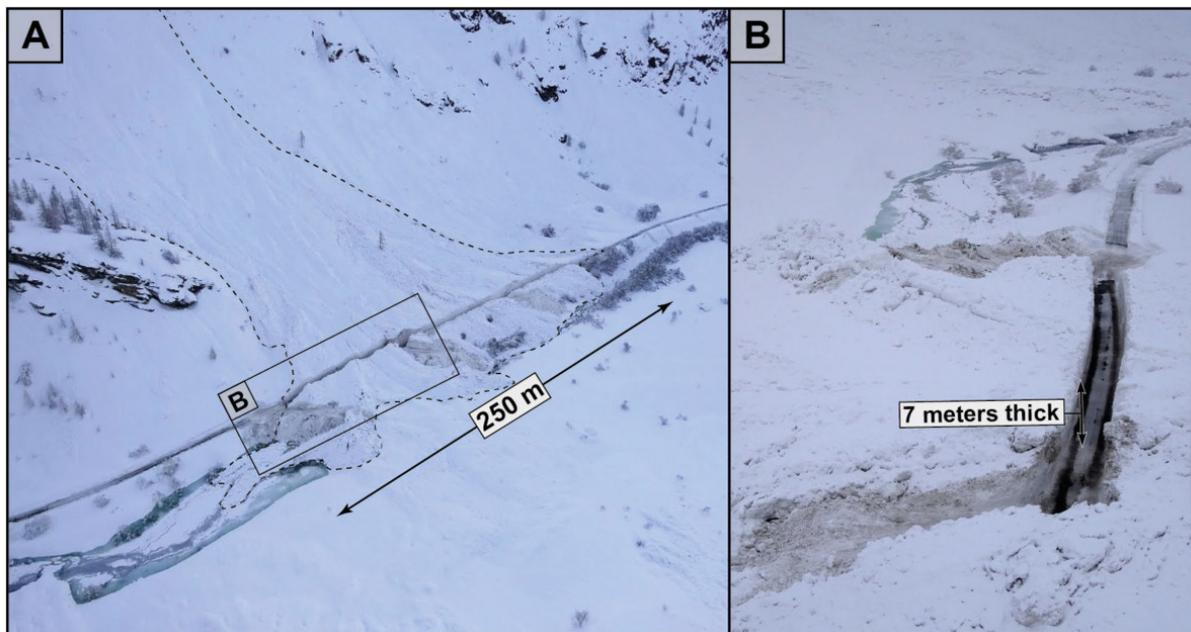


Figure 53: Aerial (A) and lateral view (B) of an avalanche deposit that resulted in a major road cut in Bonneval-sur-Arc in January 2018 (RTM 73). The thin black line is RD 902 after partial snow removal. Within the SDV, snow walls on both sides of the road are ~7m high.

9.4.1.2 Changes in seasonal SDV with path orientation

We note a significant impact of orientation on mean SDV and avalanche activity. South orientation paths recorded particularly large mean SDV for both winter (22,000 m³) and spring season (18,500 m³). West-facing paths recorded high mean SDV during winter (21,500 m³) but low mean SDV during spring (7500 m³). Northwest-

facing paths recorded low mean SDV for both winter and spring (<15,000 m³) (Fig. 54).

In Haute-Maurienne, the south and north-west oriented paths are particularly prevalent and thus have recorded a high number of avalanches between 2003 and 2017. By contrast, the western oriented paths are less frequent, leading to a lower number of avalanche records. However, despite this variability, the three studied orientations present a strong annual mean activity per path (1.7 avalanche per year and path for south paths, 2.1 for west paths and 1.6 for north-west paths) along with only a few seasons that do not record any activity at all.

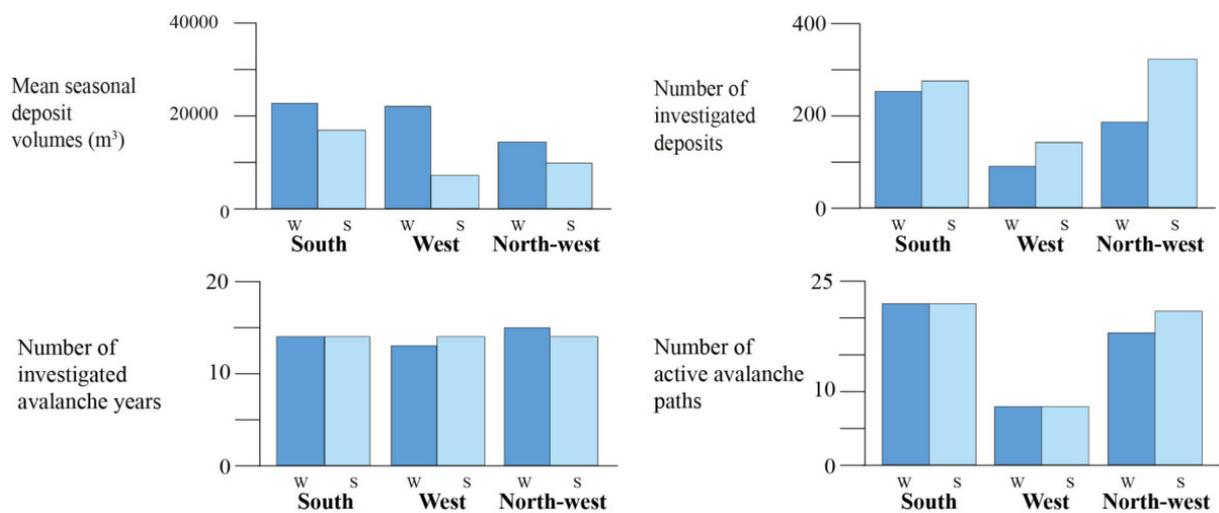


Figure 54: Mean SDV for winter (W) and spring (S) seasons, number of investigated deposits, investigated avalanche years and investigated avalanche paths for south, west and north-west faced paths from Haute-Maurienne.

9.4.3 Relationships between SDV, meteorological and snow conditions

9.4.3.1 General influence of meteorological and snow conditions on SDV

We conducted two distinct analyses using the whole set of SDV from Haute Maurienne from both seasons. First, we explored relationships between mean SDV variability and meteorological and snow conditions with all variables from different elevations. Then we further investigated relationships between mean SDV and snow-meteo data related to a specific elevation (2100; 2400; 2700 and 3000 m a.s.l.).

Table 14: Statistical summary of stepwise linear regressions performed between mean SDV for an undefined path exposition and meteorological and snow conditions for a flat topography in Haute-Maurienne considering all elevations and the two seasons. The + or - indicate the sign of significant relationships.

Orientation	Season	Regression R ²	Retained variables	Number of investigated year	Number of investigated deposit
Undefined	Winter	0.54	Ramsond max 2400m a.s.l (+) Depth max 2700 m a.s.l (+)	15	648
Undefined	Spring	No regression	No significant variables	14	808

Regression models for the two seasons considering all elevations are summarised on Table 2. Model is only significant in winter. SDV variability is positively influenced by max snowpack depth at 2700 m a.s.l. and max ramsond depth at 2400 m a.s.l. ($R^2=0.54$) (Fig. 55). This may reflect that the volume of snow in the starting area combined with the volume of the easily re-mobilized snowpack during the flow downslope explains the SDV.

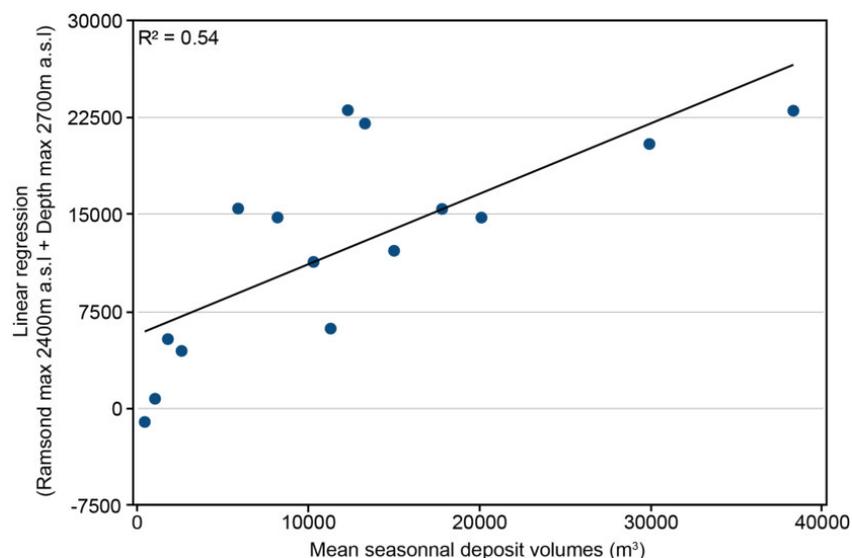


Figure 55: Multi elevations winter linear regression results and observed mean winter SDV evaluated independently of path exposition in Haute-Maurienne (Tab. 14).

Considering the four elevations separately, the best model to predict observed mean winter SDV is obtained with the 2400 m a.s.l snow and meteorological conditions ($R^2=0.51$). In detail, the R^2 are lower at 2100 and 3000 m a.s.l. than at 2400 and 2700 m a.s.l. (Tab. 14). These best elevations are related to the flowing areas and to the lower part of the releases areas and are consequently relevant for the dynamic of the avalanches. All the selected variables show a positive correlation with SDV and are related to the total amount of snowfall (accumulated snowfall) and to the snowpack

(max depth or max ramsond). However, their influence is a bit lower than with the multi-elevation model (Tab. 14). As the spring multi-elevation model does not retain any variables, spring is no longer considered for the models related to a specific elevation.

Table 15: Statistical summary of stepwise linear regressions performed between mean winter SDV for an undefined path exposition and meteorological and snow conditions for a flat topography and a given elevation only in Haute-Maurienne. The + or - indicate the sign of the relationships.

	Season	Regression R ²	Retained variables	Number of investigated years	Number of investigated deposits
Maurienne 2100m a.s.l	Winter	0.27	Accumulated snowfall (+)	15	648
Maurienne 2400m a.s.l	Winter	0.51	Accumulated snowfall (+) Max ramsond (+)	15	648
Maurienne 2700m a.s.l	Winter	0.35	Max depth (+)	15	648
Maurienne 3000m a.s.l	Winter	0.31	Accumulated snowfall (+)	15	648

9.4.3.2 Influence of meteorological and snow conditions on winter SDV according to the orientation of avalanche path

Winter regression models considering different orientations of the paths in Haute-Maurienne and all elevations are summarised in Table 16. 3 significant models were retained with R² values varying from 0.4 to 0.66. The best model (R²=0.66) shows a link between mean winter SDV and ramsond mean at 2400 m a.s.l. and mean daily snowfall at 3000 m a.s.l. for the south oriented paths (Fig. 56). Interestingly, the two selected variables in the model are the same as those mentioned earlier (with a difference concerning elevation bands). No model retains variables while considering specific orientation for the spring season.

Table 16: Statistical summary of stepwise linear regressions performed between winter SDV and meteorological and snow conditions in Haute-Maurienne for specific orientations (SDV from the considered exposition only and meteorological and snow conditions from the corresponding 40° slope). Snow and meteorological conditions from all elevations are considered. The + or - indicate the sign of the relationships.

Orientation	Season	Regression R ²	Retained variables	Number of investigated years	Number of investigated deposits
South	Winter	0.66	Ramsond mean 2400m a.s.l (+) Mean snowfall 3000 m a.s.l (+)	15	91
West	Winter	0.40	Accumulated snowfall 2700m a.s.l (+)	14	252
North-West	Winter	0.57	Accumulated snowfall 2700m a.s.l (+)	14	186

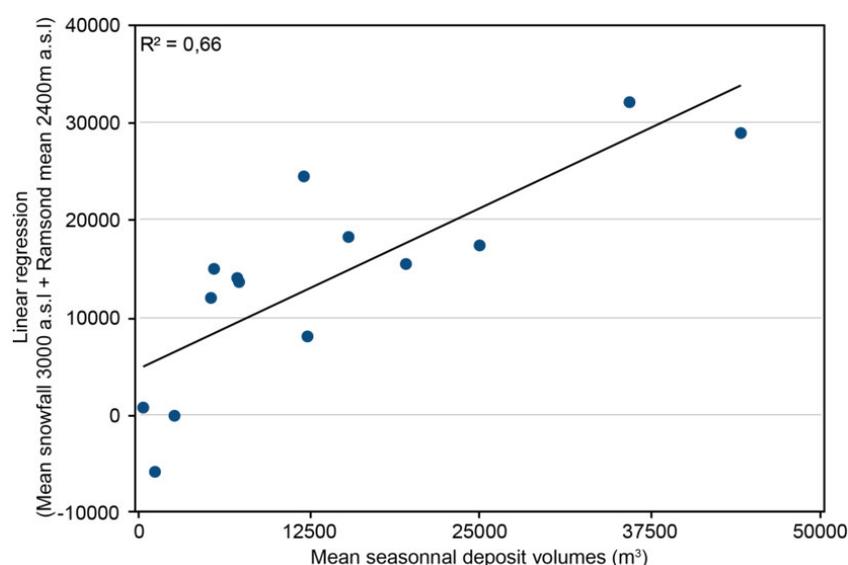


Figure 56: Multi elevations linear regression results and observed mean winter SDV for south facing paths in Haute-Maurienne (Tab 15.).

Significant variables retained for the west and north-west models are also the same as those reported earlier when the orientation effect was not considered. North-west model presents a slightly better R² (0.57) than the model that does not account for orientation (R²=0.54, Tab. 14).

9.4.3.3.b Meteorological and snow conditions influence on SDV disrupting the road network

Table 17: Statistical summary of stepwise linear regressions performed between SDV disrupting roads and meteorological and snow conditions in Haute-Maurienne during winter and spring seasons. Snow and meteorological conditions are for a flat topography and all elevations. SDV are considered altogether independently of path's exposition. The + or - indicate the sign of the relationships.

	Orientation	Season	Regression R ²	Retained variables	Number of investigated years	Number of investigated deposits
Multi-elevations models for paths with road disruptions	Undefined	Winter	0.54	Accumulated snowfall 2700m a.s.l (+)	9	109
	Undefined	Spring	0.45	Mean snowfall 2100m a.s.l (+)	13	61

Regression models only considering SDV that caused road disturbances in Haute Maurienne are summarised in Table 16. Statistical analyses show a distinct relationship with meteorological and snow variables compared to the overall sample of SDV. In winter, we notice that the best model ($R^2=0.54$) differs partly from the general analysis conducted earlier; it only retains the accumulated snowfall at 2700 m a.s.l. and highlights a higher influence of the accumulated snowfall. In spring, the best model retains mean daily snowfall at 2100 m a.s.l ($R^2=0.45$). Such differences with previous results (Tab. 14) may be due to a specific relationship between large deposits that cause road disturbances and meteo-snow data. But they may also be due to a lower number of avalanches and to the fact that data from 2017, represent 59% of winter avalanches and 22% of spring avalanches that caused road disturbances. Indeed, even if removing 2017 data does not affect the spring model ($R^2=0.46$), the winter model is no longer significant.

9.4.3.4 Regional variability in meteorological and snow conditions influencing SDV

Contrary to Haute-Maurienne, there are only two significant models (Tab. S1) for the Guil valley for all elevations as potential predictors: the winter linear model fitted for south-east facing paths with snow and meteorological conditions retaining the mean and max ramsond at 2100 m a.s.l ($R^2=0.91$) and the spring linear model fitted for north facing paths retaining max ramsond at 2100m a.s.l ($R^2=0.35$). This suggests that relationships between SDV and meteorological and snow conditions are specific to a local context. However, we cannot exclude that differences are also related to a

much smaller number of SDV in the Guil valley. Eventually, the weighted combination of deposit volumes from the two study areas was considered (Eq. 1). It does not produce better results, with no significant model identified both for winter and spring seasons (Table S5).

9.5. Discussion, conclusion and perspectives

9.5.1 Summary and discussion of main outcomes

Based on the availability of a large record of natural avalanches SDV and refined snow and weather data over 15 years, statistical analyses were conducted to study meteorological and snow factors driving SDV. In Haute-Maurienne, the influence of meteorological and snowpack conditions on winter deposit volumes is mostly driven by the quantity of snow contained in the snowpack within the starting area, either represented by the accumulated snowfall or by the maximal snow depth. This findings is consistent with previous studies in the French Alps that show that large run-outs are linked to large volumes of mobilised snow, themselves dependent on the depth of the snowpack (Eckert et al., 2010a). Similar results have recently been found in the US where large magnitude avalanche probability is related to the amount of snow (Peitzsch et al., 2021). We show that the meteorological and snow influence on SDV is better evidenced while using variables from different elevations. This reflects the combined effect of initially released snow and entrainment during the flow to explain deposit patterns, in accordance with, e.g., Sovilla et al. (2006). SDV control is also better evidenced while considering path orientations. The winter SDV integrates the distinctive evolution of the snowpack conditions between the different considered orientations. Concerning SDV disrupting the road network, we have highlighted a distinct relationship between meteorological conditions and SDV. However, the non-equal distribution of the paths orientations implies an significant over-representation of two orientations, restricting the overall results

However, results do not show any significant relationship for the spring season, during which higher avalanche activity results in lower mean SDV. We suspect that the meteorological and snow conditions indirectly control the high spring avalanche occurrence and mask the varying influence of meteorological and snow variables on

spring SDV. Furthermore, comparing or aggregating Haute-Maurienne data with Guil valley does not show any significant relationship, highlighting the non-universal nature of the relations between deposit volumes and meteorological and snowpack conditions. Similarly, aggregating/averaging the data over the full avalanche year (i.e. without the winter and spring distinction) lead to few significant relations (Table S3). Here again, we posit that at this scale the control of SDV by snow and meteorological conditions is masked by other factors such as different avalanche activity between paths and seasons.

Another limit of the approach is that pointwise meteorological and snow data measured on the field were not used. However, reanalysed data from the SAFRAN/Crocus reanalyses, largely validated with comparison to point measurement (Durand et al., 2009a), present the advantages of having a spatial resolution that makes it possible to consider several elevation bands, notably high elevations where there are no pointwise measurements but which are the most relevant for avalanche release. Also, key parameters driving avalanche dynamics, such as wind, were not considered in our study. Even if Crocus reanalyses integrate an exposition effect within energy balance computations, further analyses should probably even better consider exposition changes (e.g., including snow depth changes with drifting snow).

9.5.2 Conclusion and perspectives

SDV shows a discontinuous and non linear response to meteorological and snow conditions variations. Yet, averaging our data at the seasonal scale, makes it possible to understand the predominant meteorological factors for seasonal SDV evolution with simple linear regression models. These results point to the feasibility of identifying a control by meteorological and snowpack conditions on SDV. Yet, the non-universal nature of this control points to the necessity to consider local meteorological and snow conditions for assessing avalanche dynamics and related hazards.

Moreover, the regression models obtained, even if statistically significant, are only relative to a short period of time (15 years), making the robustness of the obtained relationship questionable, as, e.g., some winter models are extremely sensitive to the extreme 2017 year. Further work should consider datasets covering longer time frames to strengthen the findings.

Concerning SDV disrupting the road network, both winter and spring highlight a different influence of variables on snow deposit volumes compared to the overall paths. It is further speculated that the road network vulnerability is influenced by a complex combination of meteorological and snow conditions, road proximity, and path morphological characteristics influencing both the occurrence and magnitude of road disruptions. Yet, fitted models show distinct control variables for both winter and spring SDV having led to road cuts provide a basis for predicting the future intensity and location of major road cuts in the study area by feeding the obtained relations with future local projections of snow and weather conditions (Verfaillie et al., 2018).

Acknowledgements

Hippolyte KERN holds a PhD grant from Université Paris-1 Panthéon-Sorbonne. INRAE is member of Labex OSUG and this work has received financial support from LabEx DynamiTe (ANR-11-LABX-0046) as part of the “Investissement d’Avenir” program. The numerous people from ONF-RTM and INRAE that contributed to the EPA survey with the financial support of the French Ministry of the Environment are acknowledged. The authors are grateful to the ONF-RTM for sharing pictures and information regarding the avalanches of winter 2017-2018.

Partie V Discussion, conclusion et perspectives

Chapitre 10 : Synthèse et apport du travail de thèse

10.1 Rappel du contexte de recherche et des objectifs de la thèse

Les avalanches provoquent régulièrement des dommages aux biens, aux personnes et aux infrastructures. Les dommages structuraux liés aux avalanches sont rares sur le réseau routier. Cependant, les avalanches entraînent régulièrement une altération de la fonction d'usage des réseaux routiers provoquant alors d'importantes conséquences indirectes. Or, les dommages sur le réseau routier sont directement conditionnés par les caractéristiques des avalanches et, en particulier, le volume de leurs dépôts. La connaissance scientifique sur les caractéristiques des dépôts d'avalanches ainsi que leurs variables de contrôle reste limitée. Le bilan des études préexistantes a montré deux limites principales. La première réside dans une connaissance restreinte des caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches en fonction des différents types d'écoulement. De fait, la connaissance de la variabilité spatio-temporelle des volumes des dépôts ainsi que les variables de contrôle géomorphologique et météorologique des volumes des dépôts sont quasi-inexistantes. La seconde limite concerne la faible connaissance des liens entre les coupures de routes provoqués par des avalanches et les caractéristiques de leurs dépôts.

Dans ce contexte, l'objectif principal de la thèse était de pallier ces deux limites en apportant de nouvelles informations sur les dépôts d'avalanches grâce à des relevés de terrains et l'étude d'une base de données événementielle. Pour ce faire, ce travail s'est essentiellement concentré sur l'étude de dépôts d'avalanches issus du massif de la Haute-Maurienne et, dans une moindre mesure, du massif du Queyras. Ce dernier chapitre a pour but de synthétiser les différents apports de cette thèse et de présenter des perspectives de recherche.

10.2 Contrôle saisonnier des caractéristiques des volumes des dépôts d'avalanches

10.2.1 Contrôle saisonnier des caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches

Les relevés réalisés dans le cadre de cette thèse se sont concentrés sur la caractérisation géométrique du dépôt, de la granulométrie des agrégats de surface, de la masse volumique et de la porosité des couches internes du dépôt ainsi que de l'importance de l'érosion de l'écoulement avalancheux associé au dépôt (chapitre 7). Les mesures effectuées apportent des informations inédites sur la genèse des dépôts et leurs relations avec les caractéristiques du manteau neigeux initial et de l'écoulement.

Les deux dépôts étudiés présentaient des caractéristiques différentes, typiques des avalanches "hivernales" et "printanières". Les résultats obtenus illustrent le rôle majeur des caractéristiques du manteau neigeux initial sur les caractéristiques du dépôt final. En détail, les conditions météorologiques conditionnent l'importance de l'humidité du manteau neigeux initial qui détermine ensuite le type d'écoulement et, *in fine*, les propriétés du dépôt final. Cependant, du fait des modifications de la dynamique avalancheuse sur les trente dernières années, les types d'écoulement ne sont plus forcément associés à une saison spécifique. Nos résultats le confirment puisque le dépôt de neige humide provient d'une avalanche déclenchée en plein hiver, mais qui correspond à un écoulement dont les caractéristiques sont typiques d'une avalanche de printemps.

Ces résultats, issues d'une méthodologie largement améliorable, ne s'appuient que sur l'analyse de deux dépôts. Ce travail préliminaire encourage la multiplication des mesures de terrains sur des dépôts présentant des ampleurs plus importantes et des formes plus complexes.

10.2.2 Contrôle saisonnier des volumes des dépôts d'avalanches

Ce travail de thèse s'est essentiellement concentré sur l'identification des variables de contrôle des volumes des dépôts depuis l'analyse d'une base de données principalement issues de l'EPA (chapitre 8 & 9).

Nos résultats ont mis en avant l'importance d'une approche saisonnière pour déterminer les variables de contrôle des volumes des dépôts d'avalanches, car les analyses opérées à l'échelle annuelle se sont montrées peu concluantes. La compilation ainsi que la comparaison des données du massif de la Haute-Maurienne avec celles du massif du Queyras pour l'identification des variables influant sur les volumes des dépôts n'a pas apporté de résultats significatifs, illustrant le caractère non universel des liens avec les volumes des dépôts.

Le sous-échantillonnage saisonnier des volumes des dépôts a révélé des différences dans les liens entre les volumes des dépôts et les variables morphologiques des couloirs et les conditions météorologiques locales, avec des valeurs de corrélation plus élevées pour l'hiver que pour le printemps, pour des raisons qui restent à élucider.

Les volumes des dépôts hivernaux semblent plus influencés par les conditions météorologiques que par la morphologie des couloirs. On note également l'importance du rayonnement solaire ainsi que le positionnement des couloirs par rapport à la direction du vent dominant comme des facteurs fondamentaux pour la détermination des volumes des dépôts hivernaux.

En revanche, les variables contrôlant la taille des dépôts de printemps restent à élucider. Si la géomorphologie des couloirs joue un rôle faible, les conditions météorologiques semblent ne jouer aucun rôle. Le rôle du vent non pris en compte ici pourrait éventuellement être une piste à explorer à l'avenir. Les interactions entre les variables morphologiques et météorologiques et les volumes des dépôts printaniers sont masquées par la forte activité avalancheuse printanière, elle-même dépendante de la morphologie des couloirs et des conditions météorologiques. En effet, du fait de l'activité avalancheuse plus forte au printemps, qui purge régulièrement les couloirs, les volumes des dépôts du printemps sont plus faibles qu'en hiver. Dans les faits, on observe plus régulièrement une succession de dépôts avec des petits volumes issus du même couloir, plutôt qu'un unique dépôt avec un volume plus important.

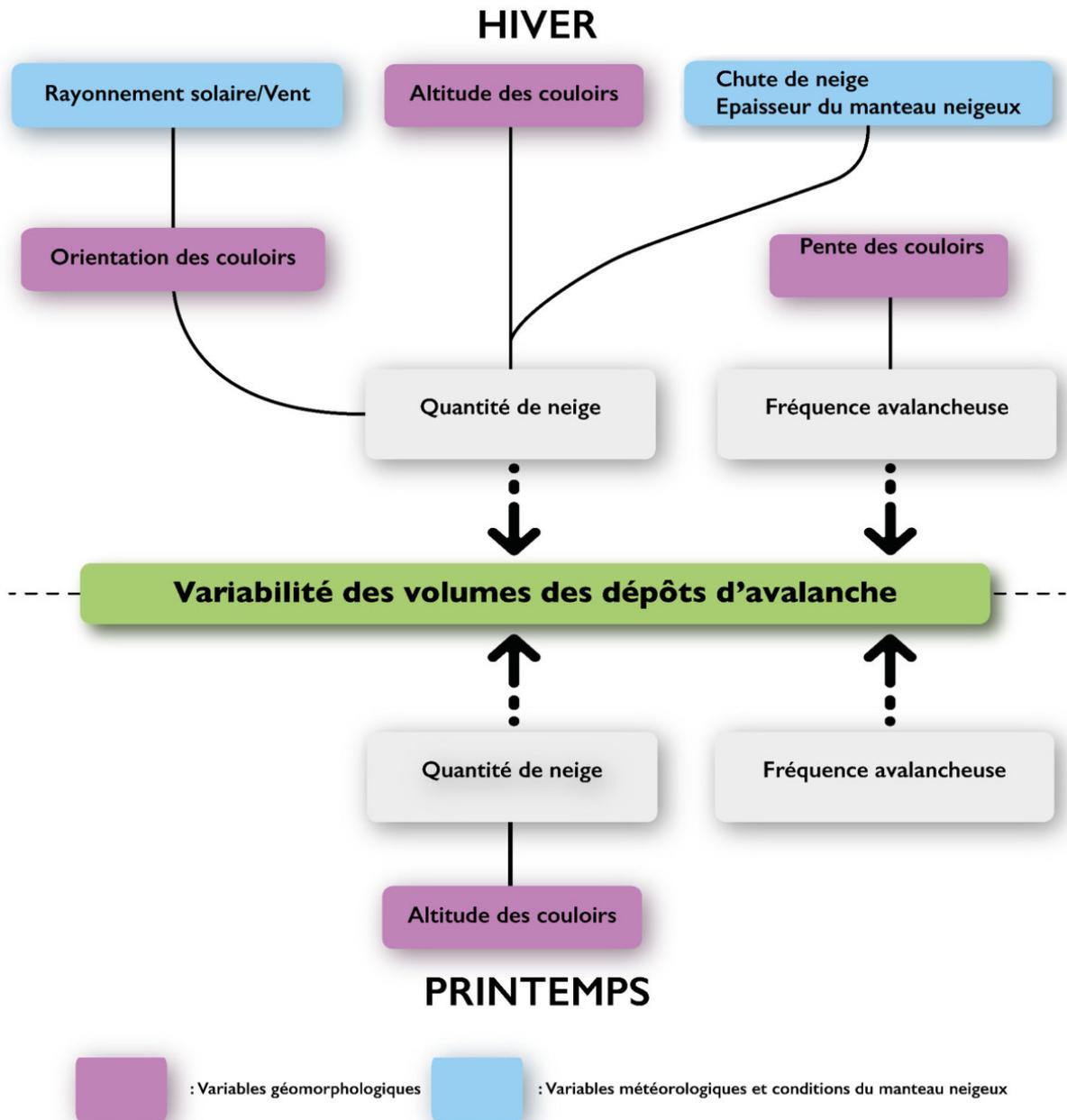


Figure 57 : Schéma récapitulatif des variables de contrôle des volumes des dépôts pour la saison hivernale et printanière

Si cette étude a permis d'apporter des résultats novateurs concernant les variables déterminant les volumes des dépôts, certaines limites demeurent présentes. Les principales limites de cette étude reposent sur la courte période considérée et sur une faible couverture spatiale. Les résultats ne portent que sur une courte période de temps (15 ans) et deux massifs alpins. De plus, des effets locaux sur les relations entre les volumes des dépôts et les conditions météorologiques et nivologiques

propres à chaque massif sont masqués par la prise en compte combinée de deux massifs, ce qui réduit *in fine* le pouvoir prédictif de ces travaux.

10.3 Apport de ces recherches sur la vulnérabilité du réseau routier alpin face aux avalanches

Ce travail a également porté sur l'identification de variables expliquant l'occurrence de coupures de routes liées aux avalanches en lien avec le volume de leurs dépôts. Dans notre cas, c'est avant tout la proximité des couloirs d'avalanches par rapport à la route qui contrôle les coupures. On note par exemple le nombre important de coupures dans la section de route entre Bessans et Bonneval-sur-Arc qui correspond à un resserrement topographique de la vallée, entraînant une proximité de la route au bas des versants sujets aux avalanches.

Toutefois, certains facteurs météorologiques ont été identifiés et ils se distinguent de ceux mis en évidence pour les autres couloirs. C'est l'importance des chutes de neige qui conditionne les volumes des dépôts coupant des routes et donc leurs ampleurs (alors que l'altitude, l'orientation et la pente des couloirs associés à l'importance de la disponibilité en neige contrôle les volumes de l'ensemble des couloirs). L'identification de liens entre les volumes des dépôts printaniers provoquant des coupures de routes et l'importance des chutes de neige souligne l'intérêt de considérer séparément des groupes de couloirs pour déterminer plus finement les variables responsables de certains volumes des dépôts.

Bien que la vallée de la Haute-Maurienne et le massif du Queyras soient des sites privilégiés pour l'étude des coupures de routes liées aux avalanches du fait de leurs fréquentes occurrences, les résultats sont uniquement relatifs à une petite partie du territoire alpin. De plus, près de la moitié des coupures de routes considérées dans ce travail ont été provoquées durant l'hiver 2017, exceptionnellement actif. Il serait donc opportun de multiplier de telles études dans d'autres secteurs des Alpes, voire dans d'autres chaînes de montagne.

10.4 Perspectives

10.4.1 Étude des caractéristiques des dépôts d'avalanches *in-situ*

L'approche méthodologique pour l'étude des dépôts *in-situ* proposée dans le chapitre 7 pourra être largement améliorée pour en pallier certaines limites. Il serait premièrement pertinent de répliquer ce type d'approche sur un plus grand nombre de dépôts d'avalanches, avec notamment des caractéristiques géométriques différentes. Puisque le temps nécessaire à ce type de mesures est important, ce travail s'est concentré sur des dépôts de petite taille. Or, bien que plus coûteux en temps et en main d'œuvre, il paraît intéressant de considérer des dépôts de grande ampleur. Ceci permettrait d'identifier l'importance de l'hétérogénéité des caractéristiques nivologiques au sein de larges dépôts. Il serait également intéressant de répliquer ces mesures sur plusieurs dépôts issus du même couloir pour identifier la variabilité locale des caractéristiques en fonction de différents manteaux neigeux initiaux.

Concernant les améliorations méthodologiques, il serait par exemple précieux d'utiliser des méthodes de photogrammétrie pour caractériser la granulométrie des agrégats en surface, en remplacement de la méthode de Wollman qui repose sur une estimation de la granulométrie sur des zones du dépôt restreintes et limitées. Grâce aux images obtenues avec le drone, cette méthode permettrait de finement calculer les dimensions des agrégats en surface sur l'ensemble du dépôt et d'obtenir des cartes de granulométrie. Ces données permettraient d'analyser bien plus finement les variables expliquant la variabilité de la granulométrie des agrégats. Ce type d'approche est par exemple déjà utilisé pour la caractérisation de la mosaïque sédimentaire de bancs alluviaux de cours d'eau en tresse et présente une bonne fiabilité (e.g Vázquez-Tarrío et al., 2017).

Par ailleurs, la mise en place de ce type d'approche sur des sites instrumentés, comme le couloir instrumenté du col du Lautaret, représente une perspective prioritaire. L'intérêt repose sur la fine connaissance de la géomorphologie du couloir et la présence de mesures détaillées réalisées au sein même de l'écoulement (champs de vitesses, pressions, etc.). De plus, la présence de stations météorologiques et la possibilité d'effectuer des mesures nivologiques dans la zone

de départ préalablement au déclenchement de l'avalanche apporteraient de précieuses données. Ces mesures permettraient de relier les caractéristiques de la météorologie, du manteau initial, des dynamiques d'écoulement ainsi que de la morphologie du couloir avec les caractéristiques géométriques, nivologiques et granulométriques des dépôts.

10.4.2 Identification des variables de contrôle des volumes des dépôts d'avalanches

L'analyse des variables géomorphologiques et météorologiques contrôlant les volumes des dépôts d'avalanches présentée dans les chapitres 8 et 9 pourrait être améliorée.

Les deux principales pistes d'amélioration méthodologique reposent sur la prise en compte de la morphologie des différentes zones composant les couloirs d'avalanches et la prise en compte de données météorologiques relatives aux vents. Il serait intéressant de distinguer les zones de départ, d'écoulement et d'arrêt. S'il est aisé d'extraire les potentielles zones d'arrêt selon un facteur de pente, il n'a pas été possible de délimiter les zones de départ. Des travaux récents effectués par Duvillier et al. (2022) ont établi une méthodologie pour identifier les potentielles zones de départ des couloirs avec une très bonne fiabilité. De plus, un des massifs testés est celui de la Haute-Maurienne. Il apparaît donc comme pertinent d'insérer dans la méthodologie appliquée dans cette thèse les variables morphologiques issues de la délimitation des différentes zones de chaque couloir EPA du massif de la Haute-Maurienne. Ces résultats permettraient de quantifier la contribution des variables morphologiques de chaque zone des couloirs aux volumes des dépôts et ainsi, de directement améliorer les résultats de ce travail. Concernant l'intégration de données météorologiques relatives à la direction et à la force du vent, il n'existe actuellement pas de données mesurées, et les données de vent issues des réanalyses de Météo-France restent encore peu fiables. Cependant, les données de réanalyses relatives aux caractéristiques du manteau neigeux prennent en compte la disponibilité de la neige en fonction de l'orientation et donc indirectement de l'effet du vent. Il serait sans doute possible d'installer plusieurs stations météorologiques à proximité de différentes

zones de départ, cependant la répartition des stations n'apporterait pas une couverture suffisante pour considérer l'impact du vent sur chaque zones de départ.

Les résultats de cette étude, relatifs aux variables de contrôle des volumes des dépôts, poussent à répliquer cette approche sur des périodes plus étendues. La principale limite repose sur la non-continuité temporelle des volumes des dépôts dans le protocole EPA mis en place entre 1975 et 2003. Ce manque de données pourrait éventuellement être comblé par le recueil de données historiques provenant de différentes sources. Par exemple, Giacona et al. (2017) ont récolté des informations sur plus de 700 avalanches dans le massif des Vosges depuis 1780, région non considérée par l'EPA.

Par ailleurs, la méthodologie appliquée dans cette thèse pourrait être répliquée à d'autres sites d'étude. Du fait de sa large couverture, l'EPA offre un important nombre de massifs avec un suivi des volumes des dépôts. Un élargissement spatial de cette approche permettrait d'opérer ce type d'analyse sur des massifs différents, notamment localisés à des altitudes moins élevées et avec un couvert forestier plus important. Ces résultats permettraient de plus largement identifier les paramètres locaux responsables des volumes des dépôts d'avalanches. La multiplication des massifs étudiés permettrait également de comparer les résultats entre différentes zones pour confirmer l'aspect non universel des relations identifiées dans ce travail. Afin d'élargir les terrains considérés notamment hors de France dans un futur proche, il serait possible de créer des bases de données de volume de dépôts sur des sites sans protocole de récolte de données *in-situ* grâce à l'utilisation d'images satellitaires. De récentes études ont confirmé le potentiel élevé de la cartographie des dépôts d'avalanches à partir d'images de télédétection pour compléter des bases de données existantes, ouvrant la voie à la quantification des volumes des dépôts depuis l'analyse d'image satellitaire (Saumya et al., 2019 ; Hafner et al., 2022).

10.4.3 Étude des volumes des dépôts et vulnérabilité du réseau routier alpin

L'étude des liens entre les volumes des dépôts d'avalanches et la vulnérabilité du réseau routier n'a fourni que de premiers résultats, ce qui permet d'envisager des futurs travaux.

Nos résultats sont uniquement relatifs à deux massifs ce qui entraîne une surreprésentation de certaines orientations de couloirs pour l'analyse des variables responsables des volumes des dépôts coupant les routes. Une seconde amélioration de nos travaux serait d'étudier les relations entre les volumes des dépôts et l'importance des coupures de routes, exprimée selon la durée de perturbations infligée au réseau routier. Les données disponibles dans les secteurs étudiées ne nous ont pas permis d'effectuer cette analyse, mais une plus grande échelle spatiale permettrait peut-être de rassembler suffisamment de données pour opérer cette analyse. Dans la continuité de cette proposition, et dans la logique des travaux effectués par Hao et al. (2022), il serait possible d'identifier des relations entre les caractéristiques nivologiques des dépôts et les durées de coupures de routes. Concrètement, il s'agirait de quantifier les différences dans le temps et dans les moyens nécessaires à la remise en fonction du réseau routier entre, par exemple, des dépôts issus d'avalanches de neige sèche et de neige humide.

Au-delà d'une connaissance approfondie sur les dépôts d'avalanches, ces résultats devraient contribuer à élaborer des stratégies de gestion des risques efficaces et innovantes à travers une meilleure identification des zones vulnérables et des facteurs de contrôle géomorphologiques et météorologiques des volumes des dépôts d'avalanches. Ce sujet est d'autant plus important que les modifications des dynamiques avalanches, en lien avec les changements climatiques, vont entraîner une modification spatio-temporelle du risque avalancheux sur le réseau routier. Dans les faits, des portions de routes non affectées par des coupures de route vont pouvoir le devenir dans les prochaines années. Cette situation souligne l'importance de l'identification des facteurs entraînant des coupures de routes ainsi que de leur ampleur pour une meilleure prise en compte de l'évolution du risque avalancheux sur le réseau routier à travers l'étude des dépôts d'avalanches.

Références bibliographiques

Akiyama K. et Ikeda S., 2013 - Features of avalanches based on aerial photograph interpretation in Japan, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*. 7-11 Octobre, Grenoble, France, 707-714.

Ancey C. et Charlier C., 1996 - Quelques réflexions autour de la classification des avalanches / Some thoughts on a classification of avalanches. *Revue de Géographie Alpine*, 84, 9-21.

Ancey C., Rapin F., Martin E., Coleou C., Naaim M. et Brunot G., 2000 - L'avalanche de Péclerey du 9 février 1999. *La Houille Blanche*, 5, 45-53.

Ancey C., Gervasoni C., Meunier M., 2004 - Computing extrême avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 39, 161-180.

Ancey C., 2006 - Dynamique des avalanches. *Presses polytechniques et universitaires romandes*. Cemagref, Lausanne, Antony (France). 352p.

Ancey C., 2009 - Avalanches: une approche rationnelle dans la gestion du territoire? *L'avalanche: une catastrophe-histoire culturelle d'une représentation*. 3-4 avril, Martigny (Suisse).

Ancey C. et Bain V., 2015 - Dynamics of glide avalanches and snow gliding. *Reviews of Geophysics*, 53, 3, 745–784.

Ancey C., 2016 - Snow avalanches. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press.

Armstrong R. et Armstrong B., 1977 - Avalanche Atlas, Ouray County, Colorado, *INSTAAR Occasional Paper No. 25*, University of Colorado, Boulder. 132 p.

Armstrong R. et Armstrong B., 1987 - Snow avalanche climates of the western United States: a comparison of maritime intermountain and continental conditions. *Avalanche formation, movement and effects*. IAHS Publications, 281-293.

Armstrong R. et Armstrong B., 2006 - A history of avalanche hazard and avalanche research in the San Juan Mountains, Southwestern Colorado, USA. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*. 1-6 Octore, Telluride, Colorado, 298–303.

Bakkehöi S., 1987 - Snow avalanche prediction using probabilistic method. *Avalanche formation, movement and effect*. IAHS publications, 549-556.

Ballesteros-Cánovas J. A., Trappmann D., Madrigal-González J., Eckert N., & Stoffel M., 2018 - Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115,13, 3410-3415.

Barbolini M., Cappabianca F., et Sailer R., 2004 - Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 77.

Bartelt P., Buser O., Platzer K., 2007 - Starving avalanches: frictional mechanisms at the tails of finite-sized mass movements. *Geophysical Research Letters*, 34,20, L20407.

Bartelt P. et McArdell B., 2009 - Granulometric investigations of snow avalanches, *Journal of Glaciology*., 55(193), 829–833.

Bartelt P., Feistl T., Bühler Y., 2012 - Overcoming the stauchwall: Viscoelastic stress redistribution and the start of full-depth gliding snow avalanches. *Geophysical Research Letters*, 39(16), 6 p.

Bartelt P. et Buser O., 2016 - The relation between dilatancy, effective stress and dispersive pressure in granular avalanches. *Acta Geotechnica*, 11(3), 549–557.

Birkeland K. et Mock C., 2001a - The Major Snow Avalanche Cycle of February 1986 in the Western United States, *Natural Hazards*, 24, 75–95.

Birkeland K.W., Mock C.J., Shinker J.J., 2001b - Avalanche extremes and atmospheric circulation patterns. *Journal of Glaciology*, 32, 135-140.

Bebi P., Kulakowski D., et Rixen C., 2009 - Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—State of research and implications for management. *Forest ecology and Management*, 257(9), 1883–1892.

Beniston M., 2003 - Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts, *Climate Change*, 59, 5–31.

Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L. M., Coppola E., Eckert N., Fantini A., Giacomoni F., Hauck C., Huss M., Huwald H., Lehning M., López-Moreno J.-I., Magnusson J., Marty C., Morán-Tejeda E., Morin S., Naaim M., Provenzale A., Rabatel A., Six D., Stötter J., Strasser U., Terzago S., et Vincent C., 2018 - The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges, *The Cryosphere*, 12(2), 759-794.

Bertrand D., Naaim M. et Brun M., 2010 - Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches. *NHESS*, 10(7), 1531–1545.

Bonnefoy M., Borrel G., Richard D., Bélanger L. et Naaim M., 2010 - La carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) : enjeux et perspectives, *Sciences Eaux & Territoires*, 2, 6-14.

Brennan P. V., Ash M., Isa F. M., Keylock C. J. et McElwaine J. N., 2009 - Advanced radar imaging of geophysical flows. *L. Trilling, et al. (Eds.)*, 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology, Cambridge, Feb. 24-26, 2. 144–147.

Bonnefoy-Demongeot M., Robinet J., Bouilloux J., Bourova E., et Richard D., 2014 - How to improve snow avalanche observation quality?, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 29 September–3 October, Banff, Alberta, Canada, 894–901.

Boudières V., Marcelpoil E. et Richard D., 2010 - Comment gérer le risque d'avalanches sur les routes des stations de montagne ? Essai d'analyse. *Sciences Eaux & Territoires*, 2, 58-65

Bourova E., Maldonado E., Leroy J-B., Alouani R., Eckert N., Bonnefoy-Demongeot M., Deschatres M., 2016 - A new web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (5), 1205-1216.

Brennan P.V., Ash M., Isa F. M., Keylock C. J., McElwaine, J. N., 2009 - Advanced radar imaging of geophysical flows. *L. Trilling, et al. (Eds.), 3rd IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology, Cambridge, Feb. 24-26, 2009.* 144–147.

Bründl M. Etter H.-J., Steiniger M. Klingler Ch. Rhyner J. et Ammann W.J. 2004 - IFKIS - a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland, *Natural Hazards Earth System Science*, 4, 257–262.

Bründl M., Bartelt P., Schweizer J., Keiler M., Glade T., 2010 - Snow avalanche risk analysis—review and future challenges. *Alcantara-Ayla I, Goudie A (eds) Geomorphological hazards and disaster prevention.* Cambridge University Press, Cambridge, 49–61

Buser O., Bartelt P., 2011 - Dispersive pressure and density variations in granular snow avalanches, *Journal of Glaciology*, 57(205), 857–860.

Castebrunet H., Eckert N., Giraud G., 2012 - Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps. *Climate of the Past*, 8, 855-875

Castebrunet H., Eckert N., Giraud G., Durand Y., Morin S., 2014 - Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: The French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. *The Cryosphere*, 8(5), 1673–1697.

Clarke J. et McClung D., 1999 - Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, British Columbia, Canada. *Journal of Glaciology*, 45, 539–546.

CLPA 2016a - Notice sur les avalanches constatées et leur environnement, dans le massif de la Haute-Maurienne

CLPA 2016b - Notice sur les avalanches constatées et leur environnement, dans le massif du Queyras

Corona C., Saez J.L., Stoffel M., Rovéra G., Edouard J.L., Berger F. 2013 - Seven centuries of avalanche activity at Echalp (Queyras massif, southern French Alps) as inferred from tree rings, *The Holocene*, 23, 292-304.

Cruden D.M., Hungr O., 1986 - The debris of the Frank Slide and theories of rockslide–avalanche mobility. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 23(3), 425–432.

Debernardi A. et Segor V., 2013 - The avalanche cadaster of the Valle d'Aosta Region (NW Italian Alps: the new born web portal (<http://catastovalanghe.partout.it/>), *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 7–11 October, Grenoble, France, 446–450.

de Bouchard d'Aubeterre G., Favillier A., Mainieri R., Lopez Saez J., Eckert N., Saulnier M., Peiry J-L., Stoffel M., Corona C. 2019 - Tree-ring reconstruction of

snow avalanche activity: Does avalanche path selection matter?, *Science of The Total Environment*, 684, 496-508.

Dent J.D., Burrell K.J., Schmidt D.S., Louge M.Y., Adams E.E., Jazbutis T.G., 1998 - Density, velocity and friction measurements in a dry-snow avalanche. *Annals of Glaciology*, 26, 247–252.

Decaulne A., 2004 - Le risque avalancheux en Islande. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 1, 75-83.

Decaulne A., 2005 - L'apport des données géomorphologiques et historiques à l'analyse diachronique du couple aléa-vulnérabilité dû aux avalanches et aux coulées de débris dans les fjords d'Islande nord-occidentale. *Norvège*, 194, 4-4.

Dent J.D., Burrell K.J., Schmidt D.S., Louge M.Y., Adams E.E. et Jazbutis T.G., 1998 - Density, velocity and friction measurements in a dry-snow avalanche. *Annals of Glaciology*, 26, 247–252.

Deschâtres M., Cabos S., Eckert N., Richard D., 2010 - E.P.A.: Avalanche permanent survey, more than 100 years of observation updated for more reliability. *Proceedings of the International Snow Science Workshop. Lake Tahoe, USA*, 18-22.

Duclos A., Laffon J., et Chapelle J., 2008 - Avalanche data: to share or not to share, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 21–27 September, Whistler, British Columbia, Canada, 566–570, 2008.

Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E., 1999 - A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 45, 469-484.

Durand Y., Laternser M., Giraud G., Etchevers P., Lesaffre L., et Mérindol, L 2009a - Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958–2002):

methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 29–449.

Durand Y., Laternser M., Giraud G., Etchevers P., Mérindol L., et Lesaffre B., 2009b - Reanalysis of 47 Years of Climate in the French Alps (1958–2005): Climatology and Trends for Snow Cover, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 48, 2487–2512.

Dupire S., Curt T., Bigot S., 2017 - Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of The Total Environment*, 595, 801-817.

Duvillier C., Eckert N., Evin G., Deschatres M., 2022 - Development and validation using ground truth of a method to identify potential release areas of snow avalanches based on watershed delineation, *NHESS*, pre-print.

Eckerstorfer M., Christiansen H.H., 2011 - Topographical and meteorological control on snow avalanching in the Longyearbyen area, central Svalbard 2006–2009, *Geomorphology*, 134 (3), 186-196.

Eckert N., Parent E., Bélanger L., 2007a -Hierarchical modelling for spatial analysis of the number of avalanche occurrences at the scale of the township. *Cold Regions Science and Technology*, 50, 97-112

Eckert N., Parent E., Richard D., 2007b - Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution, *Cold Regions Science and Technology*, 49, 88-107.

Eckert N., Parent E., Faug T., Naaim M. 2008 - Optimal design under uncertainty of a passive defense structure against snow avalanches: from a general Bayesian framework to a simple analytical model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8 , 1067-1081

Eckert N., Parent E., Faug T., Naaim M., 2009 - Bayesian optimal design of an avalanche dam using a multivariate numerical avalanche model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23, 1123-1141.

Eckert N., Parent E., Kies R., Baya H. 2010a - A spatio-temporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps. *Climatic Change*, 101, 515– 553.

Eckert N., Baya H., Deschâtres M., 2010b - 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, 3157-3180.

Eckert N., Naaim M., et Parent E., 2010c - Long-term avalanche hazard assessment with Bayesian depth-averaged propagation model, *Journal of Glaciology*, 56, 563–583.

Eckert N., Parent E., Naaim M., Richard D., 2010d - Prédétermination et calcul de risque dans le cas des avalanches : avantages et limites des méthodes utilisées en ingénierie et perspectives d'avenir, *Revue Science Eaux & Territoires, Risques naturels en montagne*, numéro 02, p. 26-35.

Eckert N., Deschâtres M., Bélanger L., 2010e - Analyse des fluctuations spatio-temporelle des nombres d'avalanches dans les Alpes du nord à partir de l'EPA, *Sciences, Eaux & Territoires*, 2, 16-25

Eckert N., Coleou C., Castebrunet H., Deschâtres M., Giraud G., et Gaume J., 2010f - 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*, 64(2), 119-136

Eckert N., Keylock C.J., Castebrunet H., Lavigne A., Naaim M., 2013 - Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: from occurrences and runout altitudes to unsteady return periods. *Journal of Glaciology*, 59, 93-114.

Eckert N, Naaim M, Giacona F, Favier P, Lavigne A, Richard, D, Bourrier F, Parent E. 2018 - Repenser les fondements du zonage réglementaire des risques en montagne «récurrents». *La Houille Blanche*, 2, 38-67.

EAWS: Avalanche Danger Scale, 2022 - disponible sur : <https://www.avalanches.org/standards/avalanche-danger-scale/>, consulté le 10 septembre 2022,

Erath A., Birdsall J., Axhausen K. W., et Hajdin R. 2009 - Vulnerability Assessment Methodology for Swiss Road Network. *Transportation Research Record*, 2137, 118–126.

Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C., Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y., Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova N.O., Pyles R.D., Schlosser A., Shmakin A.B., Smirnova T.G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.L., 2004 - Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project). *Annals of Glaciology* 38, 150–158.

Evin G., Sielenou P.D., Eckert N., Naveau P., Hagenmuller P., Morin S., 2021 - Extreme avalanche cycles: Return levels and probability distributions depending on snow and meteorological conditions. *Weather and Climate Extremes*, 33. 801-817.

Faug T., Turnbull B., Gauer P., 2018 - Looking beyond the powder/dense flow avalanche dichotomy, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 1183-1186.

Favier P., Bertrand D., Eckert N., Naaim M., 2014a - A reliability assessment of physical vulnerability of reinforced concrete walls loaded by snow avalanches. *Natural Hazards Earth System Science*, 14, 689-704.

Favier P., Eckert N., Bertrand D., et Naaim M., 2014b - Sensitivity of avalanche risk to vulnerability relations. *Cold Regions Science and Technology*, 108, 163–177.

Favier P., Eckert N., Faug T., Bertrand D., et Naaim M., 2016 - Avalanche risk evaluation and protective dam optimal design using extreme value statistics. *Journal of Glaciology*, 62(234), 725-749.

Frigo B., Bartelt P., Chiaia B., Chiambretti I., et Maggioni M., 2020 - A reverse dynamical investigation of the catastrophic wood-snow avalanche of 18 January 2017 at Rigopiano, Gran Sasso National Park, Italy. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2192-6395.

Frutiger H., 1964 - Snow avalanches along Colorado mountain highways, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, US Forest Service Research Paper RM-7, US Forest Service, Fort Collins, Colorado, 85 p.

Garcia-Hernandez C., Ruiz-fernandez J., Sanchez-Posada C., Pereira S., Oliva M. et Vieira G. 2017 - Reforestation and land use change as drivers for a decrease of avalanche damage in mid-latitude mountains (NW Spain). *Global and Planetary Change*, 153, 35-50.

Gardner J.S., 1983 - Observations of erosion by wet snow avalanches, Mount Rae, Alberta, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15, 271-274.

Gaume J., Chambon G., Eckert N., et Naaim M. 2012 - Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions: An application to French Alps, *Geophysical Research Letters*, 39,

Gaume J., Chambon G., Eckert N., Naaim M. 2013 - Influence of weak-layer heterogeneity on snow slab avalanche release: Application to the evaluation of avalanche release depths. *Journal of Glaciology*, 59, 423-437.

Giacona F. 2014 - Géohistoire du risque d'avalanche dans le Massif vosgien. Réalité spatio-temporelle, cultures et représentations d'un risque méconnu. *Thèse de l'Université de Haute-Alsace*, Mulhouse, 671 p.

Giacona F., Eckert N. et Martin B. 2017 - A 240-year history of avalanche risk in the Vosges Mountains based on non-conventional (re)sources. *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 17, 887-904.

Giacona F., Eckert N., Mainieri R., Martin B., Corona C., Lopez-Saez J., Monnet J.-M., Naaim M., et Stoffel M. 2018 - Avalanche activity and socio-environmental changes leave strong footprints in forested landscapes: a case study in the Vosges medium-high mountain range. *Annals of Glaciology*, 1-23.

Giacona F., Martin B., Furst B., Glaser R., Eckert N., Himmelsbach I., Edelbutte C. et Christiany L. 2019 - Improving the understanding of flood risk in the Alsatian region by knowledge capitalization: the ORRION participative observatory. *Natural Hazards and Earth System Science*, 19, 1653-1683.

Giacona F., Eckert N., Corona C., Mainieri R., Morin S., Stoffel, M., Martin B. et Naaim, M. 2021 - Upslope migration of snow avalanches in a warming climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(44), 10p.

Giacona F., Eckert N. et Martin B., 2022 - Comment interpréter une chronologie événementielle en géohistoire ? L'exemple de deux siècles et demi d'avalanches dans le Massif vosgien », *Cybergeog: European Journal of Geography [Online]*, *Space, Society, Territory*, document 1033.

Haegeli P. et McClung, D 2007 - Expanding the snow-climate classification with avalanche-relevant information: initial description of avalanche winter regimes for southwestern Canada, *Journal of Glaciology*, 53, 266–276.

Haegeli P., Obad J., Harrison B., Murray B., Engblom J., et Neufeld, J. 2014 - Infoex™ 3.0 – Advancing the Data Analysis Capabilities of Canada’s Diverse Avalanche Community, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 29 September–3 October 3, Banff, Alberta, Canada, 910–917.

Hafner E. D., Barton P., Daudt R. C., Wegner J. D., Schindler K., et Bühler, Y. 2022 - Automated avalanche mapping from SPOT 6/7 satellite imagery: results, evaluation, potential and limitations, *The Cryosphere Discussion* [preprint], in review.

Hao J., Mind’je R., Liu Y., Huang F., Zhou H., Li L., 2021 - Characteristics and hazards of different snow avalanche types in a continental snow climate region in the Central Tianshan Mountains. *Journal of Arid Landscape*, 13 (4), 317-331.

Hebertson E.G., Jenkins M.J., 2003 - Historical climate factors associated with major avalanche years on the Wasatch Plateau, Utah. *Cold Region Science and Technology*, 37, 315-332.

Hendrikx J. et Owens I., 2008 - Modified avalanche risk equations to account for waiting traffic on avalanche prone roads. *Cold Regions Science and Technology*, 51(2), 214–218.

Hétu B, Brown D., Germain D. 2011 - Les victimes d'avalanche au Québec entre 1825 et 2009. *The Canadian Geographer.*, 55 (3), 273-287

Hock R., Rasul G., Adler C., Cáceres S., Gruber Y., Hirabayashi M., 2020 - Chapter 2: high mountain areas. *IPCC Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, IPCC.*

Hopfinger E.J., 1983 - Snow avalanche motion and related phenomena. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 15(1), 47–76.

Hugonin F., 1988 - Le quaternaire de la haute vallée de l'Arc : stratigraphie, sédimentologie et chronologie - Alpes françaises. Géomorphologie. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 286 p.

Issler D., 2003 - Experimental information on the dynamics of dry-snow avalanches. In K. Hutter, & N. Kirchner (Eds.), *Dynamic response of granular and porous materials under large and catastrophic deformations*, 11, 109–160.

Issler D., Errera A., Priano S., Gubler H., Teufen B., Krummenacher B., 2008 - Inferences on flow mechanisms from snow avalanche deposits. *Annals of Glaciology*, 49(1), 187–192.

Issler D., Gauer P., Schaer M., Keller S., 2019a - Supplementary materials : Field observations of three mixed snow avalanches, *Geoscience*, 1-23.

Issler D., Gauer P., Schaer M., Keller S., 2019b - Inferences on mixed snow avalanches from field observations. *Geosciences*. 10(1):2, 31p.

Jail M., 1970 - Note sur l'hiver remarquable 1969-1970 dans les Alpes françaises, *Revue de géographie alpine*, 505-513.

Jenelius E., Matsson L.G., 2015 - Road network vulnerability analysis: Conceptualization, implementation and application. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 136-147.

Jomelli V., 1999 - Les effets de la fonte sur la sédimentation de dépôts d'avalanche de neige chargée dans le massif des Ecrins (Alpes françaises), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 5, 39-57

Jomelli V., Francou B., 2000 - Comparing the Characteristics of Rockfall Talus and Snow Avalanche Landforms in an Alpine Environment Using a New Methodological Approach: Massif Des Ecrins, French Alps. *Geomorphology*, 35 (3-4).181-192.

Jomelli V., Bertran P., 2001 - Wet snow avalanche deposits in the French Alps: Structure and sedimentology, *Geografiska Annaler., Series A*, 83, 15–28.

Jomelli V. et Pech P., 2004a - Little Ice Age impacts on avalanche boulder tongues in the French Alps (massif des Ecrins). *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 553-564.

Jomelli V., Pech P., Chochillon C., Brunstein D. 2004b - Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change*, 64, 77-102.

Jomelli V., Delval C., Grancher D., Escande S., Brunstein D., Hetu B., Filion L., Pech P., 2007 - Probabilistic analysis of recent snow avalanche activity and weather in the French Alps, *Cold Regions Science and Technology*, 47, Issues 1–2, 180-192.

Jomelli V., Brunstein D. Grancher D., Pech P. 2007 - Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univoca ? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps), *Climatic Change*, 85, 1-2, 119-137.

Jomelli V., Pavlova I., Eckert N., Grancher D., Brunstein D., 2015 - A new hierarchical Bayesian approach to analyse environmental and climatic influences on debris flow occurrence. *Geomorphology*, 250, 407-421.

Jomelli V., Pavlova I., Giacona F., Zgheib T., Eckert N. 2019 - Respective influence of geomorphologic and climate conditions on debris-flows occurrence in the Northern French Alps, *Landslides*, 13p.

Kern H., Jomelli V., Eckert N., Grancher D. Deschâtres M. 2020 - Variabilité des volumes des dépôts d'avalanche et relations avec la morphologie des couloirs d'écoulement (Bessans, Savoie, France), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 26, 129-140.

Kern H., Jomelli V., Eckert N., Grancher D., Deschâtres M., Arnaud-Fassetta G. 2021 - Brief communication: Weak control of snow avalanche deposit volumes by avalanche path morphology. *The Cryosphere*, 15, 4845-4852.

Kobayashi T., Nohguchi Y., Izumi K., 2000 - Comparison of dry granulation and wet agglomeration of snow, *presented at the Fourth International Conference on Snow Engineering*, Trondheim, Norway. 93–97.

Köhler A., McElwaine J. N., Sovilla B., 2018 - GEODAR Data and the Flow Regimes of Snow Avalanches, *Journal of Geophysical Researchs*, 123, 1272–1294.

Kristensen K., Harbitz C.B., Harbitz A. 2003 - Road traffic and avalanches – methods for risk evaluation and risk management. *Surveys in Geophysics*, 24 (5-6), 603-616.

Laternser M. et Pfister C. 1997 - Avalanches in Switzerland 1500-1990. In : Rapid mass movement as a source of climate evidence for the Holocene. *Édit. Gustav Fischer, Stuttgart (Allemagne)*, 241-266.

Laternser M. et Schneebeli M. 2002 - Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland, *Natural Hazards*, 27, 201–230.

Laternser M. et Schneebeli M. 2003 - Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99), *International Journal of Climatology*, 23, 733–750.

Laute K. et Beylich A.A. 2014 - Morphometric and meteorological controls on recent snow avalanche distribution and activity at hillslopes in steep mountain valleys in Western Norway, *Geomorphology*, 218, 16-34.

Lavigne F., Thouret J. C., 2000 - Les lahars: Dépôts, origines et dynamique. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, 171(5), 545–557.

Lavigne A, Bel L, Parent E et Eckert N. 2012 - A model for spatiotemporal clustering using multinomial probit regression: application to avalanche counts in the French Alps. *Envirometrics*, 23(6), 522–534

Lavigne A., Eckert N., Bel L., Parent E. 2015 - Adding expert contributions to the spatiotemporal modelling of avalanche activity under different climatic influences. *Journal of the Royal Statistic Society: Series C Applied Statistic*, 64, 651-671.

Lazar B. et Williams M. 2008 - Climate change in western ski areas: Potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100, *Cold Regions Sciences & Technologies*, 51, 219–228.

Leone F., Asté J.P., Leroi É. 1996a - Vulnerability assessment of elements exposed to mass-moving: working toward a better risk perception. In: Senneset K. (Ed.), *Landslides*. Balkema, Rotterdam, 263–269.

Leone F. 1996b - Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Thèse de Doctorat. Document du BRGM, n°250, ed B.R.G.M. Orléans, 286p.

Leone F., Vinet F. 2008 - La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. *Géorisques*, 1, 9-26.

Leone F., Meschinet de Richemond N., Vinet F. 2010 - Aléas naturels et gestion des risques, *Presses Universitaires de France*, 256 p.

Leone F., Deymier J. 2011 - Vulnérabilités des réseaux routiers face aux debris flows dans les Alpes : Quantification des risques et modélisation de l'accessibilité territoriale. *Rapport final projet SCAMPEI*, 135p.

Leone F., Colas A., Garcin Y., Eckert N., Jomelli V., Gherardi M. 2014 - Le risque avalanche sur le réseau routier alpin français, *Revue de géographie alpine*, 102-4, 18 p.

Le Roux E., Evin G., Eckert N., Blanchet J., et Morin, S. 2022 - A non-stationary extreme-value approach for climate projection ensembles: application to snow loads in the French Alps, *Earth Syst. Dynam.*, 13, 1059–1075.

Li X., Sovilla B., Jiang C., Gaume J. 2020 - The mechanical origin of snow avalanche dynamics and flow regime transitions, *The Cryosphere*, 14, 3381–3398.

López-Moreno J.I., Goyette S., et Beniston M. 2009 - Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients, *Journal of Hydrology*, 374, 384–396.

López-Moreno J.I., Goyette S., Vicente-Serrano S. M., et Beniston M. 2011 - Effects of climate change on the intensity and frequency of heavy snowfall events in the Pyrenees, *Climate Change*, 105, 489–508.

Lopez Saez J., Corona C., Stoffel M., Schoeneich P., Berger F. 2012 - Probability maps of landslide reactivation derived from tree-ring records: Pra Bellon landslide, southern French Alps, *Geomorphology* 138, 189-202.

Mainieri R., Favillier A., Lopez-Saez J., Eckert N., Zgheib T., Morel P., Saulnier M., Peiry J.-L., Stoffel M., et Corona C. 2020 - Impacts of land-cover changes on snow avalanche activity in the French Alps. *Anthropocene*, 100-244.

Manche Y. 2000 - Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 175p

Martin E., Giraud G., Lejeune Y., et Boudart, G. 2001 - Impact of climate change on avalanche hazard, *Annals of Glaciology*, 32, 163–167.

Marty C. et Meister R., 2012 - Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other highaltitude observatories in the Alps, *Theoretical and Applied Climatology*, 1–11.

McClung D. et Shaerer, P., 1980 - Snow Avalanche Size Classification. Proceedings ISSW 1980. *International Snow Science Workshop*, Vancouver BC, Canada, 29 November 3-5, 12-30.

McClung D.M., Schaerer P.A., 1985 - Characteristics of flowing snow and avalanche impact pressures. *Annals of Glaciology*, 6, 9–14.

Mc Clung D.M. et Tweedy, J. 1993 - Characteristics of avalanching: Kootenay Pass, British Columbia, Canada. *Journal of Glaciology*, 39, 317-322

McClung D. et Shaerer, P., 2006 – The avalanche handbook, *The mountaineers books*, 336 p.

McClung D.M. et Gauer P., 2018 - Maximum frontal speeds, alpha angles and deposit volumes of flowing snow avalanches, *Cold Regions Science and Technology*, Volume 153, 78-85.

MacDonald D., Crabtree J., Wiesinger G., Dax T., Stamou N., Fleury P., Lazpita G., et Gibon A. 2000 - Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. *Journal of Environmental Management*, 59(1), 47-69.

Mather A. S., Fairbairn J. et Needle C. L. 1999 - The course and drivers of the forest transition: The case of France. *Journal of Rural Studies*, 15(1), 65–90.

Mears A.I. 1992 - Snow-avalanche hazard analysis for land-use planning and engineering. *Colorado Geological Survey*, 55 p.

Météo France, 2018 - Bilan climatique de l'hiver 2017-2018

Miller L., Armstrong B., et Armstrong R. 1976 - Avalanche Atlas: San Juan County, Colorado, INSTAAR Occasional Paper, University of Colorado, Boulder, 235 p.

Mitterer C., Schweizer J. 2013 - Analysis of the snow-atmosphere energy balance during wet-snow instabilities and implications for avalanche prediction. *The Cryosphere*, 7(1), 205–216.

Mock C.J. 1995 - Avalanche climatology of the continental zone in the southern Rocky Mountains, *Physical Geography*, 16, 165-187.

Mock C.J. et Birkeland K.W. 2000 - Snow avalanche climatology of the western United States mountain ranges, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 2367-2392

Moré J.J. 1978 - The Levenberg–Marquardt algorithm: implementation and theory, edited by: Watson, G. A., *Numerical Analysis*, 630, 106–116.

Mougin P., 1922 - Les avalanches en Savoie. Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Eaux et Forêts, *Service des Grandes Forces Hydrauliques*, 175–317.

Mougin M.P., 1931 - La restauration des Alpes, *Direction générale des eaux et forêts*, 16 p.

Naaim M., Durand Y., Eckert N., Chambon G., 2013, Dense avalanche friction coefficients: Influence of physical properties of snow, *Journal of Glaciology*, 59(216), 771–782.

Naaim M., Eckert N., Giraud G., Faug T., Chambon G., Naaim- Bouvet F., Richard D., 2016 - Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises. *La Houille Blanche*, 6, 12-20.

Oller P., Muntan E., Marturia J., Garcia C., Garcia A., et Martinez, P. 2006 - The avalanche data in the Catalan Pyrenees. 20 years of avalanche mapping, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 1–6 October, Telluride, CO, 305–313.

Pavlova I., Jomelli V., Brunstein D., Grancher D., Martin E., Déqué M., 2014 - Debris flow activity related to recent climate conditions in the French Alps: A regional investigation. *Geomorphology*, 219, 248-259.

Peitzsch E., Pederson G., Birkeland K., Hendrikx J., Farge D., 2021 - Climate drivers of large magnitude snow avalanche years in the U.S. northern Rocky Mountains. *Scientific Reports*, 11.

Piazza M., Boé J., Terray L., Pagé C., Sanchez-Gomez E., et Dequé M. 2014 - Projected 21st century snowfall changes over the French Alps and related uncertainties, *Climate Change*, 122, 583– 594.

Pichard G., Arnaud-Fassetta G., Moron V. et Roucaute E. 2017 - Hydro-climatology of the Lower Rhône Valley: historical flood reconstruction (AD 1300–2000) based on documentary and instrumental sources, *Hydrological Sciences Journal*, 62:11, 1772-1795.

Pielmeier C., Techel F., Marty C., Stucki, T., 2013 - Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps - trend analysis for mid-winter season. *in Proceedings of ISSW International Snow Science Workshop*. eds. F. Naaim-Bouvet, Y. Durand and R. Lambert. October 7–11, 2013; Grenoble, France, 1240–1246.

Pigeon P. et Rebotier J. 2019 - Que nous apprennent les bases de données sur les désastres associés aux séismes ? Réflexions géographique et géohistorique sur la ville d'Esmeraldas (Équateur)", *Physio-Géo*, 14, 113-146.

Podolskiy E.A., Izumi K., Suchkov V.E. et Eckert N. 2014 - Physical and societal statistics for a century of snow-avalanche hazards on Sakhalin and the Kuril Islands (1910-2010). *Journal of Glaciology*, 60, 409-430.

Rapin F. 2002 - A new scale for avalanche intensity. *Proceedings ISSW 2002. International Snow Science Workshop*, Penticton BC, Canada, 29 September-4 October 2002, 244-251.

Rheinberger CM., Bründl M., Rhyner J., 2009 - Dealing with the white death: Avalanche risk management for traffic routes. *Risk Analysis: An International Journal*, 29, 76-94.

Reuter B., van Herwijnen A., Veitinger J., Schweizer J. 2015 - Relating simple drivers to snow instability. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 168-178.

Rousselot M., Durand Y., Giraud G., Mérindol, L., Dombrowski D., Etchevers I., Déqué M. et Castebrunet H., 2012 - Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps – application to future climate and snow cover, *The Cryosphere*, 6, 785–805.

Salm B., 1978 - Snow forces on forest plants. In *Proc. Seminar on Mountain Forests and Avalanches*, Davos, Switzerland, 157–181.

Sanz-Ramos M., Andrade CA., Oller P., Furdada G., Bladé E., Martínez-Gomariz E., 2021 - Reconstructing the Snow Avalanche of Coll de Pal 2018 (SE Pyrenees). *GeoHazards*. 2(3). 196-211.

Saporta G. 1990 - Probabilités analyse des données et statistiques, Technip, 231 p.

Schläppy R., Eckert N., Jomelli V., Stoffel M., Grancher D., Brunstein D., Naaim M., et Deschatres M., 2014 - Validation of extreme snow avalanches and related return periods derived from a statistical-dynamical model using tree-ring techniques, *Cold Regions Sciences & Technologies*, 99, 12–26.

Schweizer J., Bruce Jamieson J., Schneebeli M. 2003 - Snow avalanche formation, *Reviews of Geophysics*, 4, 14 p.

Schweizer J., Bruce Jamieson J., et Schneebeli M., 2003 - Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 2003.

Schweizer J., Bartelt P., van Herwijnen A., 2021 - Snow and Ice-Related Hazards, *Risks, and Disasters*. Amsterdam: Elsevier, 377– 416.

Sielenou P.D., Viallon-Galinier L., Hagenmuller P., Naveau P., Morin S., Dumont M., Verfaillie D., Eckert N., 2021 - Combining random forests and class-balancing to discriminate between three classes of avalanche activity in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 187.

Sinha S., Giffard-Roisin S., Karbou F., Deschâtres M., Karas A., Eckert N., Moteleoni C., 2019 - Detecting Avalanche Deposits using Variational Autoencoder on Sentinel-1 Satellite Imagery. *NeurIPS 2019 Workshop : Tackling Climate Change with Machine Learning NeurIPS workshop*, Dec 2019, Vancouver, Canada.

Smith M., et McClung D., 1997 - Avalanche frequency and terrain characteristics at Rogers' Pass, British Columbia, Canada. *Journal of Glaciology*, 43(143), 165-171.

Sovilla B., Bartelt P., 2002 - Observations and modelling of snow avalanche entrainment, *Nat. Hazards Earth System Science*, 2(3/4), 169–179,

Sovilla B., Burlando P., Bartelt P., 2006 - Field experiments and numerical modelling of mass entrainment in snow avalanches. *Journal of Geophysical Research*, 111 (F3), 16p.

Sovilla B., Schaer M., Kern M., et Bartelt P., 2008 - Impact pressures and flow regimes in dense snow avalanches observed at the Vallée de la Sionne test site. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1).

Sovilla B., McElwaine J.N., Schaer M., Vallet J., 2010 - Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurements from Vallée de la Sionne. *Journal of Geophysical Research*, 115.

Sovilla B., McElwaine J.N., Louge M.Y. 2015 - The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique*, 16, 97-104.

Statuto D., Cillis G., et Picuno P., 2017 - Using Historical Maps within a GIS to Analyze Two Centuries of Rural Landscape Changes in Southern Italy. *Landscape*, 6(3).

Steinkogler W., Sovilla B., Lehning M. 2014 - Influence of snow cover properties on avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 121–131.

Steinkogler W., Gaume J., Löwe H., Sovilla B., & Lehning M. 2015 - Granulation of snow: From tumbler experiments to discrete element simulations. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120, 1107– 1126

Stethem C., Jamieson B., Schaerer P., Liverman D., Germain D. Walker S., 2003 - Snow Avalanche Hazard in Canada – a Review. *Natural Hazards*, 28, 487–515.

Tacnet J.-M., Dezert J., Curt C., Batton-Hubert M., et Chojnacki, E., 2014 - How to manage natural risks in mountain areas in a context of imperfect information? New frameworks and paradigms for expert assessments and decision-making, *Environment Systems and Decisions*, 34, 288–311.

Techel F. et Zweifel B., 2013 - Recreational avalanche accidents in Switzerland: Trends and patterns with an emphasis on burial, rescue methods and avalanche danger, *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, 7–11 October, Grenoble, France, 1106–1112.

Tedim, F. et Leone V. 2018 - The deadly avalanche of Rigopiano (Italy): Evidences of a constructed local disaster. *The Overarching Issues of the European Space—Preparing the New Decade for Key Socio-economic and Environmental Challenges*; Remoalda, P., Ed.; Faculdade de Letras da Universidade do Porto: Porto, Portugal, 2018, 408–424.

Steinkogler W., Sovilla B. et Lehning M., 2014 - Influence of snow cover properties on avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 121–131.

Steinkogler W., Gaume J., Löwe H., Sovilla B. et Lehning M., 2015 - Granulation of snow: From tumbler experiments to discrete element simulations. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120, 1107–1126.

Sulzlée C., 1950 - Historique des méthodes de construction des ouvrages de protection contre les avalanches. *Revue Forestière Française*, 1950.

Techel F., Jarry F., Kronthaler G., Mitterer S., Nairz P., Pavšek M., Valt M., Darms G., 2016 - Avalanche fatalities in the european alps: long-term trends and statistics. *Geographica Helvetica*, 71(2):147–159,

Utasse M., 2015 - Les réseaux de transport routiers face aux laves torrentielles : contribution à l'évaluation du risque : l'exemple des Alpes françaises, Thèse de doctorat, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Vallet J., Gruber U., Dufour F., 2001 - Photogrammetric avalanche volume measurements at Vallée de la Sionne. *Annals of Glaciology*, 32, 141-146.

Vázquez-Tarrió D., Borgniet L., Liébault F., Recking A., 2017 - Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps), *Geomorphology*, 285, 94-105.

Vera Valero C., Wever N., Bühler Y., Stoffel L., Margreth S., Bartelt P., 2016 - Modelling wet snow avalanche runout to assess road safety at a high-altitude mine in the central Andes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 16. 2303-2323.

Vernay M., Lafaysse M., Hagenmuller P., Nheili R., Verfaillie D., Morin S., 2022 - The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present). *Earth System Science Data*, 14,

Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y., Morin S., 2018 - Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12. 1249-1271.

Viglietti D., Letey S., Motta R., Maggioni M., et Freppaz M., 2010 - Snow avalanche release in forest ecosystems: A case study in the Aosta Valley Region (NW-Italy). *Cold Regions Science and Technology*, 64(2), 167-173.

Viallon-Galinier L., Hagenmuller P., Eckert N., 2022 - Combining snow physics and machine learning to predict avalanche activity: does it help?. *The Cryosphere Discussions*. in review. 1-23.

Voellmy A., 1955 - Über die Zerstörungskraft von Lawinen (On the destructive forces of avalanches). *Schweizerische Bauzeitung*, 73(15), 212–217.

Vernay M., Lafaysse M., Hagenmuller P., Nheili R., Verfaillie D., Morin S., 2022 - The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present). *Earth System Science Data*, 14,

Wastl M., Stötter J., Kleindienst H., 2011 - Avalanche risk assessment for mountain roads: a case study from Iceland. *Natural Hazards*, 56, 465–480.

Wolman M.G., 1954 - A method of sampling coarse river-bed material. *AGU Trans.*, 35(6), 951–956

Yanlong W., Maoshuan H., 1992 - An outline of avalanches in the south-eastern Tibetan plateau, China. *Annals of Glaciology*, 16, 146-150.

Zgheib T., Giacona F., Granet-Abisset A.M., Morin S., Eckert N., 2020 - One and a half century of avalanche risk to settlements in the upper maurienne valley inferred from land cover and socio-environmental changes. *Global Environmental Changes*, 65, 102–149.

Zgheib T., Giacona F., Granet-Abisset A.M., Morin S., Lavigne A., Eckert N., 2022a - Spatio-temporal variability of avalanche risk in the French Alps. *Regional Environmental Change* 22, 1-18.

Zgheib T., Giacona F., Morin S., Granet-Abisset A., Favier P. et Eckert N. 2022b - Diachronic quantitative snow avalanche risk assessment as a function of forest cover changes. *Journal of Glaciology*, 1-19.

Zischg A., Fuchs S., Keiler M., Meißl G., 2005 - Modeling the system behavior of wet snow avalanches using an expert system approach for risk management on high alpine traffic road. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 821-832.

Liste des figures

FIGURE 1 : PHASE DE MÉTAMORPHOSE DE LA NEIGE, POROSITÉ ET MASSE VOLUMIQUE ASSOCIÉE (SOURCE PHOTOS : INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CRYOSPHERIC SCIENCES)	26
FIGURE 2 : COUVERTURE TEMPORELLE DES DIFFÉRENTES CHRONIQUES AVALANCHEUSES EN FRANCE DEPUIS 1900.....	36
FIGURE 3 : EXEMPLES DE VASTES DÉPÔTS AVEC PLUSIEURS BRANCHES D'ÉCOULEMENT. (A) PARTIE FRONTALE D'UN DÉPÔT DE FÉVRIER 2021, OISANS (© DATA-AVALANCHE.ORG). (B) DÉPÔTS DU 29 JANVIER 2021, HAUTE-MAURIENNE (© DATA-AVALANCHE.ORG).	40
FIGURE 4 : EXEMPLE DE DÉPÔTS D'AVALANCHES AVEC UNE STRUCTURE EN AGRÉGATS. (A) DÉPÔT DE NEIGE HUMIDE AVEC DES AGRÉGATS SPHÉRIQUES PRÉSENTANT DES DIMENSIONS CENTIMÉTRIQUES, HAUTE-MAURIENNE, 16 NOVEMBRE 2021 (© DATA-AVALANCHE.ORG). (B) DÉPÔT DE NEIGE HUMIDE AVEC DES AGRÉGATS PRÉSENTANT DES DIMENSIONS MÉTRIQUES, HAUTE-MAURIENNE, 24 NOVEMBRE 2016 (© DATA-AVALANCHE.ORG). (C) DÉPÔT DE NEIGE SÈCHE AVEC DES AGRÉGATS PRÉSENTANT DES DIMENSIONS CENTIMÉTRIQUES, HAUTE-MAURIENNE, 24 FÉVRIER 2018 (© HIPPOLYTE KERN).....	43
FIGURE 5 : COMPARAISON DES VALEURS DE MASSE VOLUMIQUE RELEVÉES DANS DES DÉPÔTS D'AVALANCHES EN FONCTION DU TYPE D'ÉCOULEMENT ASSOCIÉ.....	45
FIGURE 6 : OBSTRUCTION DE LA RD 902 LE 8 JANVIER 2018, A) : DÉPÔT COUPANT LA ROUTE, B) : DÉBLAIEMENT DE LA ROUTE (© DATA-AVALANCHE.ORG)	50
FIGURE 7 : DÉBLAIEMENT D'UN DÉPÔT DE NEIGE HUMIDE AYANT COUPÉ UNE ROUTE SUR LA COMMUNE DE BONNEVAL-SUR-ARC, 25 AVRIL 2018 (© HIPPOLYTE KERN).....	52
FIGURE 8 : MISE EN PLACE DU LASER-SCAN POUR OBTENIR LE NUAGE DE POINT NÉCESSAIRE À LA CRÉATION DU MNT D'UN DÉPÔT (© THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019).....	62

FIGURE 9 : CARACTÉRISATION NIVOLOGIQUE DES DÉPÔTS D’AVALANCHES, (A) SONDAGE RÉALISÉ À L’AIDE D’UN CAROTTIER, (B) MESURES NIVOLOGIQUES DEPUIS UN PUIT DE NEIGE (© THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019).....	63
FIGURE 10 : EXEMPLE D’UN CARNET EPA UTILISÉ ENTRE 1900 ET 1975, PAGE ISSUE DU CARNET FORESTIER DE LA COMMUNE DE BONNEVAL-SUR-ARC	67
FIGURE 11 : EXEMPLE D’UN CARNET EPA UTILISÉ ENTRE 1972 ET 1975, PAGE ISSUE DU CARNET FORESTIER DE LA COMMUNE DE BONNEVAL-SUR-ARC	68
FIGURE 12 : EXEMPLE D’UN CARNET UTILISÉ ENTRE 1975 ET 2003, PAGE ISSUE DU CARNET FORESTIER DE LA COMMUNE DE BESSANS.....	69
FIGURE 13 : SCHÉMA RÉCAPITULATIF DE LA MÉTHODOLOGIE APPLIQUÉE POUR LA CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNÉES ÉVÉNEMENTIELLES RELATIVES AUX AVALANCHES	74
FIGURE 14 : LOCALISATION ET ALTITUDES DES DEUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES MÉTÉO-FRANCE DE LA VALLÉE DE LA HAUTE-MAURIENNE EXPLOITÉES DANS LE CADRE DE LA THÈSE.....	76
FIGURE 15 : SCHÉMA RÉCAPITULATIF DE LA MÉTHODOLOGIE MISE EN OEUVRE POUR LA DÉTERMINATION DES FACTEURS DE CONTRÔLE DES VOLUMES DES DÉPÔTS D’AVALANCHES.....	82
FIGURE 16 : CARTE DE LOCALISATION ET DE PRÉSENTATION DU MASSIF DE LA HAUTE-MAURIENNE	89
FIGURE 17 : CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES MOYENNES POUR L’HIVER (H) ET LE PRINTEMPS (P) ENTRE 2003 ET 2017 DANS LE MASSIF DE LA HAUTE-MAURIENNE : <i>TEMPÉRATURE MOYENNE DE L’AIR (LA TENDANCE LINÉAIRE EST DE +0,12°C PAR AN, R2 = 0,04, ÉVALUÉS À UNE ALTITUDE DE 2400 M), NOMBRE DE JOURS AVEC UNE TEMPÉRATURE SUPÉRIEURE À 0°C (LA TENDANCE LINÉAIRE EST DE +0,6 JOUR PAR AN, R2 = 0,03, ÉVALUÉS À UNE ALTITUDE DE 2400 M), CHUTE DE NEIGE MOYENNE, CHUTE DE NEIGE ACCUMULÉE, NOMBRE DE JOURS AVEC DES CHUTES DE NEIGE, NOMBRE DE JOURS AVEC DES CHUTES DE NEIGE IMPORTANTES, ÉPAISSEUR MOYENNE DU MANTEAU NEIGEUX, ÉPAISSEUR MAXIMALE DU MANTEAU NEIGEUX, ÉPAISSEUR MOYENNE DU MANTEAU NEIGEUX HUMIDE ET ÉPAISSEUR MAXIMALE DU MANTEAU NEIGEUX HUMIDE.</i>	91

FIGURE 18 : LOCALISATION DES COULOIRS EPA DU MASSIF DE LA HAUTE-MAURIENNE ET CARTE DES PENTES	94
FIGURE 19 : CARTE DE LOCALISATION ET DE PRÉSENTATION DU MASSIF DU QUEYRAS.....	96
FIGURE 20 : CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES MOYENNES POUR L'HIVER (H) ET LE PRINTEMPS (P) ENTRE 2003 ET 2017 DANS LE MASSIF DU QUEYRAS : <i>TEMPÉRATURE MOYENNE DE L'AIR (LA TENDANCE LINÉAIRE EST DE +0,1°C PAR AN, R2 = 0,02, ÉVALUÉS À UNE ALTITUDE DE 2400 M), NOMBRE DE JOURS AVEC UNE TEMPÉRATURE SUPÉRIEURE À 0°C (LA TENDANCE LINÉAIRE EST DE +0,7 JOUR PAR AN, R2 = 0,07, ÉVALUÉS À UNE ALTITUDE DE 2400 M), CHUTE DE NEIGE MOYENNE, CHUTE DE NEIGE ACCUMULÉE, NOMBRE DE JOURS AVEC DES CHUTES DE NEIGE, NOMBRE DE JOURS AVEC DES CHUTES DE NEIGE IMPORTANTES, ÉPAISSEUR MOYENNE DU MANTEAU NEIGEUX, ÉPAISSEUR MAXIMALE DU MANTEAU NEIGEUX, ÉPAISSEUR MOYENNE DU MANTEAU NEIGEUX HUMIDE ET ÉPAISSEUR MAXIMALE DU MANTEAU NEIGEUX HUMIDE.</i>	97
FIGURE 21 : LOCALISATION DES COULOIRS EPA DU MASSIF DU QUEYRAS ET CARTE DES PENTES	100
FIGURE 22 : LOCALISATION DES DEUX COULOIRS DANS LESQUELS LES DÉPÔTS ÉTUDIÉS SE SONT PRODUITS.	112
FIGURE 23 : LIMITE D'EMPRISE EPA ET CLPA, ALTITUDES ET DÉNIVELÉS DU COULOIR EPA 208	114
FIGURE 24 : PRÉSENTATION DU COULOIR DE LA MISSION DE FÉVRIER 2020 SUR LA COMMUNE DE BESSANS : (A) ALTITUDE ET DÉNIVELÉ DU COULOIR, (B) PHOTOGRAPHIE DE LA PARTIE AVAL DU COULOIR (PRISE DE VUE DRONE, FÉVRIER 2020).....	115
FIGURE 25 : MÉTHODES UTILISÉS POUR LES MESURES DU VOLUME ET DE LA FORME D'UN DÉPÔT D'AVALANCHE : (A) VOL D'UN DRONE POUR LA RÉALISATION D'UNE PHOTOGRAMMÉTRIE 3D DU DÉPÔT (B) UTILISATION DU LASER SCAN, (C) GPS DIFFÉRENTIEL UTILISÉS POUR GÉORÉFÉRENCER L'EMPRISE DU DÉPÔT. (© THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019).....	118
FIGURE 26 : MESURE DE LA LONGUEUR DE L'AXE PERPENDICULAIRE À L'AXE PRINCIPAL D'UN AGRÉGAT À LA SURFACE D'UN DÉPÔT D'AVALANCHE (© THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019)	119

FIGURE 27 : EXEMPLE DE RÉPARTITION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS EN FONCTION DE LA FORME DU DÉPÔT : A) RÉPARTITION EN ESCALIER B) RÉPARTITION LINÉAIRE C) RÉPARTITION ÉTAGÉE LE LONG DE TRANSECTS. . 120

FIGURE 28 : CARACTÉRISATION DU PROFIL VERTICAL DU DÉPÔT : (A) CAROTTAGE DU DÉPÔT, (B) MESURE DE LA PROFONDEUR D'UN PUIT DE CAROTTAGE, (C) MESURE ET PESÉE D'UN SEGMENT DE CAROTTE, (D) PRÉLÈVEMENT D'UNE CAROTTE HORIZONTALE AU SEIN D'UN PUIT DE NEIGE (E) TAILLE D'UN AGRÉGAT DE SURFACE © THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019 ET INRAE 2020..... 123

FIGURE 29 : PHOTOGRAPHIE ET DIMENSIONS DU DÉPÔT DU COULOIR 208 (© THIBAUT VERGOZ / LGP / INRAE / CNRS PHOTOTHÈQUE / 2019)..... 125

FIGURE 30 : A) MNT ET ORTHOPHOTOGRAPHIE VIA PRISE DE VUE DRONE DU DÉPÔT DU COULOIR 208 ET LOCALISATION DES POINTS DE CAROTTAGE ET B) MNT ET ÉPAISSEUR DU DÉPÔT ET MOYENNE DE L'ENSEMBLE DES MESURES DE MASSE VOLUMIQUE POUR CHAQUE POINT DE CAROTTAGE 126

FIGURE 31 : TYPOLOGIE NIVOLOGIQUE, MASSES VOLUMIQUES ET POROSITÉS DES PROFILS DE NEIGE DU DÉPÔT DU COULOIR 208 DE BONNEVAL-SUR-ARC (CF FIG. 30 POUR LA LOCALISATION DES POINTS)..... 129

FIGURE 32 : A) MNT ET INTERPOLATION PAR KRIGEAGE DES MESURES DE MASSE VOLUMIQUE B) INCERTITUDE ASSOCIÉ À L'INTERPOLATION..... 130

FIGURE 33 : A) MNT ET INTERPOLATION PAR KRIGEAGE DES MESURES DE POROSITÉ B) INCERTITUDE ASSOCIÉ À L'INTERPOLATION..... 131

FIGURE 34 : PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE ET DIMENSIONS DU DÉPÔT DU COULOIR NON RÉFÉRENCÉ DE BESSANS (PRISE DE VUE DRONE, 12 FÉVRIER 2020) 133

FIGURE 35 : GRANULOMÉTRIE DES AGRÉGATS DE SURFACE MESURÉE AU NIVEAU DES 3 POINTS DE MESURE DU DÉPÔT, P1 : ZONE FRONTALE, P2 : ZONE MÉDIANE, P3 : ZONE AMONT 134

FIGURE 36 : PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE DU DÉPÔT ET LOCALISATION DES POINTS DE PRÉLÈVEMENTS..... 135

FIGURE 37 : TYPOLOGIE NIVOLOGIQUE ET MASSES VOLUMIQUES DES PROFILS DE NEIGE DU DÉPÔT DU COULOIR NON IDENTIFIÉS DE BESSANS (CF FIG. 36 POUR LA LOCALISATION DES POINTS DE SONDAGES) 137

FIGURE 38 : COMPARAISON DES VALEURS DE MASSE VOLUMIQUE RELEVÉES DANS DES DÉPÔTS D'AVALANCHES EN FONCTION DU TYPE D'ÉCOULEMENT ASSOCIÉ.....	140
FIGURE 39 : CARTE DE LOCALISATION ET PHOTOGRAPHIES DE DÉPÔTS EN JANVIER 2017 (INRAE-ETNA, 2017).....	158
FIGURE 40 : EXEMPLE DE CARNETS, PAGES ISSUES DES CARNETS FORESTIERS DE LA COMMUNE DE BESSANS <i>A</i> : CARNET UTILISÉ ENTRE 1900 ET 1975 <i>B</i> : CARNET UTILISÉ ENTRE 1972 ET 1975 <i>C</i> : CARNET UTILISÉ ENTRE 1975 ET 2003.....	163
FIGURE 41 : DISTRIBUTION TEMPORELLE DES VOLUMES MOYENS ANNUELS CUMULÉS DES DÉPÔTS D'AVALANCHES DE LA COMMUNE DE BESSANS.....	165
FIGURE 42 : VOLUMES DES DÉPÔTS (EXPRIMÉS EN M ³) PAR ANNÉE AVALANCHEUSE DE LA COMMUNE DE BESSANS. <i>A</i> : REPRÉSENTÉS AVEC 95 % DES VALEURS EN EXCLUANT LES VALEURS EXTRÊMES <i>B</i> : REPRÉSENTÉS AVEC LES VALEURS EXTRÊMES.....	171
FIGURE 43 : VOLUMES DES DÉPÔTS (EXPRIMÉ EN M ³) PAR COULOIRS EPA DE LA COMMUNE DE BESSANS. <i>A</i> : REPRÉSENTÉS AVEC 95% DES VALEURS <i>B</i> : REPRÉSENTÉS AVEC LES VALEURS EXTRÊMES	174
FIGURE 44 : CARTE DE LA LOCALISATION DES COULOIRS EPA DE BESSANS EN FONCTION DES VOLUMES MOYENS DE DÉPÔTS.....	176
FIGURE 45 : (A) STUDY AREA: SNOW AVALANCHE PATHS FROM THE EPA DATABASE AND AVALANCHE ACTIVITY ACCORDING TO OUR COMPLETED DATABASE IN THE UPPER PART OF THE MAURIENNE VALLEY, FRENCH ALPS, BETWEEN 2003/04 AND 2017/18; (B) EXAMPLE OF MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AN AVALANCHE PATH FROM THE EPA DATABASE (PATH N°44, BESSANS); (C) SNOW AVALANCHE DEPOSIT IN BESSANS (© INRAE ETNA, 2018); (D) METHOD FOR VISUALLY ESTIMATING THE DEPOSIT VOLUME, H: HEIGHT W: WIDTH L: LENGTH (© INRAE ETNA, BESSANS, 2019).....	189
FIGURE 46 : STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SNOW AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES. KERNEL DENSITY ESTIMATION OF MEAN PATH DEPOSIT VOLUMES AT THE ANNUAL NOV-JUN. TIME SCALE (A), IN WINTER, NOV-FEB. (B) AND IN SPRING, MAR-JUN. (C); STANDARDIZED RESIDUALS OF STEPWISE LINEAR REGRESSION	

RESULTS BETWEEN PATH MEAN DEPOSIT VOLUMES AND PATH MORPHOLOGICAL VARIABLES FOR ANNUAL (D), WINTER, (E) AND SPRING (F), LINEAR CORRELATION BETWEEN OBSERVED DEPOSIT VOLUME AND VALUES PREDICTED BY ONE NEURAL NETWORK FOR THE ANNUAL (G), WINTER (H) AND SPRING (I) DATA SET. 195

FIGURE 47: LOCATION OF THE STUDIED EPA AVALANCHE PATHS LOCATED IN (A) HAUTE-MAURIENNE VALLEY AND (B) GUIL VALLEY (QUEYRAS MASSIF)..... 206

FIGURE 48: BOXPLOT OF MEAN SEASONAL SDV PER YEAR FROM AVALANCHES DISRUPTING AND NOT DISRUPTING THE ROAD NETWORK IN HAUTE-MAURIENNE. THE MEDIAN, TWO QUARTILES, THE 10 AND 90% DECILES AND THE EXTREME VALUES ARE REPRESENTED..... 209

FIGURE 49: KERNEL DENSITY ESTIMATION OF (A) ANNUAL NUMBER OF AVALANCHES IN HAUTE-MAURIENNE AND GUIL VALLEY AND (B) ANNUAL NUMBER OF AVALANCHES DISRUPTING ROADS IN HAUTE-MAURIENNE. 210

FIGURE 50: NUMBER OF ROAD DISRUPTIONS PER AVALANCHE PATH BETWEEN 2003 AND 2017 IN HAUTE-MAURIENNE..... 211

FIGURE 51: NUMBER OF INVESTIGATED DEPOSITS AND INVESTIGATED AVALANCHE PATHS FOR WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS, DEPENDING ON PATH ORIENTATIONS FROM HAUTE-MAURIENNE..... 214

FIGURE 52: MEAN INTER-ANNUAL WINTER (W) AND SPRING (S) SDV, NUMBER OF INVESTIGATED DEPOSITS AND NUMBER OF ROAD CUTS FROM HAUTE-MAURIENNE AREA FOR THE PERIOD 2003-2017 216

FIGURE 53: AERIAL (A) AND LATERAL VIEW (B) OF AN AVALANCHE DEPOSIT THAT RESULTED IN A MAJOR ROAD CUT IN BONNEVAL-SUR-ARC IN JANUARY 2018 (RTM 73). *THE THIN BLACK LINE IS RD 902 AFTER PARTIAL SNOW REMOVAL. WITHIN THE SDV, SNOW WALLS ON BOTH SIDES OF THE ROAD ARE ~7M HIGH.*..... 217

FIGURE 54: MEAN SDV FOR WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS, NUMBER OF INVESTIGATED DEPOSITS, INVESTIGATED AVALANCHE YEARS AND INVESTIGATED AVALANCHE PATHS FOR SOUTH, WEST AND NORTH-WEST FACED PATHS FROM HAUTE-MAURIENNE. 218

FIGURE 55: MULTI ELEVATIONS WINTER LINEAR REGRESSION RESULTS AND OBSERVED MEAN WINTER SDV EVALUATED INDEPENDENTLY OF PATH EXPOSITION IN HAUTE-MAURIENNE (TAB. 14). 219

FIGURE 56: MULTI ELEVATIONS LINEAR REGRESSION RESULTS AND OBSERVED MEAN WINTER SDV FOR SOUTH FACING PATHS IN HAUTE-MAURIENNE (TAB 15.) 221

FIGURE 57 : SCHÉMA RÉCAPITULATIF DES VARIABLES DE CONTRÔLE DES VOLUMES DES DÉPÔTS POUR LA SAISON HIVERNALE ET PRINTANIÈRE..... 232

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CLASSES DE TAILLE DES AVALANCHES CRÉER PAR L'EAWS (EAWS, 2022)	30
TABLEAU 2 : TYPOLOGIE DES DOMMAGES PHYSIQUES MAXIMUM SUR RÉSEAU ROUTIER (SOURCE : LEONE, 1996B).....	48
TABLEAU 3 : TYPOLOGIE DES PERTURBATIONS LIÉES À L'ENDOMMAGEMENT DE LA ROUTE (SOURCE : LEONE, 1996B).....	49
TABLEAU 4 : RÉCAPITULATIF DU NOMBRE D'AVALANCHES, DE DÉPÔTS ET D'AJOUTS EFFECTUÉS	73
TABLEAU 5 : RÉCAPITULATIF DÉTAILLÉ DE LA BASE DE DONNÉES ÉVÉNEMENTIELLE DES AVALANCHES POUR LE MASSIF DU QUEYRAS, LE MASSIF DE LA HAUTE-MAURIENNE ET POUR LES DEUX MASSIFS.....	74
TABLEAU 6 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CARACTÉRISTIQUES NIVO-MÉTÉOROLOGIQUES MOYENNES À BESSANS SUR LA PÉRIODE 2003-2017 SELON DEUX STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES SITUÉES À 1715 M ET 2740 M.....	160
TABLEAU 7 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES VOLUMES ANNUELS CUMULÉS DES DÉPÔTS (EXPRIMÉ EN M3) PAR PÉRIODE D'UTILISATION DES DIFFÉRENTS PROTOCOLES EPA.....	169
TABLEAU 8 : CORRÉLATIONS ENTRE LES VOLUMES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES ET LES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES COULOIRS EPA DE LA COMMUNE DE BESSANS	177
TABLEAU 9 : VARIABLES MORPHOLOGIQUES MOYENNES DES 4 CLASSES DE COULOIRS SELON LEURS VOLUMES MOYENS DE DÉPÔTS.....	178
TABLEAU 10 : VOLUMES MOYENS DES DÉPÔTS EN FONCTION DE L'ORIENTATION MOYENNE DES COULOIRS.....	179
TABLEAU 11 : CORRÉLATIONS ENTRE LES VOLUMES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES ET LES CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES DES COULOIRS EPA DE LA COMMUNE DE BESSANS POUR LA PÉRIODE NOVEMBRE-FÉVRIER ET MARS-MAI	179

TABLE 12: SPEARMAN CORRELATION R BETWEEN MORPHOLOGIC VARIABLES AND AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES. VALUES IN BOLD ARE SIGNIFICANT AT THE 0.05 LEVEL. 194

TABLE 13: VARIABLES USED TO INFER THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL AND SNOWPACK CONDITIONS ON SDV. MEAN SNOWFALL IS THE TOTAL SEASONAL SNOWFALL DIVIDED BY THE NUMBER OF DAYS DURING WHICH SNOWFALL OCCURRED. 213

TABLE 14: STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN MEAN SDV FOR AN UNDEFINED PATH EXPOSITION AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR A FLAT TOPOGRAPHY IN HAUTE-MAURIENNE CONSIDERING ALL ELEVATIONS AND THE TWO SEASONS. THE + OR - INDICATE THE SIGN OF SIGNIFICANT RELATIONSHIPS..... 219

TABLE 15: STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN MEAN WINTER SDV FOR AN UNDEFINED PATH EXPOSITION AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR A FLAT TOPOGRAPHY AND A GIVEN ELEVATION ONLY IN HAUTE-MAURIENNE. THE + OR - INDICATE THE SIGN OF THE RELATIONSHIPS. 220

TABLE 16: STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN WINTER SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS IN HAUTE-MAURIENNE FOR SPECIFIC ORIENTATIONS (SDV FROM THE CONSIDERED EXPOSITION ONLY AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FROM THE CORRESPONDING 40° SLOPE). SNOW AND METEOROLOGICAL CONDITIONS FROM ALL ELEVATIONS ARE CONSIDERED. 221

TABLE 17: STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN SDV DISRUPTING ROADS AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS IN HAUTE-MAURIENNE DURING WINTER AND SPRING SEASONS. SNOW AND METEOROLOGICAL CONDITIONS ARE FOR A FLAT TOPOGRAPHY AND ALL ELEVATIONS. SDV ARE CONSIDERED ALTOGETHER INDEPENDENTLY OF PATH’S EXPOSITION..... 222

Table des matières

RESUME	4
REMERCIEMENTS	7
SOMMAIRE	13
INTRODUCTION GÉNÉRALE/CONTEXTE	19
PARTIE I CONTEXTUALISATION DE LA RECHERCHE	23
CHAPITRE 1 : LES AVALANCHES : ORIGINES, DYNAMIQUES ET CONSEQUENCES	25
1.1 NEIGE : TYPOLOGIE, TRANSFORMATION ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	25
1.2 LES DYNAMIQUES AVALANCHEUSES : GÉNÉRALITÉS ET TYPOLOGIES	26
1.3 ÉVOLUTION DE L'ACTIVITÉ AVALANCHEUSE	31
1.4 LES CHRONIQUES AVALANCHEUSES : SOURCES DE DONNÉES ET UTILISATIONS SCIENTIFIQUES.....	33
1.5 AVALANCHE ET VULNÉRABILITÉ	37
CHAPITRE 2 : LES DEPOTS D'AVALANCHES	39
2.1 VOLUME ET GÉOMÉTRIE DES DÉPÔTS D'AVALANCHES	39
2.2 CARACTÉRISTIQUES NIVOLOGIQUES ET STRATIGRAPHIQUES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	41
2.3 FACTEURS DE CONTRÔLE DES CARACTÉRISTIQUES VOLUMÉTRIQUES ET NIVOLOGIQUES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	45
2.4 VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU ROUTIER ET DÉPÔTS D'AVALANCHES.....	47
CHAPITRE 3 PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS DE LA THESE	55
3.1 MANQUES DE CONNAISSANCE ET VEROUS	55
3.2 OBJECTIFS DE THÈSE	56
3.3 ORGANISATION DES SECTIONS SUIVANTES DE LA THÈSE	56
PARTIE II : DONNÉES ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE	59
CHAPITRE 4 : ÉTUDE DE LA GEOMETRIE ET DE LA COMPOSITION DES DEPOTS <i>IN-SITU</i>	61
4.1 ORGANISATION DES MISSIONS DE TERRAIN.....	61
4.2 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	61

CHAPITRE 5 DETERMINATION DES VARIABLES RESPONSABLES DES VOLUMES DES DEPOTS DEPUIS UNE UNIQUE BASE DE DONNEES EVENEMENTIELLE RELATIVE AUX AVALANCHES	65
5.1 CONSTITUTION D'UNE UNIQUE BASE DE DONNÉES ÉVÉNEMENTIELLES RELATIVES AUX AVALANCHES	65
5.1.1 L'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA)	65
5.1.2 Correction et ajouts depuis les carnets forestiers	70
5.1.4 PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES	72
5.2 PRÉSENTATION DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES	75
5.2.1 Données météorologiques issues de mesures <i>in-situ</i>	75
5.2.2 Données météorologiques issues de réanalyses	77
5.3 DÉTERMINATION DES VARIABLES RESPONSABLES DES VOLUMES DES DÉPÔTS	78
5.3.1 Préparation des données	78
5.3.2 Traitements statistiques	80
<u>PARTIE III : PRÉSENTATION DES TERRAINS D'ÉTUDE</u>	85
CHAPITRE 6 : ZONES D'ÉTUDE : SPECIFICITES DES TERRAIN ET ACTIVITE AVALANCHEUSE	87
6.1 VALLÉE DE LA HAUTE MAURIENNE	87
6.1.1 Présentation du terrain d'étude	87
6.1.2 Météorologie propre à la période d'activité avalancheuse (novembre-mai)	89
6.1.3 Activité avalancheuse	92
6.2 MASSIF DU QUEYRAS	94
6.2.1 Présentation du terrain d'étude	94
6.2.2 Météorologie propre à la période d'activité avalancheuse (novembre-mai)	96
6.2.3 activité avalancheuse	99
<u>PARTIE IV RÉSULTATS</u>	103
CHAPITRE 7 : CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES, STRATIGRAPHIQUES ET GRANULOMETRIQUES DES DEPOTS D'AVALANCHES	105
7. ÉTUDE <i>IN-SITU</i> DE CARACTERISTIQUES VOLUMETRIQUES ET NIVOLOGIQUES DES DEPOTS D'AVALANCHES : METHODOLOGIE ET PREMIERS RESULTATS	107
7.1 INTRODUCTION	108
7.2 LOCALISATION ET PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDE	110
7.2.1 Localisation et présentation du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc et de la mission réalisée en février 2019	112

7.2.2 Localisation et présentation du couloir non référencé de Bessans et de la mission réalisée en février 2020	114
7.3 SITUATION MÉTÉOROLOGIQUE ANTÉRIEURE AUX AVALANCHES ÉTUDIÉES.....	116
7.3.1 Dépôt de février 2019 du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc	116
7.3.2 Dépôt de février 2020 du couloir non référencé de Bessans	116
7.4 MÉTHODOLOGIE	117
7.4.1 Caractérisation de la forme du dépôt et évaluation du volume	117
7.4.2 Caractérisation de la granulométrie de surface du dépôt	118
7.4.3 Caractérisation verticale de la nivologie du dépôt	119
7.4.4 Application de la méthodologie in-situ	121
7.5 RÉSULTATS	124
7.5.1 Dépôt de février 2019 du couloir EPA 208 de Bonneval sur Arc	124
7.5.2 Dépôt de février 2020 du couloir non référencé de Bessans	132
7.6 DISCUSSION	138
7.6.1 Dépôt du couloir 208 de Bonneval	138
7.6.2 Dépôt du couloir non référencé de Bessans	141
7.6.3 Analyse comparée des deux dépôts	143
7.6.4 Méthodologie employée	144
7.7 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	146
CHAPITRE 8 : VOLUME DES DEPOTS D’AVALANCHES : VARIABILITES SPATIO-TEMPORELLE ET RELATIONS AVEC LA GEOMORPHOLOGIE DES COULOIRS	149
8.1 VARIABILITE DES VOLUMES DES DEPOTS D’AVALANCHES ET RELATIONS AVEC LA MORPHOLOGIE DES COULOIRS D’ECOULEMENT (BESSANS, SAVOIE, FRANCE)	151
8.1.1 Introduction	154
8.1.2 Présentation du terrain d’étude	156
8.1.3 Données et méthodologie	160
8.1.4. Résultats	168
8.1.4.1 Évolution des volumes et fiabilité des données entre 1904 et 2017	168
8.1.5 Discussion, conclusion et perspectives	180
8.1.6 Remerciements	182
8.2 BRIEF COMMUNICATION: WEAK CONTROL OF SNOW AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES BY AVALANCHE PATH MORPHOLOGY	185
8.2.1 Introduction	185
8.2.2 Data and methodology	186
8.2.3 Results	192

8.2.4 Discussion, conclusion, and outlook	196
CHAPITRE 9 : VOLUMES DES DEPOTS D'AVALANCHES : RELATIONS AVEC LE CLIMAT ET LA VULNERABILITE DU RESEAU ROUTIER	201
9. INFLUENCE OF SNOW AND METEOROLOGICAL CONDITIONS ON SNOW-AVALANCHE DEPOSIT VOLUMES AND CONSEQUENCES FOR ROAD-NETWORK VULNERABILITY	203
9.1 INTRODUCTION	204
9.3 STUDY AREA	205
9.3 DATA AND METHODS	207
9.3.1 Data	207
9.3.4 Statistical analyses	213
9.4. RESULTS AND INTERPRETATIONS	216
9.4.1 SDV variability	216
9.4.3 Relationships between SDV, meteorological and snow conditions	218
9.5. DISCUSSION, CONCLUSION AND PERSPECTIVES.....	223
9.5.1 Summary and discussion of main outcomes	223
9.5.2 Conclusion and perspectives	224
<u>PARTIE V DISCUSSION, CONCLUSION ET PERSPECTIVES</u>	227
CHAPITRE 10 : SYNTHESE ET APPORT DU TRAVAIL DE THESE	229
10.1 RAPPEL DU CONTEXTE DE RECHERCHE ET DES OBJECTIFS DE LA THÈSE.....	229
10.2 CONTRÔLE SAISONNIER DES CARACTÉRISTIQUES DES VOLUMES DES DÉPÔTS D'AVALANCHES	229
10.2.1 Contrôle saisonnier des caractéristiques géométriques et nivologiques des dépôts d'avalanches	230
10.2.2 Contrôle saisonnier des volumes des dépôts d'avalanches	230
10.3 APPORT DE CES RECHERCHES SUR LA VULNÉRABILITÉ DU RÉSEAU ROUTIER ALPIN FACE AUX AVALANCHES	233
10.4 PERSPECTIVES	234
10.4.1 Étude des caractéristiques des dépôts d'avalanches <i>in-situ</i>	234
10.4.2 Identification des variables de contrôle des volumes des dépôts d'avalanches	235
10.4.3 Étude des volumes des dépôts et vulnérabilité du réseau routier alpin	237
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	239
LISTE DES FIGURES	267
LISTE DES TABLEAUX	275
TABLE DES MATIÈRES	279

ANNEXES

285

Sommaire des annexes

287

Annexes

Sommaire des annexes

ANNEXE 1 : MANTEAU NEIGEUX INITIAL À PROXIMITÉ DE LA ZONE DE DÉPÔT DU COULOIR 208.....	291
FIGURE SUPPLÉMENTAIRE 1 : STRATIGRAPHIE NIVOLOGIQUE ET MASSE VOLUMIQUE DU MANTEAU NEIGEUX INITIAL DANS LA ZONE DE DÉPÔT LE 6 FÉVRIER 2019 (CF FIG.9 POUR LA LOCALISATION DU POINT DE MESURE)	292
ANNEXE 2 : MANTEAU NEIGEUX INITIAL À PROXIMITÉ DE LA ZONE DE DÉPÔT DE BESSANS.....	292
FIGURE SUPPLÉMENTAIRE 2 : STRATIGRAPHIE NIVOLOGIQUE ET MASSE VOLUMIQUE DU MANTEAU NEIGEUX INITIAL DANS LA ZONE DE DÉPÔT LE 12 FÉVRIER 2020 (CF FIG.11 POUR LA LOCALISATION DU POINT DE MESURE).....	293
SUPPLEMENTARY TABLE 1: DESCRIPTIVE STATISTICS OF QUANTITATIVE MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF AVALANCHE PATHS.	295
SUPPLEMENTARY TABLE 2: PEARSON CORRELATION P BETWEEN THE MORPHOLOGICAL DESCRIPTORS AND ORIENTATIONS OF THE SET OF ANALYZED AVALANCHE PATHS. VALUES IN BOLD ARE SIGNIFICANT AT THE 0.05 LEVEL.	295
SUPPLEMENTARY TABLE 3: R2 STATISTICS FOR THE FITTED NEURAL NETWORK MODELS. FOR EACH SERIES (ANNUAL, WINTER AND SPRING) AND MODEL TYPE (3 OR 8 LAYERS) THE TABLE PROVIDES THE MEDIAN (50%), 80% AND 97.5% PERCENTILES OVER THE DISTRIBUTION OF THE 100 BOOTSTRAP ITERATIONS. ...	296
SUPPLEMENTARY FIGURE 3 : NUMBER OF PATHS BY ORIENTATION	296
SUPPLEMENTARY FIGURE 4: EXAMPLE OF ONE (AMONG THE 100 BOOTSTRAP ITERATIONS) FITTED 8-LAYER NEURAL NETWORK ANNUAL MODEL. LINEAR CORRELATION BETWEEN OBSERVED AND PREDICTED VALUES FOR: (A) TRAINING SAMPLE, (B) VALIDATION SAMPLE, (C) TEST SAMPLE, (D) FULL SAMPLE, (E) HISTOGRAM OF RESIDUALS FOR THE TRAINING, VALIDATION AND TEST SAMPLES.....	297
SUPPLEMENTARY FIGURE 5 : METEOROLOGICAL CONDITIONS IN HAUTE-MAURIENNE MASSIF BETWEEN 2003 AND 2017 IN WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS: MEAN AIR TEMPERATURE (LINEAR TREND IS	

+0,12°C/YEAR, R2=0,04, EVALUATED AT AN ELEVATION OF 2400M A.S.L), NUMBER OF DAYS WITH DAILY MEAN AIR TEMPERATURE ABOVE 0°C (LINEAR TREND IS +0,6 DAYS/YEAR WITH MEAN AIR TEMPERATURE ABOVE 0°C, R2=0,03, EVALUATED AT A ELEVATION OF 2400M A.S.L), MEAN DAILY SNOWFALL, ACCUMULATED SNOWFALL, NUMBER OF SNOWFALL DAYS AND NUMBER OF HIGH SNOWFALL (>6,5KG/M2) DAYS. 299

SUPPLEMENTARY FIGURE 6 : SNOW ON THE GROUND CONDITIONS IN HAUTE-MAURIENNE MASSIF BETWEEN 2003 AND 2017 IN WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS: MEAN AND MAXIMAL SNOWPACK DEPTH AND RAMSOND DEPTH FOR AN UNDEFINED ORIENTATION (FLAT AREA). 300

SUPPLEMENTARY FIGURE 7 : METEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE GUIL VALLEY BETWEEN 2003 AND 2017 IN WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS: MEAN AIR TEMPERATURE (LINEAR TREND IS +0,1°C/YEAR, R2=0,02, EVALUATED AT AN ELEVATION OF 2700M A.S.L), NUMBER OF DAYS WITH DAILY MEAN AIR TEMPERATURE ABOVE 0°C (LINEAR TREND IS +0,7 DAYS/YEAR WITH MEAN AIR TEMPERATURE ABOVE 0°C, R2=0,07, EVALUATED AT A ELEVATION OF 2700M A.S.L), MEAN DAILY SNOWFALL, ACCUMULATED SNOWFALL, NUMBER OF SNOWFALL DAYS AND NUMBER OF HIGH SNOWFALL (>6,5KG/M2) DAYS..... 301

SUPPLEMENTARY FIGURE 8 : SNOW ON THE GROUND CONDITIONS IN THE GUIL VALLEY BETWEEN 2003 AND 2017 IN WINTER (W) AND SPRING (S) SEASONS: MEAN AND MAXIMAL SNOWPACK DEPTH AND RAMSOND DEPTH FOR AN UNDEFINED ORIENTATION (FLAT AREA). 302

SUPPLEMENTARY FIGURE 9 : MEAN INTER-ANNUAL WINTER (W) AND SPRING (S) SDV AND NUMBER OF INVESTIGATED DEPOSITS FROM THE GUIL VALLEY AREA FOR THE PERIOD 2003-2017 303

SUPPLEMENTARY TABLE 4 : STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS IN THE GUIL VALLEY FOR WINTER AND SPRING SEASONS. METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS ARE FOR ALL ELEVATIONS. BOTH THE UNDEFINED EXPOSITION CASE (ALL SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR A FLAT TOPOGRAPHY) AND SPECIFIC SOUTH-EAST AND NORTH SUBSAMPLES (SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR THE CONSIDERED ORIENTATION ONLY) ARE CONSIDERED. 303

SUPPLEMENTARY TABLE 5 : STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN WEIGHTED MEAN SDV AND WEIGHTED MEAN METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS (EQ. 1) FOR BOTH WINTER AND SPRING SEASON AND FOR AN UNDEFINED EXPOSITION (FLAT TOPOGRAPHY). 303

SUPPLEMENTARY TABLE 6 : STATISTICAL SUMMARY OF STEPWISE LINEAR REGRESSIONS PERFORMED BETWEEN MEAN ANNUAL SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS IN HAUTE-MAURIENNE. MODELS ARE WITH METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR ALL ELEVATIONS OR SPECIFIC ELEVATION BANDS. IN EACH CASE, BOTH THE UNDEFINED EXPOSITION CASE (ALL SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR A FLAT TOPOGRAPHY) AND SPECIFIC SOUTH, NORTH-WEST AND WEST SUBSAMPLES (SDV AND METEOROLOGICAL AND SNOW CONDITIONS FOR THE CONSIDERED ORIENTATION ONLY) ARE CONSIDERED.
..... 304

Annexe du Chapitre 7

Annexe 1 : Manteau neigeux initial à proximité de la zone de dépôt du couloir 208

Le manteau neigeux initial à proximité de la zone de dépôt du couloir 208 de Bonneval est typique d'un hiver froid. L'épaisseur est de 100 cm, on y observe 3 couches homogènes délimitées par des croûtes de regel bien identifiable. La couche de surface fait 40 cm d'épaisseur, elle est caractérisée par une neige récente, sèche et froide avec une masse volumique de 160 kg/m^3 . On note la présence d'une fine couche de regel à la surface. La seconde couche est délimitée par une fine croûte de regel caractéristique d'un épisode de redoux. Cette couche mesure 17 cm d'épaisseur et s'étend entre 41 et 58 cm de profondeur. Elle se caractérise par la présence de grains fins dans sa partie supérieure et de faces planes dans sa partie inférieure. La masse volumique mesurée est de 298 kg/m^3 . On trouve ensuite entre 58 et 65 cm de profondeur une succession de fines couches de glace, de gobelets et d'une croûte de regel de 7 cm. Enfin, la dernière couche mesure 45 cm, entre 65 cm de profondeur et le sol végétalisé. Cette couche est composée de gobelets, partiellement regelés au contact de la végétation. La masse volumique mesurée y est de 312 kg/m^3 (Fig. 4).

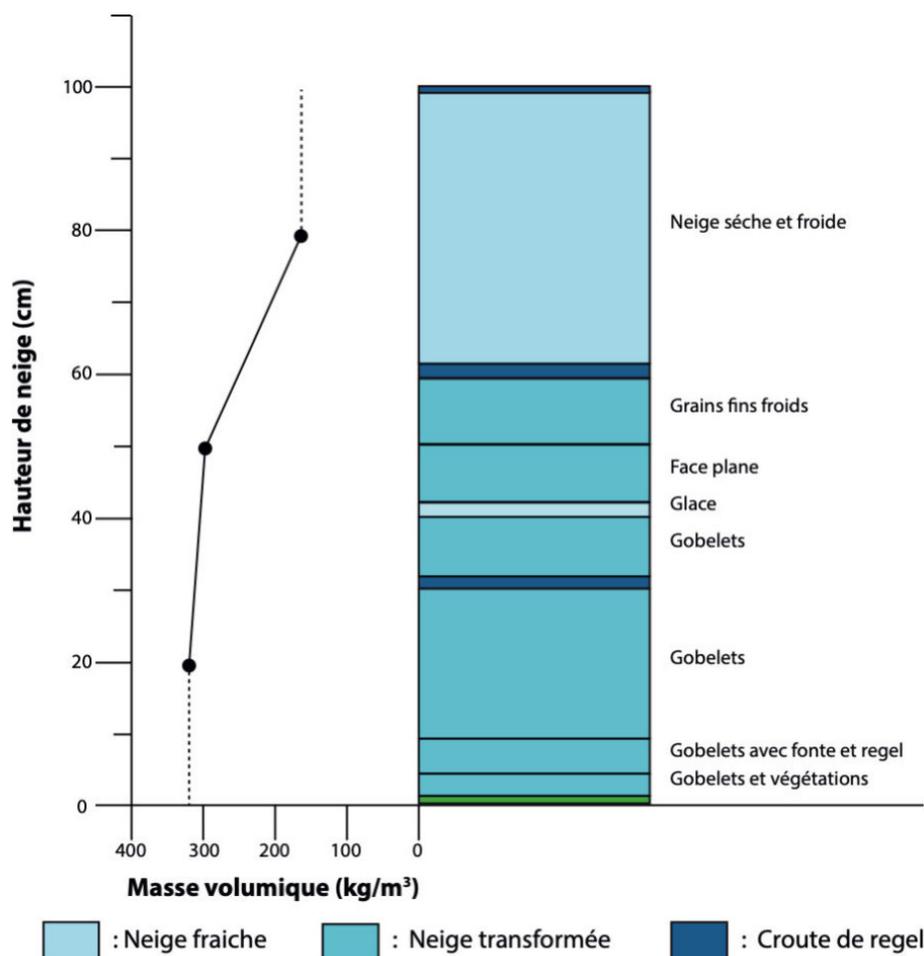


Figure supplémentaire 1 : Stratigraphie nivologique et masse volumique du manteau neigeux initial dans la zone de dépôt le 6 février 2019 (cf fig.9 pour la localisation du point de mesure)

Annexe 2 : Manteau neigeux initial à proximité de la zone de dépôt de Bessans

Le manteau neigeux initial dans la zone de dépôt de la mission de février 2019 est typique d'un hiver avec d'importantes phases de redoux et propre à des conditions printanières : le manteau neigeux a subi de nombreuses métamorphoses et on note l'absence de neige fraîche. Le manteau neigeux initial dans la zone de dépôt est de 67 cm d'épaisseur et est composé de 5 couches délimitées par des croûtes de regel. Les 3 premières couches sont composées de faces planes et mesurent respectivement 27 cm, 10 cm, 8 cm d'épaisseur. Elles sont séparées par des croûtes de regel. Les deux fines couches situées à la base du manteau neigeux sont constituées de gobelets. Les valeurs de masse volumique diminuent avec l'épaisseur,

on mesure une masse volumique de 304 kg/m³ à 55 cm d'épaisseur et de 368kg/m³ à 13cm d'épaisseur (Fig. 5).

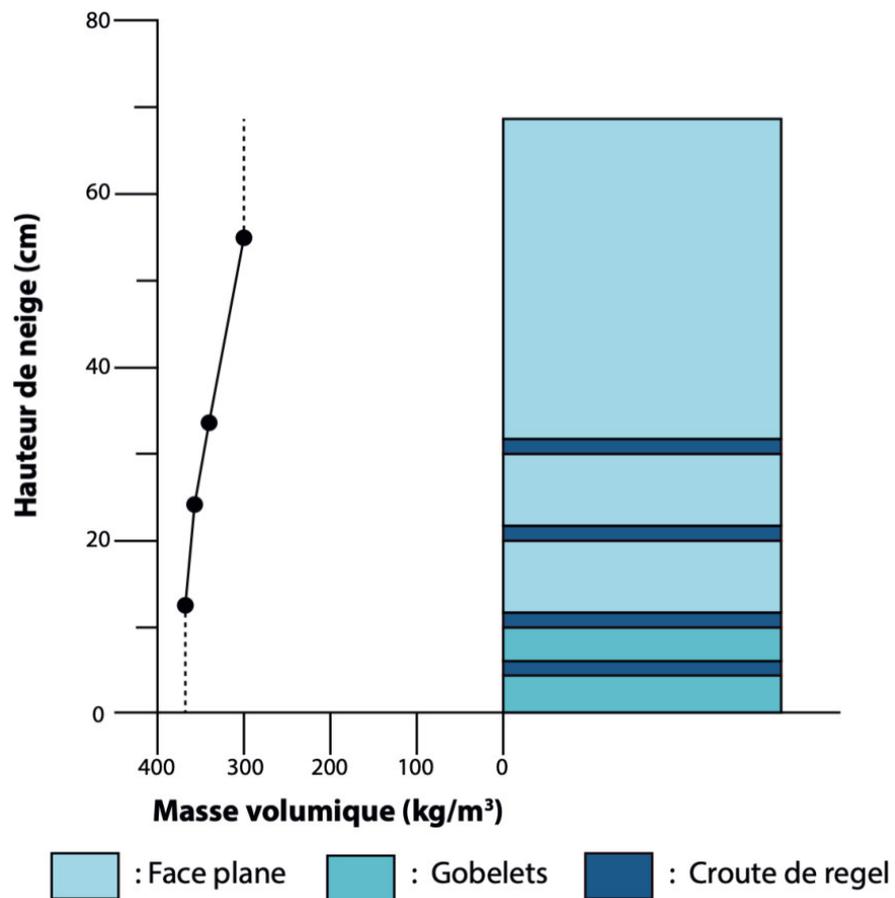


Figure supplémentaire 2 : Stratigraphie nivologique et masse volumique du manteau neigeux initial dans la zone de dépôt le 12 février 2020 (cf fig.11 pour la localisation du point de mesure)

Annexe du chapitre 8.2

Supplementary table 1: Descriptive statistics of quantitative morphological characteristics of avalanche paths.

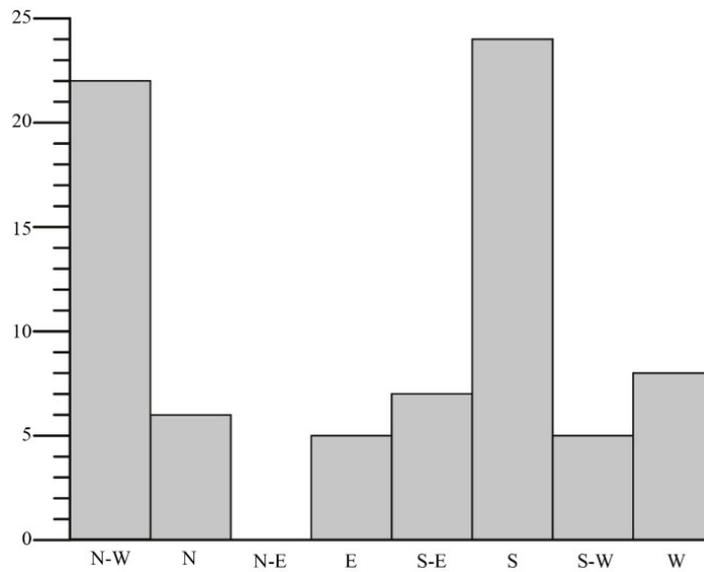
Variable	Mean	Std. deviation	Range
Length (m)	1515	615	594-2860
Minimal elevation (m a.s.l.)	1781	123	1461-2313
Maximal elevation (m a.s.l.)	2731	397	2120-3731
Mean elevation (m a.s.l.)	2281	260	1936-2942
Vertical drop (m)	950	395	331-1887
Area minimmal slope (°)	3	4	0-15
Area maximal slope (°)	82	81	39-89
Area mean slope (°)	39	7	26-49
Surface area (ha)	36	39	3-172

Supplementary Table 2: Pearson correlation ρ between the morphological descriptors and orientations of the set of analyzed avalanche paths. Values in bold are significant at the 0.05 level.

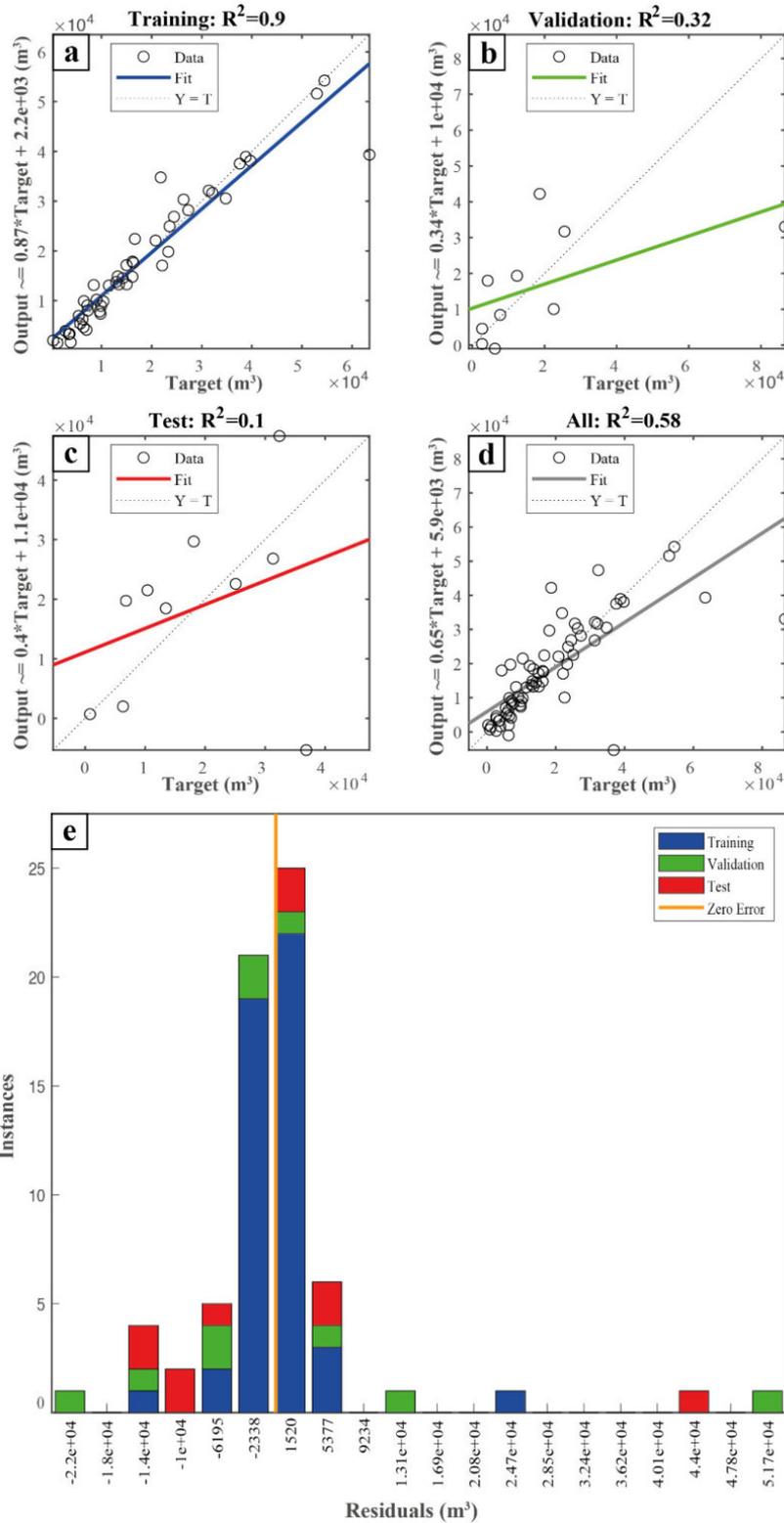
	Min elevation	Max elevation	Mean elevation	Vertical drop	Min slope	Max slope	Mean slope	Surface area	N-W	N	N-E	E	S-E	S	S-W	W	Path frequency
Min elevation	1	0.01	0.26	-0.17	-0.09	0.10	0.14	-0.09	0.25	-0.04	-0.03	0.01	-0.19	-0.01	-0.03	-0.01	-0.01
Max elevation	0.01	1	0.94	0.97	-0.42	0.41	0.01	0.72	-0.07	0.04	0.01	0.05	0.12	-0.15	-0.11	-0.11	0.17
Mean elevation	0.26	0.94	1	0.86	-0.42	0.38	0.06	0.74	-0.04	0.03	-0.01	0.02	0.14	-0.08	-0.12	-0.13	0.13
Vertical drop	-0.17	0.97	0.86	1	-0.42	0.37	-0.02	0.74	-0.14	0.05	0.11	0.04	0.17	-0.14	-0.01	0.19	0.19
Min slope	-0.09	-0.42	-0.42	-0.40	1	-0.48	0.07	-0.41	0.08	0.17	-0.19	-0.22	0.16	-0.01	-0.14	-0.24	-0.24
Max slope	0.01	0.41	0.38	0.37	-0.48	1	0.49	0.28	0.06	-0.08	0.21	-0.16	-0.18	0.03	0.21	0.51	0.51
Mean slope	0.14	0.01	0.06	-0.02	0.07	0.49	1	-0.19	0.26	-0.03	-0.15	-0.22	-0.12	-0.03	0.18	0.34	0.34
Surface area	-0.01	0.72	0.74	0.74	-0.41	0.28	-0.19	1	-0.22	0.05	0.10	0.09	0.10	0.07	-0.11	0.11	0.11
N-W	0.25	-0.07	-0.04	-0.14	0.08	0.06	0.26	-0.22	1	-0.18	-0.17	-0.20	-0.43	-0.17	-0.21	0.11	0.11
N	-0.04	0.04	0.03	0.05	0.17	-0.07	-0.03	0.05	-0.18	1	-0.07	-0.09	-0.20	-0.08	-0.10	-0.22	-0.22
N-E																	
E	-0.03	0.01	-0.01	0.11	-0.19	0.21	-0.15	0.10	-0.17	-0.08	1	-0.08	-0.18	-0.07	-0.10	0.31	0.31
S-E	0.01	0.05	0.02	0.04	-0.22	-0.16	-0.21	0.09	-0.20	-0.09	-0.08	1	-0.21	-0.08	-0.11	-0.03	-0.03
S	-0.19	0.12	0.14	0.17	0.16	-0.18	-0.12	0.10	-0.43	-0.20	-0.18	-0.21	1	-0.18	-0.23	-0.27	-0.27
S-W	-0.01	-0.15	-0.07	-0.14	-0.01	0.03	-0.03	0.07	-0.17	-0.07	-0.07	-0.08	-0.18	1	-0.10	-0.14	-0.14
W	-0.03	-0.11	-0.12	-0.01	-0.14	0.21	0.18	-0.11	-0.21	-0.10	-0.10	-0.11	-0.23	-0.10	1	0.34	0.34
Path frequency	-0.01	0.17	0.13	0.19	-0.24	0.51	0.34	-0.11	0.11	0.11	0.31	-0.03	-0.27	-0.14	0.34	1	1

Supplementary Table 3: R2 statistics for the fitted neural network models. For each series (annual, winter and spring) and model type (3 or 8 layers) the table provides the median (50%), 80% and 97.5% percentiles over the distribution of the 100 bootstrap iterations.

	3 layers			8 layers		
	50%	80%	97,5%	50%	80%	97,5%
Annual	0.18	0.32	0.46	0.28	0.43	0.57
Winter	0.29	0.45	0.57	0.33	0.56	0.76
Spring	0.06	0.21	0.37	0.10	0.30	0.54

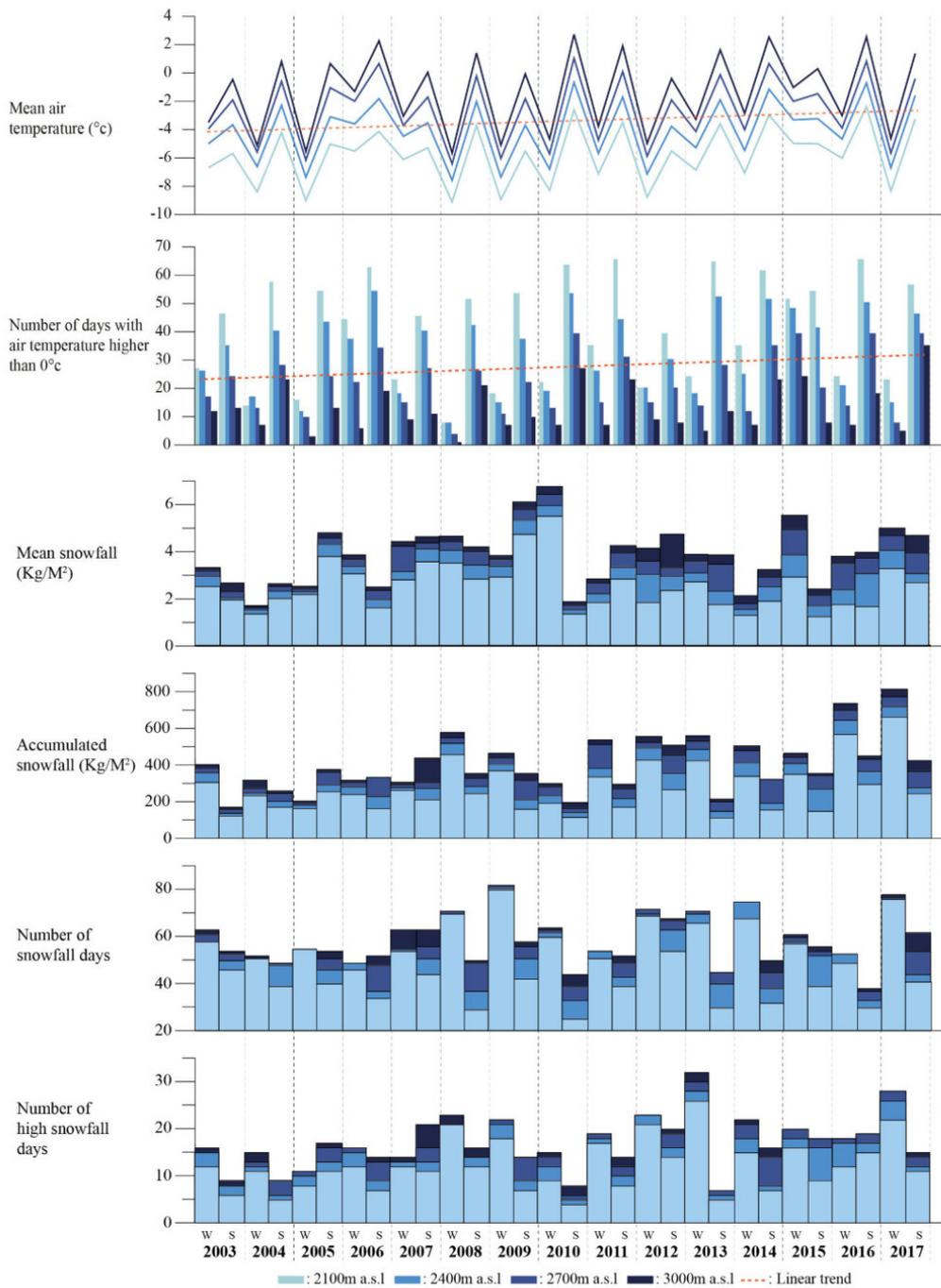


Supplementary figure 3 : Number of paths by orientation

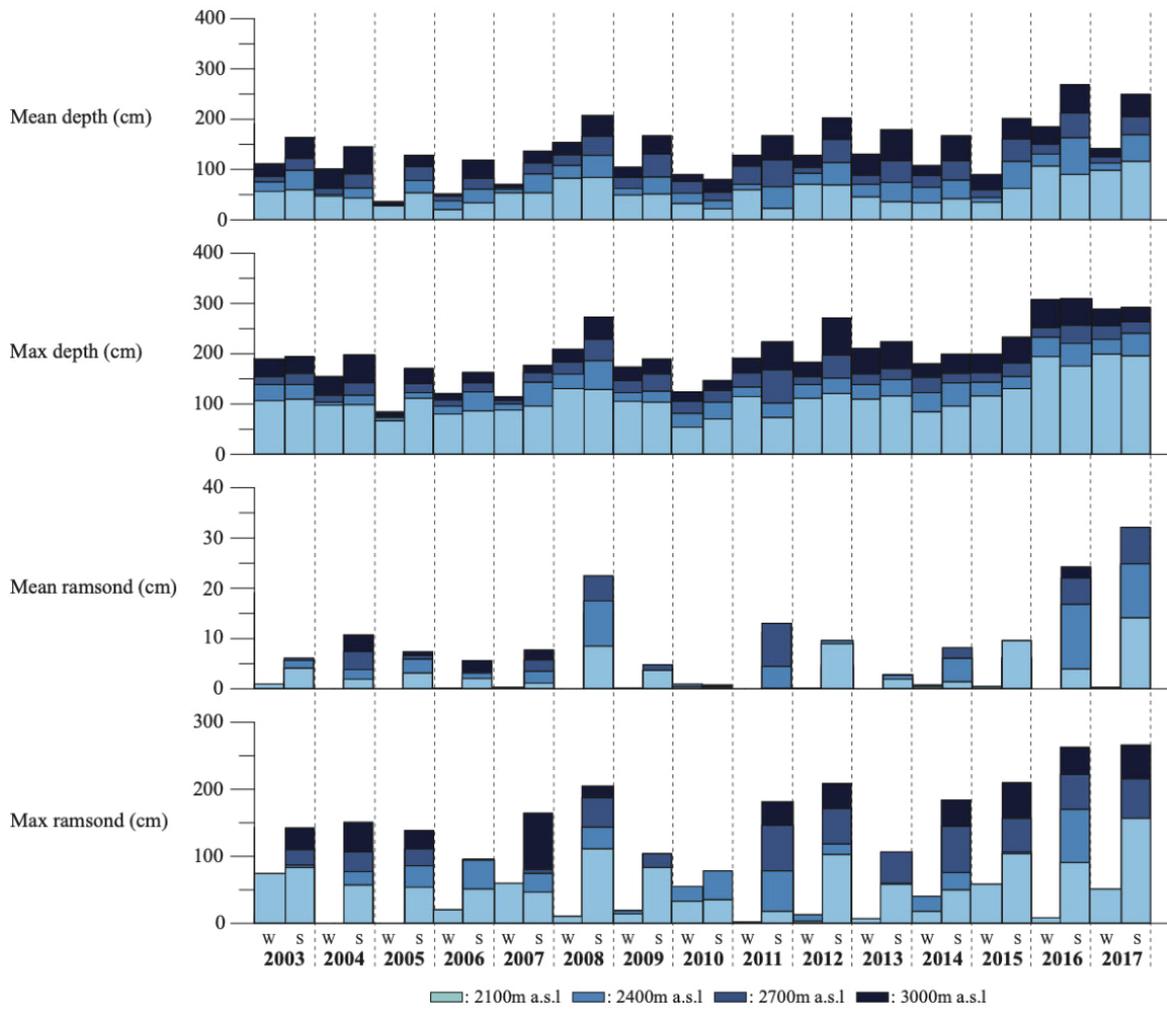


Supplementary Figure 4: Example of one (among the 100 bootstrap iterations) fitted 8-layer neural network annual model. Linear correlation between observed and predicted values for: (a) training sample, (b) validation sample, (c) test sample, (d) full sample, (e) histogram of residuals for the training, validation and test samples.

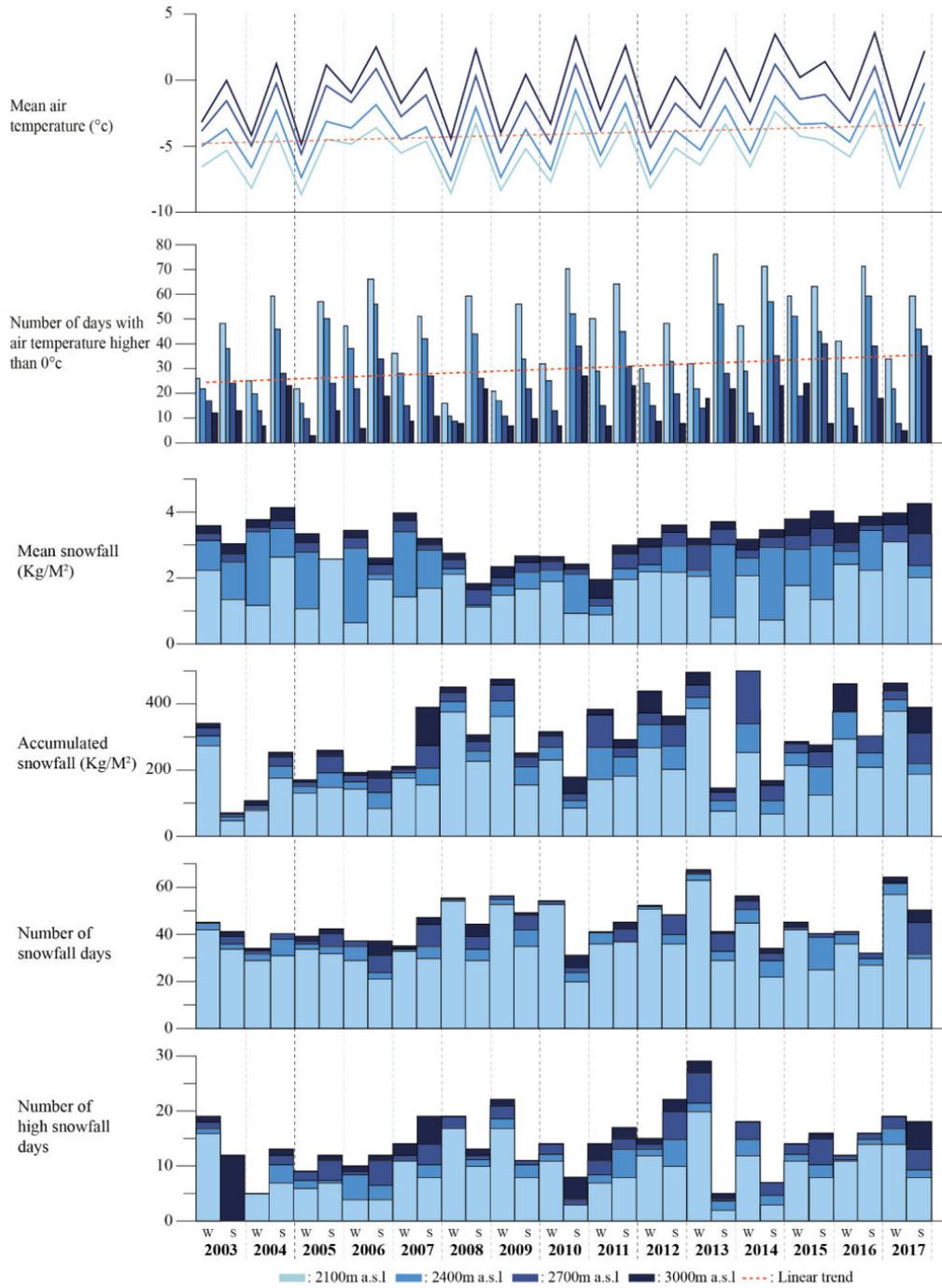
Annexe du chapitre 9



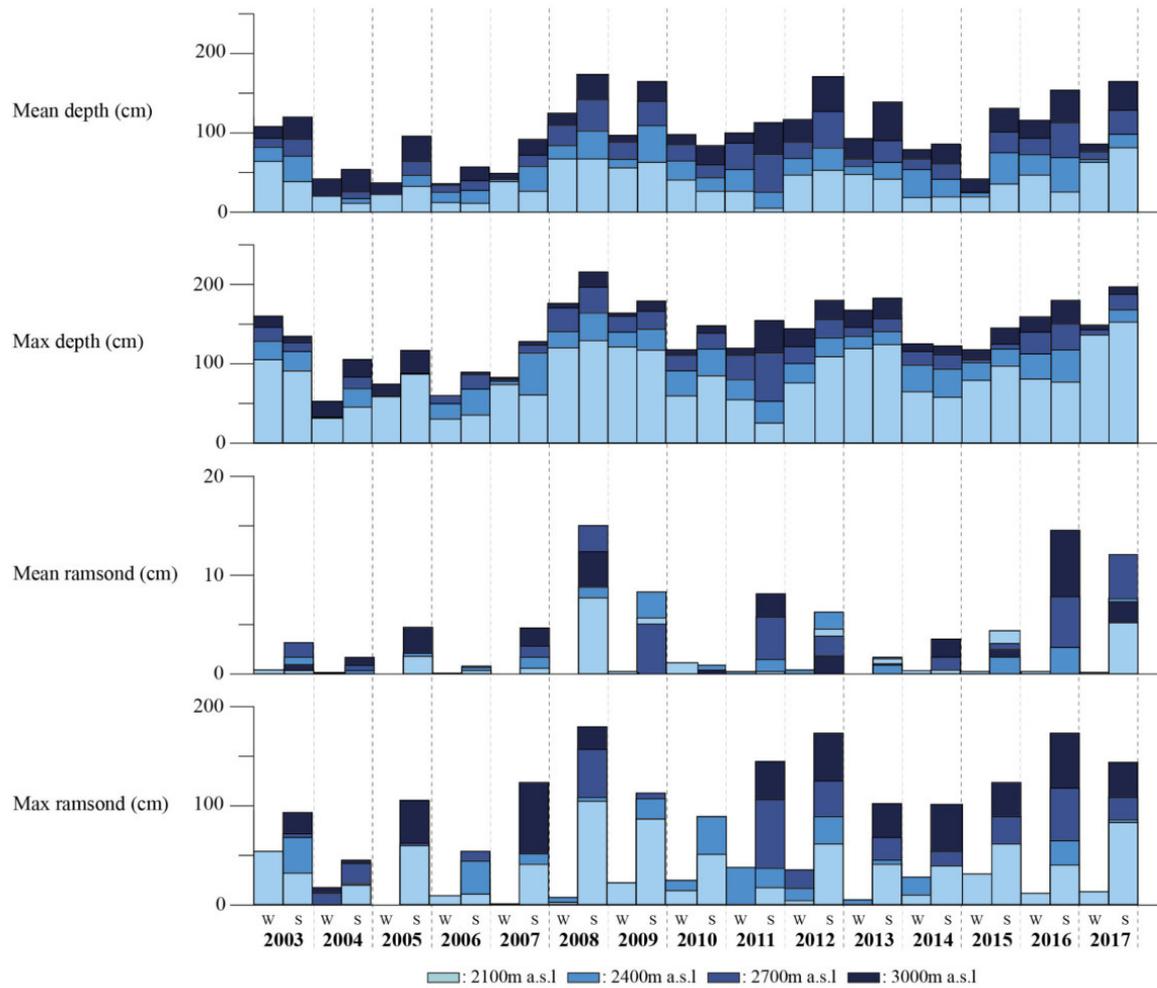
Supplementary figure 5 : Meteorological conditions in Haute-Maurienne massif between 2003 and 2017 in winter (W) and spring (S) seasons: mean air temperature (linear trend is $+0,12^{\circ}\text{C}/\text{year}$, $R^2=0,04$, evaluated at an elevation of 2400m a.s.l), number of days with daily mean air temperature above 0°C (linear trend is $+0,6$ days/year with mean air temperature above 0°C , $R^2=0,03$, evaluated at a elevation of 2400m a.s.l), mean daily snowfall, accumulated snowfall, number of snowfall days and number of high snowfall ($>6,5\text{Kg}/\text{M}^2$) days.



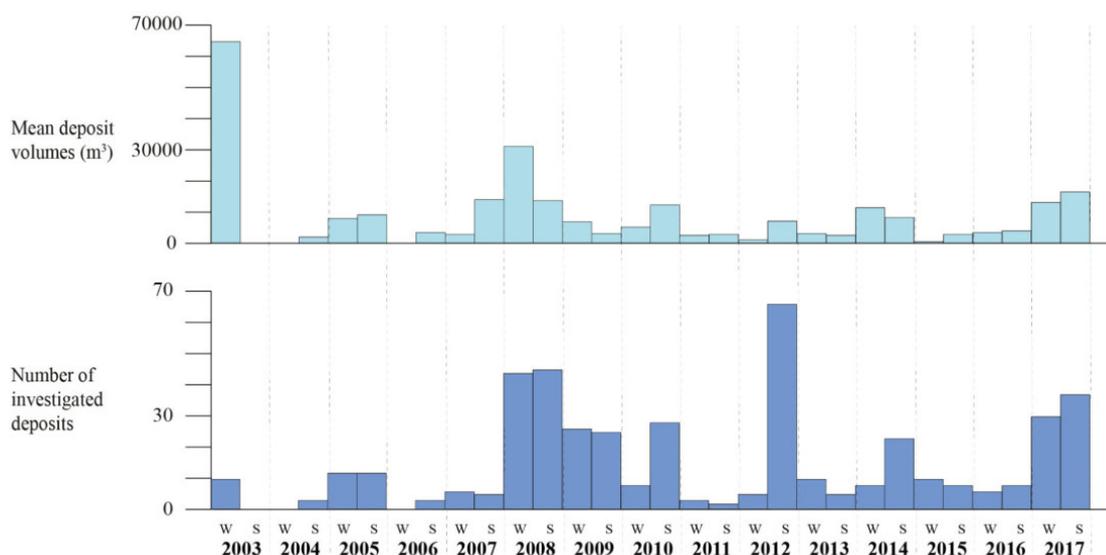
Supplementary figure 6 : Snow on the ground conditions in Haute-Maurienne massif between 2003 and 2017 in winter (W) and spring (S) seasons: mean and maximal snowpack depth and ramsond depth for an undefined orientation (flat area).



Supplementary figure 7 : Meteorological conditions in the Guil valley between 2003 and 2017 in winter (W) and spring (S) seasons: mean air temperature (linear trend is $+0,1^{\circ}\text{C}/\text{year}$, $R^2=0,02$, evaluated at an elevation of 2700m a.s.l), number of days with daily mean air temperature above 0°C (linear trend is $+0,7$ days/year with mean air temperature above 0°C , $R^2=0,07$, evaluated at a elevation of 2700m a.s.l), mean daily snowfall, accumulated snowfall, number of snowfall days and number of high snowfall ($>6,5\text{Kg}/\text{M}^2$) days.



Supplementary figure 8 : Snow on the ground conditions in the Guil valley between 2003 and 2017 in winter (W) and spring (S) seasons: mean and maximal snowpack depth and ramsond depth for an undefined orientation (flat area).



Supplementary figure 9 : Mean inter-annual winter (W) and spring (S) SDV and number of investigated deposits from the Guil valley area for the period 2003-2017

Supplementary table 4 : Statistical summary of stepwise linear regressions performed between SDV and meteorological and snow conditions in the Guil valley for winter and spring seasons. Meteorological and snow conditions are for all elevations. Both the undefined exposition case (all SDV and meteorological and snow conditions for a flat topography) and specific south-east and north subsamples (SDV and meteorological and snow conditions for the considered orientation only) are considered.

	Aspect	Season	Regression R ²	Retained variables	N	Number of investigated deposits
Queyras multi-elevations	Undefined	Winter	No regression		13	178
	Undefined	Spring	No regression		12	264
Queyras multi elevations	South-east	Winter	0.91	Mean ramsond 2100m a.s.l (-) Max ramsond 2100m a.s.l (+)	12	34
	South-east	Spring	No regression		7	24
Queyras multi elevations	North	Winter	No regression		11	64
	North	Spring	0.35	Max ramsond 2100m a.s.l (+)	12	133

Supplementary table 5 : Statistical summary of stepwise linear regressions performed between weighted mean SDV and weighted mean meteorological and snow conditions (Eq. 1) for both winter and spring season and for an undefined exposition (flat topography).

	Orientation	Season	Regression R ²	Retained variables	Number of investigated years	Number of investigated deposits
Queyras + Maurienne multi-elevations	Undefined	Winter	No regression		13	796
	Undefined	Spring	No regression		11	666

Supplementary table 6 : Statistical summary of stepwise linear regressions performed between mean annual SDV and meteorological and snow conditions in Haute-Maurienne. Models are with meteorological and snow conditions for all elevations or specific elevation bands. In each case, both the undefined exposition case (all SDV and meteorological and snow conditions for a flat topography) and specific south, north-west and west subsamples (SDV and meteorological and snow conditions for the considered orientation only) are considered.

	Aspect	Season	Regression R ²	Retained variables	N	Number of investigated deposit
Maurienne multi-elevations	Undefined	Annual	No regression		15	1456
	South	Annual	No regression		15	233
	West	Annual	0.34	Ramsond mean 2700m a.s.l (+)	14	527
	North-west	Annual	No regression		15	508
Maurienne 2100m a.s.l	Undefined	Annual	No regression		15	1456
	South	Annual	No regression		15	233
	West	Annual	No regression		14	527
	North-west	Annual	No regression		15	508
Maurienne 2400m a.s.l	Undefined	Annual	No regression		15	1456
	South	Annual	No regression		15	233
	West	Annual	0.55	Mean depth (-) Mean ramsond (+)	14	527
	North-west	Annual	No regression		15	508
Maurienne 2700m a.s.l	Undefined	Annual	No regression		15	1456
	South	Annual	No regression		15	233
	West	Annual	0.33	Mean ramsond (+)	14	527
	North-west	Annual	No regression		15	508
Maurienne 3000m a.s.l	Undefined	Annual	No regression		15	1456
	South	Annual	No regression		15	233
	West	Annual	No regression		14	527
	North-west	Annual	No regression		15	508

