



HAL
open science

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

Hippolyte Kern, Vincent Jomelli, Nicolas Eckert, Delphine Grancher, Michaël Deschâtres

► **To cite this version:**

Hippolyte Kern, Vincent Jomelli, Nicolas Eckert, Delphine Grancher, Michaël Deschâtres. Variabilité des volumes des dépôts d'avalanche et relations avec la morphologie des couloirs d'écoulement (Bessans, Savoie, France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2020, 26 (2), pp.127-140. 10.4000/geomorphologie.14361 . hal-03036955

HAL Id: hal-03036955

<https://cnrs.hal.science/hal-03036955>

Submitted on 15 Jul 2024

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

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

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

Variability of avalanche deposits volumes and relationships with corridor morphology (Bessans, Savoie, France)

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

^a Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, LGP UMR 8591 CNRS, 1 place Aristide Briand, Meudon, France.

^b INRAE, 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'avalanche 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 XX^e 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.

ABSTRACT

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.

INFORMATION SUR L'ARTICLE

Article soumis le 26 septembre 2019.

Reçu sous sa forme révisée le 23 mars 2020.

*Auteur correspondant. Tél : +33 (0)1 45 07 55 52
Courriels : hippolyte.kern@lgp.cnrs.fr (H. Kern)
vincent.jomelli@lgp.cnrs.fr (V. Jomelli)
nicolas.eckert@inrae.fr (N. Eckert)
delphine.grancher@lgp.cnrs.fr (D. Grancher)
michael.deschates@inrae.fr (M. Deschâtres)

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 al., 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 ; Naaïm 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 Mc Ardell, 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'avalanche 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.

2. Présentation du terrain d'étude

2.1. Cadre géographique

Bessans (fig. 1) est située dans la vallée de la Haute-Maurienne, partie amont de la vallée de la Maurienne (fig. 1), 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.

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. 1). 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 dénivélés compris entre 430 et 2 400 m.

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. 1). 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. 1). 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

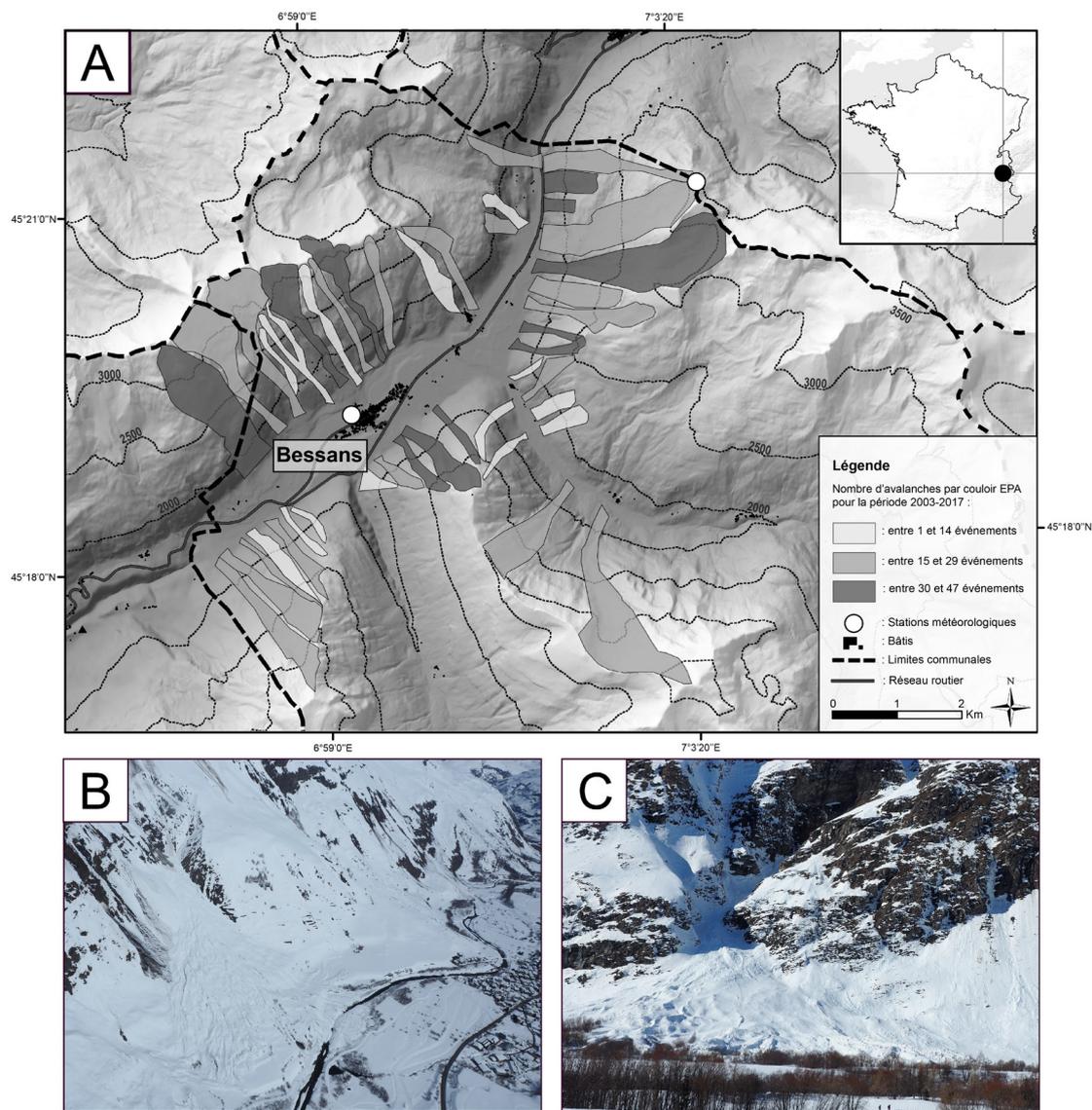


Fig. 1 - Carte de localisation et photographies de dépôts en janvier 2017 (INRAE-ETNA, 2017).

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.

Fig. 1 - Location map and photographs of the deposits in January 2017 (INRAE-ETNA, 2017) 2003-2017.

A: Location map and number of avalanches recorded per corridor for the period 2003-2017. B: EPA corridor #16 of Bessans. C: EPA corridor #17 of Bessans.

Tab. 1 - Statistiques descriptives des caractéristiques nivo-météorologiques moyennes à Bessans sur la période 2003-2017 selon deux stations météorologiques situées à 1 715 m et 2 740 m.

Tab.1 - Descriptive statistics of Bessans mean nivo-meteorological characteristics from two weather stations located at 1,715 m a.s.l. and 2,740 m a.s.l. between 2003 and 2017.

| 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 |

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).

3. Données et méthodologie

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.

3.1.1. 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. 1) 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. 2A) 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. 2B) 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. 2C). 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

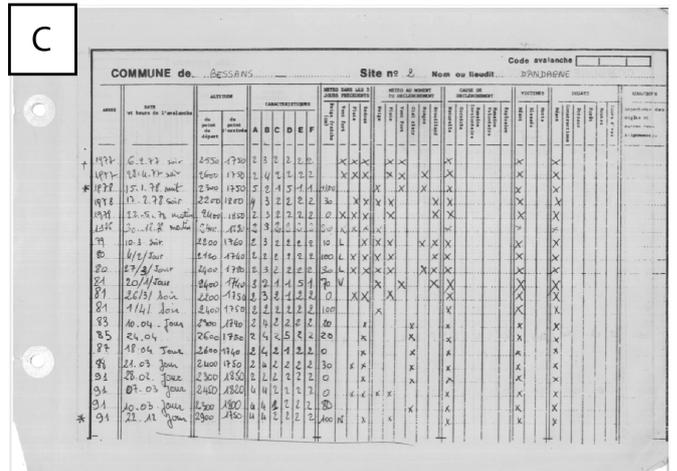
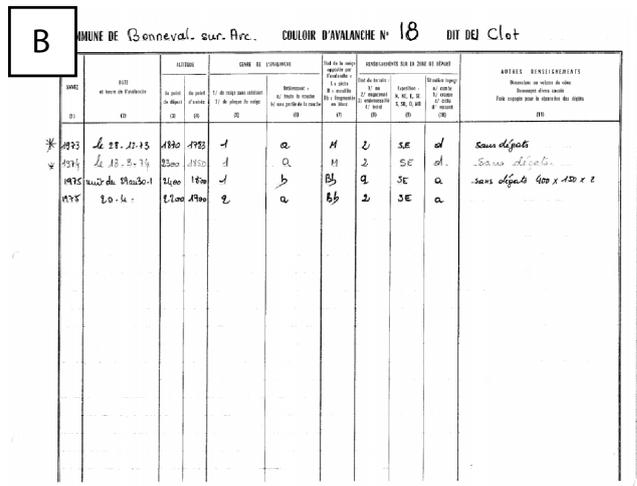
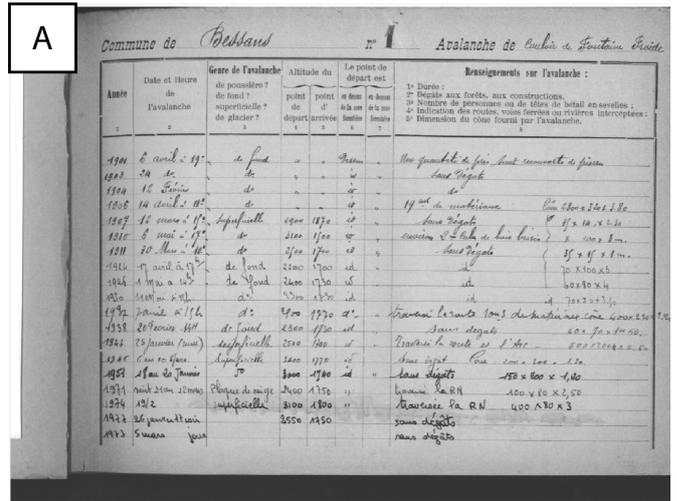


Fig. 2 - Exemple de carnets, pages issue des carnets forestiers de la commune de Bessans.

A : Carnet utilisé entre 1900 et 1975. B : Carnet utilisé entre 1972 et 1975 C : Carnet utilisé entre 1975 et 2003.

Fig. 2 - Example of notebooks, pages from the forest notebooks of the municipality of Bessans.

A: Book used between 1900 and 1975. B: Book used between 1972 and 1975 C: Book used between 1975 and 2003.

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 2 295 avalanches à Bessans entre 1901 et 2017.

3.1.2. 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 :

(i) 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 ;

(ii) 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 ;

(iii) 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.

3.1.3. Les volumes des dépôts d'avalanche

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. 3) 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.

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 XX^e 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.

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.

3.3. Traitement statistique des données

3.3.1. Répartition spatiale et temporelle des volumes des dépôts d'avalanche

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 ».

3.3.2. 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 croissante ou décroissante. 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'avalanche, 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 : $P < 0,05$.

4. Résultats

4.1. Evolution des volumes et fiabilité des données entre 1904 et 2017

L'étude de l'évolution des volumes des dépôts entre 1904 et 2017 (fig. 3, tab. 2) 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.

La période 1904-1945, qui recense 509 estimations de volumes de dépôts, est marquée par des volumes moyens élevés ($230\ 000\ m^3$) et des écarts types importants ($260\ 000\ m^3$), bien supérieurs aux deux autres périodes. Ces fortes valeurs ainsi que l'importance du dernier décile ($> 1\ 000\ 000\ m^3$) 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

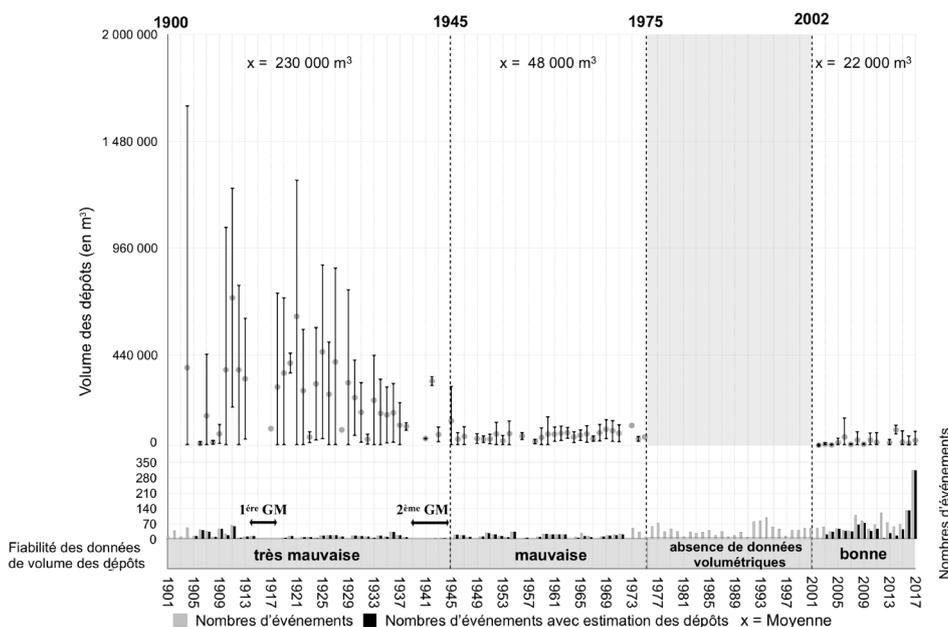


Fig. 3 - Distribution temporelle des volumes moyens annuels cumulés des dépôts d'avalanche de la commune de Bessans.

Fig. 3 - Temporal distribution of the annual average volumes of avalanche deposits in the municipality of Bessans.

Tab. 2 - Statistiques descriptives des volumes annuels cumulés des dépôts (exprimé en m³) par période d'utilisation des différents protocoles EPA.

Tab. 2 - Descriptive statistics of deposition volumes (expressed in m³) by period of use of the different EPA protocols.

| | 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 |

pour sept années avalanches (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 avalanches. 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.

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

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. 4A). 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

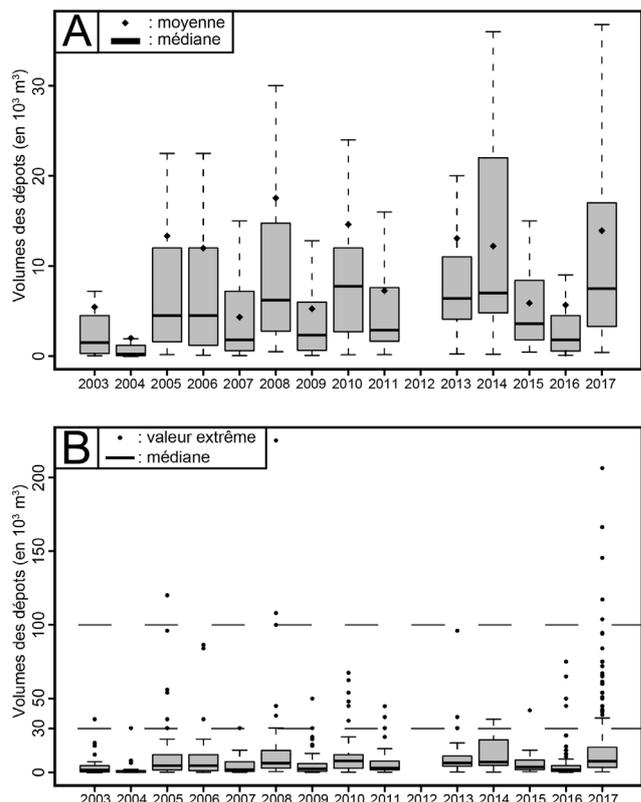


Fig. 4 - Volumes des dépôts (exprimés en m³) par année avalancheuse de la commune de Bessans.

A : Représentés avec 95 % des valeurs en excluant les valeurs extrêmes. B : Représentés avec les valeurs extrêmes.

Fig. 4 - Deposit volumes (expressed in m³) per avalanche year in the municipality of Bessans.

A: Represented with 95 % of the values (without extremes values). B: Represented with extreme values.

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 1 000 m³ pour 2004 et 7 500 m³ pour 2017. La variation interannuelle des moyennes est plus importante avec des valeurs comprises entre 3 000 m³ pour 2004 et 17 000 m³ pour 2008.

Les années avalanches 2003, 2004, 2007, 2009, 2011, 2015 et 2016 se caractérisent par des volumes moyens de dépôts faibles (< 10 000 m³ et médiane < 4 000 m³). Avec des moyennes comprises entre 11 000 m³ et 19 000 m³ et des médianes supérieures à 4 000 m³ les années avalanches 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.

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. 4B). En effet, les volumes dépassant les 30 000 m³ ne sont observés qu'en 2004 et 2007

et trois années avalancheuses sont caractérisées par des volumes de dépôts supérieurs à 100 000 m³ (2005, 2008 et 2017). Les années 2008 et 2017 sont marquées par des volumes de dépôts particulièrement importants, dépassant 200 000 m³. 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 m³) et la médiane (8 000 m³) 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 m³ et 100 000 m³ et 5 dépôts avec des volumes supérieurs à 100 000 m³.

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).

4.3.1. Distribution des volumes moyens

L'analyse de la répartition des volumes des dépôts par couloirs sur la commune de Bessans (fig. 5A) 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. 6). 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).

4.3.2. 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. 6) 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. 6). Les couloirs présentant des dimensions et des dénivelés importants ont pour la plupart des volumes moyens compris entre 20 000 m³ et 142 000 m³ (en noir sur la Figure 6). 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.

4.3.3. Valeurs extrêmes des couloirs EPA de Bessans

L'analyse des valeurs extrêmes (fig. 5B) nous permet de constater que 10 couloirs ont produit des dépôts supérieurs à 100 000 m³, que 18 couloirs ont produit des dépôts compris entre 100 000 m³ et 30 000 m³ et que 12 couloirs n'ont pas produit de dépôts supérieurs à 30 000 m³. Certains couloirs, par exemple le couloir 12, ont des

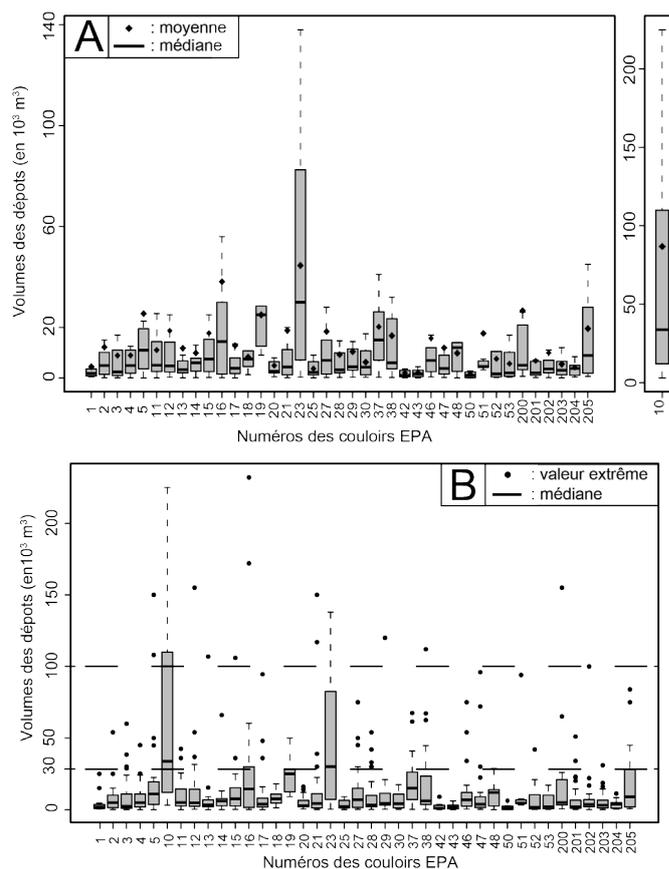


Fig. 5 - Volumes des dépôts (exprimé en m³) par couloirs EPA de la commune de Bessans.

A : Représentés avec 95 % des valeurs. B : représentés avec les valeurs extrêmes

Fig. 5 - Deposition volumes (expressed in m³) by EPA corridors in the municipality of Bessans.

A: Represented with 95 % of the values. B: Represented with extreme values.

volumes de dépôts moyens faibles (< 12 000 m³) mais peuvent générer parfois de très gros dépôts (> 100 000 m³).

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. 3).

On constate que les corrélations sont significatives (pour un seuil r significatif = $\pm 0,3$ 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 ($r = -0,4$ 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

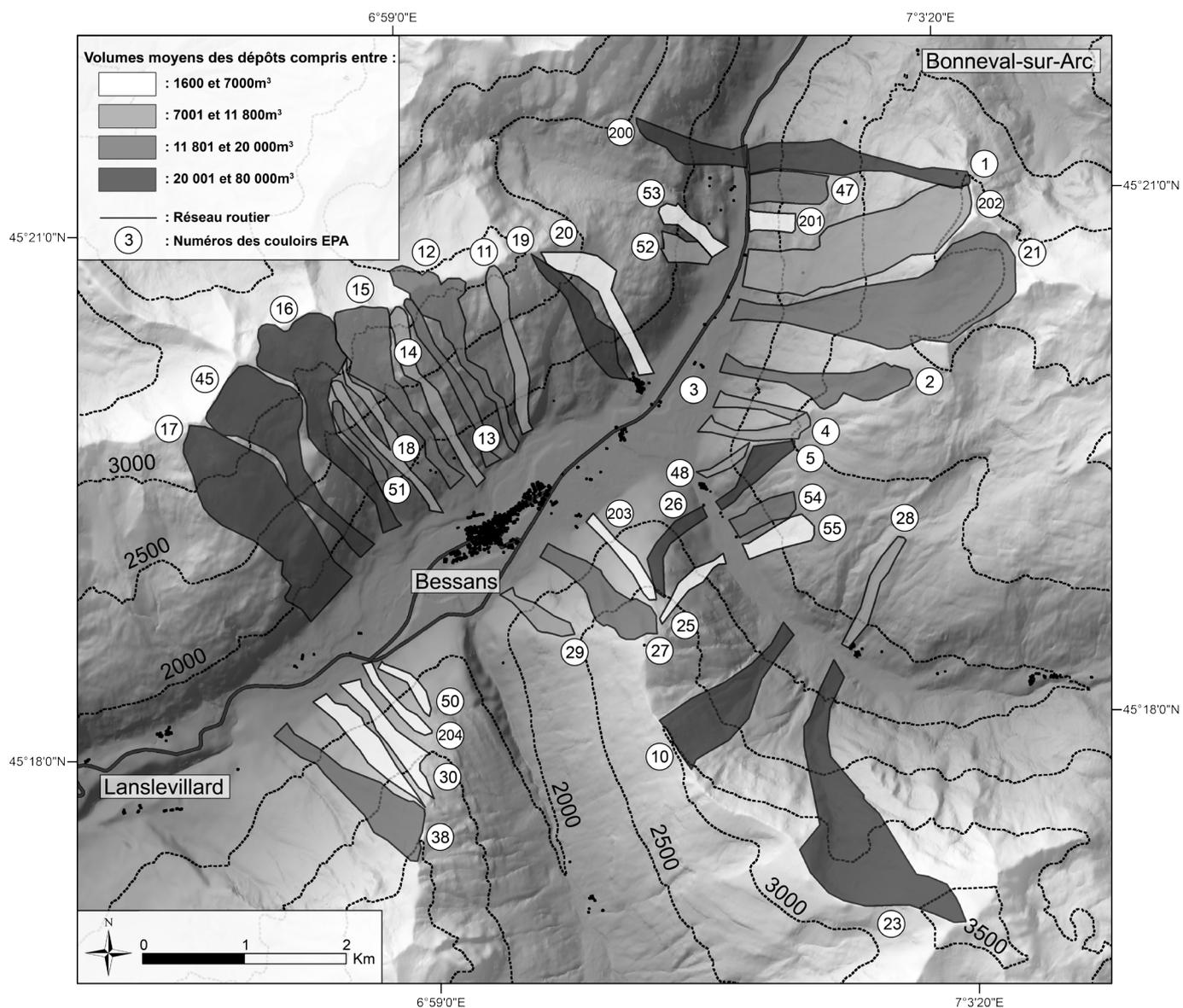


Fig. 6 - Carte de la localisation des couloirs EPA de Bessans en fonction des volumes moyens de dépôts.

Fig. 6 - Location map of the EPA Bessans corridors depending on average deposition volumes.

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. 6) selon leurs volumes moyens de dépôts présentés précédemment (tab. 4). Les relations sont significatives avec les variables descriptives des couloirs.

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

Tab. 3 - Corrélations entre les volumes des dépôts d'avalanches et les caractéristiques morphologiques des couloirs EPA de la commune de Bessans.

Tab. 3 - Correlations between avalanche deposition volumes and morphological characteristics of EPA corridors in the municipality of 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 |

Tab. 4 - Variables morphologiques moyennes des 4 classes de couloirs selon leurs volumes moyens de dépôts.

Tab. 4 - Mean morphological variables of the 4 corridor classes depending on their average deposition volumes.

| 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° |

couloirs sont importants. Par exemple, les couloirs qui produisent les volumes de dépôts moyens les plus importants (20 001 m³ à 80 000 m³) sont ceux situés en moyenne à 2 314 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. 4). 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 5. 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.

4.5. Relations entre les volumes de dépôts et la géomorphologie des couloirs

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

Tab. 5 - Volumes moyens des dépôts en fonction de l'orientation moyenne des couloirs.

Tab. 5 - Average deposition volumes depending on the average orientation of the corridors.

| 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 |

distinguant les dépôts de printemps et d'hiver (tab. 6).

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.

Tab. 6 - 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.

Tab. 6 - Correlations between avalanche deposition volumes and morphological characteristics of EPA corridors for the period November-February and March-May in the municipality of Bessans.

| | 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 (r) | 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 (P) | 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 (r) | -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 (P) | 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 |

5. Discussion, conclusion et perspective

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'avalanche 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 (Laternser 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 de l'écoulement.

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 (Naaïm et al., 2016).

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.

Références

- Ancey C., Gervasoni C., Meunier M. (2004)** - Computing extreme avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 39 (2-3), 161-180.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2004.04.004
- 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.
DOI : 10.1073/pnas.1716913115
- Bakkehöi S. (1987)** - Snow avalanche prediction using probabilistic method. *Avalanche formation, movement and effect*, IAHS, 162, 549-556.
- Bartelt P., McArdell B. W. (2009)** - Granulometric investigations of snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 55 (193), 829-833.
DOI : 10.3189/002214309790152384
- Birkeland K.W., Mock C.J., Shinker J.J. (2001)** - Avalanche extremes and atmospheric circulation patterns. *Journal of Glaciology*, 32, 135-140.
DOI : 10.3189/172756401781819030
- 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.
DOI : 10.5194/nhess-16-1205-2016
- 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.
DOI : 10.5194/cp-8-855-2012
- 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, 1673-1697.
DOI : 10.5194/tc-8-1673-2014
- 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 October 2010. 6 p.
- Durand Y., Giraud G., Laternser M. (2009)** - Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958-2005): climatology and trends for snow cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 2487-2512.
DOI : 10.1175/2009JAMC1810.1
- Eckert N., Parent E., Richard D. (2007)** - Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution. *Cold Regions Science and Technology*, 49, 88-107.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2007.01.005
- 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.
DOI : 10.1007/s00477-008-0287-6
- 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.
DOI : 10.1007/s10584-009-9718-8
- 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.
DOI : 10.1175/2010JCLI3312.1
- Eckert N., Deschâtres M., Bélanger L. (2010c)** - 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., 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.
DOI : 10.3189/2013JG12J091
- Eckerstorfer M., Christiansen H.H. (2011)** - Topographical and meteorological control on snow avalanching in the Longyearbyen area, central Svalbard 2006 - 2009. *Geomorphology*, 134, 186-196.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2011.07.001
- Faug T., Turnbull B., Gauer P. (2018)** - Looking beyond the powder/dense flow avalanche dichotomy, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 1183-1186.
DOI : 10.1002/2018JF004665
- Favier P., Eckert N., Bertrand D., Naaim M. (2014)** - Sensitivity of avalanche risk evaluation to vulnerability relations. *Cold Regions Science and Technology*, 108, 163-177.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2014.08.009
- Favier P., Eckert N., Faug T., Bertrand D., Naaim M. (2016)** - Avalanche risk evaluation and protective dam optimal design using extreme value statistics. *Journal of Glaciology*, 62 (234), 725-749.
DOI : 10.1017/jog.2016.64
- García-Hernández C., Ruiz-Fernández J., Sánchez-Posada C., Pereira S., Oliva M., 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.
DOI : 10.1016/j.gloplacha.2017.05.001
- Gaume J., Chambon G., Eckert N., Naaim M. (2012)** - Relative influence of mechanical and meteorological factors on avalanche release depth distributions: An application to French Alps. *Geophysical Research Letters*, L12401.
DOI : 10.1029/2012GL051917
- 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.
DOI : 10.3189/2013JG12J161
- Giacona F., Eckert N., Martin B. (2017)** - A 240-year history of avalanche risk in the Vosges Mountain based on non-conventional (re)resources. *Natural Hazards and earth System Sciences*, 17 (6), 887-904.
DOI : 10.5194/nhess-17-887-2017

- 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.
DOI : 10.1016/S0165-232X(03)00073-9
- 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 (1), 39-57.
DOI : 10.3406/morfo.1999.974
- Jomelli V., Bertran P. (2001)** - Wet snow avalanche deposits in the French Alps: structure and sedimentology. *Geografiska Annaler*, 83 (1-2), 15-28.
DOI : 10.1111/j.0435-3676.2001.00141.x
- Jomelli V., 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.
DOI : 10.1002/esp.1050
- 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.
DOI : 10.1023/B:CLIM.0000024700.35154.44
- Jomelli V., Brunstein D., Grancher D., Pech P. (2007)** - Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, 85 (1-2), 119-137.
DOI : 10.1007/s10584-006-9209-0
- 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*, 16, 1871-1883.
DOI : 10.1007/s10346-019-01195-7
- Kölher A., McElwaine J.N., Sovilla B. (2018)** GEODAR Data and the flows regimes of snow avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 1272-1294.
DOI : 10.1002/2017JF004375
- Laternser, M., & Schneebeli, M. (2002)** - Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland. *Natural Hazards*, 27 (3), 201-230.
DOI : 10.1023/A:10203273121719
- Laute K., 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.
DOI : 10.1016/j.geomorph.2013.06.006
- Mc Clung D.M., Tweedy, J. (1993)** - Characteristics of avalanching: Kootenay Pass, British Columbia. Canada. *Journal of Glaciology*, 39, 317-322.
DOI : 10.3189/S0022143000015975
- Mc Clung D.M., Gauer P. (2018)** - Maximum frontal speeds, alpha angles and deposit volumes of flowing snow avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, 153, 78-85.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2018.04.009
- Météo France (2018)** - Bilan climatique de l'hiver 2017-2018. Comprendre, tout savoir sur la météo, le climat et Météo-France. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2018>
- Mock C.J. (1995)** - Avalanche climatology of the continental zone in the southern Rocky Mountains. *Physical Geography*, 16, 165-187.
DOI : 10.1080/02723646.1995.10642548
- Mouglin P. (1922)** - Les avalanches en Savoie. Ministère de l'Agriculture, Direction Générale des Eaux et Forêts, Service des Grandes Forces Hydrauliques, 175-317.
- 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.
DOI : 10.1051/lhb/2016055
- Reuter B., van Herwijnen A., Veitinger J., Schweizer J. (2015)** - Relating simple drivers to snow instability. *Cold Regions Science and Technology*, 120, 168-178.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2015.06.016
- Schläppy R., Jomelli V., Grancher D., Stoffel M., Corona C., Brunstein D., Eckert N., Deschatres M. (2013)** - A New Tree-Ring-Based, Semi-Quantitative Approach for the Determination of Snow Avalanche Events: use of Classification Trees for Validation. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45 (3), 383-395.
DOI : 10.1657/1938-4246-45.3.383
- Schweizer J. (1999)** - Review of dry snow slab avalanche release. *Cold Regions Science and Technology*, 99, 43-57.
DOI : 10.1016/S0165-232X(99)00025-7
- Schweizer J., Bruce Jamieson J., Schneebeli M. (2003)** - Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 4, 1-24.
DOI : 10.1029/2002RG000123
- Smith M., McClung D. (1997)** - Avalanche frequency and terrain characteristics at Rogers' Pass, British Columbia, Canada. *Journal of Glaciology*, 43 (143), 165-171.
DOI : 10.3189/S0022143000002926
- Saporta G. (1990)** - Probabilités analyse des données et statistiques, Technip, 231 p.
- Steinkogler W., Sovilla B., Lehning M. (2014)** - Influence of snow cover properties on avalanches dynamics. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 121-131.
DOI : 10.1016/j.coldregions.2013.10.002
- Sovilla B., McElwaine J.N., Schaer M., Vallet J. (2010)** - Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurement from Vallée de la Sionne. *Journal of Geophysical Research*, 115, F02016.
DOI : 10.1029/2009JF001390.
- Sovilla B., McElwaine J.N., Louge M.Y. (2015)** - The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique*, 16, 97-104.
DOI : 10.1016/j.crhy.2014.11.005
- Yanlong W., Maoshuan H. (1992)** - An outline of avalanches in the South-Eastern Tibetan plateau, China. *Annals of Glaciology*, 16, 146-150.
DOI : 10.3189/1992AoG16-1-146-150

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. 1).

Data used, and particularly the volumes of deposits, are mainly from the EPA (Enquête Permanente des phénomènes Avalancheux) set up in 1898 (fig. 2). 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. 4). 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. 3). The variables related to size and elevation of the corridors principally influence deposit volumes (tab. 3–4). 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. 6). 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.