ESIT – Université Sorbonne Nouvelle

Mémoire de Traduction Anglais-Français

Prévision et évolution du risque d'avalanche

Aline BOURREAU

Mention : Traduction et interprétation
Parcours-type : Traduction éditoriale, économique et technique (TEET)

Sous la direction de Madame Freddie PLASSARD
Session de septembre 2022

CC BY NC ND

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier ma directrice de mémoire, Mme Freddie Plassard, pour sa disponibilité et ses conseils avisés, qui m'ont aiguillée dans ce travail de rédaction et de traduction et me seront utiles dans ma pratique professionnelle.

Je remercie chaleureusement Pascal Hagenmuller, responsable de l'équipe de recherche « Matériau Neige » au Centre d'études de la neige (CEN) de Grenoble, unité du Centre national de recherches météorologiques (CNRM) pour avoir accepté d'être le spécialiste-référent de mon mémoire. Il a su prendre le temps de répondre à mes questions terminologiques et techniques avec clarté et précision.

J'adresse également mes remerciements à Bastien, ami de longue date et ingénieur spécialisé dans les structures bois, qui a pris le temps de relire mes propositions de traduction pour les termes d'analyse statistique.

Merci aussi à Daniel Gondouin, traducteur technique chez qui j'ai eu la chance d'effectuer un stage en mai et juin 2021. Les clés qu'il m'a données pour aborder la traduction technique m'ont été précieuses pour l'élaboration de ce mémoire.

SOMMAIRE

PARTIE I : EXPOSÉ **0**

Introduction *1*

1. Neige et avalanches *5*
1.1. Cristaux, grains et manteau neigeux 5
1.1.1. La formation de la neige dans l'atmosphère 5
1.1.2. La transformation de la neige au sol 9
1.2. Caractéristiques des avalanches 15
1.2.1. Les avalanches de neige récente 17
1.2.2. Les avalanches de neige humide 18
1.2.3. Les avalanches de plaque 19

2. Prévision et évolution du risque d'avalanche *24*
2.1. Outils et méthodes de prévision 25
2.1.1. L'estimation du risque d'avalanche 26
2.1.2. La communication du risque d'avalanche 31
2.2. Évolution du risque d'avalanche 37
2.2.1. La constitution de longues séries temporelles 37
2.2.2. L'étude récente des répercussions du changement climatique sur l'activité avalancheuse 40

Conclusion *42*

PARTIE II : TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION **43**

PARTIE III : STRATÉGIE DE TRADUCTION **93**

1. Présentation du texte support *93*

2. Outils utilisés *95*

3. Problèmes de traduction *96*
3.1. Terminologie de spécialité 96
3.1.1. Adaptation de la terminologie de taille des avalanches à la réalité nord-américaine 97
3.1.2. Traitement du français canadien 100
3.1.3. Traitement de la synonymie 101
3.1.4. Terminologie statistique 102
3.1.5. Terminologie nivo-météorologique 106
3.2. Reformulation 107
3.2.1. Traduction du titre 107
3.2.2. Syntaxe anglaise 109
3.2.3. Concordance des temps 110
3.2.4. Qualité rédactionnelle 110

Conclusion *113*

PARTIE IV : ANALYSE TERMINOLOGIQUE **114**

1. Fiches terminologiques *114*

2. Glossaire _____ *126*

3. Lexique _____ *133*
3.1. Lexique français-anglais _____ 133
3.2. Lexique anglais-français _____ 141

PARTIE V : BIBLIOGRAPHIE CRITIQUE SÉLECTIVE _____ 147

1. Sources de langue anglaise _____ *147*
1.1. Articles scientifiques _____ 147
1.2. Sources multimédia _____ 150
1.3. Documents institutionnels _____ 152

2. Sources de langue française _____ *153*
2.1. Ouvrages _____ 153
2.2. Articles scientifiques _____ 154
2.3. Sources multimédia _____ 156

INDEX _____ 158

PARTIE I : EXPOSÉ

Avertissement au lecteur

Afin de faciliter la lecture du présent exposé, les termes faisant l'objet d'une **fiche terminologique** sont signalés en gras avec la lettre F en exposant suivie du numéro de la **fiche**$^{\mathbf{Fn}}$, tandis que ceux intégrés au glossaire sont, à leur première occurrence pertinente, soulignés et signalés par un astérisque*****.

Les pages de gauche sont réservées aux figures et tableaux, les pages de texte sont celles de droite.

Les notes de bas de page indiquent la référence exacte d'une source citée ou consultée pour développer une notion.

Introduction

Le dictionnaire Le Robert définit le risque[1] comme un *« danger éventuel plus ou moins prévisible »*, l'*« éventualité d'un événement qui peut causer un dommage »*, ou encore le *« fait de s'exposer à un danger (dans l'espoir d'obtenir un avantage) »*. De cette définition ressort l'ambivalence même du terme, selon laquelle l'exposition au risque peut être choisie ou subie. Dans le cadre de notre étude, il convient d'envisager et d'englober les deux cas de figure, de l'individu qui décide de pratiquer une activité de plein air en ayant plus ou moins conscience du risque auquel il s'expose, ou des pouvoirs publics qui, sur certains territoires comme les communes ou les infrastructures routières, assurent un devoir de protection envers les biens et les personnes.

Selon la définition donnée par Christophe Ancey dans l'ouvrage de référence[2] en nivologie* dont il a coordonné la rédaction, une avalanche* est *« un écoulement gravitaire rapide de neige. C'est un phénomène naturel qui consiste en un déplacement d'une masse importante de neige (par opposition à une coulée de neige) à des vitesses dépassant le mètre par seconde […]. L'ordre de grandeur de la masse est le millier de tonnes, celui du volume est le millier de m^3. La dénivelée* se mesure en centaine de mètres. »* Elle *« se déclenche lorsque la force proportionnelle au poids de la couche de neige, qui a tendance à faire glisser la neige vers le bas, est supérieure à la force qui résulte du frottement et de la cohésion du manteau neigeux* »*[3]. Il s'agit d'un aléa qui, selon son ampleur et sa localisation, peut constituer une menace pour les personnes, les habitations et les voies de communication présentes sur le trajet de l'avalanche.

Une avalanche est impossible à prédire tant les facteurs qui entrent en compte dans le déclenchement sont nombreux et complexes. Toutefois, il est possible de déterminer les probabilités de déclenchement dans une zone déterminée. Le risque d'avalanche correspond donc à une estimation, pour une période et une zone déterminées, de la facilité avec laquelle un événement

[1] *Risque - Définitions, synonymes, conjugaison, exemples | Dico en ligne Le Robert*, https://dictionnaire.lerobert.com/definition/risque, consulté le 4 février 2022.
[2] C. Ancey, *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Edisud., 1998, p. 323.
[3] N. Mayer, *Comment se déclenche une avalanche ?*, https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/meteorologie-declenche-avalanche-6148/, consulté le 7 janvier 2022.

avalancheux pourrait se produire. En Europe, les nivologues-prévisionnistes tentent d'harmoniser la communication de cette estimation en utilisant une échelle européenne de risque d'avalanche[4], dont s'inspire l'échelle nord-américaine.[5] Ces échelles, qui sont le résultat de travaux de recherche, sont régulièrement adaptées pour être les plus fiables et lisibles possible.

Le dictionnaire Le Robert définit la prévision[6] comme l'*« action de prévoir, [la] connaissance de l'avenir »*, ou comme *« ce qu'on croit être dans l'avenir, [une] opinion formée par le raisonnement sur les choses futures »*. La prévision du risque d'avalanche est assurée au niveau départemental par les prévisionnistes-nivologues de Météo France. Elle est le fruit d'observations nivologiques et météorologiques de terrain et du recours à des modèles numériques. La prévision ne doit pas être confondue avec la prévention, qui, bien qu'intimement liée à la prévision dans la pratique, est une notion distincte que nous nous contenterons de définir ici mais dont nous ne traiterons pas dans cette étude. La prévention peut consister en la fermeture temporaire d'un axe routier ou ferroviaire, de l'évacuation d'une zone particulièrement menacée, de déclenchements artificiels d'avalanches, ou encore d'ouvrages de défense permanents (ouvrages de déviation, de freinage ou d'arrêt).[7] Les verbes associés à ces deux substantifs sont d'ailleurs parlants puisque la prévision tend à prévoir, en l'occurrence à émettre un bulletin permettant aux acteurs concernés de prendre des décisions en connaissance de cause, tandis que la prévention vise à prévenir, c'est-à-dire à prendre des mesures de réduction du risque (ouvrage de protection, déclenchement préventif d'avalanche par explosif, évacuation ou interdiction d'accès à certaines infrastructures, etc.).

Toutefois, la prévision ne se limite pas à l'émission d'un bulletin d'estimation du risque d'avalanche. En effet, d'une part, le manteau neigeux se forme et se transforme tout au long de la saison d'hiver, c'est donc l'ensemble de l'évolution des conditions météorologiques et nivologiques qui doivent être étudiées pour pouvoir estimer le risque d'avalanche. D'autre part, certains couloirs*

---

[4] *Échelle de risque d'avalanche 2019 - Anena*, https://www.anena.org/8912-echelle-de-risque-d-avalanche-et-nouveaux-pictogrammes.htm, consulté le 23 février 2022.

[5] G. Statham et al., « The North American Public Avalanche Danger Scale », *2010 International Snow Science Workshop*, 2010, p. 117- 123.

[6] *Le Grand Robert de la langue française*, https://grandrobert-lerobert-com.ezproxy.univ-paris3.fr/robert.asp, consulté le 23 février 2022.

[7] *Rapport n°1540 sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France*, https://www.assemblee-nationale.fr/rap-oecst/risque/R1540-03.asp, consulté le 10 février 2022.

où des avalanches se produisent avec régularité ont été identifiés et cartographiés. L'étude sur le long terme de ces cartes permet d'identifier certaines tendances relatives à l'évolution du risque d'avalanche, et notamment des variations liées au réchauffement climatique ces quarante dernières années, susceptibles de modifier la nature et l'ampleur des avalanches.

Nous donnerons dans une première partie des éléments de définition relatifs à la neige et aux avalanches, puis aborderons dans une seconde partie les méthodes utilisées pour assurer la prévision du risque d'avalanche et en étudier l'évolution.

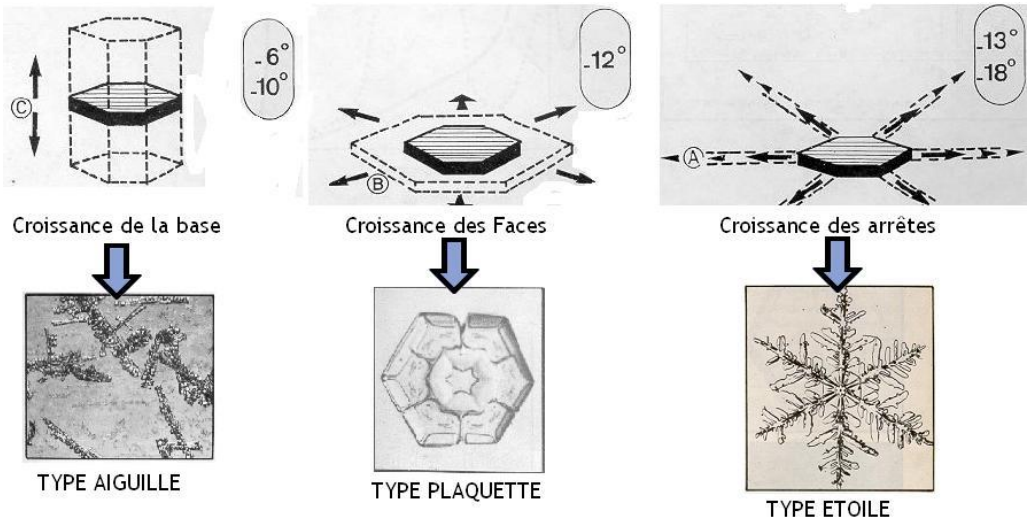


Figure 1 : Directions privilégiées de la croissance des germes de glace en fonction de la température de l'air[8]

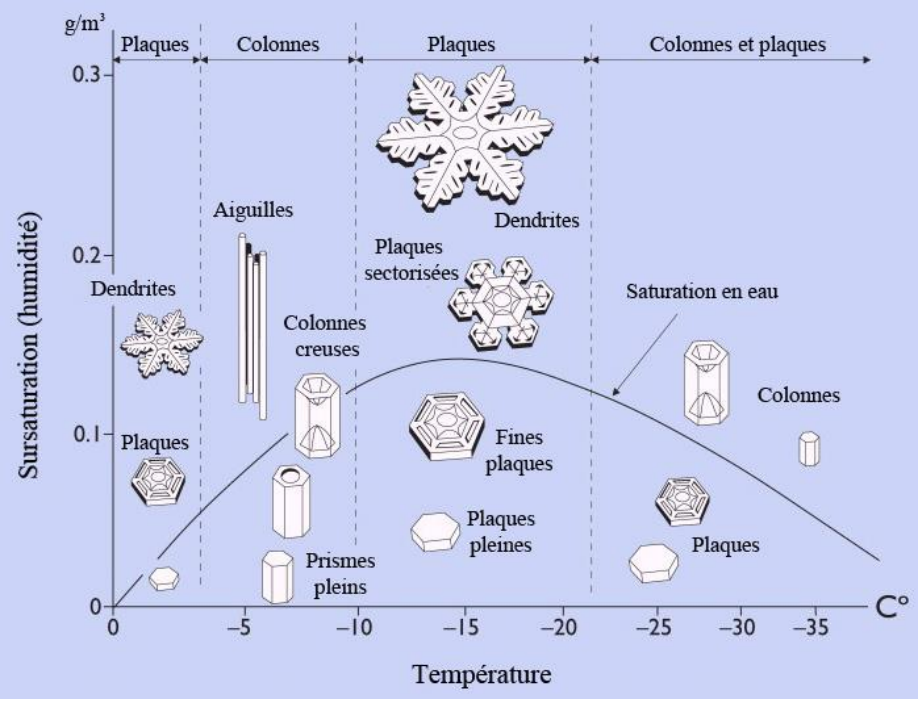


Figure 2 : Classification des cristaux de glace en fonction de la saturation en eau et de la température en °C[9]

[8] *La neige de culture : formation et fonctionnement à Valloire*, http://www.ski-valloire.net/dossier/neige.php, consulté le 31 mars 2022.

[9] *Forme des cristaux de neige et origine des avalanches*, https://www.di.ens.fr/~granboul/enseignement/formes/cristauxneige/, consulté le 3 février 2022.

1. Neige et avalanches

Une avalanche est, par définition, un écoulement gravitaire de neige. Il convient donc de retracer le parcours de la neige, de sa formation à la constitution d'un manteau neigeux, avant d'aborder le phénomène avalancheux.

1.1. Cristaux, grains et manteau neigeux

Le manteau neigeux est un empilement de plusieurs strates correspondant à différentes chutes de neige. La neige qui compose ces différentes couches va varier selon les conditions rencontrées au moment de sa chute (1.1.1.), mais aussi une fois au sol, selon divers paramètres mécaniques et physiques (1.1.2.).

Le terme de « cristal » désigne les cristaux de glace individuels qui s'agglomèrent pour composer la neige fraîche. On parle de cristaux de neige dès lors qu'ils ont amorcé leur chute. La neige au sol va ensuite être regroupée en différentes catégories de « grains de neige » (voir Figures 6 et 10).

1.1.1. La formation de la neige dans l'atmosphère

La vapeur d'eau présente dans les nuages va se condenser autour d'impuretés, pour former des « noyaux de congélation en suspension [qui] permettent alors le développement de cristaux de glace élémentaires, appelés germes, qui vont croître en respectant une symétrie hexagonale »[10]. Ces germes de glace vont prendre différentes formes selon le taux d'humidité et la température (voir Figures 1 et 2).

[10] C. Ancey, *op. cit.*, p. 49.



Figure 3 : Photographie de grains de neige roulée[11]



Figure 4 : Photographie du givre de surface[12]

[11] *Nivologie - Connaissances de base - Anena*, https://www.anena.org/5292-nivologie-connaissances-de-base.htm, consulté le 3 février 2022.

[12] *Givre de surface - Centre National de Recherches Météorologiques*, https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article464, consulté le 17 mai 2022.

On considère généralement que :

- une température comprise entre -6 et -10°C favorise la croissance des bases ou grandes faces des cristaux, conduisant à la formation de colonnes ou d'aiguilles ;
- une température comprise entre -10 et -12°C favorise la croissance des petites faces, conduisant à la formation de plaquettes ;
- des températures encore plus froides favorisent le développement des arêtes, conduisant à la formation d'étoiles, famille la plus caractéristique avec ses six branches également appelées dendrites.

Au sein des nuages, la température fluctue et la structure des cristaux de glace qui se forment est souvent une combinaison des trois processus précédemment décrits. Dès que leur masse compense la pesanteur et les turbulences rencontrées au sein du nuage, ces cristaux chutent, isolément ou soudés en légers flocons de neige. Si la température au sol est négative, les cristaux de neige vont s'y déposer et tenir entre eux par une cohésion de feutrage*. Cette cohésion par imbrication des branches des cristaux est faible et dure rarement longtemps, elle ne concerne donc que la neige fraîche poudreuse. À ce stade, les cristaux se sont déjà « abimés » au contact des autres. On ne parle alors plus d'aiguilles, de colonnes ni d'étoiles mais de particules reconnaissables puisqu'il reste possible d'identifier le type de croissance qu'ils ont suivi.

Les cristaux de neige peuvent néanmoins dès leur chute subir des transformations sous l'effet du vent et des températures rencontrées. Des températures positives engendrent un début de fonte des cristaux qui perdent alors leur forme initiale. De même, si le vent souffle, ils s'entrechoquent et sont défigurés. Les grains ayant perdu leur structure dendritique sont plus proches les uns des autres et se soudent entre eux par frittage (voir cohésion de frittage, 1.1.2.).

Neige fraiche	Particules reconnaissables	Grains ronds	Grains à faces planes	Gobelets	Grains fins
					

Figure 5 : Photographie des différents types de grains de neige[13]



Figure 6 : Représentation symbolique des différents types de grains[14]

[13] « Nivologie - Connaissances de base - Anena », art. cit.

[14] F. Cabot, *Neige et avalanches, Connaître et comprendre pour limiter le risque*, Glénat, Grenoble, 2020, rabat couverture.

Outre les trois principales familles de cristaux susmentionnées, la neige roulée* constitue un cas particulier (voir supra Figure 3). Elle ne se forme pas par condensation de la vapeur d'eau, mais par congélation, au contact des cristaux de glace, de gouttelettes d'eau liquide surfondue qui demeurent à l'état liquide alors même que la température est inférieure à la température de congélation.

Le givre de surface*, qui ne tombe pas du ciel mais se forme à la surface du manteau neigeux par nuit froide et humide, constitue une autre exception (voir supra Figure 4).

1.1.2. La transformation de la neige au sol

Si la neige subit des transformations avant même de toucher le sol, le manteau neigeux évolue ensuite jusqu'à sa fonte sous l'effet de facteurs mécaniques (tels que la masse de la neige ou le vent), ou encore physiques (thermodynamiques, on parle de **métamorphisme**[F4]). L'influence respective de ces facteurs sur l'évolution du manteau varie selon que la neige au sol est sèche (l'eau y est présente uniquement sous forme solide et gazeuse), humide ou mouillée (présence d'eau liquide dans le manteau). Selon les conditions rencontrées, les grains qui constituent le manteau neigeux prennent différentes formes et leur cohésion varie (voir Figures 5 et 6).

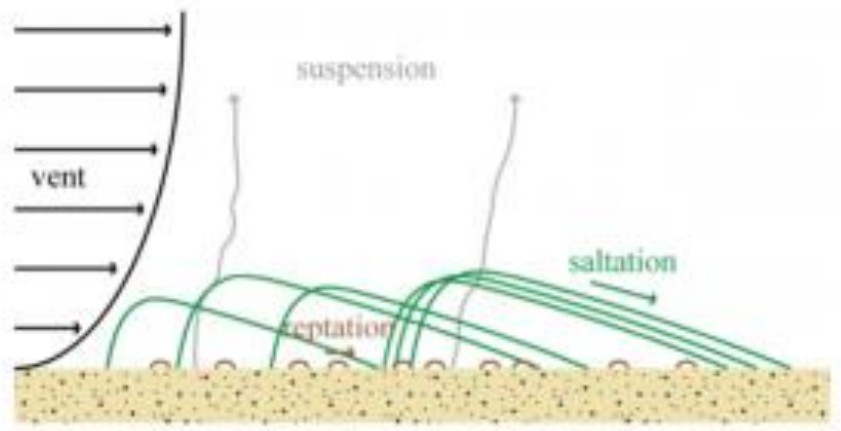


Figure 7 : Représentation schématique du transport des particules par le vent[15]

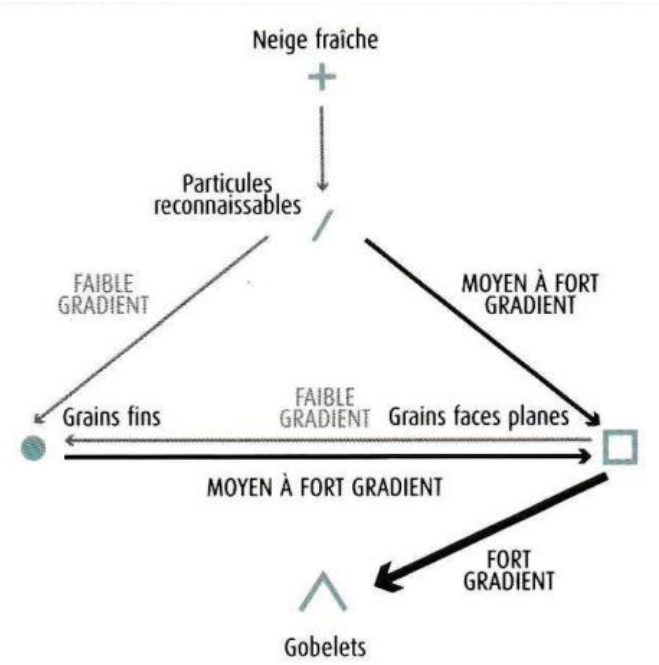


Figure 8 : Schéma illustrant le métamorphisme de neige sèche[16]

[15] *L'activité éolienne: transport (suspension, saltation, reptation)*, https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_planetologie-surface/erosioneolienne3.html, consulté le 17 mai 2022.

[16] F. Cabot, *op. cit.,* rabat couverture.

La neige fraîche sèche a une masse volumique faible. Les grains tiennent entre eux par une cohésion de feutrage par définition assez faible, et peuvent donc être facilement transportés sous l'action du vent (voir Figure 7). Lorsque le vent souffle juste assez fort pour que les premiers centimètres de neige à la surface soient transportés, il y a **reptation**[F5]. Lorsque le vent forcit, les particules sont éjectées puis retombent et en éjectent alors d'autres, il s'agit du phénomène de saltation*. Les particules transportées par le vent se cassent et les grains restants, qualifiés de grains fins, se soudent au niveau de leurs points de contact par un pont de glace*. Se crée alors une cohésion de frittage* bien plus forte que la cohésion de feutrage. Si le vent souffle encore plus fort, on parlera d'une diffusion turbulente* qui va mettre en suspension les particules transportées, et causer la sublimation (passage de l'état solide à l'état gazeux) d'une partie d'entre elles.

Outre l'influence des facteurs mécaniques, la neige sèche subit des transformations liées au gradient de température du manteau neigeux. Il s'agit du métamorphisme de neige sèche* (voir Figure 8). En effet, si la température de la base du manteau neigeux (en contact direct avec le sol) est de 0°C, celle de la surface peut être bien plus basse. Le calcul du gradient de température prend également en compte l'épaisseur du manteau. Si la température varie fortement au sein du manteau, on parle de métamorphisme de fort gradient, tandis que pour une température relativement homogène, ou qui varie assez peu sur un manteau épais, on parle de métamorphisme de faible gradient. Les échanges de matière entre les grains varient selon le gradient de température. Un métamorphisme de faible gradient conduit, comme l'action du vent, à la formation de grains fins soudés entre eux par frittage.

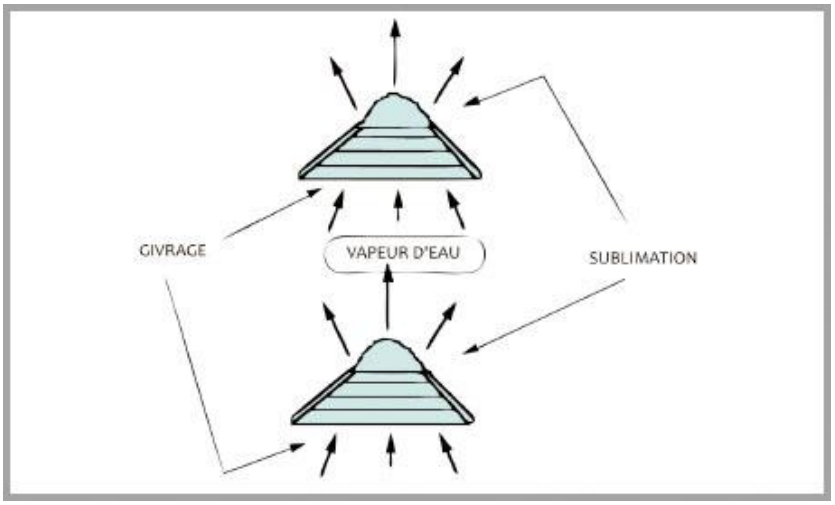


Figure 9 : Échanges de matière à l'échelle du grain de neige lors d'un métamorphisme de moyen à fort gradient[17]

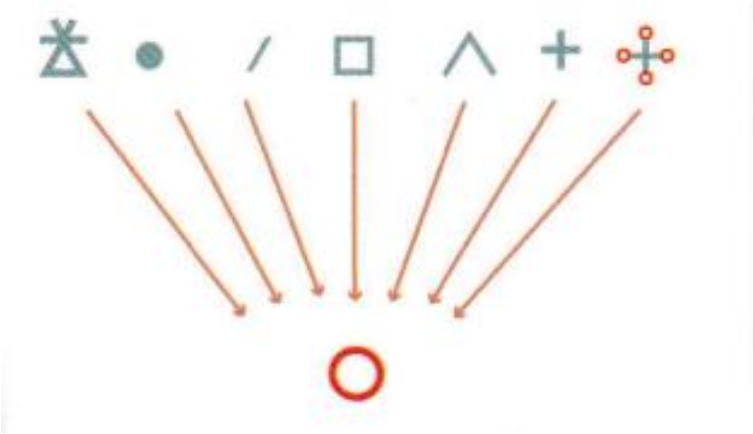


Figure 10 : Schéma illustrant le métamorphisme de neige humide[18]

[17] *Les métamorphoses de la neige - Anena*, https://www.anena.org/7158-les-metamorphoses-de-la-neige.htm, consulté le 4 février 2022.
[18] F. Cabot, *op. cit.,* rabat couverture.

Sous un métamorphisme de moyen à fort gradient, les transferts de vapeur (eau présente à l'état gazeux) conduisent à la croissance de la base de chaque grain par condensation solide de la vapeur d'eau provenant du grain inférieur (voir Figure 9). Les particules reconnaissables et les grains fins évoluent alors en grains à faces planes*, une catégorie de grains anguleux* qui, par leur taille et leur forme, constituent une couche peu cohésive laquelle, une fois enfouie au sein du manteau, va constituer une redoutable couche fragile. Néanmoins, ce phénomène est réversible, des grains à faces planes à nouveau soumis à un métamorphisme de faible gradient peuvent évoluer en grains fins. Ce n'est pas le cas des gobelets*, une autre catégorie de grains anguleux qui se forment en surface du manteau par fort gradient et résistent au métamorphisme de faible gradient. Une couche de gobelets recouverte d'autres strates de neige va constituer une couche fragile persistante, qui ne pourra évoluer que par humidification : on parle alors de métamorphisme de neige humide*.

Un métamorphisme de neige humide ou métamorphisme de fonte* advient lorsqu'il y a un apport d'eau à l'état liquide dans le manteau, lors d'un événement pluvieux ou par une hausse des températures. Tout type de grain qui le subit évolue en grain rond*, dernier stade d'évolution de la neige, irréversible avant la fonte (voir Figure 10). La cohésion d'une couche de neige humide varie en fonction de la teneur en eau liquide* (TEL) du manteau. Peu d'eau dans le manteau signifie une bonne cohésion par capillarité* entre les grains ronds. Néanmoins, au-delà d'une certaine quantité, les grains vont perdre toute cohésion et « flotter » entre eux. La fragilité de cette couche peut conduire à une avalanche de neige humide ou mouillée, aussi appelée avalanche de fonte (voir 1.2.2.).

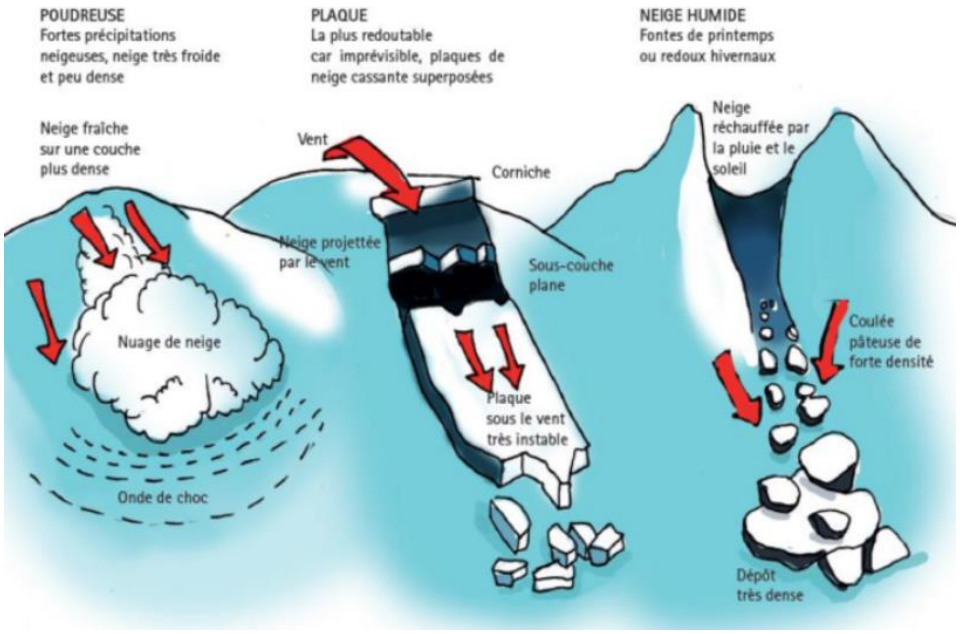


Figure 11 : Illustration des trois grandes catégories d'avalanches généralement retenues[19]

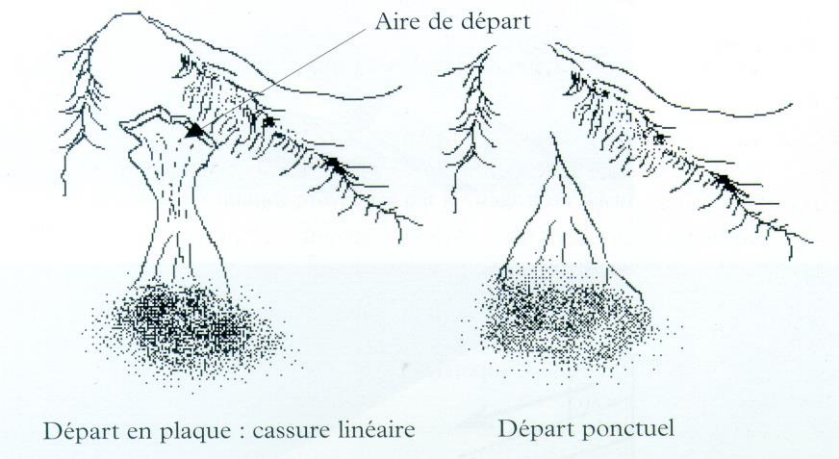


Figure 12 : Schéma des deux types de départs d'avalanche les plus communs[20]

[19] *Les avalanches*, https://paysgrandbrianconnais.fr/girn/les-risques-naturels-en-montagne/titre-par-defaut, consulté le 5 avril 2022.

[20] École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications, Toulouse, https://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9900/travaux/optsee/bei/g11/pa03.htm, consulté le 11 avril 2022.

Ainsi, les conditions météorologiques influent profondément sur les évolutions de la neige et participent à la production d'événements avalancheux aux dynamiques variées.

1.2. Caractéristiques des avalanches

Catégoriser les avalanches n'est pas chose aisée puisque les critères utilisés permettant de les distinguer sont hétérogènes et variables. Diverses classifications des avalanches ont pu être établies selon :

- le type de départ : ponctuel (écoulement en poire ou en cône) ou en cassure linéaire* (caractéristique des avalanches de plaque*) ;
- les conditions de déclenchement : spontané (lié à la déclivité, au poids de la neige, à la pluie, au redoux ou au rayonnement solaire) ou provoqué (passage d'un animal, d'un skieur, déclenchement préventif) ;
- le type de neige mobilisée : neige sèche, plaque dure ou neige humide ;
- le mode d'écoulement : avalanche en aérosol, avalanche coulante ou avalanche mixte.

Pour décrire plus en détail trois grands types d'avalanches, nous retiendrons ici la catégorisation par type de neige mobilisée retenue par Météo France, acteur majeur de la prévision du risque d'avalanche. On distingue les avalanches de neige récente, les avalanches de neige humide et les avalanches de plaque, qui sont les plus difficiles à prévoir et donc les plus piégeuses pour les pratiquants d'activités de montagne.

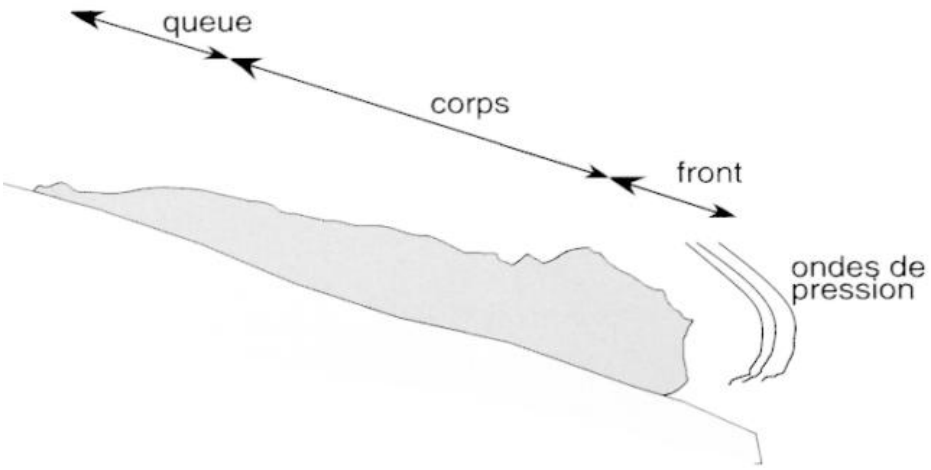


Figure 13 : Les différentes parties d'une avalanche durant sa phase d'écoulement[21]

[21] C. Ancey, *op. cit.*, p. 92.

1.2.1. Les avalanches de neige récente

Parler d'avalanche de neige récente comme le fait Météo France peut porter à confusion, car une chute de neige humide est également une chute de neige récente, mais qui humidifie le manteau neigeux et peut donner lieu à une avalanche de neige humide. À des fins de classification, on entend par avalanche de neige récente une avalanche de neige sèche (TEL = 0) peu cohésive. On parle également d'avalanche de neige poudreuse dans la mesure où elle contient beaucoup d'air. Ces avalanches se déclenchent après des chutes de neige dans certaines pentes où la faible cohésion de feutrage entre les grains (particules reconnaissables), n'est pas suffisante pour contrebalancer le poids de la neige. Elles sont fonction de l'inclinaison de la pente et de la quantité de neige tombée. Si la chute de neige s'accompagne de vent, il y a moins d'avalanches de neige récente mais davantage d'accumulations dangereuses sous le vent (formation de corniche) favorisant une cohésion de frittage qui, sous certaines conditions, peut conduire à de redoutables avalanches de plaque (voir 1.2.3.). Les départs des avalanches de neige récente sont ponctuels ou en plaques friables. Ils sont parfois mixtes avec un départ ponctuel mobilisant d'abord un certain volume de neige qui peut constituer une surcharge de nature à causer une rupture de plaque si la neige en contrebas est plus cohésive.

Lorsqu'elles mobilisent un gros volume de neige sèche, ces avalanches peuvent parcourir de grandes distances et atteindre des vitesses très importantes dépassant les 200 km/h. Elles s'accompagnent alors d'une onde de surpression aux effets destructeurs, on parle du souffle de l'avalanche* ou de vent d'avalanche (voir Figure 13). L'avalanche a alors une partie « coulante » avec un écoulement dense proche du sol, et une partie aérienne, un nuage de particules de neige. Dès lors, le dépôt* de l'avalanche n'est pas net et, en l'absence de dégâts matériels, il est parfois difficile de l'identifier.

Ces avalanches de neige récente peuvent soit partir spontanément, soit être provoquées, par le passage d'un skieur ou d'un animal, ou déclenchées de manière artificielle par les services des pistes des stations de ski qui utilisent des explosifs pour purger les pentes menaçant leur domaine skiable. On parle généralement de départ spontané et de déclenchement provoqué.

1.2.2. Les avalanches de neige humide

La neige humide est constituée de grains ronds qui adhèrent les uns aux autres par capillarité. Si la teneur en eau liquide dans le manteau reste assez faible, cette cohésion peut être bonne, voire excellente si cette neige humide subit un fort refroidissement à la suite duquel la neige en surface prend alors la forme d'une croûte de glace, appelée **croûte de regel**[F3]. Il s'agit d'un phénomène très fréquent au printemps avec une alternance de refroidissement nocturne et de réchauffement diurne. Lorsque les skieurs hors-piste descendent au bon moment, c'est-à-dire sur une neige qui n'est pas « béton » mais qui ne s'est pas trop ramollie au point d'être « soupe », ils parlent d'une neige « moquette » qui a « décaillé ». Toutefois, en cas de réchauffement important ou si la pluie vient imbiber le manteau, la masse volumique et la teneur en eau liquide de ce dernier vont augmenter jusqu'à saturation. Une fois la capacité de rétention d'eau de la couche dépassée, une avalanche de neige humide est susceptible de se déclencher si les conditions topographiques sont réunies pour permettre son écoulement.

Ces avalanches de neige humide peuvent, selon les cas, partir en poire ou en cassure linéaire et, selon la distance qu'elles parcourent, causer de nombreux dégâts sur leur passage et bloquer des axes de communication. En effet, les volumes de neige mobilisés, de masse volumique importante, sont parfois considérables. L'avalanche de neige humide qui s'est produite sur le domaine skiable de la station de Saint François Longchamp (Savoie) en mars 2012 et qui a littéralement « plié » le pylône d'un télésiège en constitue un bon exemple.

Lorsqu'une avalanche mobilise l'ensemble du manteau neigeux, il s'agit d'une **avalanche de fond**[F1]. Ces avalanches, qui emportent avec elles l'intégralité du manteau neigeux de la saison, ont souvent lieu au printemps, quand le sol comme la neige se sont réchauffés. Elles sont également parfois qualifiées d'**avalanches de glissement**[F2] (bien qu'il existe une nuance entre les deux termes, souvent ignorée des pratiquants et des professionnels, voir fiches terminologiques correspondantes), on désigne alors l'origine physique de l'avalanche. On parle également de plaques de fond lorsque la neige mobilisée part sous la forme de plaques (neige suffisamment cohésive). Les avalanches de plaque sont souvent les plus délicates à prévoir, tant sur le terrain pour les pratiquants de sports de montagnes qu'en amont pour les prévisionnistes. Il s'agit donc de la troisième et dernière catégorie d'avalanches que nous définirons ici.

1.2.3. Les avalanches de plaque

Nous avons pu voir en présentant la transformation de la neige au sol que certains grains sont plus cohésifs que d'autres. La cohésion varie donc au sein du manteau neigeux, composé de diverses couches de neige plus ou moins denses et solidaires les unes des autres. Une couche de neige peu cohésive constitue une couche fragile*. Toutefois, la présence en surface ou au sein du manteau d'une couche fragile ne suffit pas pour qu'une avalanche se déclenche, d'autres paramètres parmi lesquels les caractéristiques topographiques et les conditions météorologiques entrent en compte, d'où le minutieux travail des prévisionnistes.

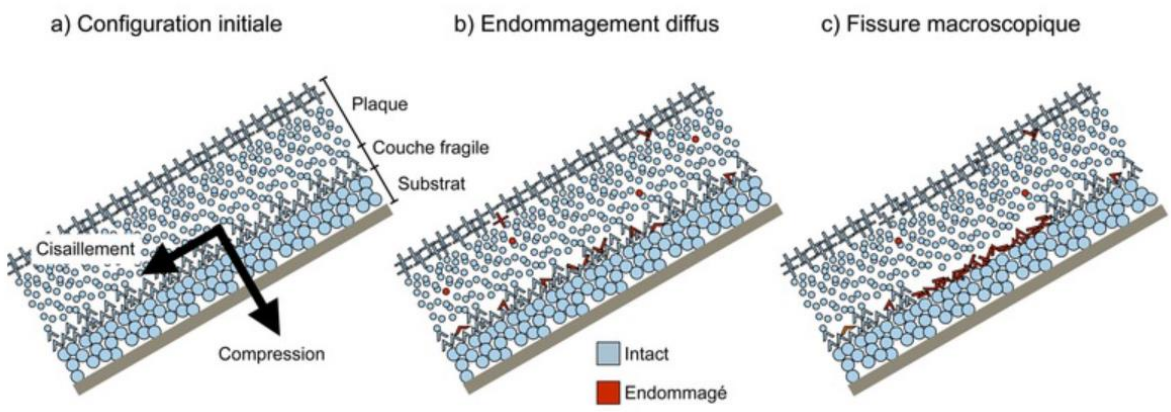


Figure 14 : Dynamique d'une avalanche de plaque, initiation d'une rupture dans la couche fragile[22]

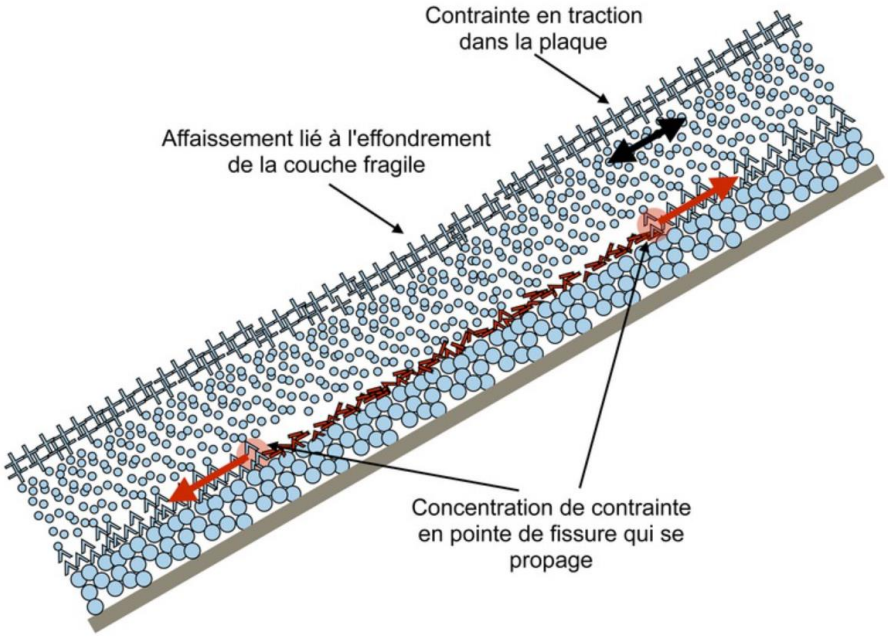


Figure 15 : Propagation d'une rupture dans la couche fragile[23]

[22] *Le déclenchement des avalanches de plaque*, https://www.skipass.com/news/174631-le-declenchement-des-avalanches-d.html, consulté le 5 avril 2022.
[23] *Ibid.*

Trois éléments sont nécessaires pour qu'une plaque se déclenche :

- une pente à plus de 30° dans la zone de départ de la plaque (pour les pentes inférieures à 30°, une rupture peut se produire mais sans que la force de traction soit suffisamment importante pour entraîner une plaque, tandis qu'au-delà de 45°, les pentes se purgent d'elles-mêmes au moment des chutes de neige) ;
- une couche fragile enfouie (faces planes, gobelets, givre de surface enfoui, grains ronds avec une humidification de la couche telle qu'il n'y a plus de cohésion par capillarité, etc.) au sein de laquelle une rupture va s'amorcer ;
- au-dessus de la couche fragile, une couche suffisamment cohésive (frittage) pour permettre la propagation de la rupture de la couche fragile, puis ouvrir une cassure sommitale qui va se propager ensuite sur toute la largeur de la plaque.[24]

Le manteau neigeux est à l'équilibre lorsque les forces auxquels il est soumis s'annulent, lorsque la force de cohésion et les frottements avec le sol viennent compenser la composante tangentielle liée au poids du manteau, aussi appelée contrainte de cisaillement. Cet équilibre, qui varie selon la déclivité, les ancrages au sol, le type et la quantité de neige, peut être rompu par une surcharge progressive (chute de neige, humidification et donc alourdissement du manteau par exemple), ou soudaine (chute d'un sérac, passage d'un animal). La perte de cet équilibre va se matérialiser par une série de ruptures mécaniques dans le manteau neigeux qui peuvent être décomposées en trois étapes menant au départ d'une plaque :

- l'amorce d'une rupture dans une couche fragile sous une plaque relativement cohésive (voir Figure 14) ;
- la propagation de cette rupture dans la couche fragile (voir Figure 15). Lorsqu'un pont rompt entre deux grains de neige, la contrainte à laquelle sont soumis les ponts voisins augmente, avec pour conséquence de nouvelles ruptures de proche en proche ;
- la rupture en traction de la plaque et le glissement de la plaque dans la pente (voir Figure 16).

[24] F. Cabot, *op. cit.*, p. 128-131.

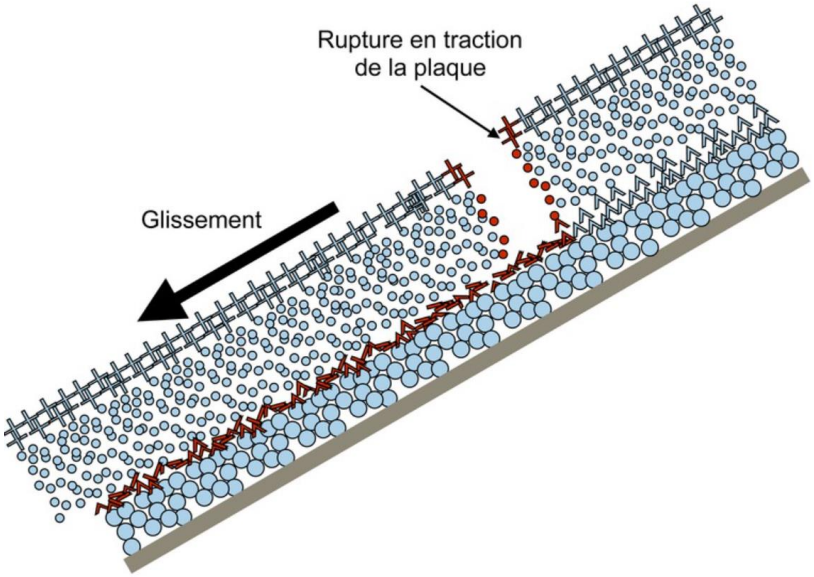


Figure 16 : Rupture en traction de la plaque et glissement dans la pente[25]

[25] « Le déclenchement des avalanches de plaque », *art. cit.*

Une fois ces distinctions opérées, il reste essentiel de garder à l'esprit que les frontières entre catégories d'avalanches sont poreuses. Le phénomène avalancheux étant lié à des facteurs nivo-météorologiques et topologiques variables, aucune des différentes classifications ne permet de recouvrir tous les types d'avalanches susceptibles de se produire. Comme le dit de manière avisée Christophe Ancey, il ne faut pas vouloir « conformer le réel à son vocabulaire »[26], car un « vocabulaire mal adapté peut fausser la vision des phénomènes »[27]. Ainsi, il est parfois pertinent de croiser les classifications pour fournir le plus grand nombre d'informations possible sur le phénomène que l'on cherche à qualifier. C'est notamment la raison pour laquelle les prévisionnistes vont souvent distinguer dans leur bulletin les départs spontanés des déclenchements provoqués par les skieurs.

La multiplicité des facteurs, l'immense variété spatiale du phénomène et la rapidité d'évolution du manteau neigeux font de l'accessibilité de la prévision du risque d'avalanche un véritable défi. Si les nivologues-prévisionnistes émettent un bulletin quotidien pendant la période hivernale, ils étudient le manteau neigeux dans son ensemble pour pouvoir en analyser le comportement. Récemment, certains chercheurs se sont également intéressées à des séries temporelles plus longues (plusieurs décennies) afin de déterminer si l'évolution du climat influait sur le comportement des avalanches. Leurs résultats semblent converger pour attribuer au réchauffement climatique une hausse du nombre d'avalanches de neige humide, corrélée à une diminution du nombre d'avalanches de neige sèche. Le mode d'écoulement des avalanches de neige sèche et des avalanches de neige humide et, par extension, les dégâts causés n'étant pas les mêmes, chercheurs et prévisionnistes s'attachent non seulement à établir des prévisions quotidiennes, mais également à dégager des tendances sur le long terme.

[26] C. Ancey, *op. cit., p. 89.*
[27] *Ibid.*

2. Prévision et évolution du risque d'avalanche

Dans cette partie, nous allons traiter de la gestion du risque d'avalanche en France, même si de nombreux autres pays (Suisse[28], États-Unis[29], Canada[30], etc.) sont confrontés à la même problématique et disposent de leurs propres méthodes de prévision et de communication du risque. Si les différents bulletins d'estimation du risque d'avalanche sont adaptés aux spécificités de chaque territoire, ils rendent néanmoins peu ou prou compte des mêmes informations, dans la perspective d'une d'harmonisation[31] plébiscitée par les chercheurs, et dont l'existence d'une échelle européenne de risque d'avalanche constitue un bon exemple.

En France, les avalanches sont répertoriées parmi les risques naturels[32]. Elles font à ce titre l'objet d'une surveillance particulière, qui a été institutionnalisée à la suite de plusieurs drames liés à la hausse de la fréquentation des milieux montagnards à des fins touristiques dès les années 1960. La catastrophe de l'UCPA de Val d'Isère, dévasté par une avalanche dans laquelle 39 personnes sont décédées en 1970, a notamment été à l'origine de ce tournant. L'ANENA, Association nationale de l'étude de la neige et des avalanches, a été créée suite à ces hivers particulièrement meurtriers afin de « faire progresser la sécurité par la prévention des risques liés à la neige et aux avalanches »[33]. Elle assure de nombreuses formations et publie trimestriellement la revue « Neige et avalanches ».

[28] *SLF Page principale - SLF*, https://www.slf.ch/fr/index.html, consulté le 10 mai 2022.
[29] *Avalanche.org » U.S. Avalanche Centers*, https://avalanche.org/us-avalanche-centers/, consulté le 10 mai 2022.
[30] *Avalanche Canada*, https://www.avalanche.ca/en/map, consulté le 10 mai 2022.
[31] Montagnes, *Pour une harmonisation des prévisions sur le danger d'avalanches à l'échelle des Alpes*, https://www.montagnes-magazine.com/actus-pour-harmonisation-previsions-danger-avalanches-echelle-alpes, consulté le 14 janvier 2022.
[32] *Avalanches | Géorisques*, https://www.georisques.gouv.fr/risques/avalanches, consulté le 14 février 2022.
[33] *L'ANENA - Anena*, https://www.anena.org/5046-l-anena.htm, consulté le 9 mai 2022.

Les avalanches doivent être mentionnées dans le plan de prévention des risques naturels (PPRN), document réglementaire intégré au plan local d'urbanisme (PLU) qui, pour une commune dont une partie du territoire est vulnérable à un risque, délimite les zones soumises à ce-dit risque.

Nous aborderons dans un premier temps la prévision du risque d'avalanche, avant de nous intéresser à ses récentes évolutions, que les chercheurs tentent de corréler aux activités anthropiques à l'origine de bouleversements climatiques aujourd'hui indéniables.

2.1. Outils et méthodes de prévision

Les problématiques associées au risque d'avalanche évoluent au fil du temps. Les voies de communication, bâtiments ou stations de sports d'hiver menacés directement par des avalanches spontanées récurrentes sont aujourd'hui identifiés et, dans la mesure du possible, protégés par des tunnels, digues, râteliers, etc. Le risque d'avalanche n'a donc jamais été autant contrôlé. Toutefois, ces ouvrages de protection, si efficaces soient-ils là où ils ont été installés, ne permettent pas de s'affranchir du risque d'avalanche. En effet, certaines zones dont la topographie rend impossible l'installation d'ouvrages permanents ou menacées uniquement ponctuellement par de grosses avalanches justifient certains déclenchements artificiels d'avalanches, tout comme la nécessité de purger certaines pentes situées en amont des pistes de ski sécurisées,. Outre la connaissance de la trajectoire susceptible d'être empruntée par l'avalanche qu'ils vont déclencher, les artificiers chargés de sécuriser ces couloirs doivent accéder facilement à des informations complètes relatives à la situation avalancheuse pour faciliter leur prise de décision. Les personnes engagées dans une pratique de loisir, qui représentent aujourd'hui plus de 95 % des victimes d'avalanches, doivent également pouvoir accès à ces informations.

Les enjeux liés à la prévision du risque d'avalanche sont donc doubles. D'une part, la complexité du phénomène avalancheux préalablement décrit suppose l'intégration de nombreux facteurs nivo-météorologiques pour aboutir à une prévision fiable. D'autre part, ces prévisions doivent pouvoir rencontrer leur public, ce qui pose alors la question de la communication du risque d'avalanche.

2.1.1. L'estimation du risque d'avalanche

Il convient de garder à l'esprit que la nivologie est une science relativement récente et qu'il en est donc de même pour la prévision du risque d'avalanche.

Le Centre national de recherches météorologiques (CNRM) est une unité de recherche de Météo France et du CNRS créée pour l'étude des processus météorologiques et climatiques. Elle est composée de 6 sous-unités parmi lesquelles le Centre d'études de la neige (CEN), qui se consacre à la recherche sur la neige et à la mise au point d'outils numériques d'analyse et d'aide à la prévision[34]. Créé en 1959 pour le suivi de l'enneigement du col de Porte (dont la station météorologique est aujourd'hui toujours active), le CEN a été chargé en 1970, suite à la catastrophe de Val d'Isère, de la prévision du risque d'avalanche pour tous les massifs. Depuis la décentralisation de 1985, cette tâche incombe à Météo France qui, grâce à ses centres départementaux, confie la prévision à des observateurs connaissant bien le terrain sur lequel ils travaillent. Le CEN n'en conserve pas moins un rôle majeur, tant pour la mise au point des outils numériques utilisés quotidiennement par les prévisionnistes avalanche que pour les activités de recherche menées conjointement avec d'autres laboratoires, notamment sur l'architecture des liens entre variabilité climatique et couverture neigeuse.

[34] *CEN : Centre d'Etudes de la Neige - Centre National de Recherches Météorologiques*, https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique85, consulté le 11 mai 2022.

La nivologie étant intimement liée aux conditions météorologiques, les nivologues de Météo France chargés de l'étude de l'évolution du manteau neigeux ont également la casquette de prévisionnistes météo montagne. Ils sont chargés d'estimer le risque d'avalanche à partir d'une compilation de données qui leur sont fournies. Ces données proviennent d'un réseau de stations comprenant :

- les quelque 2000 stations automatiques de Météo France réparties sur le territoire de la métropole, dont environ 500 sur des territoires de montagne (Alpes, Corse, Pyrénées) ;
- 145 points d'observations situés entre 1000 et 2500 m d'altitude dans les Alpes, en Corse et dans les Pyrénées. Les observations y sont effectuées par des observateurs nivo-météo formés, des professionnels de la montagne et des partenaires de Météo-France tels que les pisteurs en station ou les gardiens de refuge ;
- 29 stations automatiques d'altitude (Nivôses) situées entre 1600 et 3100 m afin de disposer de données pour des lieux difficiles d'accès.

Les informations suivantes sont relevées deux fois par jour : couverture nuageuse, vitesse et orientation du vent, températures et précipitations, épaisseur et qualité de la neige fraîche, hauteur totale de neige au sol, transport de neige par le vent sur les crêtes et avalanches observées. Des sondages hebdomadaires du manteau neigeux sont également effectués afin d'en évaluer la stabilité. Il s'agit d'établir un profil du manteau neigeux en identifiant les différentes couches de neige superposées et en mesurant leur dureté, température, masse volumique et humidité. Toutes ces données sont ensuite communiquées aux prévisionnistes qui vont les compiler et estimer par massif et pour les 24 heures suivantes, un degré de risque d'avalanche sur une échelle allant de 1 à 5 (voir Figure 18).

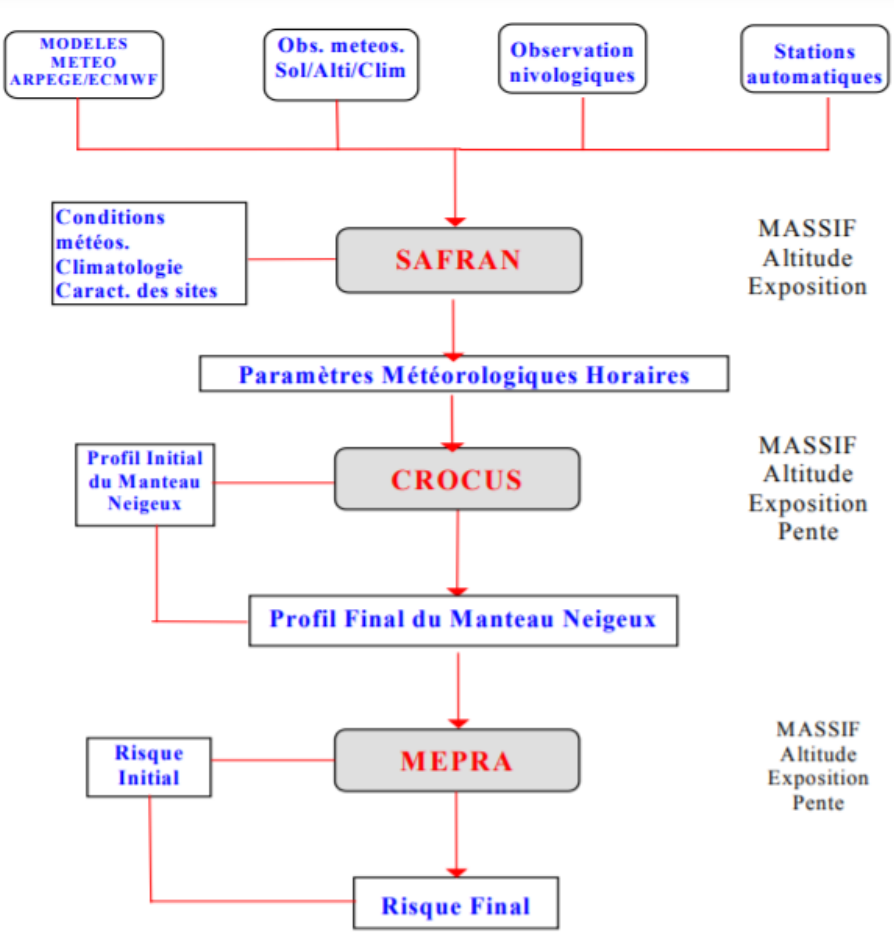


Figure 17 : Architecture du système SAFRAN-Crocus-MEPRA[35]

[35] CNRM, *Estimation du risque avalancheux dans le système expert MEPRA*, 2002, 37 p., p. 4.

Ces données viennent également alimenter la chaîne de modèles numériques de prévision du risque d'avalanche SAFRAN-Crocus-MEPRA, développée au Centre d'études de la neige pour évaluer la stabilité du manteau neigeux, et également utilisée par les chercheurs pour des études climatiques (voir Figure 17). Ces modèles constituent une application au manteau neigeux de la prévision numérique du temps (PNT).[36] Dans un article paru sur son site internet, Météo France résume clairement son fonctionnement : « À partir d'observations et de prévisions météorologiques, SAFRAN [système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques pour la nivologie] fournit heure par heure les conditions atmosphériques passées et prévues de chaque massif, pour différentes altitudes. Ces données alimentent Crocus, qui simule à l'échelle du massif les principaux processus à l'œuvre au sein du manteau neigeux, en fonction de l'altitude, de l'exposition et de la pente. Enfin, MEPRA [Modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanche] évalue le risque d'avalanche à partir des caractéristiques du manteau neigeux simulées par Crocus. »[37]

Au vu de la complexité du phénomène avalancheux et du caractère récent de la nivologie comparé à la météorologie, l'utilisation de cette chaîne de modèle pour la prévision reste à ce jour limitée. Si elle constitue un bon outil auquel ont recours les prévisionnistes, elle ne fournit pas de manière autonome une estimation du risque d'avalanche sur la base des seules données collectées par des stations automatiques. Un article de revue intitulé « *Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future* », auquel ont contribué plusieurs nivologues européens et nord-américains, dresse un état des lieux des différents modèles numériques existants et propose des pistes d'amélioration pour faciliter leur utilisation par les prévisionnistes dans l'élaboration de leurs bulletins.[38]

---

[36] Futura, *Définition | Modèle climatique - Modèle numérique du climat - Modèle couplé de circulation générale - Simulation climatique | Futura Planète*, https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-modele-climatique-12896/, consulté le 11 mai 2022.

[37] *Peut-on prévoir les avalanches ? | Météo-France*, https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/precipitations/peut-prevoir-les-avalanches, consulté le 11 mai 2022.

[38] S. Morin et al., « Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future », *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 23 p.

Échelle de risque d'avalanche (à partir de la saison 2018/2019) – Version France				
	Indice de risque	**Icône**	**Stabilité du manteau neigeux**	**Probabilité de déclenchement**
5	**Très fort**		L'instabilité du manteau neigeux est généralisée.	De nombreux départs spontanés de très grandes avalanches, parfois d'ampleur exceptionnelle, sont à attendre, y compris en terrain peu raide*.
4	**Fort**		Le manteau neigeux est faiblement stabilisé dans la plupart* des pentes suffisamment raides.	Déclenchements d'avalanches probables même par faible surcharge** dans de nombreuses pentes suffisamment raides*. Dans certaines situations, de nombreux départs spontanés de grandes, et parfois très grandes avalanches, sont à attendre.
3	**Marqué**		Dans de nombreuses* pentes suffisamment raides, le manteau neigeux n'est que modérément à faiblement stabilisé.	Déclenchements d'avalanches possibles parfois même par faible surcharge** et dans de nombreuses pentes suffisamment raides*, surtout dans celles généralement décrites dans le bulletin. Dans certaines situations, quelques départs spontanés de grandes, et parfois très grandes avalanches, sont possibles.
2	**Limité**		Dans quelques* pentes suffisamment raides, le manteau neigeux n'est que modérément stabilisé. Ailleurs, il est bien stabilisé.	Déclenchements d'avalanches possibles surtout par forte surcharge** et dans quelques pentes suffisamment raides*, généralement décrites dans le bulletin. Des départs spontanés de très grandes avalanches ne sont pas à attendre.
1	**Faible**		Le manteau neigeux est bien stabilisé dans la plupart des pentes.	Les déclenchements d'avalanches ne sont en général possibles que par forte surcharge** dans de très rares pentes raides*. Seules des coulées ou des avalanches de taille moyenne peuvent se produire spontanément.

* Caractéristiques des pentes
- La localisation des pentes les plus dangereuses est généralement précisée dans le bulletin (altitude, orientation, topographie, etc.)
- Terrain peu raide : pente insuffisante pour que la neige parte en avalanche.
- Pente suffisamment raide : pente propice à un départ ou déclenchement d'avalanche en raison de son inclinaison, la configuration du terrain, la proximité des crêtes, ...
- Pente raide : pente particulièrement propice aux avalanches notamment en raison de sa forte inclinaison, sa topographie ou de la nature du sol.

** Surcharge :
- faible : par exemple skieur/surfeur isolé évoluant en douceur et sans tomber, raquettiste, groupe avec distances d'espacement entre eux (d'au moins 10 m)
- forte : par exemple plusieurs skieurs/surfeurs sans distances d'espacement entre eux, dameuse, tir d'un explosif

Départ spontané : sans intervention humaine
Déclenchement : concerne les avalanches provoquées par surcharge, notamment par le(s) skieur(s).

Figure 18 : Échelle de risque d'avalanche en vigueur en France depuis l'élaboration d'une échelle européenne du risque d'avalanche[39]

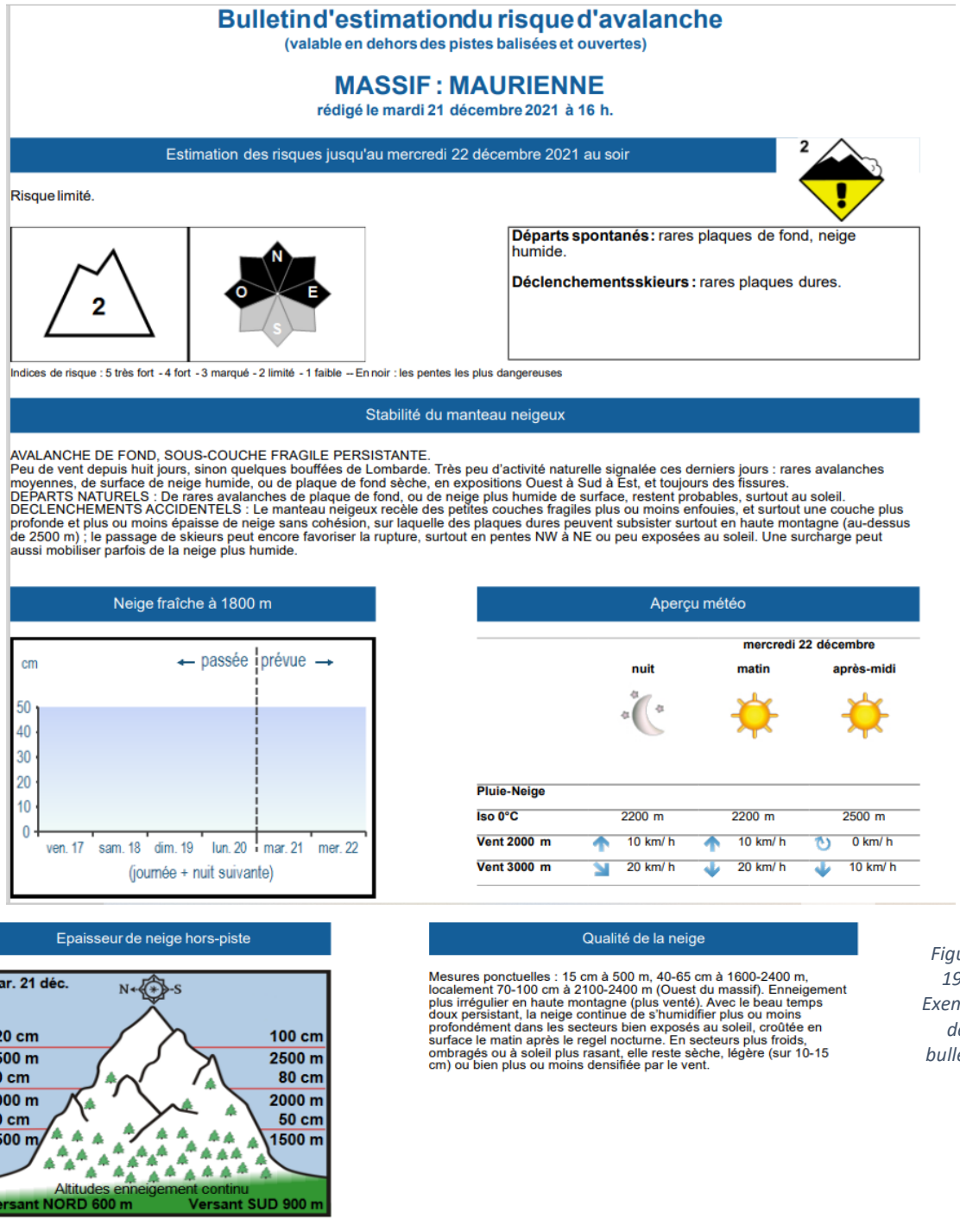
[39] « Échelle de risque d'avalanche 2019 - Anena », art. cit.

Un des problèmes majeurs est que les modèles numériques ne fournissent pas des données en temps réel. Or, une période sans mesure peut léser non seulement la prévision à un instant *t*, mais également avoir des conséquences pour l'ensemble de la saison. Tout risque de défaillance technique ou d'alimentation doit donc être anticipé. En outre, le système fonctionne sur la base de pentes types et ne prend donc pas en compte les ancrages amont, aval et latéraux ni le transport de la neige par le vent.

Une fois les conditions nivo-météorologiques étudiées par les prévisionnistes, le risque estimé par ces derniers et les facteurs augmentant la probabilité de déclenchement doivent être communiqués. Le bulletin doit contenir un maximum d'informations tout en étant à la portée d'un public varié.

2.1.2. La communication du risque d'avalanche

En France, l'outil clé utilisé pour communiquer le risque d'avalanche est le BERA (bulletin d'estimation du risque d'avalanche). Il est publié quotidiennement à 16h pour chaque massif des Alpes, des Pyrénées et de Corse du 15 décembre au 30 avril, ce qui correspond aux périodes d'ouverture des stations de ski dont les services des pistes fournissent de précieuses informations aux prévisionnistes. Pour répondre à la demande d'information sur le risque d'avalanche en début et en fin de saison d'hiver, un bulletin d'information neige et avalanches (INA) est diffusé minimum deux fois par semaine dès le 1er novembre et jusque fin juin.



Bulletin d'estimation du risque d'avalanche

(valable en dehors des pistes balisées et ouvertes)

MASSIF : MAURIENNE

rédigé le mardi 21 décembre 2021 à 16 h.

Estimation des risques jusqu'au mercredi 22 décembre 2021 au soir

2

Risque limité.

2

N O E S

Départs spontanés : rares plaques de fond, neige humide.

Déclenchements skieurs : rares plaques dures.

Indices de risque : 5 très fort - 4 fort - 3 marqué - 2 limité - 1 faible -- En noir : les pentes les plus dangereuses

Stabilité du manteau neigeux

AVALANCHE DE FOND, SOUS-COUCHE FRAGILE PERSISTANTE.
Peu de vent depuis huit jours, sinon quelques bouffées de Lombarde. Très peu d'activité naturelle signalée ces derniers jours : rares avalanches moyennes, de surface de neige humide, ou de plaque de fond sèche, en expositions Ouest à Sud à Est, et toujours des fissures.
DEPARTS NATURELS : De rares avalanches de plaque de fond, ou de neige plus humide de surface, restent probables, surtout au soleil.
DECLENCHEMENTS ACCIDENTELS : Le manteau neigeux recèle des petites couches fragiles plus ou moins enfouies, et surtout une couche plus profonde et plus ou moins épaisse de neige sans cohésion, sur laquelle des plaques dures peuvent subsister surtout en haute montagne (au-dessus de 2500 m) ; le passage de skieurs peut encore favoriser la rupture, surtout en pentes NW à NE ou peu exposées au soleil. Une surcharge peut aussi mobiliser parfois de la neige plus humide.

Neige fraîche à 1800 m

cm ← passée | prévue →

50 40 30 20 10 0

ven. 17 sam. 18 dim. 19 lun. 20 mar. 21 mer. 22

(journée + nuit suivante)

Aperçu météo

	mercredi 22 décembre		
	nuit	matin	après-midi
Pluie-Neige			
Iso 0°C	2200 m	2200 m	2500 m
Vent 2000 m	10 km/ h	10 km/ h	0 km/ h
Vent 3000 m	20 km/ h	20 km/ h	10 km/ h

Epaisseur de neige hors-piste

mar. 21 déc.

N S

120 cm 2500 m 90 cm — 100 cm 2500 m 80 cm

2000 m 60 cm — 2000 m 50 cm

1500 m — 1500 m

Altitudes enneigement continu

Versant NORD 600 m — Versant SUD 900 m

Qualité de la neige

Mesures ponctuelles : 15 cm à 500 m, 40-65 cm à 1600-2400 m, localement 70-100 cm à 2100-2400 m (Ouest du massif). Enneigement plus irrégulier en haute montagne (plus venté). Avec le beau temps doux persistant, la neige continue de s'humidifier plus ou moins profondément dans les secteurs bien exposés au soleil, croûtée en surface le matin après le regel nocturne. En secteurs plus froids, ombragés ou à soleil plus rasant, elle reste sèche, légère (sur 10-15 cm) ou bien plus ou moins densifiée par le vent.

Figure 19 : Exemple de bulletin d'estimation du risque d'avalanche[40]

[40] Extrait du BERA du 21 décembre 2021 pour le massif de la Maurienne, https://meteofrance.com/meteo-montagne/alpes-du-nord/risques-avalanche., consulté le 12 décembre 2021.

Le BERA, reproduit ici dans sa version du 21 décembre 2021 pour le massif de la Maurienne à titre d'exemple[41], fournit à l'échelle du massif les informations suivantes (voir Figures 19 et 20) :

- un indice de risque sur une échelle allant de 1, pour un risque faible correspondant à un manteau neigeux stabilisé, à 5 pour un risque très fort correspondant à une instabilité généralisée (voir Figure 18) ;
- l'orientation des pentes les plus susceptibles d'être concernées par des départs ou déclenchements d'avalanches (en noir sur la rose des vents) ;
- la distinction entre le risque de départs spontanés et le risque de déclenchements provoqués ;
- un récapitulatif des précipitations neigeuses passées et prévues accompagné d'un aperçu météorologique ;
- des informations relatives à l'épaisseur et à la qualité de la neige (toujours selon l'orientation des pentes) ;
- l'évolution des conditions nivo-météorologiques sur les sept derniers jours.

L'enjeu de ce bulletin réside dans la multiplicité et la complexité des données qu'il doit synthétiser tout en restant adapté à divers publics. En effet, le BERA s'adresse autant aux pratiquants d'activités de loisirs en secteurs hors-pistes qui préparent leur sortie qu'aux services des pistes qui doivent sécuriser le domaine skiable et informer le public, sans oublier les responsables de sécurité (sécurité civile, maires, services routiers, etc.).

[41] *Météo Montagne Alpes du Nord, Risques d'avalanche par Météo-France, [en ligne], disponible sur* https://meteofrance.com/meteo-montagne/alpes-du-nord/risques-avalanche, consulté le 12 mai 2022.

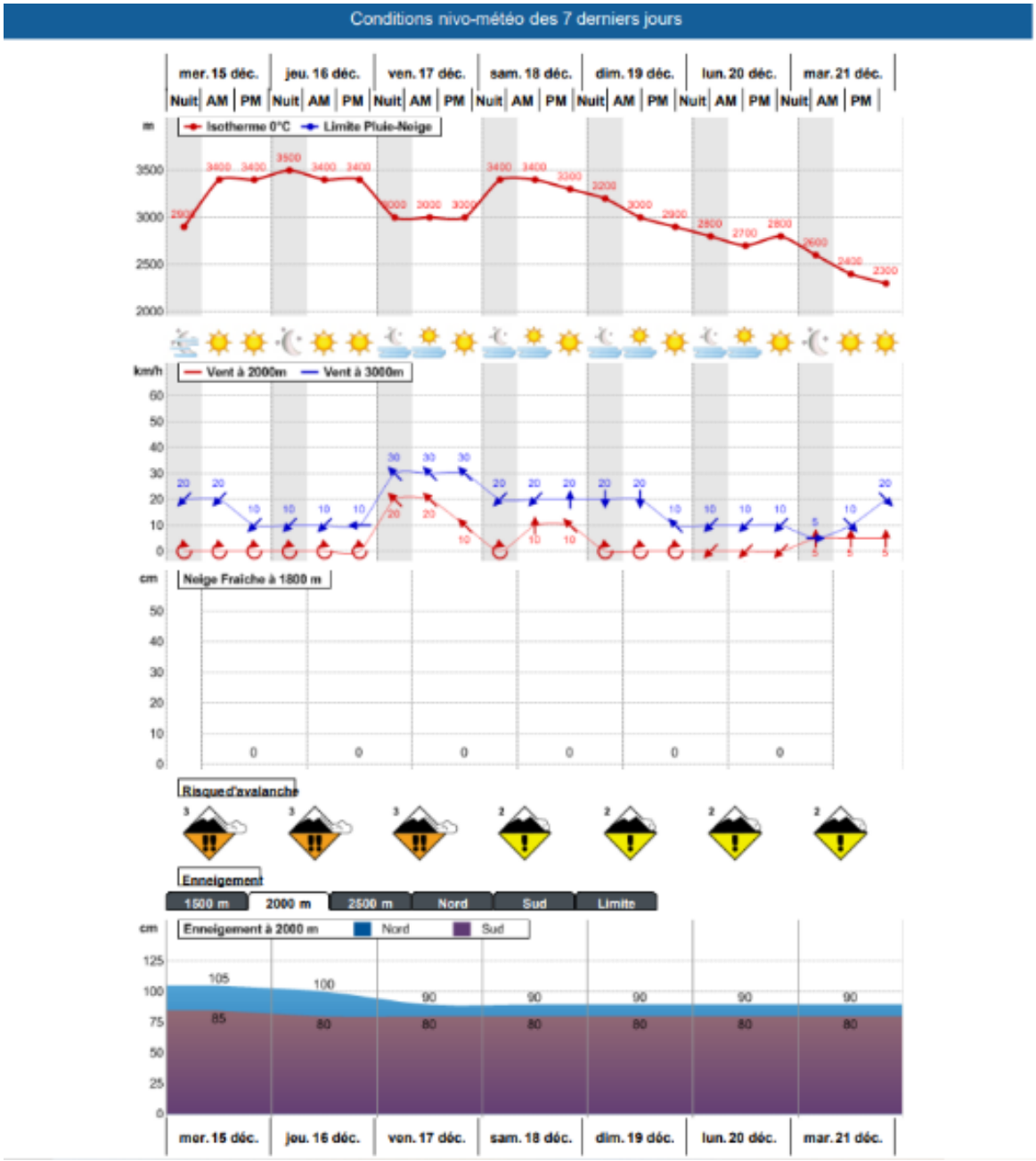


Figure 20 : Exemple de bulletin d'estimation du risque d'avalanche[42]

[42] Extrait du BERA du 21 décembre 2021 pour le massif de la Maurienne, https://meteofrance.com/meteo-montagne/alpes-du-nord/risques-avalanche., consulté le 12 décembre 2021.

Malgré l'effort d'exhaustivité et de synthèse mené par les services de Météo France, certains points faibles ou mauvais usages du BERA persistent. Par exemple, le risque 3 demeure souvent sous-estimé par les randonneurs qui le considèrent à tort comme étant un risque « moyen ». Les usagers attachent aussi souvent trop d'importance au chiffre donné par le bulletin, tandis que ce dernier peut cacher des réalités bien différentes selon l'orientation des pentes, l'altitude, etc. Par ailleurs, le BERA reste amené à évoluer au gré des travaux de recherche proposant des pistes d'amélioration pour permettre aux destinataires de mieux comprendre et ainsi de limiter le risque. Les différents acteurs de prévision du risque d'avalanche et de sensibilisation travaillent, conjointement avec les services de prévision du risque d'avalanche d'autres pays, à l'harmonisation des bulletins d'estimation entre les différents pays, notamment dans l'arc alpin. Ces efforts conjoints ne se limitent pas à l'estimation du risque d'avalanche, mais s'attachent de plus en plus à l'étude des répercussions du changement climatique sur l'activité avalancheuse.

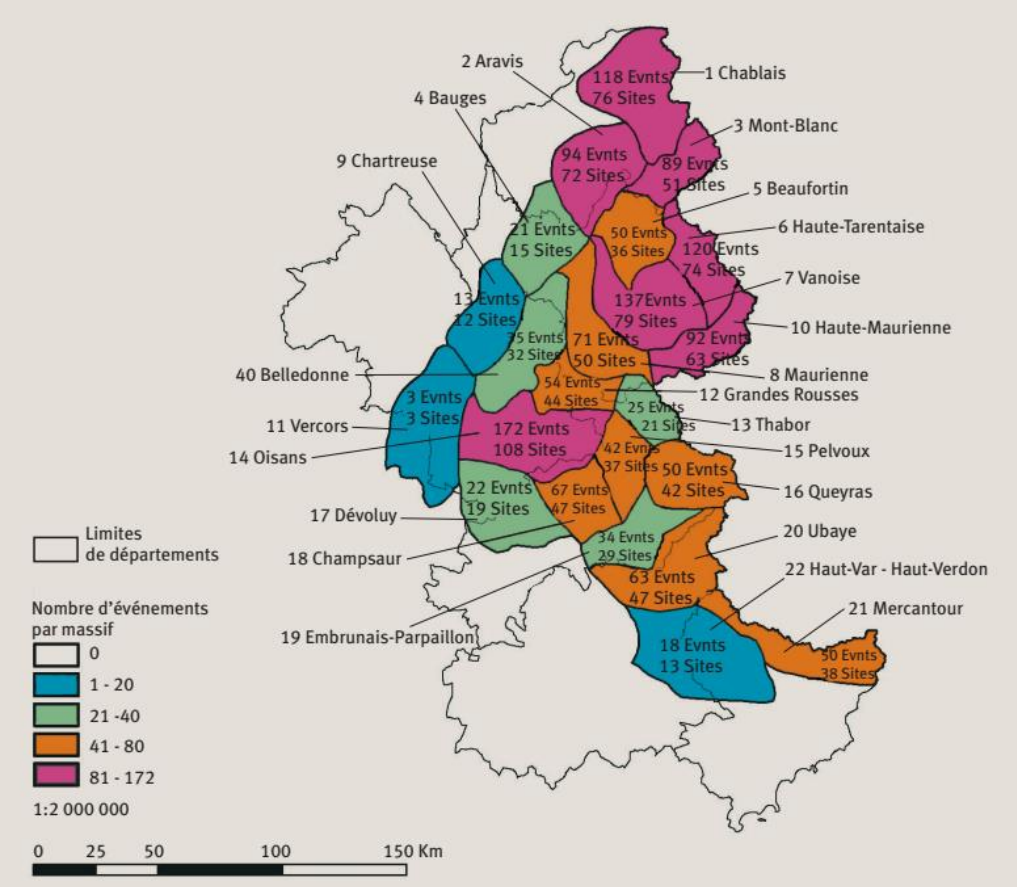


Figure 21 : Distribution spatiale des avalanches sur sites EPA alpins durant l'hiver 2005[43]

[43] N. Eckert, M. Deschatres et L. Bélanger, « Analyse des fluctuations spatio-temporelles des nombres d'avalanches dans les Alpes du Nord à partir de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA) », 2010.

2.2. Évolution du risque d'avalanche

Cette partie vise à décrire les différents enjeux de l'étude de l'évolution du risque d'avalanche sur le long terme, et à présenter brièvement certains résultats dégagés. Prévision et évolution vont de pair, et ce sont souvent les mêmes personnes qui travaillent sur les deux thématiques. Les outils et méthodes présentés ici se recoupent donc parfois avec ceux décrits ci-dessus. La constitution de séries climatiques suffisamment longues et homogènes (2.2.1.) est un prérequis à l'étude des conséquences du changement climatique sur l'activité avalancheuse (2.2.2.).

2.2.1. La constitution de longues séries temporelles

Jusqu'au milieu du XX^{e} siècle, les habitants des zones de montagne qui transmettaient de génération en génération leur connaissance des avalanches passées et les couloirs empruntés par ces dernières étaient, par la force des choses, les personnes les mieux renseignées sur le phénomène. Dès 1899, Paul Mougin, ingénieur forestier, a été à l'initiative de la collecte des données relatives aux avalanches dans une perspective de gestion des risques et de restauration des territoires de montagne. Il a mis en place une enquête permanente sur les avalanches (EPA) pour le département de la Savoie, qui a été étendue au fil du temps à l'ensemble des massifs alpins et pyrénéens (voir Figures 21 et 22). Il s'agit d'« une chronique très détaillée d'événements d'avalanche sur près de cinq mille sites sélectionnés en France. »[44]. Ses données sont utilisées par les gestionnaires du risque en montagne et par des chercheurs qui quantifient et étudient les variations de l'activité avalancheuse dans l'espace et dans le temps, afin de mieux comprendre le phénomène et sa réponse aux variations du climat.

[44] *Présentation de l'Enquête permanente sur les avalanches*, https://www.avalanches.fr/epa_lobservation-actuelle/, 12 juin 2012, consulté le 13 mai 2022.

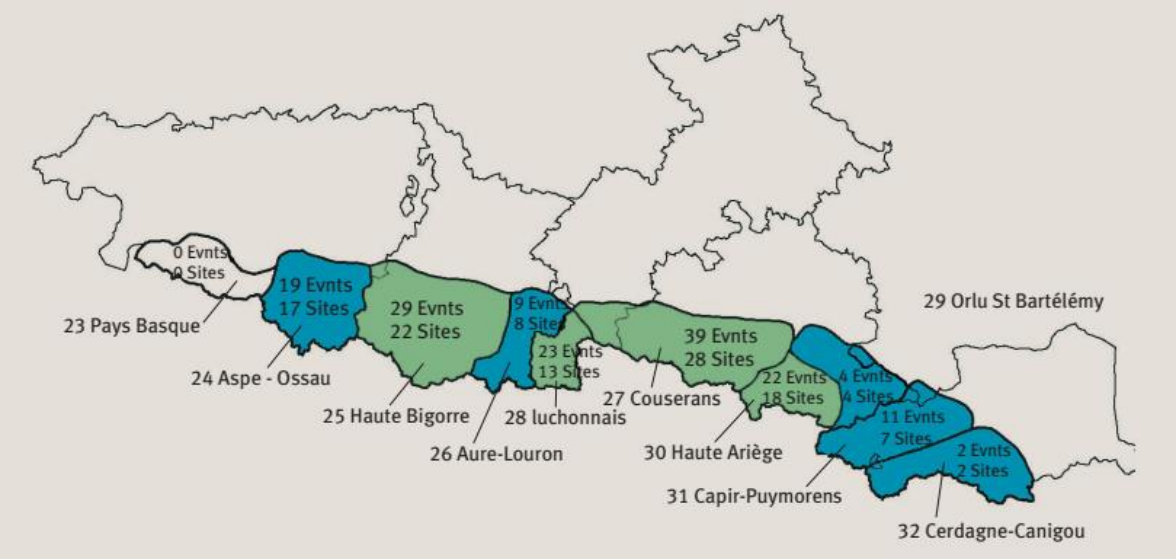


Figure 22 : Distribution spatiale des avalanches sur sites EPA pyrénéens durant l'hiver 2005[45]

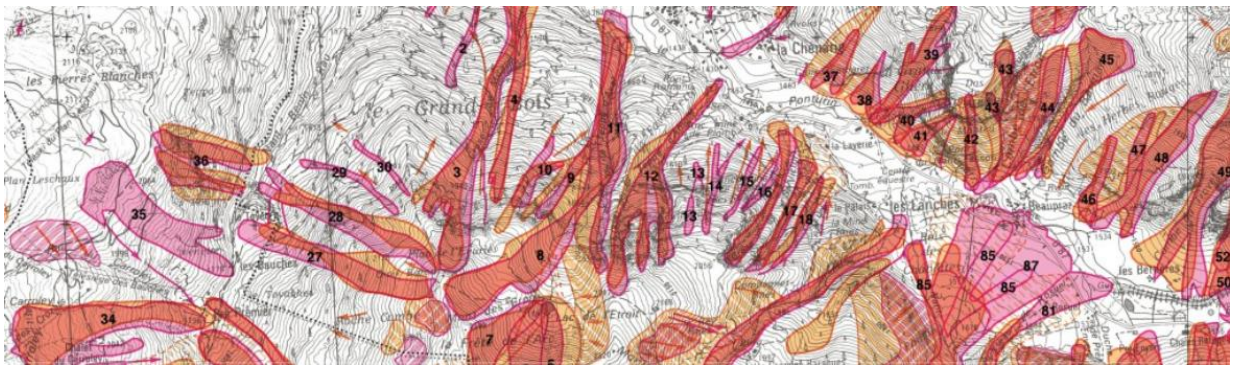


Figure 23 : Extrait de la CLPA[46]

[45] N. Eckert, M. Deschatres et L. Bélanger, « Analyse des fluctuations spatio-temporelles des nombres d'avalanches dans les Alpes du Nord à partir de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA) », art. cit. (note de l'auteure : pour le site 31, il s'agit du Capcir-Puymorens et non du Capir-Puymorens).

[46] *Présentation de la Carte de localisation des phénomènes avalancheux*, https://www.avalanches.fr/clpa-presentation/, 12 juin 2012, consulté le 13 mai 2022.

Concrètement, des observateurs qualifiés de l'Office national des forêts (ONF) collectent les données relatives à la date, aux altitudes de départ et d'arrivée de l'avalanche, au type d'avalanche et de dépôt, sa taille, etc. ; puis les transmettent à l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA, anciennement CEMAGREF), chargé de gérer la base de données.

Outre l'EPA, la Carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) est un autre outil permettant en France de visualiser les zones où des avalanches se sont produites dans le passé (voir Figure 23). Mise en place suite à la catastrophe de Val d'Isère de 1970, il s'agit d'un document informatif à destination des services administratifs et techniques confrontés à la problématique de la gestion des risques naturels en montagne. La CLPA est constituée d'une carte au 1/25000^{e} complétée par des fiches signalétiques. La carte CLPA représente à la fois en orange le résultat d'une étude sur photos aériennes (photo-interprétation et analyse de terrain), en mauve le produit d'un recueil de témoignages par enquête, et en noir les dispositifs de protection fixes.[47] La CLPA ne permet pas directement de constituer de longues séries de données exploitables pour l'étude des événements d'avalanche passés mais participe à l'étude de la dynamique des avalanches, notamment par le biais de son intégration aux modèles numériques de terrain. Elle demeure donc un outil nécessaire tant que le déclenchement et la dynamique des avalanches ne sont pas parfaitement maîtrisés et qu'ils ne peuvent pas être modélisés de manière prédictive. En outre, les conséquences du changement climatique demeurent incertaines et « confirment la nécessité du maintien d'un dispositif robuste d'observation continue des avalanches. »[48]

Ces deux bases de données consacrées aux avalanches en France, qui ont été rénovées et numérisées au début des années 2000, permettent donc aux chercheurs et aux prévisionnistes d'étudier le phénomène avalancheux à partir d'un vaste jeu de données (90 000 observations pour l'EPA).

[47] *Ibid.*

[48] M. Bonnefoy et al., « La carte de localisation des phénomènes d'avalanche (CLPA) : enjeux et perspectives », 2010, p. 14.

2.2.2. L'étude récente des répercussions du changement climatique sur l'activité avalancheuse

Les projets Étude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle (ECANA) et Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagne : phénomènes extrêmes, enneigement et incertitudes (SCAMPEI) sont deux des principaux projets qui ont été menés pour étudier les liens entre phénomènes avalancheux et évolution du climat.

ECANA est un projet financé par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Environnement depuis 2009. Les travaux sont effectués en collaboration entre l'unité de recherche Érosion Torrentielle Neige et Avalanches (ETNA) d'IRSTEA et le CEN. Son objectif principal est l'étude de la climatologie de l'activité avalancheuse naturelle dans les Alpes françaises en s'appuyant sur les données de l'EPA mais aussi sur les données nivo-météorologiques acquises, assimilées et réanalysées par Météo France. « Il s'agit ainsi de tester, voire de remettre en cause, l'hypothèse généralement effectuée pour la gestion courante du risque que le phénomène avalancheux est stationnaire dans le temps. Pour ce faire, des méthodes statistiques avancées d'analyse de séries temporelles, de modélisation, de classification et de sélection de variables sont mises en œuvre. »[49] Les premiers résultats du projet sont présentés sur le site avalanches.fr, dédié à la communication de l'avancée des différents travaux de recherche.[50] Les liens entre avalanches et climat ont ainsi été modélisés par la corrélation entre différentes variables nivo-météorologiques et l'activité avalancheuse. Des ruptures climatiques ont ainsi pu être détectées.

[49] *Projet ECANA*, https://www.avalanches.fr/projet-ecana/, 21 septembre 2012, consulté le 4 février 2022.
[50] *Quelques résultats d'ECANA*, https://www.avalanches.fr/quelques-resultats-decana/, 28 septembre 2012, consulté le 13 mai 2022.

En outre, le projet SCAMPEI conduit entre 2009 et 2011 a permis de modéliser l'évolution du climat à une échelle plus fine (8 km) que celle auparavant utilisée, pour trois périodes (période de référence correspondant à l'activité des années 1970, futur proche soit horizon 2030, futur lointain soit années 2080) et selon plusieurs des scénarios climatiques éventuels publiés par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La chaîne de modèle SAFRAN-Crocus-MEPRA a été alimentée avec les données correspondant aux différents scénarios, ce qui a permis de calculer des indices nivologiques pour chaque période et chaque scénario, à savoir la hauteur de neige saisonnière, l'équivalent en eau, la durée annuelle d'enneigement, la hauteur minimale de neige sur 100 jours ainsi que la fréquence de fort risque d'avalanche naturelle. Ce projet innovant a montré la nécessité d'élaborer des scénarios climatiques adaptés aux zones de montagne et ses résultats qui prévoyaient « une diminution significative de la couverture neigeuse en dessous de 2000 mètres d'altitude dès les prochaines décennies »[51] se vérifient déjà. Toutefois, les scénarios prévus ne sont aujourd'hui plus d'actualité car ils n'intègrent pas les dernières projections du GIEC. Ces observations concordent néanmoins avec celles de l'étude « Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises »[52].

Les conséquences précises du changement climatique sur le phénomène avalancheux demeurent difficiles à évaluer, tant du fait de la technicité des modèles numériques et statistiques à mettre en place que de la complexité de la dynamique des avalanches. Établir un lien entre changement climatique et activité avalancheuse demeure donc un défi pour les chercheurs, et un enjeu pour la gestion de ce risque qui menace les personnes et les infrastructures qui y sont confrontées.

[51] *Projet SCAMPEI - Des scénarios climatique adaptés aux zones de (...) - Centre National de Recherches Météorologiques*, https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article675, consulté le 13 mai 2022.
[52] M. Naaim et al., « Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises », *La Houille Blanche*, 2016, 6, p. 12- 20.

Conclusion

Les avalanches de neige sont un phénomène complexe dont l'étude mobilise des connaissances en météorologie, nivologie et physique (thermodynamique).

Elles représentent un risque naturel pour les infrastructures et les pratiquants de sports d'hiver. Des aménagements permanents sont réalisés pour protéger les zones particulièrement exposées. La prévision du risque d'avalanche demeure néanmoins essentielle pour communiquer aux professionnels et particuliers une synthèse des conditions par massif. Météo France s'en charge et publie quotidiennement en saison hivernale un bulletin d'estimation du risque d'avalanche élaboré par des prévisionnistes-nivologues.

Toutefois, dans un contexte de changement climatique anthropique, le nombre et la dynamique des avalanches évoluent rapidement. Les chercheurs sont donc amenés à étudier la réponse de l'activité avalancheuse au changement climatique afin d'adapter les mesures de réduction du risque à l'évolution du phénomène.

PARTIE II : TEXTE-SUPPORT ET SA TRADUCTION

Avertissement au lecteur

Le lecteur trouvera dans la partie suivante, en vis-à-vis, le texte source sur la page de gauche et la traduction qui lui correspond sur la page de droite.
Les termes faisant l'objet d'une **fiche terminologique** sont signalés en gras avec la lettre F en exposant suivie du numéro de la **fiche**^{Fn}, tandis que ceux intégrés au glossaire sont, à leur première occurrence pertinente, soulignés et signalés par un astérisque*****.
Les mots ou expressions encadrés par des barres obliques sont commentés dans la /partie stratégie de traduction\.

L'article dont est tiré l'extrait est le suivant :

S. Bellaire, B. Jamieson, S. Thumlert, J. Goodrich, G. Statham, "Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada", *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 121, p. 118-125.

Il est accessible dans son intégralité à l'adresse suivante :
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X15002505

L'extrait traduit commence à la page 1 de l'article, au paragraphe « 1. Introduction », et se termine page 7, à la fin du paragraphe « 4. Discussion ». Les coupes effectuées sont indiquées entre crochets : […].

Le texte source comporte 3861 mots, sa traduction 4719.

Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada

Sascha Bellaire, Bruce Jamieson, Scott Thumlert, Jeff Goodrich, Grant Statham

1. Introduction

Trends in avalanche activity, if they exist, could be used in planning for avalanche hazard management for transportation corridors, pipe- or powerlines, and ski areas, as well as for commercial winter recreation in the backcountry. Trends in avalanching, snow cover or weather could be indicators of climate change. Several long-term studies of avalanche activity have not found significant trends […]. However, Germain et al. (2009) found an increase in avalanche activity in eastern Canada during the last 30 years using tree-ring analysis. […] In two of six avalanche prone sections of highways in western Canada, Sinickas et al. (2015) found a decrease in the number of avalanches reaching highways. They also found a weak increase in the number of wet-snow avalanche deposits at highways with low elevation and low latitudes. The studies by Eckert et al. (2010a, 2010b, 2013), Castebrunet et al. (2012) and Sinickas et al. (2015) might indicate a change of avalanche type, size or runout rather than a trend towards more or less avalanches.

/It is particularly difficult to relate trends in avalanche activity to climate change since many avalanche safety operations with good records of avalanches use explosives to trigger avalanches, which are subject to technological and human-induced changes.\ […] Increases in explosive triggering may decrease the frequency of large natural (spontaneous) avalanches (e.g. Sinickas et al., 2015). […]

Analyse de longues séries de données météorologiques, nivologiques et d'avalanche dans le parc national des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada

Sascha Bellaire, Bruce Jamieson, Scott Thumlert, Jeff Goodrich, Grant Statham

1. Introduction

Des tendances de l'activité avalancheuse pourraient, le cas échéant, être intégrées à la planification de la gestion du risque d'avalanche, indispensable à la sécurisation des activités hivernales de pleine nature ainsi que des axes de communication, gazoducs, oléoducs, lignes électriques et domaines skiables. Des tendances propres à l'activité avalancheuse, au manteau neigeux ou à la météorologie sont susceptibles de constituer des indicateurs du changement climatique. Plusieurs chercheurs ont étudié de longues séries climatiques relatives à l'activité avalancheuse sans dégager de tendances significatives. [...] Toutefois, Germain et al. (2009) ont identifié une hausse de l'activité avalancheuse dans l'est du Canada ces trente dernières années en analysant des cernes d'arbres. [...] Sur deux des six tronçons routiers exposés aux avalanches dans l'ouest du Canada, Sinickas et al. (2015) ont relevé une baisse du nombre d'avalanches atteignant les routes. Ils ont également constaté une légère hausse du nombre de dépôts d'avalanches de neige humide sur les axes routiers situés à basses altitude et latitude. Les études de Eckert et al. (2010a, 2010b, 2013), Casterbrunet et al. (2012) et Sinickas et al. (2015) indiquent qu'il pourrait s'agir d'un changement de type, de taille et de mode d'écoulement des avalanches plutôt que d'une tendance à la hausse ou à la baisse de leur nombre.

/Établir une corrélation entre changement climatique et tendances de l'activité avalancheuse s'avère particulièrement difficile puisqu'une part importante des avalanches recensées correspond à des déclenchements préventifs par explosifs, qui sont tributaires des moyens utilisés et du caractère aléatoire des décisions humaines.\ [...] L'augmentation du nombre d'avalanches déclenchées par explosifs pourrait diminuer la fréquence des grosses avalanches naturelles (spontanées) (voir par exemple Sinickas et al., 2015). [...]

Trends in snowpack properties such as depth and structure, as well as snowfall trends may be more indicative of climate change. […] In view of the limited studies of long term avalanche records (Fitzharris, 1987; Sinickas et al., 2015) as well as of weather and snowpack variables from elevations relevant to avalanche forecasting in the interior of British Columbia, we sought to identify long-term trends in weather, snowpack and avalanches in Glacier National Park (GNP) that are relevant to avalanche forecasting. Specifically, in the GNP records, are there trends over 1965 to 2014 in the weather, snow cover data from weather stations at 1315 m and 1905 m, or in the avalanche records?

Trends, especially if consistent with large-scale trends such as global climate change, are likely to influence avalanche forecasting in the region in the future.

Une évolution des propriétés du manteau neigeux telles que sa hauteur ou sa structure, ou une évolution des cumuls de précipitations neigeuses seraient peut-être de meilleurs indicateurs du changement climatique. [...] Au vu du nombre limité d'études portant sur de longues séries de données d'avalanches (Fitzharris, 1987 ; Sinickas et al., 2015) ainsi que sur des variables météorologiques et relatives au manteau neigeux à des altitudes appropriées pour l'estimation du risque d'avalanche en Colombie-Britannique, nous avons cherché à identifier, dans le parc national des Glaciers (PNG), des tendances météorologiques, nivologiques et avalancheuses de long terme pertinentes pour la prévision du risque d'avalanche. Plus précisément, les archives du PNG permettent-elles, à partir des avalanches recensées et des données météorologiques et nivologiques collectées dans deux stations météorologiques à 1315 m et 1905 m, de dégager une évolution sur la période 1965-2014 ? L'observation d'une évolution pourrait contribuer à faire évoluer la prévision du risque d'avalanche dans la région, surtout si cette évolution va de pair avec des phénomènes de plus grande ampleur comme le changement climatique à l'échelle planétaire.

2. Data and methods

In this section data sets of long-term meteorological and avalanche observations from Glacier National Park, Canada as well as the corresponding applied methods are introduced. The winter was partitioned into an early /winter season\ from September to November, a mid-winter season from December to February, and finally the late winter season from March to May.

2.1. Study area

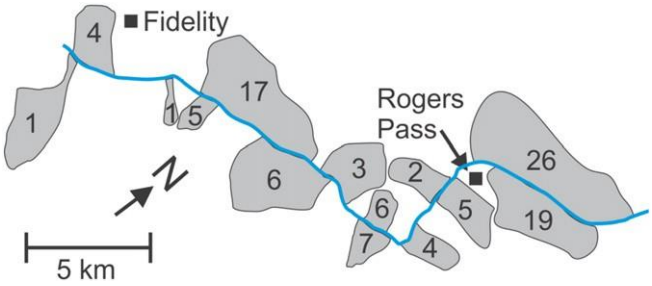


Fig. 1. Major avalanche areas (shaded grey) in Glacier National Park. The number in each area is the number of major paths that reach the highway (blue lines). In addition to the paths in the shaded areas, avalanches in a smaller number of paths that infrequently affect the highway or railway were recorded and used in the analysis. Weather stations at Mt Fidelity, 1905 m, and Rogers Pass, 1315 m, are marked by black squares. Base map from Roger Pass Snow Avalanche Atlas, Glacier National Park, British Columbian Canada (Schleiss, V.G., 1989).

2. Données et méthodes

Dans cette section, nous présentons les longues séries de données d'observation météorologiques et d'avalanches du parc national des Glaciers au Canada, ainsi que les méthodes d'analyse associées. /Nous avons divisé la saison d'hiver en trois périodes\, la période de début d'hiver s'étendant de septembre à novembre, le milieu d'hiver de décembre à février, et la fin d'hiver de mars à mai.

2.1. *Zone étudiée*

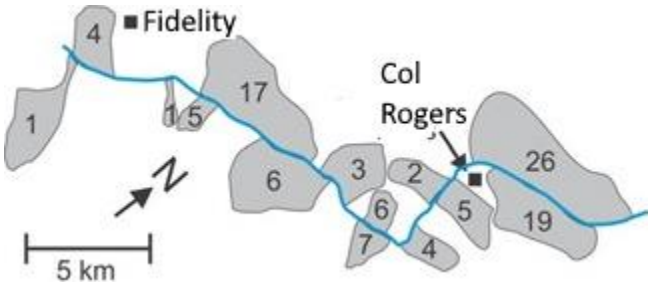


Fig. 1. Principaux secteurs avalancheux (grisés) du parc national des Glaciers. Le nombre donné pour chaque secteur correspond au nombre de grands couloirs d'avalanche menaçant la route (ligne bleue). Outre les avalanches des couloirs des zones grisées, d'autres avalanches s'écoulant par des couloirs secondaires et coupant occasionnellement la route ou la voie ferrée ont été intégrées à cette analyse. La localisation des stations météorologiques du mont Fidelity, 1905 m, et du col Rogers, 1315 m, est indiquée par des carrés noirs. Fond de carte tiré de l'atlas *Roger Pass Snow Avalanche Atlas, Glacier National Park, British Columbian Canada* (Atlas neige et avalanche du col Rogers, parc national des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada) (Schleiss, V.G., 1989).

For this study we analyzed long-term meteorological, snow and avalanche data from the Rogers Pass area (Fig. 1) located within Glacier National Park, British Columbia, Canada. Rogers Pass, a mountain pass with the highest point at 1330 m, is used by the Canadian Pacific Railway and the Trans-Canada highway (TCH) and is therefore the main transportation corridor in Western Canada. Rogers Pass is located in a transitional climate with a strong maritime influence (Haegeli and McClung, 2003). Tree-line in this area is located around 2000 m. For this study we therefore consider starting zones higher than this threshold as above tree-line (ATL) and lower as below tree-line (BTL).

Skilled observers frequently patrol the TCH and observe avalanche occurrences. Since the TCH is the main transportation corridor in western Canada, avalanche control work* is a necessity along the highway during wintertime. The Avalanche Control Section at Glacier National Park has routinely observed avalanches along the TCH since 1965; individual avalanche paths have been partly controlled by explosives. Nevertheless, numerous natural avalanches have been observed on the same path that have been controlled in this area since 1965 roughly between Mt. Fidelity station and 10 km east of the Rogers Pass station, a distance of about 30 km from east to west. The starting zones of approximately 140 avalanche paths range from about 800 m to 2800 m a.s.l. with vertical falls of up to 1800 m (Fig. 1). /The majority of the starting zones are north- or south- facing, i.e. both sides of the east–west oriented Trans-Canada Highway\.

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé des données météorologiques, nivologiques et d'avalanches collectées sur le long terme dans la région du col Rogers (Fig. 1) située dans le parc national des Glaciers, en Colombie-Britannique au Canada. Le col Rogers, col de montagne culminant à 1330 m d'altitude, se situe sur le tracé[53] du Chemin de fer Canadien Pacifique et de la route Transcanadienne (TCH pour *Trans-Canada highway*). Il s'agit donc de l'un des principaux axes de communication de l'ouest du Canada. Le col Rogers est soumis à un climat de transition et à une forte influence océanique (Haegeli and McClung, 2003). Dans ce secteur, la limite forestière se situe environ à 2000 m. Pour cette étude, les zones de départ situées à une altitude supérieure à cette limite sont définies comme étant au-dessus de la limite forestière (>LF), et les zones de départ situées à une altitude inférieure sont considérées comme étant au-dessous de la limite forestière (<LF*).*

Des spécialistes parcourent régulièrement la route Transcanadienne afin de recenser les événements avalancheux. La TCH étant le principal axe routier de l'ouest du Canada, le déclenchement préventif d'avalanches* le long de la route est nécessaire tout au long de l'hiver. Depuis 1965, l'unité de prévention des avalanches du parc national des Glaciers (ACS pour *Avalanche Control Section*) recense systématiquement les avalanches se produisant le long de la route TCH, et sécurise certains couloirs d'avalanche par des déclenchements préventifs. De nombreuses avalanches naturelles ont néanmoins été observées sur ces mêmes couloirs où des avalanches sont déclenchées de manière préventive depuis 1965, entre la station du mont Fidelity et 10 km à l'est de la station du col Rogers, soit sur une distance d'environ 30 km d'est en ouest. Sur ces quelque 140 couloirs pouvant mesurer jusqu'à 1800 m de longueur, les zones de départ des avalanches se situent entre 800 m et 2800 m d'altitude. /La majorité des zones de départ sont orientées au nord ou au sud, soit de part et d'autre de la route Transcanadienne qui suit un axe est-ouest.\

[53] Le Chemin de fer Canadien Pacifique, qui empruntait historiquement le col Rogers, évite aujourd'hui une partie de cette zone particulièrement exposée aux avalanches en empruntant une série de tunnels, dont celui du mont Macdonald, long de 14,7 km (*note de la traductrice*).

2.2. *Meteorological and snow cover data*

We used snow as well as meteorological data from two /study plots\ located at Rogers Pass and Mt. Fidelity, respectively. The first station, named Rogers Pass, is located at 1315 m a.s.l. and the second station, named Mt. Fidelity, is located at 1905 m a.s.l. We analyzed meteorological data, i.e. air temperature and precipitation, from these two stations between 1965 and 2014.

/Monthly mean air temperature at Rogers Pass and Mt. Fidelity was calculated\ by averaging the daily observed minimum and maximum air temperature. Precipitation was measured at both stations with a /precipitation gauge\. At Mt. Fidelity precipitation measurements were only available since 1969. For comparison, corresponding trends at Rogers Pass were only calculated for the time period between 1969 and 2014.

In the event of precipitation falling as snow, the snow water equivalent (SWE)* was calculated based on measured snow density. Density was measured using a sampling tube pushed vertically through the new snow collected on a storm board. The sample was then weighed. In absence of a measured snow density, we assumed 100 kg m^{-3}. Using snow density, the solid precipitation ratio, i.e. the fraction of the solid precipitation in the total precipitation can be calculated. However, for some years the solid precipitation ratio could not be calculated due to missing monthly precipitation measurements. In addition, mixed precipitation, i.e. snow and rain, was not considered specifically and therefore treated as snowfall.

Throughout the study period, the manual measurement of new snow height (HN24) at the Rogers Pass study plot has not changed. However, at Mt. Fidelity the daily new snow height was initially measured manually, whereas in recent years, on days without observers on site HN24 is estimated from manual measurements on adjacent days with guidance from hourly measurements from a precipitation gauge and ultrasonic snow depth sensor at the same site as the manual measurements.

2.2. *Données météorologiques et nivologiques*

Nous avons utilisé les données nivologiques et météorologiques relevées sur les /sites\ du col Rogers et de mont Fidelity. La station du col Rogers est située à 1315 m d'altitude, celle du mont Fidelity à 1905 m d'altitude. Nous avons analysé les données météorologiques, à savoir la température de l'air et les quantités de précipitations, mesurées dans ces deux stations entre 1965 et 2014.

/Nous avons calculé les températures mensuelles moyennes de l'air au col Rogers et au mont Fidelity\ en faisant la moyenne des températures journalières minimales et maximales relevées. Les mesures de précipitations ont été réalisées dans les deux stations à l'aide d'un /pluviomètre\. Les précipitations n'ont été mesurées qu'à partir de 1969 au mont Fidelity. À des fins de comparaison, les tendances associées à cette variable au col Rogers ont été calculées sur la période 1969-2014.

Nous avons calculé l'équivalent en eau* des précipitations neigeuses à partir de la densité de la neige, elle-même obtenue en pesant une carotte prélevée dans la couche de neige fraîche tombée sur une planche à neige. En l'absence de mesure de densité de la neige, nous attribuons une valeur par défaut de 100 kg/m^{-3}. La densité de la neige permet de calculer le rapport de précipitations solides, autrement dit la part de précipitations solides sur le total des précipitations. Toutefois, certaines années, le rapport de précipitations solides n'a pas pu être calculé en l'absence de mesures mensuelles de précipitations. De plus, nous n'avons pas traité les précipitations mixtes (pluie et neige mêlées) comme une catégorie à part entière, nous les avons donc intégrées aux précipitations neigeuses.

La /hauteur de neige fraîche\ (HN24) a été mesurée manuellement sur le site du col Rogers sur toute la durée de l'étude. Toutefois, au mont Fidelity, la hauteur de neige fraîche journalière a d'abord été mesurée manuellement avant d'être parfois estimée, au cours des dernières années et en l'absence de spécialiste sur site, sur la base des mesures manuelles des jours précédents et suivants ainsi que des relevés horaires d'un pluviomètre et d'un capteur de hauteur de neige à ultrasons installés sur le même site.

2.3. *Avalanche data*

/We used all avalanches observed along the Trans-Canada Highway with a qualitative size of medium and large. The qualitative size (small, medium, large) is not a standard observation and was introduced by the Avalanche Control Section at Rogers Pass and is therefore not comparable to the relative size introduced by the American Avalanche Association (Greene et al., 2010). It represents the size of an avalanche in relation to the maximum avalanche that can occur in the particular path where the avalanche was observed. A medium qualitative size avalanche at Rogers Pass can be classified as an avalanche with a destructive size (CAA, 2014) of about 2 to 3 depending on the size of the avalanche path. An avalanche classified as large might reach a destructive size of 3 to 4, also depending on the size of the avalanche path.\

This size selection leaves a total number of 27,330 avalanches observed at 140 avalanche paths between 1965 and 2014 for the analysis. About two thirds of these avalanches released naturally (N = 18,238) and one third was triggered by explosive (N = 9092).

For each of these avalanches skilled observers classified the moisture content of the avalanche deposit in dry, moist, or wet deposits. For this study we grouped moist and wet avalanches into one group (moist/ wet) since it is often difficult to clearly distinguish between moist and wet avalanche deposits.

2.3. *Données avalancheuses*

/Nous avons intégré à notre étude toutes les avalanches de taille moyenne et les grosses avalanches observées le long de la route Transcanadienne. La taille des avalanches (petites, de taille moyenne et grosses) est estimée selon une méthode qualitative mise au point par l'unité de prévention des avalanches (ACS) du col Rogers. Elle ne suit donc pas de normes d'observation et n'est pas comparable avec la taille relative proposée par l'*American Avalanche Association* (Greene et al., 2010). La taille d'une avalanche est déterminée par rapport à la taille de la plus grosse avalanche susceptible de se produire dans le couloir où l'avalanche a été observée. Une avalanche de taille moyenne selon la classification qualitative du col Rogers correspond à une avalanche avec un pouvoir destructeur (CAA, 2014) de 2 ou 3 selon les dimensions du couloir d'avalanche. Une avalanche entrant dans la catégorie des grosses avalanches peut avoir un potentiel destructeur de 3 à 4 selon la taille du couloir.\

Ce critère de taille nous a permis de sélectionner, aux fins de notre analyse, un total de 27 330 avalanches observées sur 140 couloirs d'avalanche entre 1965 et 2014. Environ deux tiers de ces avalanches se sont déclenchés naturellement (N = 18 238), et un tiers a été déclenché par explosifs (N = 9 092).

Lors de leur recensement, ces avalanches ont été classées selon la /qualité de neige du dépôt\ : sec, humide ou mouillé. Aux fins de cette étude, nous avons regroupé les avalanches de neige humide et de neige mouillée dans un seul et même groupe (humide/mouillé), car il est souvent difficile d'opérer une distinction claire entre les dépôts d'avalanche humides et mouillés.

2.4. *Manual snow cover observations*

Manual snow cover* profiles recorded in a flat experimental site at Mt. Fidelity were used to assess whether or not early season **rain crusts**[F3] formed more often in recent years. Therefore, manual profiles recorded in early December between 1959 and 2014 were searched for the presence or absence of crusts. For this study we define a crust as a distinct layer thinner than 10 cm consisting of ice or melt-forms* with a hardness greater than 1 finger or a ram resistance of 400 N and higher (Fierz et al., 2009).

2.4. *Observations manuelles du manteau neigeux*

Les profils manuels du manteau neigeux*, observés sur un site expérimental plat au mont Fidelity, ont été utilisés pour déterminer si la formation de **croûtes de regel**[F3] en début d'hiver était plus fréquente ou non au cours des dernières années. Nous avons donc étudié la présence ou l'absence de croûtes sur les profils manuels établis début décembre entre 1959 et 2014. Aux fins de cette étude, nous définissons une croûte comme une couche distincte de moins de 10 cm d'épaisseur, composée de glace ou de grains ronds*, d'une dureté supérieure à un doigt ou d'une résistance au battage de 400 N et plus (Fierz et al., 2009).

2.5. *Statistical analysis*

For this study we used simple linear regression to estimate trends or long-term changes of meteorological, snow and avalanche observations. Trends were judged to be statistically significant based on a significance level of 5% (ANOVA, F-Statistic, p-value < 0.05).

/In addition, a breakpoint analysis, i.e. a segmented linear regression (Bai and Perron, 2003), was used to determine significant breaks or changes in a time series.\ This method was used to determine whether or not a significant change in melt-freeze crust occurrence took place during the investigated period. /For our breakpoint analysis we assume that the change in our data (crust occurrence; no/yes or 0/1) is not a logistic transition but a step function.\ Therefore we perform a breakpoint analysis with two segments, separated by a breakpoint, in which each segment has a significantly different intercept. The breakpoint between the segments was varied to find the value that maximized the fit to the preceding and following segments.

Simple correlation (pairwise, complete) was used to analyze relations between avalanche count (dry or moist/wet) and meteorological as well as snow parameters. We define a rank correlation coefficient (Kendall's tau) of smaller 0.3 as weak correlation, larger than 0.3 and smaller than 0.7 as moderate correlation as well as correlation coefficients of larger 0.7 as strong correlation.

2.5. *Analyse statistique*

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé une régression linéaire simple afin de dégager des tendances ou des évolutions sur le long terme des observations météorologiques, nivologiques et avalancheuses. Les tendances sont jugées statistiquement significatives pour un degré de signification inférieur à 5 % (ANOVA, statistique F, valeur-p < 0,05).

/Nous avons également procédé à une détection de rupture de pente avec une régression linéaire segmentée (Bai and Perron, 2003) afin d'identifier des ruptures ou des évolutions significatives dans une série temporelle.\ Cette méthode a permis de déterminer s'il y avait eu ou non un changement significatif de présence d'une croûte de regel sur la durée de l'étude. /Pour la détection de rupture, nous sommes partis du principe que l'évolution de nos données (présence d'une croûte ; oui/non ou 0/1) ne suivait pas une fonction logistique, mais une fonction constante par morceaux.\ Nous avons donc procédé à une détection de rupture avec deux segments séparés par un point de rupture, chaque segment ayant une ordonnée à l'origine différente. L'ajustement du point de rupture entre les segments permet d'identifier la valeur qui maximise le résultat des segments précédent et suivant.

Nous avons procédé à des corrélations simples (par paires, complètes) pour analyser les liens entre les avalanches recensées (sèches ou humides/mouillées) et les paramètres météorologiques et nivologiques. Nous avons établi qu'un coefficient de corrélation de rang (tau de Kendall) inférieur à 0,3 correspondait à une corrélation faible, un coefficient supérieur à 0,3 et inférieur à 0,7 à une corrélation modérée, et un coefficient supérieur à 0,7 à une corrélation forte.

3. Results

In the following sections, we summarize the results of the statistical analysis for the seasonal air temperature, precipitation, snow or snow cover as well as avalanche characteristics. Statistical measures are summarized for each parameter, research site and winter season in Tables 1 to 3, respectively.

Variable	Season	Rogers Pass (1315 m a.s.l.)			Mt. Fidelity (1905 m a.s.l.)		
		p-Value	R^2	T.o.P.	p-Value	R^2	T.o.P.
Ta_{mean} (°C)	Sep.–Nov.	0.51	0.01	−0.45	0.45	0.01	0.55
	Dec.–Feb.	**0.04**	**0.09**	**1.89**	**0.01**	**0.13**	**2.1**
	Mar.–May	0.38	0.01	−0.51	0.59	0.01	0.35
SPR (–)	Sep.–Nov.	0.65	0	−0.020	0.16	0.05	−0.07
	Dec.–Feb.	0.53	0.01	0.010	0.76	0.00	0
	Mar.–May	0.08	0.06	−0.090	0.11	0.06	−0.08
$HN24_{mean}$ (cm)	Sep.–Nov.	**<0.01**	**0.16**	**−1.43**	0.22	0.03	−0.82
	Dec.–Feb.	**<0.01**	**0.52**	**−4.53**	**<0.01**	**0.33**	**−3.7**
	Mar.–May	**<0.01**	**0.06**	**−3.53**	0.09	0.06	−0.8
$HN24_{max}$ (cm)	Sep.–Nov.	0.96	0	−0.21	0.96	0	0.32
	Dec.–Feb.	**0.03**	**0.09**	**−9.55**	**0.05**	**0.08**	**−9.36**
	Mar.–May	0.6	0	2.09	0.95	0	−0.24
HS_{max} (cm)	Sep.–Nov.	0.6	0.01	−6.21	0.86	0	−4.14
	Dec.–Feb.	**0.02**	**0.12**	**−42**	0.21	0.03	−35.83
	Mar.–May	**0.02**	**0.03**	**−40.36**	0.26	0.03	−31.45

Table 1 Summary statistics (simple linear regression) for mean air temperature (Ta_{mean}), the solid precipitation ratio (SPR), mean and maximum 24-hour new snow amounts ($HN24_{mean}$ and $HN24_{max}$) as well as the maximum snow depth (HS_{max}). Statistics are given for each winter season and study site location. Given are p-values, the coefficient of determination (R2) as well as the overall trend over the investigated time period (T.o.P.), i.e. 49 years. Significant trends ($p < 0.05$) are highlighted in bold.

3. Résultats

Dans les sections suivantes, nous résumons les résultats de notre analyse statistique pour la température de l'air, les précipitations, la neige ou le manteau neigeux ainsi que les caractéristiques des avalanches ; et ce pour chaque période. Les tableaux 1 à 3 récapitulent les mesures statistiques de chaque variable, chaque site et chaque période de l'hiver.

Variable	Période	Col Rogers (1315m)			Mt. Fidelity (1905m)		
		valeur-p	R^2	PC	valeur-p	R^2	PC
Ta_{moy} (°C)	Sep.–Nov.	0,51	0,01	−0,45	0,45	0,01	0,55
	Déc.–Fév.	**0,04**	**0,09**	**1,89**	**0,01**	**0,13**	**2,1**
	Mars–Mai	0,38	0,01	−0,51	0,59	0,01	0,35
RPS (–)	Sep.–Nov.	0,65	0	−0,020	0,16	0,05	−0,07
	Déc.–Fév.	0,53	0,01	0,010	0,76	0,00	0
	Mars–Mai	0,08	0,06	−0,090	0,11	0,06	−0,08
$HN24_{moy}$ (cm)	Sep.–Nov.	**<0,01**	**0,16**	**−1,43**	0,22	0,03	−0,82
	Déc.–Fév.	**<0,01**	**0,52**	**−4,53**	**<0,01**	**0,33**	**−3,7**
	Mars–Mai	**<0,01**	**0,06**	**−3,53**	0,09	0,06	−0,8
$HN24_{max}$ (cm)	Sep.–Nov.	0,96	0	−0,21	0,96	0	0,32
	Déc.–Fév.	**0,03**	**0,09**	**−9,55**	**0,05**	**0,08**	**−9,36**
	Mars–Mai	0,6	0	2,09	0,95	0	−0,24
HS_{max} (cm)	Sep.–Nov.	0,6	0,01	−6,21	0,86	0	−4,14
	Déc.–Fév.	**0,02**	**0,12**	**−42**	0,21	0,03	−35,83
	Mars–Mai	**0,02**	**0,03**	**−40,36**	0,26	0,03	−31,45

Tableau 1 Statistiques récapitulatives (régression linéaire simple) de la température moyenne de l'air (Ta_{moy}), du rapport de précipitations solides (RPS), des hauteurs de neige fraîche journalières moyennes et maximales ($HN24_{moy}$ et $Hn24_{max}$), et de la hauteur de neige maximale (HS_{max}). Les statistiques sont données pour chaque période de l'hiver et chaque site. Les mesures fournies sont la valeur-p, le coefficient de détermination (R^2) ainsi que la tendance globale sur la période considérée (PC), à savoir. 49 ans. Les tendances significatives ($p < 0,05$) sont indiquées en gras.

3.1. Air temperature

[…]

3.2. Precipitation

[…]

3.2.2. New snow amounts—HN24

Highly significant ($p < 0.01$) decreasing trends of the 24-hour mean /new snow amounts\ were found for all seasons at Rogers Pass and the mid-winter season at Mt. Fidelity (Fig. 4, Table 1). The analysis revealed a significant decreasing trend of the 24-hour maximum new snow amounts at both study sites during mid-winter (p-values 0.03 and 0.05, respectively). No significant trends were identified for the early and later winter season (Fig. 5, Table 1).

3.1. Température de l'air

[…]

3.2. Précipitations

[…]

3.2.2. Hauteurs de neige fraîche — HN24

Nous avons constaté des tendances très significatives à la baisse ($P < 0,01$) des /hauteurs de neige fraîche journalières\ moyennes, sur les trois périodes de l'hiver au col Rogers, et en milieu d'hiver au mont Fidelity. L'analyse a fait apparaître une tendance significative à la baisse des hauteurs de neige fraîche journalières maximales en milieu d'hiver dans les deux stations (valeurs-p respectivement de 0,03 et 0,05). Aucune tendance significative n'a été identifiée pour les périodes de début et fin d'hiver (Fig. 5, Tableau 1).

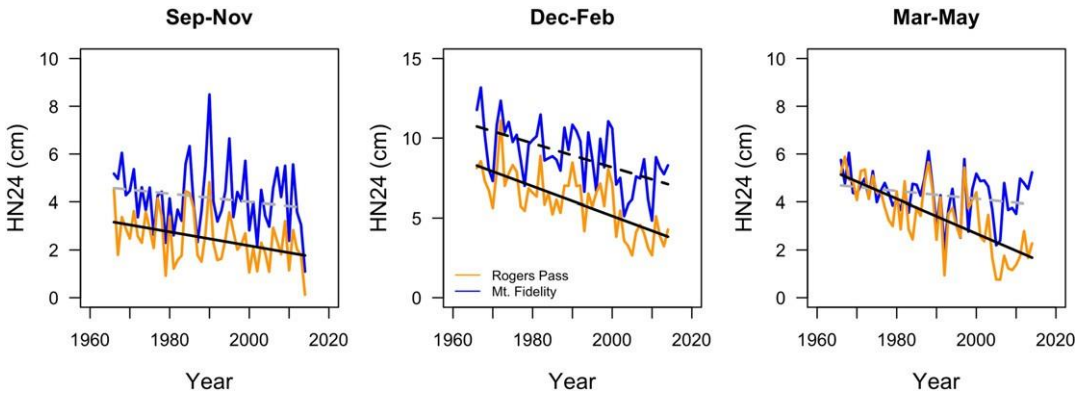


Fig.4 Mean 24-hour new snow amounts (HN24) per year and season at Rogers Pass and Mt Fidelity. [Color-coded trend lines for Rogers Pass (solid) and Mt. Fidelity (dashed) are given; whereas a grey line indicates a non-significant trend and a black line a significant trend ($p < 0.05$)].

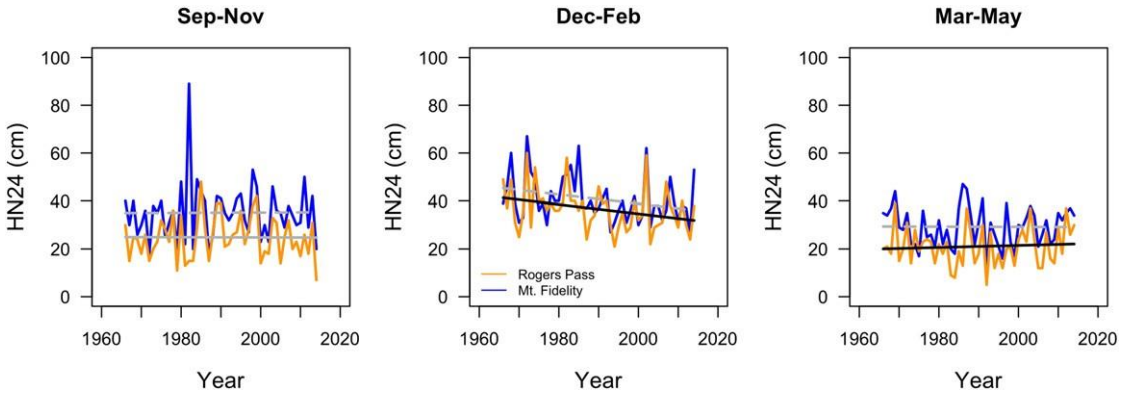


Fig. 5. Maximum 24-hour new snow amounts per year and season observed at Rogers Pass and Mt Fidelity. Color-coding as well as trend lines as in [Fig. 4].

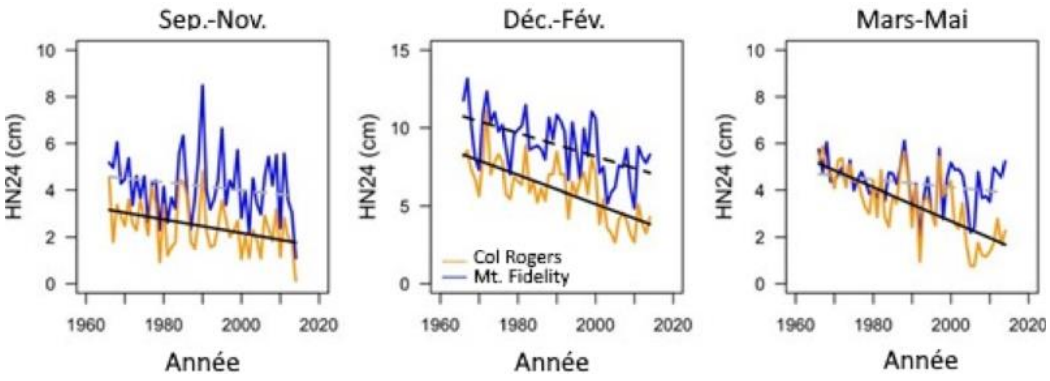


Fig. 4 Hauteurs de neige fraîche journalières moyennes (HN24) par année et par période de l'hiver au col Rogers et au mont Fidelity. Les lignes de couleurs indiquent les tendances au col Rogers (ligne continue) et au mont Fidelity (ligne pointillée). Une ligne grise indique une tendance non significative, une ligne noire une tendance significative ($p < 0,05$).

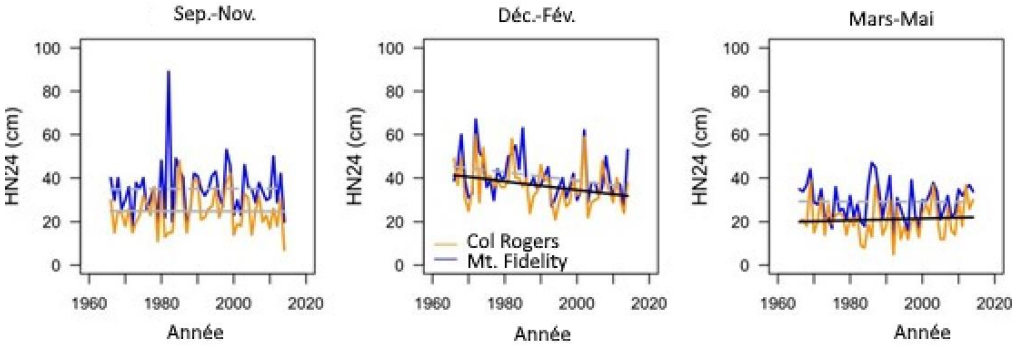


Fig. 5 Hauteurs de neige fraîche journalières maximales par année et par période de l'hiver au col Rogers et au mont Fidelity. Le code couleur utilisé est le même que pour la Fig. 4.

3.3. Snow cover

Significant decreasing trends of the maximum snow /depth\ were found for the mid and late season at Rogers Pass (Fig. 6, Table 1). Trends at Mt. Fidelity as well as early winter trends at Rogers Pass were not significant. No significant trends (Rogers Pass p = 0.28; Mt. Fidelity p = 0.66) were found for the day-of-the-year when the study site at Rogers Pass and Mt. Fidelity became snow free for the first time, i.e. snow height equals zero.

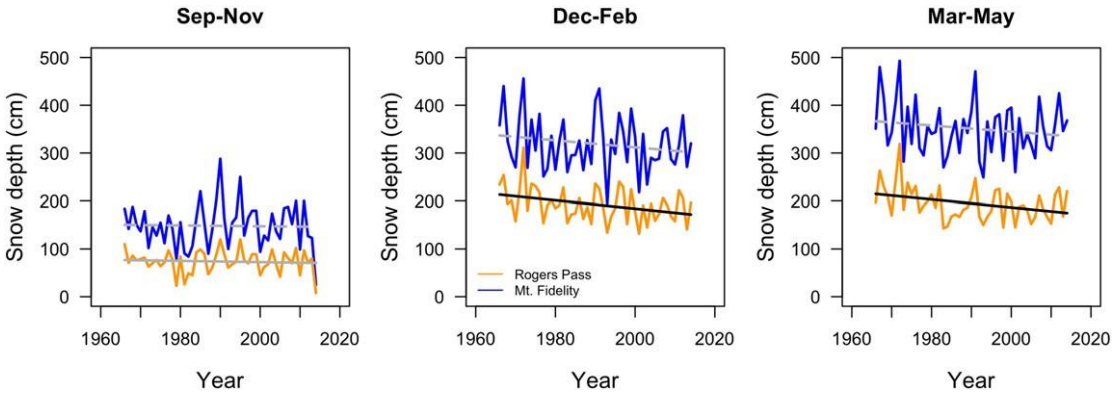


Fig. 6. Maximum snow depth per year and season measured at Rogers Pass and Mt. Fidelity. Color-coding as well as trend lines as in [Fig. 4]

3.3. Manteau neigeux

Des tendances significatives à la baisse de la /hauteur de neige\ maximale ont été constatées en milieu et en fin de saison au col Rogers (Fig. 6, Tableau 1). Les tendances observées au mont Fidelity et celles de début d'hiver au col Rogers ne sont pas significatives. Aucune tendance significative ($p = 0,28$ au col Rogers ; et $p = 0,66$ au mont Fidelity) n'a été identifiée concernant le premier jour de l'année sans neige au sol sur les sites du col Rogers et du mont Fidelity, soit lorsque la hauteur de neige est égale à zéro.

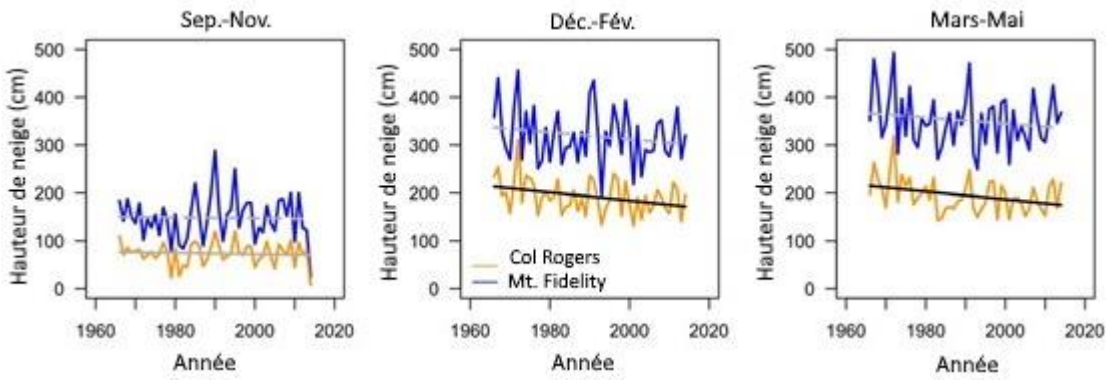


Fig. 6 Hauteur de neige maximale par année et par période de l'hiver au col Rogers et au mont Fidelity. Le code couleur utilisé est le même que pour la Fig. 4.

The analysis of the manual snow profiles observed between 1959 and 2014 showed that early season rain crusts formed more often during the last two decades (Fig. 7). A segmented linear regression using one breakpoint showed a significant breakpoint in 1994 ($p < 0.001$), i.e. significant change in crust occurrence was found for the winter season after 1994/1995.

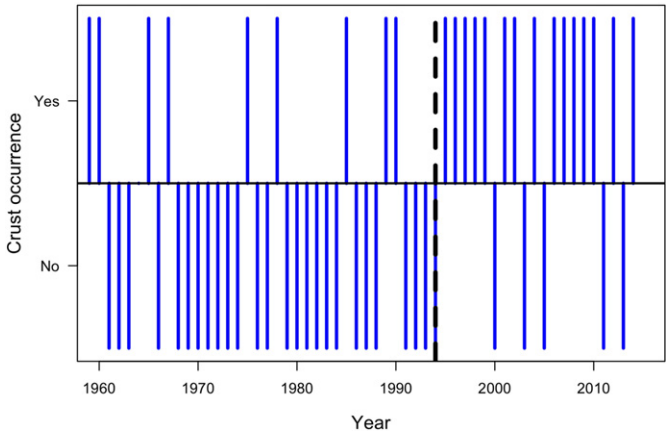


Fig. 7. Crust occurrence (Yes or No) derived from manual snow cover observations recorded between mid November and mid December from 1959 to 2014 in the near vicinity of the Mt. Fidelity study site. Dashed vertical line shows the location of the breakpoint (1994) derived from a segmented linear regression.

L’analyse des profils de neige manuels réalisés entre 1959 et 2014 a montré que la formation de croûtes de regel en début d’hiver était plus fréquente au cours des vingt dernières années (Fig. 7). Une régression linéaire segmentée avec point de rupture a montré une rupture significative en 1994 ($p < 0,001$) se traduisant par la présence plus fréquente de croûtes pour les saisons d’hiver postérieures à 1994/1995.

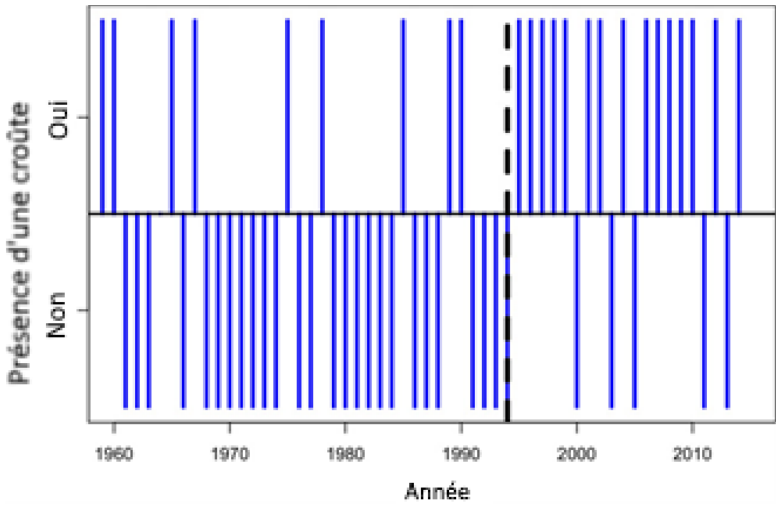


Fig. 7. Présence d’une croûte (Oui ou Non) à partir d’observations manuelles du manteau neigeux réalisées entre mi-novembre et mi-décembre de 1959 à 2014 à proximité du site du mont Fidelity. La ligne verticale pointillée indique l’emplacement de la rupture identifiée par une régression linéaire segmentée.

3.4. Avalanches

3.4.1. Deposit moisture content

The frequency distribution of the /deposit moisture content\ (dry or moist/wet) for all natural avalanches observed at Rogers Pass per season is shown in Fig. 8. No significant trends were found for natural avalanches with dry deposit for all seasons. /A negative significant trend, i.e. less moist/wet deposits, was found for the mid and late winter season between December and May\.

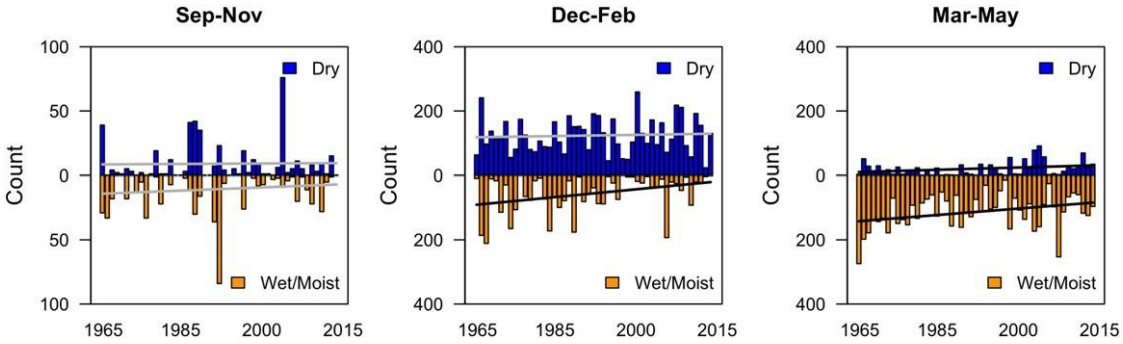


Fig. 8. Frequency distribution of all natural avalanches of size medium and large with dry deposit (blue bars) and moist/wet deposit (orange bars) observed in the Rogers Pass region between 1966 and 2014 separated by season. Solid lines indicate corresponding trend lines, whereas grey lines indicate non-significant ($p > 0.05$) trends and black lines significant trends ($p < 0.05$).

3.4. Avalanches

3.4.1. Qualité de neige du dépôt

La distribution statistique de l'ensemble des avalanches naturelles observées au col Rogers selon la qualité de neige de leur dépôt (sec ou humide/mouillé) est donnée à la Fig. 8. Aucune tendance significative des avalanches naturelles à dépôt sec n'a été identifiée, quelle que soit la période de l'hiver. /Une tendance négative significative, une baisse du nombre de dépôts humides/mouillés, a été identifiée sur les périodes de milieu et fin d'hiver, à savoir entre décembre et mai\.

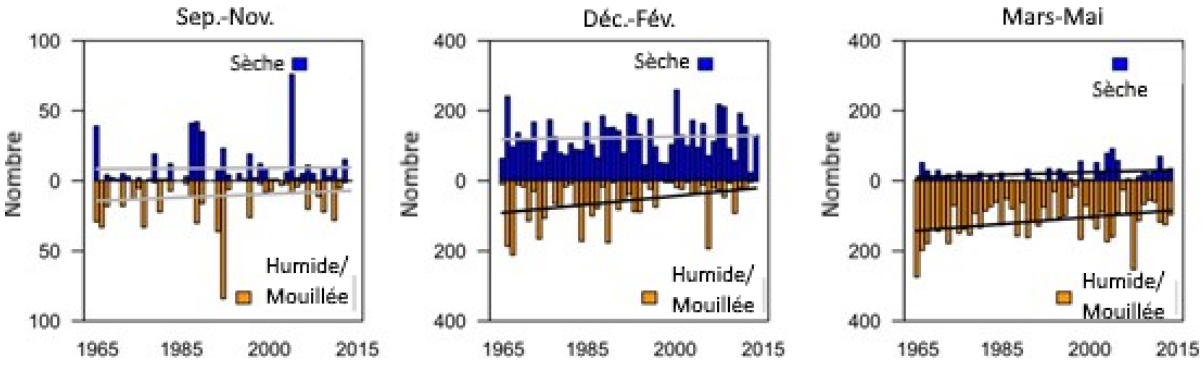


Fig. 8. Distribution des fréquences de l'ensemble des avalanches naturelles moyennes et grosses avec dépôts secs (barres bleues) et humides/mouillés (barres orange), observées dans la région du col Rogers pour chacune des trois périodes entre 1966 et 2014. Les lignes continues indiquent les tendances correspondantes. Les lignes grises indiquent des tendances non significatives ($p > 0,05$), les lignes noires des tendances significatives ($p < 0,05$).

3.4.2. Avalanche start zones

Natural avalanches release per start zone – above tree-line (ATL) and below tree-line (BTL) – was found to show significant negative trends for the mid-winter season from December to February indicating a general trend towards less avalanches during this period. All other trends in both elevation bands were found to be not significant (Figs. 8, 9; Table 2).

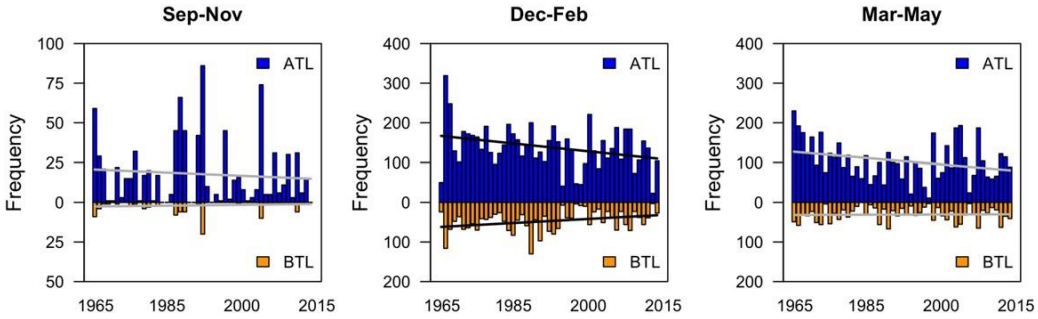


Fig. 9. Frequency distribution of all natural avalanches of size medium and large which avalanched above tree-line (ATL; start zone >2000 m) or below tree-line (BTL; start zone<2000 m) in the Rogers Pass region between 1966 and 2014 separated by season. Solid lines indicate corresponding trend lines, whereas grey lines indicate non-significant ($p > 0.05$) trends and black lines significant trends ($p < 0.05$).

Variable	Season	Dry			Moist/wet		
		p-Value	R^2	T.o.P.	p-Value	R^2	T.o.P.
Naturals	Sep.–Nov.	0.89	0	1	0.34	0.02	−7
	Dec.–Feb.	0.69	0	11	**0.01**	**0.13**	**−72**
	Mar.–May	0.05	0.08	21	**0.02**	**0.08**	**−59**
		ATL (<2000 m)			BTL (>2000 m)		
Start zone	Sep.–Nov.	0.58	0.01	−6	0.4	0.02	−3
	Dec.–Feb.	**0.03**	**0.09**	**−58**	**0.02**	**0.1**	**−30**
	Mar.–May	0.06	0.08	−47	0.85	0.08	−2

Table 2 Summary statistics (simple linear regression) for the change of frequency with time of natural avalanches (Naturals) separated by avalanches where the moisture content of the deposit was found as either dry or moist/wet. In addition given are the summary statistics for natural avalanches that avalanched on path with start zones above tree line (ATL) and below tree line (BTL). Statistics are given for each winter season. Same statistical measures and highlighting as in Table 1.

3.4.2. *Zones de départ des avalanches*

Des tendances négatives significatives ont été identifiées sur les zones de départ des avalanches naturelles situées au-dessus et au-dessous de la limite forestière (>LF et <LF) en milieu d'hiver, soit entre décembre et février ; ce qui indique une tendance générale à la baisse du nombre d'avalanches sur cette période. Aucune autre tendance ne s'est avérée significative pour chacune des deux plages altitudinales (Fig. 8 et 9, Tableau 2).

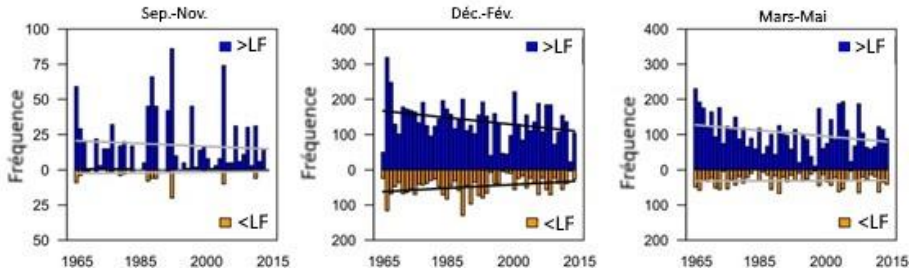


Fig. 9 Distribution des fréquences de l'ensemble des avalanches naturelles moyennes et grosses parties au-dessus de la limite forestière (>LF ; zone de départ >2000 m) ou au-dessous de la limite forestière (<LF ; zone de départ<2000 m) dans la région du col Rogers pour chacune des trois périodes entre 1966 et 2014. Les lignes continues indiquent les tendances correspondantes. Les lignes grises indiquent des tendances non significatives ($p > 0,05$), les lignes noires des tendances significatives ($p < 0,05$).

Variable	Période	Secs			Humides/Mouillés		
		valeur-p	R^2	PC	valeur-p	R^2	PC
Av. nat.	Sep.–Nov.	0,89	0	1	0,34	0,02	−7
	Déc.–Fév	0,69	0	11	**0,01**	**0,13**	**−72**
	Mars–Mai	0,05	0,08	21	**0,02**	**0,08**	**−59**
		>LF (>2000 m)			<LF (<2000 m)		
Zone dép.	Sep.–Nov.	0,58	0,01	−6	0,4	0,02	−3
	Déc.–Fév.	**0,03**	**0,09**	**−58**	**0,02**	**0,1**	**−30**
	Mars–Mai	0,06	0,08	−47	0,85	0,08	−2

Tableau 2 Statistiques récapitulatives (régression linéaire simple) de l'évolution de la fréquence des avalanches naturelles (Av. nat.), classées en deux catégories selon que leur dépôt est sec ou humide/mouillé.. Sont également fournies les statistiques récapitulatives pour les avalanches dont la zone de départ est située au-dessus de la limite forestière (>LF) et au-dessous de la limite forestière (<LF). Les chiffres sont donnés pour chaque période de l'hiver. La présentation des mesures et la mise en gras de certains résultats suivent le même modèle que pour le Tableau 1.

3.4.3. *Correlations—avalanches, snow, precipitation and temperature*

Counts of dry and moist/wet-snow avalanches were correlated with the mean air temperature, the solid precipitation ratio, mean and maximum 24-hour new snow amounts as well as the maximum snow height per avalanche season and station. Correlation coefficients are shown in Table 3. Weak to moderate positive correlation was found for almost all snow parameters, i.e. new snow amounts and snow height, for the early and late winter season, but not for the mid-winter season. No correlation was found between avalanche counts, dry or moist/wet, for the mean air temperature at both stations. A weak negative correlation was found for the solid precipitations rate (SPR) suggesting a link between rain events, i.e. decreasing SPR, and increasing wet snow avalanche activity.

Variable	Dry			Moist/wet		
	Sep.–Nov.	Dec.–Feb.	Mar.–May	Sep.–Nov.	Dec.–Feb.	Mar.–May
Rogers Pass (1315 m a.s.l.)						
Ta_{mean}	−0.06	0.08	0.07	−0.01	−0.16	0.05
SPR	0.06	−0.22	−0.05	0.13	0.02	0.11
$HN24_{mean}$	**0.42**	0.13	0.12	**0.47**	0.17	**0.44**
$HN24_{max}$	**0.41**	0.22	**0.45**	**0.42**	0.18	**0.32**
HS_{max}	**0.56**	**0.31**	0.16	**0.52**	0.05	**0.33**
Mt. Fidelity (1905 m a.s.l.)						
Ta_{mean}	−0.14	−0.07	−0.14	−0.12	0.22	−0.22
SPR	0.01	0.18	−0.01	0.02	**−0.34**	0.14
$HN24_{mean}$	0.29	0.21	**0.31**	**0.59**	0.23	**0.51**
$HN24_{max}$	**0.33**	0.18	**0.40**	**0.40**	0.22	**0.37**
HS_{max}	**0.44**	**0.35**	0.15	**0.57**	0.12	**0.32**

Table 3 Correlation coefficients (Kendall's tau) derived by simple correlation of avalanche counts (dry or moist/wet) and mean air temperature (Ta), solid precipitation rate (SPR), mean and maximum 24-hour new snow amounts as well as the maximum snow depth (HS). Correlation was performed for each station and winter season. Moderate and strong correlations, i.e. correlation coefficients > 0.3 are highlighted in bold.

3.4.3. *Corrélations entre avalanches et neige, précipitations et températures*

Le nombre d'avalanches sèches et humides/mouillées recensées a été corrélé avec la température moyenne de l'air, le rapport de précipitations solides, les hauteurs de neige fraîche journalières moyennes et maximales, et les hauteurs de neige maximales par période hivernale et par station. Les coefficients de corrélation sont indiqués dans le Tableau 3. Nous avons trouvé une corrélation positive faible à modérée pour presque tous les paramètres relatifs à la neige, à savoir les hauteurs de neige fraîche et la hauteur de neige maximale, pour les périodes de début et fin d'hiver, mais pas pour le milieu d'hiver. Nous n'avons trouvé aucune corrélation entre les avalanches recensées (sèches ou humides/mouillées) et la température moyenne de l'air, au col Rogers comme au mont Fidelity. Nous avons déterminé une faible corrélation négative pour le rapport de précipitations solides (RPS), ce qui semble indiquer un lien entre précipitations pluvieuses (un RPS en baisse), et une hausse du nombre d'avalanches de neige mouillée.

Variable	Sèches			Humides/Mouillées		
	Sep.–Nov.	Déc.–Fév.	Mars–Mai	Sep.–Nov.	Déc.–Fév.	Mars–Mai
Col Rogers (1315 m)						
Ta_{moy}	−0,06	0,08	0,07	−0,01	−0,16	0,05
RPS	0,06	−0,22	−0,05	0,13	0,02	0,11
$HN24_{moy}$	**0,42**	0,13	0,12	**0,47**	0,17	**0,44**
$HN24_{max}$	**0,41**	0,22	**0,45**	**0,42**	0,18	**0,32**
HS_{max}	**0,56**	**0,31**	0,16	**0,52**	0,05	**0,33**
Mt. Fidelity (1905 m)						
Ta_{moy}	−0,14	−0,07	−0,14	−0,12	0,22	−0,22
RPS	0,01	0,18	−0,01	0,02	**−0,34**	0,14
$HN24_{moy}$	0,29	0,21	**0,31**	**0,59**	0,23	**0,51**
$HN24_{max}$	**0,33**	0,18	**0,40**	**0,40**	0,22	**0,37**
HS_{max}	**0,44**	**0,35**	0,15	**0,57**	0,12	**0,32**

Tableau 3 Coefficients de corrélation (tau de Kendall) obtenus par une corrélation simple entre les avalanches recensées (sèches ou humides/mouillées), la température moyenne de l'air (Ta_{moy}), le rapport de précipitations solides (RPS), les hauteurs de neige fraîche journalières moyennes et maximales ($HN24_{moy}$, $HN24_{max}$), et la hauteur de neige maximale (HS). Les corrélations sont établies pour chacune des stations et des périodes de l'hiver. Des corrélations modérées et fortes (coefficients de corrélation > 0,3) sont indiquées en gras.

4. Discussion

For Rogers Pass (1315 m) and Mt Fidelity (1905 m) study sites, four and three of the weather and snowpack parameters in Table 1 show significant trends for at least one avalanche season. When the avalanche seasons are considered separately, seven of the 15 trends for Rogers Pass and three of the 15 for Mt Fidelity are significant. Each of the significant trends is consistent with expectations for climate warming, i.e. warmer temperatures and less snowfall over monthly or longer periods. Also, greater effects (or in this study more trends that are significant) at lower elevations (Rogers Pass 1315 m) than at higher elevations (Mt. Fidelity 1905 m) are consistent with climate change. Further the increase in the number of early winter rain crusts shown in Fig. 7 is consistent with climate change. Trends towards greater or more frequent extremes are not apparent in Figs. 1 to 6, 8 or 9. However, the shortest period displayed is three months, so extremes on the scale of days or multi-day storms would not be apparent.

Analyzed trends, even when significant, show low coefficients of determination (Tables 1, 2). This can partly be explained by the large interannual variations of the data and use of a simple linear regression. However, applying more robust methods (e.g. Mann–Kendall Test, not shown) exhibited similar results. Therefore, we believe that applying an easily interpretable method such as a linear regression is justifiable.

4. Discussion

Pour les sites du col Rogers (1315 m) et du mont Fidelity (1905 m), quatre et trois des variables météorologiques et relatives au manteau neigeux du Tableau 1 indiquent des tendances significatives pour au moins une des trois périodes de l'hiver. Lorsque les périodes hivernales sont étudiées séparément, 7 des 15 tendances sont significatives au col Rogers contre 3 au mont Fidelity. Chaque tendance significative est cohérente avec les projections de réchauffement climatique, qui indiquent des températures en hausse et des chutes de neige en baisse à l'échelle du mois ou sur de plus longues périodes. De plus, des effets plus importants (ou, dans le cadre de cette étude, davantage de tendances significatives) à basse altitude (col Rogers, 1315 m) qu'à haute altitude (mont Fidelity, 1905 m) sont cohérents avec un changement climatique. En outre, la hausse du nombre de croûtes de regel formées en début d'hiver tel que l'indique la figure 7 est cohérente avec un changement climatique. Les figures 1 à 6 et 8 et 9 n'indiquent pas de tendances correspondant à des extrêmes plus élevés ou plus fréquents. En tout état de cause, la plus courte période d'étude étant de trois mois, les extrêmes enregistrés lors de tempêtes journalières ou plurijournalières n'apparaîtraient pas.

Même lorsque les tendances analysées sont significatives, elles témoignent de faibles coefficients de détermination (Tableaux 1 et 2). Ce phénomène peut s'expliquer en partie par les grandes variations interannuelles des données et par le recours à une régression linéaire simple. Toutefois, le recours à des méthodes plus robustes (test de Mann-Kendall, non présenté ici) permet d'obtenir des résultats similaires. Le recours à une méthode facile d'interprétation telle que la régression linéaire nous semble donc justifié.

Long-term time series of meteorological and avalanche observations in mountainous terrain are rare in Canada. However, the Avalanche Control Section (ACS) at Glacier National Park has been recording these data systematically since the early 1960s leaving a data set of about 27,000 avalanches with a relative size of medium and larger. ACS does avalanche control work in the Rogers Pass area ensuring safe public transportation. This control work, i.e. avalanche release by explosive, might have biased our data set. However, a strong positive correlation of 0.72 was found between counts of natural avalanches and explosive controlled avalanches suggesting that explosive control in the Rogers Pass area does not strongly reduce natural avalanche activity. Hence, apparent trends are not likely to be highly biased, which is also shown by the fact that almost two-thirds of all analyzed avalanches were natural releases. In addition, Sinickas et al. (2015) found no substantial difference in natural avalanche activity between paths in British Columbia outside of Glacier National Park that were frequently controlled by explosives and paths with more than 75% natural avalanches.

Les longues séries de données d'observations météorologiques, nivologiques et avalancheuses sont rares au Canada. Toutefois, l'unité de prévention des avalanches (ACS) du parc national des Glaciers a systématiquement collecté ces données depuis le début des années 1960, constituant un jeu de données d'environ 27 000 avalanches de taille relative moyenne à grosse. L'ACS assure le déclenchement préventif d'avalanches dans la région du col Rogers afin de sécuriser le transport routier et ferroviaire. Ces opérations de prévention, à savoir le déclenchement préventif d'avalanches par explosifs, ont pu fausser notre jeu de données. Toutefois, une forte corrélation positive de 0,72 a été constatée entre les avalanches naturelles recensées et les avalanches préventives déclenchées, ce qui semble indiquer que le recours aux explosifs dans la région du col Rogers ne réduit pas de façon notable l'activité avalancheuse naturelle. En outre, deux tiers des avalanches étudiées sont des avalanches naturelles, ce qui renforce l'idée que les tendances présentées ne devraient pas être largement faussées. De plus, l'étude de Sinickas et al. (2015) n'a pas relevé de différence substantielle de l'activité avalancheuse entre les couloirs d'avalanche de Colombie-Britannique situés en dehors du parc national des Glaciers, où sont régulièrement effectués des déclenchements préventifs, et ceux où plus de 75 % des avalanches sont naturelles.

During the early years of the avalanche program at Rogers Pass meteorological data were manually observed routinely at least twice daily and automatically during the last two decades. Homogenization of long-term meteorological data is typically required prior to analysis. However, homogenization for both stations was not possible since this typically requires at least a few other stations with similar geographical location or characteristics. Neither station has moved during the investigated time period and observational methods – except for new snow amounts – were similarly applied to both stations, i.e. should show the same trends. In addition, Venema et al. (2012) showed that absolute homogenization methods could make the data even more inhomogeneous if the data shift or error is unknown. However, trend comparisons, although similar to trends found outside the Park (e.g. Sharma and Déry, 2015) need to be interpreted cautiously.

Au cours des premières années du programme, les données météorologiques étaient relevées manuellement au minimum deux fois par jour au col Rogers. Ces relevés ont ensuite été automatisés pour les vingt dernières années. L'homogénéisation des longues séries de données météorologiques est normalement un préalable à l'analyse. Toutefois, en l'absence de stations présentant un emplacement géographique ou des caractéristiques semblables aux nôtres, nous n'avons pas pu procéder à l'homogénéisation des données. Aucune des deux stations n'a néanmoins été déplacée sur la durée de l'étude et les méthodes d'observation utilisées, à l'exception de la mesure des hauteurs de neige fraîche, étaient les mêmes pour les deux stations et devraient donc indiquer les mêmes tendances. En outre, Venema et al. (2012) ont démontré que des méthodes d'homogénéisation absolue peuvent être source d'inhomogénéité tant qu'on n'a pas identifié l'origine de la rupture ou de l'erreur dans les données. Les comparaisons de tendances, bien que semblables à celles observées en dehors du parc (voir p. ex. Sharma and Déry, 2015) doivent malgré tout être interprétées avec précaution.

Understanding and quantifying the effect of climate change on the environmental system is one of the main aims of the climate science community. However, linking climate change to avalanche activity remains challenging. For example increasing air temperature might stabilize the snow cover; on the other hand warmer air can hold more moisture, which might result in larger precipitation amounts, and therefore increase avalanche activity.

However, the latter might not be the case since our analysis showed decreasing significant trends for the mean 24-hour new snow amounts at Rogers Pass station for all seasons and at Mt. Fidelity station during the mid-season. In addition, we found significant decreasing trends of the maximum 24-hour new snow amounts for the mid-season at Rogers Pass and Mt. Fidelity station suggesting less intense storms.

Consequently, reduced 24-hour new snow amounts result in decreasing maximum snow depth. However, a significant decrease was only found for Rogers Pass (1315 m a.s.l.) for the mid and late season. No changes were found for Mt. Fidelity station (1905 m a.s.l.). No trends were found at both stations for the day-of-the-year when the experimental site became snow free for the first time.

[…]

La compréhension et la quantification des effets du changement climatique sur le système environnemental font partie des principaux objectifs de la communauté scientifique étudiant le climat. Néanmoins, il demeure difficile d'établir un lien entre changement climatique et activité avalancheuse. Une hausse de la température de l'air peut par exemple avoir pour effet de stabiliser le manteau neigeux, mais comme l'air chaud peut contenir plus d'eau, cela peut également avoir pour conséquence des cumuls de précipitations plus importants, et donc une hausse de l'activité avalancheuse.

Toutefois, cette hausse des cumuls de précipitations se traduisant par une augmentation de l'activité avalancheuse pourrait ne pas se vérifier. En effet, nos analyses indiquent des tendances significatives à la baisse des hauteurs de neige fraîche journalières moyennes, sur chaque période de l'hiver à la station du col Rogers, et sur la période de milieu d'hiver à la station du mont Fidelity. De plus, nous avons observé des tendances significatives à la baisse des hauteurs de neige fraîche journalières maximales sur la période de milieu d'hiver pour les stations du col Rogers et du mont Fidelity, ce qui semble indiquer une baisse des épisodes de fortes précipitations.

Par conséquent, une baisse des hauteurs de neige fraîche journalières se traduit par une baisse de la hauteur de neige maximale. Toutefois, une baisse significative n'a été constatée qu'au col Rogers (1315 m) pour les périodes de début et milieu d'hiver. Aucune évolution n'a été constatée à la station du mont Fidelity (1905 m). Pour chacune des deux stations, aucune tendance n'a été identifiée concernant le premier jour de l'année sans neige au sol.

[…]

During the last two decades, early season rain crusts occurred more often in manually observed snow profiles at Mt. Fidelity. A segmented linear regression showed a significant breakpoint in 1994, i.e. a significant change in crust occurrence after the winter season of 1994/1995. Nevertheless, the existence of the crusts suggests more rain events, i.e. a decreasing SPR during the early season, although no significant trends in the solid precipitation rate were found.

A moderate negative correlation of moist/wet avalanche counts with the solid precipitation rate during the mid-season (Table 3) might suggest more avalanches triggered by rain events during this period. Alternatively, this could be due to moist or wet snow being entrained along the avalanche path in lower elevations.

Au cours des vingt dernières années, des croûtes de regel formées en début d'hiver apparaissaient plus fréquemment sur les profils de manteau neigeux relevés manuellement au mont Fidelity. Une régression linéaire segmentée a indiqué une rupture significative en 1994, à savoir la présence bien plus fréquente de croûtes après l'hiver 1994/1995. Toutefois, si la présence de croûtes évoque des précipitations pluvieuses en hausse, soit un RPS en baisse en début d'hiver, aucune tendance significative n'a été observée concernant le rapport de précipitations solides.

Une corrélation négative modérée entre les avalanches humides/mouillées recensées et le rapport de précipitations solides en milieu de saison (Tableau 3) pourrait indiquer que les précipitations pluvieuses conduisent à un pic de déclenchement d'avalanches au cours de cette période. Cette corrélation pourrait également être liée à l'écoulement de la neige humide ou mouillée à plus basse altitude que la neige sèche dans un même couloir d'avalanche.

Avalanche formation is clearly related to atmospheric conditions including precipitation rate, duration, and type as well as wind, air temperature, and radiation. All these driving agents for avalanche formation changed in recent years as stated by the IPCC (IPCC, 2013). Therefore, avalanche activity should also be affected by changing atmospheric conditions in a changing global climate. However, avalanche cycles are caused by short-term weather systems (days) rather than long-term climate trends (decades). In addition, avalanche formation is rather a combination of snow cover structure in combination with preceding and current weather conditions. This is supported by correlating avalanche counts with snow parameters (Table 3). Although the correlations are not highly significant, Table 3 suggests that an increase in new snow amounts and consequently snow heights correlates with increasing counts of avalanches or – simply spoken – more snowfall results in more avalanches.

La formation des avalanches est étroitement liée aux conditions atmosphériques, notamment au taux, à la durée et au type de précipitations, ainsi qu'au vent, à la température de l'air et aux rayonnements. L'ensemble de ces éléments qui conduisent à la formation d'avalanches ont évolué ces dernières années, comme l'indique le GIEC (IPCC, 2013). Dans un climat en mutation à l'échelle planétaire, l'évolution des conditions atmosphériques devrait se répercuter sur l'activité avalancheuse. Toutefois, les phénomènes avalancheux sont liés aux systèmes météorologiques de court terme (journaliers) plutôt qu'à des tendances climatiques à long terme (décennales). De plus, la formation d'avalanches ne dépend pas uniquement des conditions météorologiques présentes et passées, mais de leur combinaison avec la structure du manteau neigeux. La corrélation entre avalanches recensées et variables nivologiques témoigne de ce phénomène (Tableau 3). Bien que les corrélations ne soient pas hautement significatives, le Tableau 3 indique qu'une hausse des hauteurs de neige fraîche et, par conséquent, de la hauteur totale de neige, est corrélée avec un plus grand nombre d'avalanches. Pour le dire simplement, des chutes de neige plus importantes conduisent à une recrudescence du nombre d'avalanches.

Therefore, snow cover structure should be introduced into analysis of long-term avalanche records especially when linked to climate change scenarios as suggested by e.g. Haegeli and McClung (2007).

Nevertheless, in our large data set of observed natural avalanches we found significant change in avalanche characteristics. A significant decreasing trend for natural avalanches with moist or wet deposits was found for the mid and late avalanche season from December to May. This seems counter-intuitive since one would expect more moist/wet deposits or avalanches in a warming climate. However, as stated above warming, i.e. settling or melting and refreezing, can also stabilize the snow cover and hence, less natural avalanches might release. Furthermore, our data set suggests less avalanches, i.e. decreasing trends, during the mid-season from December to February for avalanches releasing below and above tree-line, which is in alignment with increasing air temperature and decreasing new snow amounts for the same period. However, due to the intense explosive triggering during this period in the area, the avalanche data set might be biased and the trends, even when significant, have to be interpreted carefully.

Ainsi, la structure du manteau neigeux devrait être intégrée aux études sur le long terme des avalanches passées, notamment lorsqu'il s'agit d'établir un lien avec les scénarios de changement climatique, comme l'indique par exemple l'étude de Haegeli et McClung (2007).

Toutefois, nous avons identifié dans notre longue série de données d'avalanches naturelles une évolution significative des caractéristiques des avalanches. Nous avons constaté une tendance significative à la baisse des avalanches naturelles avec dépôts humides ou mouillés sur les périodes de milieu et fin d'hiver, à savoir de décembre à mai. Cette observation semble contre-intuitive puisqu'il est plus facile d'imaginer que le réchauffement climatique conduit à une hausse du nombre d'avalanches ou de dépôts humides ou mouillés. Toutefois, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, le réchauffement, qui se traduit par le tassement ou par la fonte suivie d'un regel du manteau neigeux, peuvent contribuer à sa stabilisation, et donc conduire à une diminution du nombre de départ d'avalanches spontanées. En outre, notre jeu de données semble indiquer une diminution du nombre d'avalanches, à savoir des tendances à la baisse des départs d'avalanches au-dessus et au-dessous de la limite forestière, concomitante avec une hausse des températures de l'air et une baisse des hauteurs de neige fraîche sur la période de milieu d'hiver, soit entre décembre et février. Cependant, les importantes opérations de déclenchement préventif par explosifs sur cette période ont pu fausser notre jeu de données avalancheuses. Il convient donc d'interpréter les tendances avec prudence, même lorsqu'elles sont significatives.

Références bibliographiques apparaissant dans la traduction, par ordre alphabétique des auteurs :

- Bai, J., Perron, P., 2003. *Computation and analysis of multiple structural change models* [Calcul numérique et analyse de modèles avec changements structurels multiples]. J. Appl. Econ. 18, 1–22.

- Canadian Avalanche Association (CAA), 2014. *Observation Guidelines and Recording Standards for Weather, Snow Cover and Avalanches* [Lignes directrices pour les observations et mesures météorologiques, nivologiques et avalancheuses]. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, BC, Canada.

- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., 2012. *Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 yr in the French Alps* [Contrôle climatique nivo-météorologique sur les fluctuations du nombre d'avalanches de neige, étude sur 50 ans dans les Alpes françaises]. Clim. Past 8, 855–875.

- Eckert, N., Parent, E., Kies, R., Baya, H., 2010a. *A spatiotemporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps* [Cadre de modélisation spatio-temporel pour l'étude des fluctuations du nombre d'avalanches de neige dues au changement climatique : application à 60 ans de données dans les Alpes du nord françaises]. Clim. Chang. 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 [Étude de la réponse altitudinale des dépôts avalancheux aux fluctuations climatiques par une modélisation hiérarchique : application aux données de 61 hivers en France]. J. Clim. 23, 3157–3180.

- 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* [Tendances temporelles dans l'activité avalancheuse dans les Alpes françaises et à plus petite échelle : du nombre d'avalanches et de l'altitude des dépôts aux périodes de retour variables]. J. Glaciol. 59 (213), 93–114.

- Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K., Sokratov, S.A., 2009. *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground* [Classification internationale de la neige saisonnière au sol]. IHP Tech. Doc. in Hydrol. Ser. UNESCO-IHP, Paris.

- Fitzharris, B.B., 1987. *A climatology of major avalanche winters in western Canada* [Climatologie des hivers à forte activité avalancheuse dans l'ouest du Canada]. Atmos. Ocean 25, 115–136.

- Germain, D., Filion, L., Hétu, B., 2009. *Snow avalanche regime and climatic conditions in the Chic-Choc Range*, eastern Canada [Caractéristiques des avalanches de neige et conditions climatiques dans le massif des Chic-Choc dans l'est du Canada]. Clim. Chang. 92, 141–167.

- Greene, E., Atkins, D., Birkeland, K., Elder, K., Landry, C., Lazar, B., Mc Cammon, I., Moore, M., Sharaf, D., Sternenz, C., Tremper, B., Wiliams, K., 2010. *Snow,*

Weather and Avalanches: Observation Guidelines for Avalanche Programs in the United States [Météorologie et avalanches : lignes directrices pour la surveillance des avalanches aux États-Unis]. American Avalanche Association, Pagosa Springs, CO (Second Printing Fall 2010).

- Haegeli, P., McClung, D., 2007. *Expanding the snow-climate classification with avalanche- relevant information: initial description of avalanche winter regimes for southwestern Canada* [Intégration des informations pertinentes relatives aux avalanches à la classification neige-climat : une première description des caractéristiques des avalanches hivernales dans le sud-ouest du Canada]. J. Glaciol. 53 (181).

- IPCC, 2013. *Summary for Policymakers* [Résumé à l'intention des décideurs]. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Schleiss, V.G., 1989. *Roger Pass Snow Avalanche Atlas* [Atlas neige et avalanche du Col Rogers]. Glacier National Park, British Columbia, Canada, Parks Canada, Ottawa, Canada.

- Sinickas, A., Maes, M.A., Jamieson, B., 2015. *Assessing the effects of changing climate on snow avalanche activity in Canada* [Étude des effets du changement climatique sur les avalanches de neige au Canada]. Journal of Structure and Infrastructure Engineering, Special Issue, International Forum on Engineering Decision Making 2013: Decision- Making in a Changing Climate.

PARTIE III : STRATÉGIE DE TRADUCTION

Cette partie du mémoire vise à présenter la méthode suivie lors de la traduction, ainsi que les principales difficultés rencontrées et la manière dont celles-ci ont été surmontées. À cet égard, nous présenterons le texte support de la traduction ainsi que les outils utilisés, puis détaillerons les difficultés dont la résolution a jalonné le processus de traduction. Ces dernières relèvent de deux catégories, selon qu'il s'agit de considérations terminologiques ou de problèmes de reformulation.

1. Présentation du texte support

Le texte support de ma traduction est un article intitulé "Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada" [54]. Publié en janvier 2016 dans la revue *Cold Regions Science and Technology* (volume 121, p. 118-125), il reprend le travail présenté par ses auteurs dans le cadre des *International Snow Science Workshop* (ISSW), cycle de conférences annuel en nivologie réunissant des chercheurs de nationalités et de spécialités différentes.

Cinq personnes ont pris part à cette étude. L'auteur correspondant, Sascha Bellaire, est un météorologue suisse formé à Davos. Ses travaux de recherche l'ont amené à travailler à l'étranger, et notamment au Canada entre 2010 et 2013. La deuxième personne à avoir participé à cette étude est le canadien Bruce Jamieson. Il étudie les avalanches depuis 35 ans, est rattaché au département de génie civil de l'Université de Calgary et est également membre de la *Canadian Avalanche Association*. Scott Thumlert a lui participé en tant que membre du département de gestion des ressources et de l'environnement de l'Université Simon Fraser à Burnaby (Colombie-Britannique). En outre, Jeff Goodrich a été rattaché au projet en tant que membre de l'unité de prévention des

[54] *Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada - ScienceDirect*, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X15002505, consulté le 14 février 2022.

avalanches du col Rogers. Enfin, Grant Statham de Parcs Canada, l'agence qui gère les parcs nationaux canadiens dont le parc national des Glaciers, a également contribué au projet.

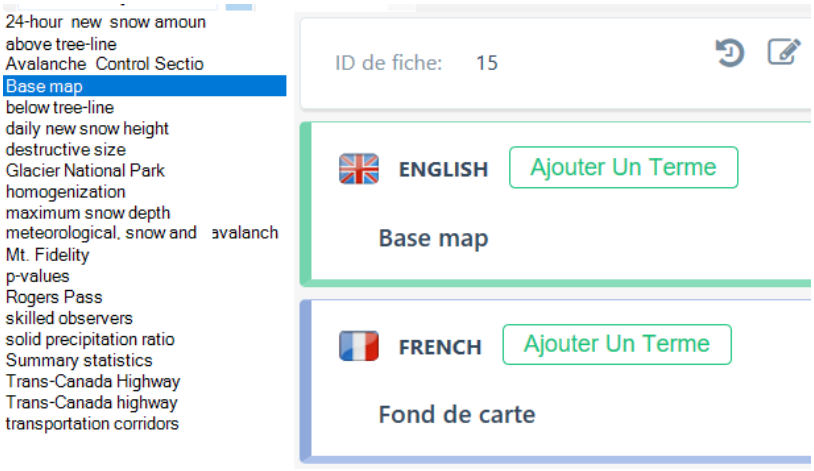
Cet article est la synthèse d'un travail de recherche visant à expliquer les conséquences du changement climatique sur les avalanches par l'établissement de corrélations entre l'évolution de variables climatiques et une modification du comportement des avalanches. Le réchauffement climatique se fait particulièrement ressentir sur les territoires de montagne[55]. La qualité et la quantité des précipitations neigeuses ainsi que les conditions subies par la neige au sol évoluent rapidement, tout comme le nombre, le volume et la dynamique des avalanches. Les auteurs ont cherché à identifier des tendances afin d'adapter la gestion du risque à la transformation des phénomènes.

Dans le cadre de ce mémoire, le texte-support de ma traduction devait comporter environ 3000 mots. Or, l'article dans son ensemble en comptait plus de 6000. J'ai donc dû effectuer des coupes en veillant à ne pas nuire à la cohérence d'ensemble du texte. J'ai choisi de ne pas traduire le résumé et la conclusion puisqu'ils reprennent ce qui est exposé dans le corps de l'article, et ai décidé de couper certains passages de l'introduction ainsi que d'autres relatifs à certaines variables dont les résultats se sont révélés statistiquement non significatifs.

[55] Montagnes, *Changement climatique en montagne : qu'en savons-nous exactement ?*, https://www.montagnes-magazine.com/actus-changement-climatique-transition-territoires-de-montagne-en-questions, consulté le 14 janvier 2022.

2. Outils utilisés

J'ai effectué ma traduction avec Trados Studio 2021. J'ai ainsi pu mettre à profit mes cours de traduction assistée par ordinateur (TAO) de M2, et ai profité des fonctionnalités qu'offre un tel outil sur un texte d'une certaine longueur. Un des principaux avantages est de conserver la mise en page du texte source en générant le texte cible, et donc de ne pas avoir à s'en occuper au fil de la traduction. J'ai également créé une mémoire de traduction et une base terminologique que j'ai alimentée en cours de traduction en créant des fiches terminologiques (voir extrait ci-après), tant pour harmoniser la traduction de certains termes que pour éviter des erreurs ou variantes typographiques (utilisation de tirets, de majuscules…). J'ai également profité de la frappe prédictive qui constitue un gain de temps pour les termes qui reviennent régulièrement.



Extrait de la base terminologique alimentée en cours de traduction sur Trados Studio 2021

J'ai utilisé l'outil graphique gratuit paint.net pour la traduction du texte des figures.

J'ai fait le choix de ne commencer à traduire qu'après avoir rédigé une grande partie de mon exposé, et après avoir effectué des recherches sur les termes de statistiques présents dans la traduction. J'avais donc déjà téléchargé et lu beaucoup d'articles sur la dynamique des avalanches, l'étude des

variables nivométéorologiques et les conséquences liées au changement climatique. J'avais également consigné un nombre conséquent de sources dans Zotero, le logiciel de gestion de références bibliographiques qui m'a facilité les citations et la constitution de ma bibliographie. J'étais donc familière de la plupart des termes que j'allais devoir traduire, et disposais d'un corpus fiable et solide pour mes recherches. J'ai néanmoins complété ces recherches en cours de traduction dans de nouvelles sources, souvent avec des recherches de mots-clés dans Google Scholar. J'ai conservé des traces de tous les sites et articles consultés, tant pour m'aider dans la révision que pour anticiper la rédaction de la partie « Problèmes de traduction » qui suit.

3. Problèmes de traduction

Nous présenterons dans cette partie les difficultés rencontrées en cours de traduction ainsi que les méthodes suivies pour les dépasser. Nous aborderons d'abord certains points de terminologie de spécialité avant de traiter des enjeux de reformulation.

3.1. Terminologie de spécialité

Le texte que j'ai traduit décrit une étude menée au Canada, mais est destiné à un public français. Cette considération a guidé plusieurs de mes choix terminologiques. D'une part, concernant la terminologie relative à la taille des avalanches, j'ai dû prendre garde à ne pas plaquer la terminologie européenne applicable aux phénomènes avalancheux dans l'arc alpin sur la réalité canadienne. D'autre part, j'ai dû prendre du recul sur certains équivalents existants du fait de sources institutionnelles canadiennes proposées en anglais et en français. En outre, j'ai dû opérer certains choix qui m'ont conduite à supprimer la synonymie présente dans le texte source pour des raisons de clarté. Enfin, j'ai rencontré des difficultés terminologiques classiques, pour la recherche d'équivalents dans les domaines statistique et nivo-météorologique.

3.1.1. Adaptation de la terminologie de taille des avalanches à la réalité nord-américaine

Dans la partie *"2.3. Avalanche data"* (p. 69), l'article explique que la taille des avalanches intégrées à l'étude ne correspond pas à une méthode de classification standard qui respecte des critères quantitatifs (masse, distance d'écoulement, pression d'impact), mais est évaluée par l'unité de prévention des avalanches du col Rogers :

> *"We used all avalanches observed along the Trans-Canada Highway with a qualitative size of medium and large. The qualitative size (small, medium, large) is not a standard observation and was introduced by the Avalanche Control Section at Rogers Pass and is therefore not comparable to the relative size introduced by the American Avalanche Association (Greene et al., 2010). It represents the size of an avalanche in relation to the maximum avalanche that can occur in the particular path where the avalanche was observed. A medium qualitative size avalanche at Rogers Pass can be classified as an avalanche with a destructive size (CAA, 2014) of about 2 to 3 depending on the size of the avalanche path."*

L'enjeu dans la traduction de ce passage était de bien cibler le rôle respectif des différents acteurs cités (*Avalanche Control Section, American Avalanche Association, Canadian Avalanche Association*) dans l'évaluation de la taille des avalanches, et d'identifier la terminologie utilisée, pour ne pas employer un vocabulaire qui correspondrait à la description de la taille des avalanches en France mais ne reflèterait pas la réalité en Amérique du Nord.

L'American Avalanche Association a contribué à introduire dans l'échelle nord-américaine de risque d'avalanche une taille d'avalanche potentielle selon le degré de risque, reproduite ci-après en anglais[56], puis en français[57] :

[56] G. Statham et al., « The North American Public Avalanche Danger Scale », art. cit.
[57] Agence Parcs Canada, *Échelle canadienne de risque d'avalanche - Sécurité en montagne*, https://www.pc.gc.ca/fr/pn-np/mtn/securiteenmontagne-mountainsafety/avalanche/echellerisque-dangerscale, 8 mars 2017, consulté le 24 mai 2022.

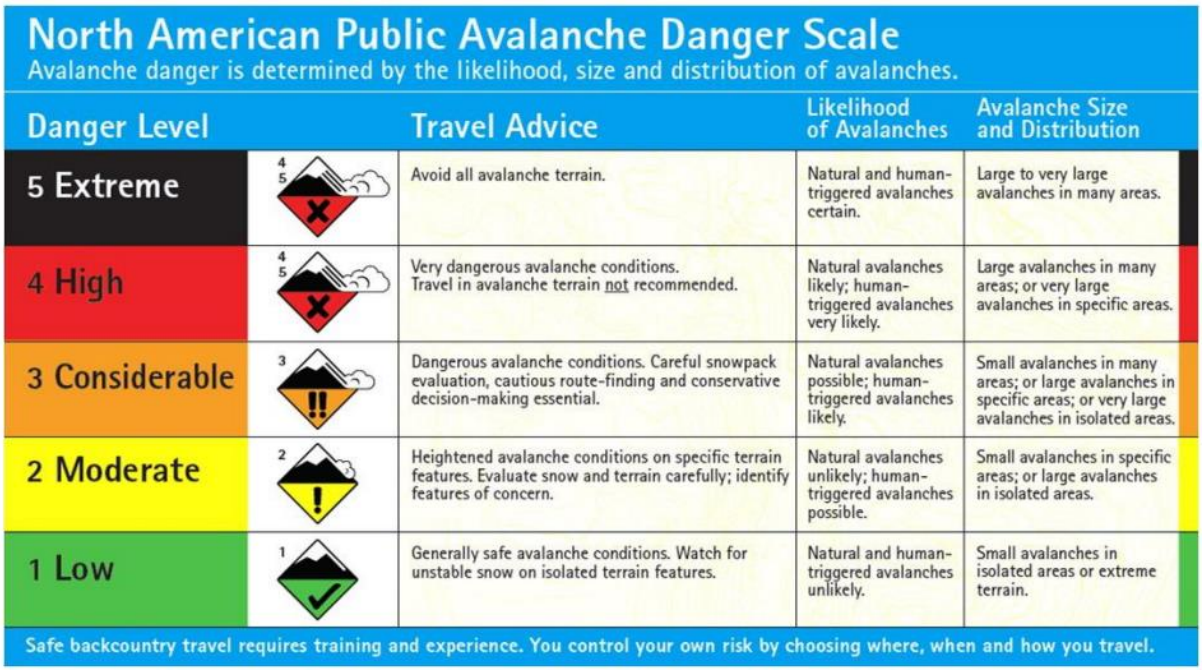


Tableau 6.1 : *Échelle publique nord-américaine de risque d'avalanche (Statham et al., 2010).*

Indice de risque	**Consignes pour les déplacements**	**Probabilité de déclenchement**	**Taille et répartition des avalanches**
5 - Extrême	Éviter tout terrain avalancheux.	Avalanches naturelles certaines; déclenchements par intervention humaine certains.	Avalanches variant de grosses à très grosses dans de nombreux secteurs.
4 – Élevé	Conditions avalancheuses très dangereuses. Déplacements en terrain avalancheux non recommandés.	Avalanches naturelles probables; déclenchements par intervention humaine très probables.	Grosses avalanches dans de nombreux secteurs ou très grosses avalanches localisées.
3 - Considérable	Conditions avalancheuses dangereuses. Évaluer soigneusement le manteau neigeux. Faire preuve d'une grande prudence dans le choix d'itinéraire et la prise de décisions.	Avalanches naturelles possibles; déclenchements par intervention humaine probables.	Petites avalanches dans de nombreux secteurs, grosses avalanches localisées ou très grosses avalanches dans des secteurs isolés.
2 - Modéré	Danger accru sur des reliefs de terrain précis. Évaluer soigneusement le manteau neigeux et le terrain; repérer les reliefs de terrain préoccupants.	Avalanches naturelles improbables; déclenchements par intervention humaine possibles.	Petites avalanches localisées ou grosses avalanches dans des secteurs isolés.
1 - Faible	Conditions avalancheuses généralement sécuritaires. Faire attention à la neige instable sur des reliefs de terrain isolés	Avalanches naturelles improbables; déclenchements par intervention humaine improbables.	Petites avalanches dans des secteurs isolés ou en terrain extrême.

Contrairement à l'échelle européenne qui opère une gradation de taille des avalanches entre « coulées », « avalanches de taille moyenne », « grandes avalanches », « très grandes avalanches » et « avalanches de taille exceptionnelle »[58], l'échelle nord-américaine distingue les « petites avalanches » des « grosses avalanches » et des « très grosses avalanches ». Nous conservons donc ces derniers termes dans la traduction. Contrairement aux unités de prévention du risque d'avalanche du col Rogers, l'échelle nord-américaine ne prévoit pas de catégorie intermédiaire pour les avalanches "*medium size*", nous ajoutons donc aux « petites et grosses avalanches » les « avalanches de taille moyenne » pour la classification *ad hoc* utilisée dans le cadre de cette étude. En outre, dans l'article, les trois tailles proposées sont mises en rapport avec le potentiel destructeur des avalanches (lien vers la documentation en anglais[59], et en français[60] de l'Association canadienne des avalanches). Tous ces éléments nous ont permis de proposer la traduction suivante (p. 70) :

> « Nous avons intégré à notre étude toutes les avalanches de taille moyenne et les grosses avalanches observées le long de la route Transcanadienne. La taille des avalanches (petites, grosses et de taille moyenne) est estimée selon une méthode qualitative mise au point par l'unité de prévention des avalanches (ACS) du col Rogers. Elle ne suit donc pas de normes d'observation et n'est pas comparable avec la taille relative proposée par l'*American Avalanche Association* (Greene et al., 2010). La taille d'une avalanche est déterminée par rapport à la taille de la plus grosse avalanche susceptible de se produire dans le couloir où l'avalanche a été observée. Une avalanche de taille moyenne selon la classification qualitative du col Rogers correspond à une avalanche avec un pouvoir destructeur (CAA, 2014) de 2 ou 3 selon les dimensions du couloir d'avalanche. Une avalanche entrant dans la catégorie des grosses avalanches peut avoir un potentiel destructeur de 3 à 4 selon la taille du couloir. »

[58] « Échelle de risque d'avalanche 2019 - Anena », art. cit.
[59] Canadian Avalanche Association, « Observation guidelines and recording standards for weather, snowpack and avalanches », 2016.
[60] Association canadienne des avalanches, « Aspects techniques de la gestion des risques d'avalanche, Ressources et directives pour les spécialistes des avalanches au Canada », 2016.

3.1.2. Traitement du français canadien

Dans le cadre de ma traduction, j'ai pu consulter certaines sources gouvernementales canadiennes puisque la zone étudiée se situe dans le parc national des Glaciers dont la gestion est assurée par des agences étatiques. Le site de Parcs Canada fournit notamment des informations sur le col Rogers et le programme de déclenchement préventif d'avalanches, et existe tant en anglais qu'en français. Il s'agit d'une mine d'informations puisque certains équivalents dont déjà fournis. Toutefois, la terminologie et la phraséologie employées, ponctuées de québécismes, sont assez éloignées de l'usage des spécialistes français. La phrase suivante en est un bon exemple :

> *"We used snow as well as meteorological data from two study plots located at Rogers Pass and Mt. Fidelity, respectively"*. (p. 67, § 1)

Pour voir à quoi ressemblaient ces "*study plots*" et ainsi choisir une traduction adéquate, j'ai consulté le site du parc national des Glaciers. Le site en anglais indique, comme c'est le cas dans notre article, que le col Rogers et Mt. Fidelity sont des "*study plots*"[61]. Or, la même page en français indique que ces deux sites sont des « parcelles-échantillons »[62]. Si le terme de « parcelles-échantillons » a le mérite d'être explicite et correspond bien à ce que l'on peut voir sur les photos, une zone plate dédiée aux mesures, la tournure québécoise passe mal en français. « Site de mesures » ou tout simplement « site » m'a semblé plus approprié au contexte, d'où la traduction suivante :

> « Nous avons utilisé les données nivologiques et météorologiques relevées sur les sites du col Rogers et de mont Fidelity » (p. 68).

[61] Parks Canada Agency, *Avalanche control program - Glacier National Park*, https://www.pc.gc.ca/en/pn-np/bc/glacier/nature/AvCon2, 3 mai 2022, consulté le 24 mai 2022.
[62] Agence Parcs Canada, *Programme de déclenchement préventif d'avalanches - Parc national des Glaciers*, https://www.pc.gc.ca/fr/pn-np/bc/glacier/nature/AvCon2, 3 mai 2022, consulté le 24 mai 2022.

3.1.3. Traitement de la synonymie

Deux des variables étudiées dans cet article sont la hauteur de neige fraîche (tombée au cours des dernières vingt-quatre heures) et la hauteur totale de neige (tenant compte de l'ensemble des précipitations neigeuses sur l'hiver). Le premier paramètre est d'abord désigné par *"new snow height"* à ses premières occurrences (p. 67) puis par *"new snow amounts"* (p. 75 à 103) ; tandis que le deuxième est d'abord décrit par *"maximum snow depth"*, puis par *"maximum snow height"* (p. 89). Or, comme le préconisent l'UNESCO et le Programme hydrologique internationale dans leur *International classification for seasonal snow on the ground*[63] paru en 2009, il convient de distinguer la hauteur de neige fraîche (HN pour *"height of new snow"*) de la hauteur totale de neige (HS pour *"height of snowpack"*, parfois qualifiée de *"snow depth"*). Hauteur de neige fraîche et hauteur totale de neige désignent toutes deux la mesure d'une coordonnée verticale (contrairement à l'épaisseur, *"thickness"*, dont il n'est pas question dans cet article et qui est une mesure parallèle à la pente). La seule distinction entre la hauteur de neige fraîche et la hauteur totale se rapporte à la couche de neige mesurée. La langue française ne disposant pas de deux mots différents pour traduire les synonymes *"depth"*" et *"height"* et le risque de confusion étant bel et bien présent, j'ai opté pour « hauteur de neige fraîche »[64] pour traduire *"new snow amounts"* et *"new snow height"* ; et pour « hauteur totale de neige » pour traduire *"maximum snow depth"* et *"maximum snow height"*. Les abréviations correspondantes (à savoir respectivement HN pour *"height of new snow"* et HS pour pour *"height of snowpack"* étant consacrées et n'ayant pas d'équivalents attestés en français, j'ai décidé de les conserver dans la traduction.

En outre, dans cet article, l'hiver au sens large (de septembre à mai) est divisé en trois périodes différentes afin de pouvoir effectuer des comparaisons (voir p. 63). Le texte source parle de *"winter seasons"* dans les trois premières parties, puis désigne le même partage en employant le terme *"avalanche seasons"* dans les parties 3.4.3. et dans la partie *"4. Discussion"*. J'ai fait le choix de parler de « période de l'hiver » plutôt que de « saison » pour désigner chacune des trois périodes de

[63] *The International classification for seasonal snow on the ground - UNESCO Bibliothèque Numérique*, https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462, consulté le 19 mai 2022.
[64] Bernard LESAFFRE et al., « Impact du changement climatique sur l'enneigement de moyenne montagne : l'exemple du site du col de Porte en Chartreuse », 2012.

début d'hiver (septembre à novembre), milieu d'hiver (décembre à février) et fin d'hiver (mars à mai), afin de ne pas introduire de confusion avec la saison d'hiver *stricto sensu*.

3.1.4. Terminologie statistique

La partie « 2.5. Analyse statistique » de l'article consiste en l'exposé des méthodes statistiques utilisées pour dégager des tendances relatives aux variables étudiées. Les destinataires de ce type de document connaissent bien ces notions statistiques. En outre, les chercheurs doivent être concis dans leur rédaction si l'article est destiné à la publication. L'ensemble de ces éléments fait que j'ai dû longuement me documenter afin de comprendre le raisonnement suivi par les auteurs avant de pouvoir traduire.

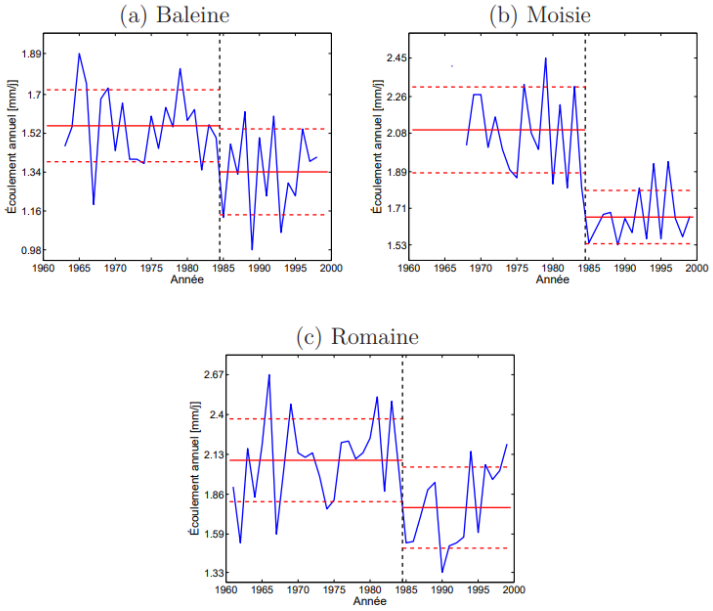
Dans cette partie de l'article est cité un travail de Bai et Perron de 2003, intitulé *Computation and analysis of multiple structural change models* [Calcul numérique et analyse de modèles avec changements structurels multiples]. Il a été publié dans le *Journal of Applied Econometrics*, revue spécialisée en économétrie appliquée, branche de la statistique consacrée à l'étude de données économiques. Les économètres sont en effet à l'origine de nombreuses avancées dans l'étude des séries temporelles. La détection de ruptures dans la présence d'une croûte de regel dans les profils de manteau neigeux en début d'hiver suit donc ces modèles. La modélisation des ruptures consiste en des relations non linéaires parfois discontinues entre variables. Passer par le prisme de l'économétrie m'a permis d'obtenir bien plus de résultats dans mes recherches sur les modèles de rupture qu'en cherchant dans un corpus de statistiques plus large.

Avoir compris le contexte ne m'a pas empêchée de buter sur la traduction de certains termes. Lors de mes recherches d'équivalent, j'hésitais souvent entre plusieurs termes de sens assez proche, notamment pour la traduction de la phrase suivante (p. 73, § 2) :

> *"In addition, a breakpoint analysis, i.e. a segmented linear regression (Bai and Perron, 2003), was used to determine significant breaks or changes in a time series."*

En recherchant « apport des travaux de Bai and Perron 2003 » dans un moteur de recherche, de nombreux articles évoquent les ruptures/*"breaks"*. Généralement, il s'agit de « détecter les

changements dans les caractéristiques du signal et les localiser, pour pouvoir ensuite analyser individuellement les segments de la série temporelle »[65]. Ici, il s'agit d'identifier le moment de la rupture afin de dater une accélération du changement climatique. J'avais initialement choisi « analyse de rupture » comme l'ont notamment fait des chercheurs de l'Institut national de recherche scientifique canadien dans « Analyses des ruptures et des tendances dans les écoulements annuels observés et simulés par le MRCC en climat actuel (1961-1999) pour les 21 bassins versants de la péninsule Québec/Labrador »[66], article dont la terminologie se rapproche de celle de notre article. Il s'agit néanmoins d'un article rédigé en français du Canada, avec l'emploi d'une terminologie et d'une phraséologie qui diffèrent parfois du français utilisé en France. Même en sachant cela, cette source reste intéressante pour ses graphiques représentant les ruptures présentes dans un jeu de données, non pas sous la forme oui/non mais sous forme chiffrée (l'article ici consulté traitant du comportement de cours d'eau, les légendes des figures correspondent à des noms de rivières au Québec) :



Le terme « détection de ruptures » est le terme consacré le plus adéquat pour traduire "*breakpoint analysis*". Il permet de désigner le phénomène recherché, sachant que dans notre cas, la méthode

[65] F. Harle, *Détection de ruptures multiples dans des séries temporelles multivariées : application à l'inférence de réseaux de dépendance*, Université Grenoble Alpes, 2009.
[66] K. Dion et al., « Analyses des ruptures et des tendances dans les écoulements annuels observés et simulés par le MRCC en climat actuel (1961-1999) pour les 21 bassins versants de la péninsule Québec/Labrador », *INRS*, 2009.

utilisée est précisée juste après : "*i.e. a segmented linear regression*". Ce modèle de régression renvoie directement à l'article de Bai et Perron. Cette « régression linéaire segmentée » s'oppose à la « régression linéaire simple » ou « régression linéaire par ajustement affine » qui consiste à déterminer une équation entre deux variables aléatoires. La « régression linéaire segmentée » n'est pas très documentée mais le texte anglais est explicite sur ce point :

> "*to determine significant breaks or changes in a time series. This method was used to determine whether or not a significant change in melt-freeze crust occurrence took place during the investigated period.*"

À défaut de traduction consacrée du terme "*segmented linear regression*", j'ai choisi une traduction littérale qui permet de ne pas plaquer un autre concept sur celui désigné ici. De plus, le renvoi à l'article de Bai et Perron permet au lecteur qui ressent le besoin d'approfondir de s'y référer, d'où la traduction suivante (p. 74, § 2) :

> « Nous avons également procédé à une détection de rupture, en d'autres termes une régression linéaire segmentée (Bai and Perron, 2003), afin d'identifier des ruptures ou des évolutions significatives dans une série temporelle. »

Par ailleurs, une autre phrase de cette partie d'analyse statistique (p. 73) mérite également qu'on s'y arrête :

> *"For our breakpoint analysis we assume that the change in our data (crust occurrence; no/yes or 0/1) is not a logistic transition but a step function."*

Cette phrase vient préciser la méthode suivie pour la détection de ruptures. Le changement de distribution des données ne suit pas une fonction de transition logistique, n'est pas représenté par une courbe sigmoïdale[67]. Parler de « fonction de transition logistique » est juste et ne pose pas de problème de traduction puisqu'il s'agit d'une théorie théorisée par un Français, Pierre-François Verhulst. En revanche, la "*step function*" m'a posé bien plus de problèmes puisqu'il n'existe pas

[67] J.S. Cramer, *The Origins of Logistic Regression*, Rochester, NY, Social Science Research Network, 2002, p. 2.

de terme consacré et qu'il m'a fallu démêler de nombreux homonymes et hyperonymes afin de n'être ni plus vague que l'anglais, ni de procéder à une équivalence forcée. On peut lire sur Wikipedia que *"the Heaviside function is an often-used step function"*[68]. J'ai ensuite lu qu'en mathématiques, « la fonction de Heaviside (également fonction échelon, fonction marche ou, par abus de traduction de l'anglais *step*, fonction d'étape) […] est une fonction H discontinue prenant la valeur 0 pour tous les réels strictement négatifs et la valeur 1 partout ailleurs »[69]. Si la première source indique que fonction de Heaviside est un hyperonyme de "*step function*", la deuxième laisse penser qu'elle est une traduction de "*step function*". Quoi qu'il en soit, la définition donnée indique qu'il ne s'agit pas du terme recherché puisque dans notre cas, les données portant sur la présence d'une croûte ne peuvent adopter que deux valeurs, correspondant à « oui » ou « non », excluant donc tout passage progressif d'un état à un autre. J'ai donc mis de côté la fonction de Heaviside et me suis intéressée aux fonctions étagées et aux fonctions en escalier. Des cours de mathématiques de licence m'ont permis de comprendre que les fonctions en escaliers constituent une sous-catégorie des fonctions étagées[70]. Il s'agit de fonctions dont les valeurs sont constantes sur des intervalles, ce qui est bien le cas dans notre article. On parle également de fonctions linéaires par morceaux ou de fonctions constantes par morceaux[71], ce que mon ami ingénieur m'a confirmé. C'est ce dernier terme que j'ai choisi de conserver, même si celui de fonction en escalier aurait également pu convenir, d'où la proposition de traduction suivante p. 74 :

> « Pour la détection de rupture, nous partons du principe que l'évolution de nos données (présence d'une croûte ; oui/non ou 0/1) ne suivait pas une fonction logistique, mais une fonction constante par morceaux. »

Malgré mes recherches, je ne me sentais pas très à l'aise avec ces notions statistiques très poussées. En effet plusieurs des sources que j'ai consultées étaient des supports de cours de masters

[68] *Heaviside step function*, https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Heaviside_step_function&oldid=1081077108, 5 avril 2022, consulté le 25 mai 2022.
[69] *Fonction d'étape de Heaviside*, https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/637488, consulté le 25 mai 2022.
[70] Université Pierre et Marie Curie, *Fonctions en escalier, fonctions étagées, fonctions réglées, fonctions boréliennes*, https://www.ljll.math.upmc.fr/daniel/documents/LM364-TD5.pdf, 2010, consulté le 24 mai 2022.
[71] *Fonction linéaire par morceaux*, http://stringfixer.com/fr/Piecewise_linear_function, consulté le 24 mai 2022.

en mathématiques composés uniquement de formules, et j'ai parfois eu du mal à adapter les notions d'économétrie à notre objet d'étude. J'ai donc fait appel à un ami ingénieur formé en statistiques qui a accepté de relire cette partie. Il m'a confortée dans mes choix en validant les termes que j'ai choisis, et m'a suggéré quelques modifications phraséologiques permettant de gagner en idiomaticité. Ainsi, pour le dernier exemple que nous venons de développer, c'est lui qui m'a indiqué qu'il était plus idiomatique de dire « l'évolution de nos données […] ne suit pas une fonction de transition logistique mais une fonction constante par morceaux », plutôt qu'une formulation assez plate avec le verbe être : « n'est pas une fonction…».

3.1.5. Terminologie nivo-météorologique

L'article compile l'étude de variables météorologiques, nivologiques et avalancheuses. Les avalanches recensées sont notamment étudiées à partir de leur dépôt, selon qu'il est constitué de neige sèche, ou de neige humide ou mouillée. L'anglais parle de "*deposit moisture content"* (p. 85). La traduction de ce terme m'a posé problème, non pour sa compréhension mais pour la recherche d'équivalent. Parler d' « humidité du dépôt » n'est absolument pas idiomatique, et parler de « teneur en eau liquide du dépôt » est juste sur le fond mais vient plaquer une idée de mesure précise, alors qu'il s'agit ici d'une classification empirique. J'ai donc ensuite pensé à « qualité de neige du dépôt » qui me semblait convenir. J'ai néanmoins préféré demander confirmation à Pascal Hagenmuller, spécialiste-référent de mon mémoire, au cas où un terme consacré existerait mais m'aurait échappé. Ce dernier m'a confirmé que ma proposition de « qualité de neige du dépôt » (p. 86) convenait bien dans ce contexte.

Par ailleurs, la mesure des différentes variables suppose l'utilisation de nombreux instruments spécialisés, désignés par des termes consacrés avec lesquels j'ai dû me familiariser, notamment *"precipitation gauge"* (p. 67, § 2 et § 4). Cet outil sert à mesurer les quantités de précipitations, qu'elles soient solides ou liquides. Or, pour la traduction française, je n'étais pas certaine qu'un « pluviomètre » permette de mesurer tant les précipitations pluvieuses que neigeuses. J'hésitais donc à opérer une distinction et à traduire par « un pluviomètre et un nivomètre ». Ne trouvant pas de réponse qui me convienne, j'ai interrogé Pascal Hagenmuller qui m'a expliqué n'avoir « jamais fait

la distinction pluviomètre ou autre pour mesurer les quantités de précipitation solide ou liquide […]. On parle parfois de pluviomètre chauffé pour la neige (car il faut chauffer pour que la neige fonde et prenne moins de place, sinon le pluviomètre déborde). 'Pluviomètre' est le bon terme. »

Cette section a permis de présenter les problèmes de traduction liés à la terminologie de spécialité, la section suivante est consacrée aux difficultés de reformulation rencontrées en cours de traduction.

3.2. Reformulation

Dans cette section consacrée aux problèmes de reformulation, nous retracerons d'abord le processus de traduction du titre, aborderons ensuite la restitution en français d'une phrase complexe ainsi que le respect de la concordance des temps, et terminerons par une rubrique consacrée à la qualité rédactionnelle.

3.2.1. Traduction du titre

J'ai longtemps tergiversé sur la traduction du titre de l'article (p.59) avant de m'arrêter sur une proposition :

> *"Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada"*.

Le syntagme nominal *"long-term weather, snow and avalanche data"* m'a donné du fil à retordre, notamment pour la traduction de *"long-term"* dans ce contexte bien précis. En effet, en météorologie et plus spécifiquement dans la prévision du risque d'avalanche, on parle bien de « prévisions à long terme » ou encore de « prévisions à longue échéance ». On rencontre également beaucoup d'occurrences pour les collocations « préservation/stockage/archivage des données à long terme ». Toutefois, il s'agit ici de l'analyse rétrospective d'une longue série de données collectées sur 49 années. J'ai d'abord envisagé une traduction explicative contournant la difficulté que posait *"long-*

term" et qui aurait donné : « Analyse de 49 années de données météorologiques, nivologiques et avalancheuses dans le parc national des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada ». Néanmoins, cette solution était loin d'être optimale puisqu'elle s'éloignait du texte source et mettait l'accent sur le nombre d'années pendant lesquelles des données ont été collectées, alors qu'il s'agit seulement de dire que des données ont été collectées sur une période suffisamment longue pour pouvoir dégager d'éventuelles tendances. J'ai ensuite envisagé de traduire en restant assez proche de la source, en ajoutant seulement le participe passé « collectées » venant préciser les données, ce qui aurait donné ; « Analyse de données météorologiques, nivologiques et avalancheuses collectées sur le long terme dans le parc national des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada ». Toutefois, cette traduction ne me satisfaisait pas car elle ne me semblait pas refléter la phraséologie spécialisée, et relevait d'un autre type de traduction explicative. Finalement, après avoir consulté de nombreuses sources sur les séries de données, notamment pour traduire *"long-term time series of meteorological and avalanche observations"* et m'être familiarisée avec la phraséologie de l'étude du climat sur le long terme, une recherche d'occurrences en contexte m'a assuré qu'il est tout à fait correct de traduire *"long-term data"* par « longues séries de données » (occurrences dans des documents de Météo France[72]-[73], du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques[74], sur l'encyclopédie Universalis[75] et dans la documentation du CNRM[76]).

Ma proposition de traduction pour le titre est donc la suivante (p. 60) :

> « Analyse de longues séries de données météorologiques, nivologiques et d'avalanche dans le parc national des Glaciers, Colombie-Britannique, Canada ».

[72] *La mémoire du climat | Météo-France La mémoire du climat*, https://meteofrance.fr/missions/etude-climat/la-memoire-du-climat, consulté le 18 mai 2022.
[73] *Pourquoi le climat passé est important pour simuler l'avenir ? | Météo-France Pourquoi le climat passé est important pour simuler l'avenir ?*, https://meteofrance.fr/missions/etude-climat/pourquoi-le-climat-passe-est-important-pour-simuler-lavenir, consulté le 18 mai 2022.
[74] *2006 - Séries de référence - CCROM*, http://ccrom.meteo.fr/ccrom/spip.php?rubrique4, consulté le 18 mai 2022.
[75] E. Universalis, *MÉTÉOROLOGIE - Les outils, Les outils de la prévision météorologique*, https://www.universalis.fr/encyclopedie/meteorologie-les-outils/4-les-outils-de-la-prevision-meteorologique/, consulté le 18 mai 2022.
[76] *Site nivo-météorologique du Col de Porte - Centre National de Recherches Météorologiques*, https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique218, consulté le 18 mai 2022.

3.2.2. Syntaxe anglaise

Dans l'introduction (p. 59, § 2), les auteurs préviennent que :

> *"It is particularly difficult to relate trends in avalanche activity to climate change since many avalanche safety operations with good records of avalanches use explosives to trigger avalanches, which are subject to technological and human-induced changes."*

La longueur de la phrase et du sujet de la proposition subordonnée conjonctive *("since many avalanche safety operations with good record of avalanches"*) ainsi que la proposition relative précisant ensuite le terme *"explosives"* m'ont compliqué la traduction de cette phrase. L'idée est que l'identification de tendances relatives à l'activité avalancheuse n'aurait pas pour seule origine l'évolution des variables nivo-météorologiques liée au changement climatique. Il convient de prendre également en compte les déclenchements préventifs d'avalanches par explosifs[77], dont le nombre et l'ampleur varient dans le temps selon le matériel utilisé, les moyens techniques, et un facteur humain, la décision d'intervenir ou non. Ces deux éléments empêchent d'attribuer au seul changement climatique une modification des tendances de l'activité avalancheuse, et incitent à la prudence dans l'analyse des résultats. J'ai essayé d'être plus claire dans la traduction, en réorganisant une partie de la syntaxe, notamment en simplifiant la proposition subordonnée conjonctive *"since many avalanche safety operations with good records of avalanches use explosives to trigger avalanches"* qui devient « puisqu'une part importante des avalanches recensées correspond à des déclenchements préventifs par explosifs ». Cela permet d'alléger la phrase (p. 60, § 2), qui devient :

> **«** Établir une corrélation entre changement climatique et tendances de l'activité avalancheuse s'avère particulièrement difficile puisqu'une part importante des avalanches recensées correspond à des déclenchements préventifs par explosifs, qui sont tributaires des moyens utilisés et du caractère aléatoire des décisions humaines ».

[77] *Déclenchement d'avalanches - Anena*, https://www.anena.org/9119-declenchement-d-avalanches.htm, consulté le 24 mai 2022.

3.2.3. Concordance des temps

Certains problèmes de traduction rencontrés sont liés à la concordance des temps.

D'une part, j'avais mal compris l'anglais dans la partie "*2.2. Meteorological and snow cover data*" (p. 67). J'avais d'abord cru que les opérations décrites se rapportaient à des calculs effectués par les équipes des deux stations au moment des mesures, soit entre 1965 et 2014, alors qu'on se plaçait au moment de l'étude. J'ai donc commencé par rédiger au plus-que-parfait avant de comprendre mon erreur et de réécrire la partie au passé composé.

D'autre part, dans la partie *"2.5. Statistical analysis"* (p. 73), le texte anglais utilise successivement présent et passé pour décrire la méthode utilisée. J'ai choisi d'utiliser le passé composé dans ma traduction pour l'ensemble de cette section (p. 74).

3.2.4. Qualité rédactionnelle

Nous allons clore cette section sur les problèmes de reformulation avec une rubrique plus générale portant sur le travail de rédaction dans un contexte scientifique.

Ce travail de traduction m'a permis d'identifier mes points faibles, en prenant du recul sur les différentes versions produites, notamment grâce à la relecture de ma directrice de mémoire qui m'a indiqué les passages à reprendre.

Tout d'abord, lors de ma première révision de la traduction après l'avoir exportée depuis Trados, j'ai réalisé que j'étais tombée dans l'écueil d'une traduction explicative qui n'avait pas sa place ici. Satisfaite d'avoir bien compris une notion, j'avais parfois inconsciemment trop étoffé. J'ai donc révisé ma traduction en gardant en tête son *skopos*, sa finalité. L'article se destine à un public de spécialistes habitués à manier le vocabulaire technique et statistique présent dans l'article, et rompus à la concision caractéristique des articles scientifiques. Ainsi, par exemple, quand le texte anglais évoque à plusieurs reprises les *"wet deposits"* ou *"moist/wet deposits"*, il s'agit d'une contraction désignant les « dépôts d'avalanche constitués de neige sèche » ou les « dépôts

d'avalanche de neige humide », et il est tout à fait correct de parler directement de « dépôts secs » ou de « dépôts humides ».

En outre, je n'ai pas su éviter un piège classique de la traduction technique : j'ai inconsciemment concentré mes efforts sur les passages qui posaient des problèmes terminologiques ou phraséologiques, au détriment de la qualité de la rédaction d'autres passages qui ne présentaient pas de difficultés particulières. Pour éviter cela, il peut être utile de dissocier les relectures et d'en consacrer une à la dimension rédactionnelle, en mettant de côté le contenu technique. J'avais notamment traduit assez littéralement certaines phrases qui pouvaient gagner en idiomaticité en étant reformulées. De nombreuses tournures passives en anglais méritaient d'être passées à l'actif en français, comme par exemple "*Monthly mean air temperature was calculated*" (p. 67, § 3), traduit par « Nous avons calculé les températures mensuelles moyennes de l'air » (p. 68, § 3). Si ces formulations me sont venues assez spontanément, j'ai eu plus du mal à tourner certaines phrases à l'actif lorsque l'emploi du sujet n'était pas naturel. Cela a notamment été le cas pour la première phrase de l'introduction (p. 59) : " *Trends in avalanche activity, if they exist, could be used in […]*". Je l'avais initialement laissé au passif en français, et traduit par « Si des tendances de l'activité avalancheuse existaient, elles pourraient être utilisées », sans penser à recourir à un formule impersonnelle telle que « S'il existait des tendances de l'activité avalancheuse », tournure plus fluide que m'a proposée ma directrice de mémoire et que j'ai finalement conservée (p. 60).

Par ailleurs, le texte source comporte de nombreuses occurrences de l'abréviation *"i.e."* pour *"id est"* qui en latin signifie « c'est-à-dire ». On la retrouve à de nombreuses reprises pour annoncer une précision apportée à la proposition principale. J'ai d'abord choisi « c.-à-d. » comme équivalent français de *"i.e."* mais cela est assez lourd et ne reflète pas l'usage des spécialistes. Madame Plassard a attiré mon attention sur le fait que les occurrences de cette locution doivent être traitées au cas par cas et qu'il n'est pas toujours nécessaire de la traduire. En effet, parfois, une simple virgule ou deux points suffisent. On peut sinon avoir recours à la conjonction de coordination « soit », comme dans ***"****The majority of the starting zones are north- or south- facing, i.e. both sides of the east–west oriented Trans-Canada Highway****"*** (p. 65, dernière phrase), traduit par « La majorité des zones de départ sont orientées au nord ou au sud, soit de part et d'autre de la route Transcanadienne qui suit un axe est-ouest. » (p.66, dernière phrase), ou à la locution « à savoir », comme avec *"A negative*

significant trend, i.e. less moist/wet deposits, was found for the mid and late winter season between December and May" (p. 85) traduit par « Une tendance négative significative, une baisse du nombre de dépôts humides/mouillés, a été identifiée sur les périodes de milieu et fin d'hiver, à savoir entre décembre et mai. » (p. 86)

Conclusion

Il s'agissait de ma première traduction d'un article scientifique. Je me suis rendu compte en me révisant que j'avais parfois eu tendance à traduire de manière explicative. Or, les destinataires de cet article sont des spécialistes qui n'ont pas besoin qu'on leur définisse les termes. J'ai donc repris ma traduction en étant plus concise. Consciente de cela et soucieuse de ne pas foisonner plus que de raison, je suis parfois tombée dans l'écueil inverse et suis restée trop proche du texte source, ce qui a fait perdre ma traduction en idiomaticité.

En outre, j'ai dû me familiariser avec la terminologie nivologique et avalancheuse, en cours de traduction mais aussi lors de la rédaction de l'exposé, puis lors de l'analyse terminologique qui m'a permis d'approfondir des subtilités entre certains termes. J'ai également eu à me renseigner, notamment pour la traduction de l'introduction, sur la géographie de la zone étudiée et sur les mécanismes de protection mis en œuvre pour sécuriser les infrastructures routières et ferroviaires.

Enfin, j'ai dû reprendre ma traduction pour l'améliorer et gommer certains défauts. En effet, j'ai passé beaucoup de temps à travailler certains passages qui m'ont donné du fil à retordre, et sans m'en rendre compte, en ai délaissé d'autres qui ne présentaient pas de difficultés de traduction apparente, et sur lesquels je suis donc passée trop vite. J'avais également parfois fait des fautes de français, notamment en utilisant des prépositions inappropriées ou des temps verbaux qui ne convenaient pas. Ces dernières sont faciles à éviter en mettant de côté le contenu technique à l'occasion d'une relecture consacrée à la dimension rédactionnelle.

À l'avenir, dans le cadre de mes projets de traduction, je dois donc consacrer davantage de temps à la révision, notamment en travaillant la rédaction. Je dois parvenir à respecter le *skopos* du texte sans jamais perdre de vue qu'une traduction, quelle que soit sa visée, est jugée à sa fluidité et à la qualité de sa rédaction.

PARTIE IV : ANALYSE TERMINOLOGIQUE

1. Fiches terminologiques

Cinq fiches terminologiques sont présentées en vis-à-vis dans cette partie, la fiche en anglais figurant sur la page de gauche et celle en français sur la page de droite.

Seul un des cinq termes sélectionnés provient de la traduction : « croûte de regel ». Les difficultés terminologiques rencontrées au fil de la traduction relevaient davantage du domaine statistique que du domaine nivologique. Or, j'aborde déjà ces difficultés dans la partie « Stratégie de traduction ». De plus, il m'a semblé approprié d'axer une partie de mes fiches terminologiques sur des concepts autour desquels règne une grande polysémie, notamment en matière de dynamique des avalanches. Leurs caractéristiques évoluent au fil du temps et selon les territoires, il est donc parfois difficile de trouver le bon usage. C'est dans cette perspective que j'ai choisi de travailler sur les termes « avalanche de fond », « avalanche de glissement » et « reptation ». Par ailleurs, le terme « métamorphisme » dont l'équivalent anglais "metamorphism" peut sembler évident a été sélectionné pour la richesse de ses collocatifs et pour faire le parallèle bien souvent présent entre terminologie géologique et terminologie nivologique.

Vedette française	N°	Vedette anglaise
avalanche de fond	1	full-depth avalanche
avalanche de glissement	2	glide avalanche
croûte de regel	3	melt-freeze crust
métamorphisme	4	metamorphism
reptation	5	creeping

Comment lire une fiche terminologique ?

Les fiches terminologiques sont constituées de tout ou partie des champs suivants :

VE	Vedette (terme faisant l'objet de la fiche et ses synonymes)	
EN/FR	ENglish, FRench	
DOM	DOMaine (en français, source : www.granddictionnaire.com)	
DF	DéFinition de la vedette	
CTX	ConTeXte	
COL	COLocation	
ID	Identification de l'auteur :	
	Bureau émetteur (organisme pour lequel la fiche a été rédigée) : ESIT	
	Collection terminologique à laquelle appartient la fiche : MEM22 pour mémoire soutenu en 2022	
	Auteur de la fiche : MDU = Marie DUpont	
Notes :	EXP	renseignements encyclopédiques qui ne font pas partie de la définition
	USG	indications relatives à l'USaGe, au niveau de langue, au registre, à la région, etc.
	GRM	indications GRaMmaticales
	ETY	ÉTYmologie
	DER	mots DÉRivés
	HOM	HOMonyme
	ANT	ANTonyme
	SPE	termes SPÉcifiques
	GEN	termes GÉNériques
	REL	renvois associatifs à d'autres termes
RF	RéFérences (sources bibliographiques)	

(Les domaines et sous-domaines indiqués sont relativement larges mais *Le Grand dictionnaire terminologique* auquel nous nous référons n'en propose pas de plus précis).

Fiche n°1

ANGLAIS

VE EN	full-depth avalanche [1], ground avalanche [2]
DF	Avalanches where the entire snowpack down to the ground is mobilized.
DOM	géologie, mécanique des sols
CTX	During the winter 2011/12 the Swiss Alps experienced repeated cycles with high activity of snow gliding and full-depth avalanches.
COL	g.n. full-depth glide avalanche, * event, unpredictable *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP Ground avalanches are often gliding avalanches, but sometimes slab avalanches which release when a weak layer on the ground fails. REL glide avalanche, gliding avalanche, creeping, crack
RF	J. Clarke, *Full-depth avalanche occurrences caused by snow gliding, Coquihalla, British Columbia, Canada*, Journal of Glaciology, No. 151, 1999, p. 539 [DF]; P. Bartelt et al., *The underestimated role of the stauchwall in full-depth avalanche release*, ISSW, 2012, p. 127 [CTX], European avalanche warning services, *Glossary*, [en ligne], disponible sur <https://www.avalanches.org/glossary/#ground-avalanche>, consulté le 13 juin 2022 [EXP].

Fiche n°1

FRANÇAIS

VE FR	avalanche de fond [1]
DF	Avalanche qui concerne, dans la zone d'accumulation, le manteau neigeux sur toute son épaisseur.
DOM	géologie, mécanique des sols
CTX	Pour l'aléa avalanche, ce n'est pas seulement la neige en elle-même qui est responsable des dommages sur les routes mais aussi les débris rocheux et végétaux transportés pas l'avalanche. Ces débris sont en quantité très limitée pour les avalanches de plaque, plus importants pour les avalanches en aérosol et parfois importants pour les avalanches de fond.
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP L'ensemble du manteau neigeux est mis en mouvement lors du déclenchement de l'avalanche. USG Les pratiquants et professionnels de la montagne confondent les dénominations « avalanche de glissement » et « avalanche de fond ». En pratique, la terminologie « avalanche de fond » est utilisée pour désigner les avalanches de glissement. ANT avalanche de surface REL avalanche de glissement, reptation, gueule de baleine
RF	C. Ancey, *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Edisud., 1998, p. 323 [DF SEC] ; P. Hagenmuller, courrier électronique du 22 juin 2022 [EXP].

Fiche n°2

ANGLAIS

VE EN	glide avalanche [1], gliding avalanche [2]
DF	Release of the entire snow cover as a result of gliding over the ground
DOM	géologie, mécanique des sols
CTX	Winters with continuing snow gliding and a high activity of glide avalanches might be called 'glide winters'.
COL	n. : formation of *, release of *, dynamic of *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP1 . Glide avalanches can be composed of wet, moist, or almost entirely dry snow. Glide avalanches typically occur in very specific paths, where the slope is steep enough and the ground surface is relatively smooth. They are often preceded by glide cracks, though the time between the appearance of a crack and an avalanche can vary between seconds and months. Glide avalanches are unlikely to be triggered by a person, are nearly impossible to forecast, and thus pose a hazard that is extremely difficult to manage. EXP2 This type of avalanches is more frequent and always composed of wet, heavy snow in countries under a maritime influence. REL full-depth avalanche, ground avalanche, glide crack, creeping
RF	Sierra Avalanche Center, *Avalanche problems*, [en ligne], disponible sur <https://www.sierraavalanchecenter.org/avalanche-problems>, consulté le 13 juin 2022 [DF, EXP1]; I.P. Nuse, *The mysteries of glide avalanches*, [en ligne], disponible sur <https://sciencenorway.no/climate-forskningno-geologi/the-mysteries-of-glide-avalanches/1426933>, 2015, consulté le 4 juin 2022 [EXP2 SEC]; P. Höller, *Snow gliding and glide avalanches, a review*, [en ligne], disponible sur <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-013-0963-9>, consulté le 4 juin 2022 [CTX] .

Fiche n°2

FRANÇAIS

VE FR avalanche de glissement [1]

DF Glissement de l'intégralité du manteau neigeux sur le sol.

DOM géologie, mécanique des sols

COL g.n. : déclenchement d'une * ; v. : donner lieu à une *

ID ESIT MEM22 ABO

Notes : EXP 1 Les glissements de neige débutent dès que la pente dépasse 15°. De forts glissements peuvent se produire sur les pentes supérieures à 25°. Les versants propices présentent généralement une faible rugosité (grandes herbes, dalles rocheuses), un sous-sol humide, une exposition au sud et une altitude inférieure à 2000 m. Des hauteurs de neige importantes et des périodes prolongées de douceur accentuent le phénomène.

EXP 2 Les avalanches de glissement peuvent se produire aussi bien dans un manteau neigeux sec et froid que dans un manteau neigeux mouillé. La prévision du déclenchement d'une avalanche de glissement est très difficile, même si elle s'annonce souvent par l'apparition de fissures.

EXP 3 Ces avalanches sont fréquentes et composées de neige très humide dans les régions de montagne sous influence maritime (Japon, Norvège, Rocheuses canadiennes…).

USG Les pratiquants et professionnels de la montagne confondent les dénominations « avalanche de glissement » et « avalanche de fond ». En pratique, la terminologie « avalanche de fond » est utilisée pour désigner les avalanches de glissement.

REL avalanche de fond, gueule de baleine, fissure, reptation

RF SLF Institut d'études de la neige et des avalanches, *Situations avalancheuses typiques*, [en ligne], disponible sur <https://www.slf.ch/fr/bulletin-davalanches-et-situation-nivologique/en-savoir-plus-sur-le-bulletin-davalanches/situations-avalancheuses-typiques/avalanches-de-glissement.html>, consulté le 13 juin 2022 [DF, EXP 2] ; C. Ancey, op. cit., p. 323 [EXP 3 SEC] ; F. Cabot, Neige et avalanches, *Connaître et comprendre pour limiter le risque*, Glénat, Grenoble, 2020, p. 72 [EXP 3 SEC] ; SLF, *Les glissements de neige et avalanches de glissement lors de l'hiver très enneigé de 2011/12 : exemples et mesures techniques*, [en ligne], disponible sur <https://www.slf.ch/fileadmin/user_upload/SLF/Lawinen/Lawinenkunde_und_Praevention/Gleitschneelawinen/Les_glissements_de_neige_et_avalanches_de_glissement_lors_de_l.pdf>, consulté le 13 juin 2022 [EXP 1].

Fiche n°3

ANGLAIS

VE EN	melt-freeze crust [1], rain crust [2], sun crust [3]
DF	Layer of hard-compacted snow resulting from a melt-freeze process; increases firmness.
DOM	science de l'atmosphère, météorologie
CTX	Melt-freeze crusts often occur as a result of wet snow, rain or strong insolation.
COL	adj: early *, buried *, thick *, thin *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	USG In Canada, a difference is made between [2] when a layer of ice formed when rain falls on the snow then freezes, and [3], when a snow layer melted by radiation from the sun refreezes.
RF	EAWS, *Glossary*, [en ligne], disponible sur <https://www.avalanches.org/glossary/?lang=en#melt-freeze-crust>, consulté le 28 mai 2022 [DF]; M. Smith, *Observation and Modeling of Buried Melt-Freeze Crust*, ISSW, 2008, [en ligne], disponible sur https://arc.lib.montana.edu/snow-science/item/27>, consulté le 28 mai 2022, [CTX 1].

Fiche n°3

FRANÇAIS

VE FR	croûte de regel [1], croûte de pluie [2], croûte de soleil [3]
DF	Croûte formée suite au regel d'une couche de neige gorgée d'eau liquide.
DOM	science de l'atmosphère, météorologie
CTX	La température de part et d'autre de croûtes de regel est très proche de 0°C. De forts gradients de température s'appliquent localement (surtout lorsqu'elles sont enfouies).
COL	g.n. : formation d'une *, présence d'une *, épaisse *, fine *, à proximité de la *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP La présence d'eau liquide peut résulter soit de la fonte de la couche elle-même, soit d'un apport d'eau direct par la pluie ou par percolation dans le manteau neigeux. USG [2] et [3] validés par le Comité d'uniformisation de la terminologie des bulletins d'avalanche canadien mais impropres en France.
RF	P. Hagenmuller, *Influence des croûtes de regel sur la formation de couches fragiles persistantes*, Neige et Avalanches n°159, 2017, [en ligne], disponible sur <http://www.umr-cnrm.fr/IMG/pdf/article_hagenmuller_croute_v2.pdf>, consulté le 28 mai 2022 [DF 1 SEC] [EXP] ; F. Hivert, *Croûte de regel et avalanche de plaque*, [en ligne], disponible sur <https://www.beaufortain-guide.fr/croute-de-regel-et-avalanche-de-plaque/>, consulté le 29 mai 2022 [CTX].

Fiche n°4

ANGLAIS

VE EN	metamorphism [1], metamorphosis [2]
DF	Physical change of snow grains within the snowpack due to differences in temperature and pressure.
DOM	science de l'atmosphère, météorologie
CTX	Temperature gradient plays a vital role in snow metamorphism.
COL	n. : snow *, melt-freeze *, dry *, wet *, temperature gradient *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP 1 During wet-snow metamorphism, temperature gradients and freezing-point differences are created by curvature differences. Heat flows from concave to convex surfaces, leading to grain rounding. EXP 2 In the dry-snow metamorphism, no liquid water is present and temperatures are generally below freezing. There are two types of dry snow metamorphism. First is equilibrium, or sintering, which occurs with small snowpack temperature gradients. Changes in the crystal structure often result in more bonding between the crystals. As water vapor gets deposited onto the crystals, the hollows are filled in and the points become more round. The new, more rounded shapes result in a greater snowpack density. The other type of dry metamorphism is kinetic growth, which occurs when snowpack temperature gradients are greater than 10°C m-1. New crystal structures are often poorly bonded and can actually lower the density of the snowpack. USG [1] preferred term REL facetting
RF	Avalanches.org, *Avalanche encyclopedia*, [en ligne], disponible sur < https://avalanche.org/avalanche-encyclopedia/metamorphism-snow/#:~:text=The%20physical%20change%20of%20snow,differences%20in%20temperature%20and%20pressure>, consulté le 28 mai 2022 [DF 1]; N. Logan, *Snow temperature patterns and artificial avalanche release*, International Snow Science Workshop, 1992, p.37 [CTX 1]; University of Washington, Earth System Science Course, Principles of Glaciology, The Cryosphere, [en ligne], disponible sur <https://courses.washington.edu/ess431/LECTURES/LECTURE_2016/Lect_04_Snow_2016.pdf>, consulté le 22 juillet 2022 [EXP 1]; University Corporation for Atmospheric Research, Snowmelt Processes, Snow Metamorphism, [en ligne], disponible sur https://download.comet.ucar.edu/memory-stick/hydro/basic_int/snowmelt/navmenu.php_tab_1_page_3.3.0.htm, consulté le 21 juillet 2022 [EXP 2].

Fiche n°4

FRANÇAIS

VE FR	métamorphisme [1], métamorphose [2]
DF	Ensemble des gradients thermiques à l'origine de flux de vapeur d'eau à travers toute l'épaisseur du manteau neigeux desquels résulte des transformations physiques des cristaux de neige.
DOM	science de l'atmosphère, météorologie
CTX	Décrire de façon détaillée l'évolution des propriétés internes du manteau neigeux (transfert thermique, transfert radiatif) en s'appuyant sur une description semi-quantitative de l'évolution des propriétés morphologiques des grains de neige au cours de leur métamorphisme.
COL	g.n. : * de neige sèche, * de neige mouillée, * de neige humide, * de fonte, * de faible gradient, * de fort gradient
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP 1 La neige est humide lorsque l'eau y est présente sous forme liquide. Les grains les plus petits ont alors tendance à fondre, l'eau liquide migre par capillarité vers les grains de glace restants, qui deviendront ainsi plus gros au moment du regel. EXP 2 Le métamorphisme de neige sèche correspond à des transformations de la microstructure de la neige principalement régies par des processus de transport de chaleur et de vapeur. Pour de faibles gradients, l'effet de rayon de courbure (flux de vapeur des zones convexes vers les zones concaves) l'emporte sur l'effet de gradient, ce qui provoque un arrondissement des grains et une prise de cohésion de frittage. Lorsque le gradient de température est important, la neige se transforme par facettage : les grains grossissent, deviennent plats, avec des arêtes et des angles. Les couches de grains facettés (grains anguleux) sont généralement fragiles et diminuent la solidité du manteau neigeux. USG beaucoup d'occurrences pour [2] mais impropre, [1] est le terme adéquat REL facettage
RF	A.-S. Taillandier, *Évolution de la surface spécifique de la neige. Études expérimentales et de terrain, paramétrisation.*, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2006 [DF 1 SEC, EXP 1] ; CNRM, Modèles d'évolution du manteau neigeux, [en ligne], disponible sur < https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article265>, consulté le 29 mai 2022 [CTX 1] ; P. Hagenmuller, Entretien téléphonique du 10 février 2022 [USG] ; EAWS, Glossary, [en ligne], disponible sur <https://www.avalanches.org/glossary/?lang=fr#facettage>, consulté le 21 juillet 2022 [EXP 2, SEC] ; N. Calonne, *Modélisation des métamorphoses de la neige sèche : de la microstructure à la couche de neige*, La Météorologie, 2017 [EXP 2].

Fiche n°5

ANGLAIS

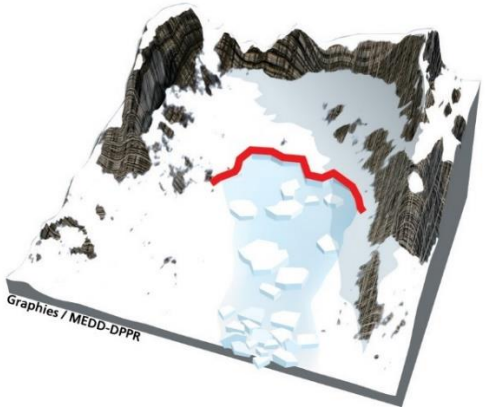
VE EN	creeping [1], gliding [2]
DF	Low, gliding movement of the snowpack over smooth or wet ground.
DOM	géologie, mécanique des sols
CTX	The tensile stresses caused by creeping are among the main causes of avalanches.
COL	n.g. * behavior of the snowpack, snow *
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP it can occur on grassy slopes or smooth rock slabs, and attain velocities of a few millimeters to a few meters per day. HOM [1] also refers to drifting snow, a form of aeolian snow transport <1m above the surface. REL glide avalanche, glide crack
RF	EAWS, *Glossary*, op. cit. [DF] [SEC EXP]; *Glossary of Snow, Ice, and Permafrost Terms Encyclopedia Arctica Volume 1: Geology and Allied Subjects*, [en ligne], disponible sur <https://collections.dartmouth.edu/arctica-beta/html/EA01-07.html>, consulté le 19 mai 2022 [CTX].

Fiche n°5

FRANÇAIS

VE FR	reptation [1]
DF	Glissement du manteau neigeux depuis le sol et sur toute sa hauteur.
DOM	géologie, mécanique des sols
CTX	Sur les anciennes estives à forte pente, la croissance de gispet facilite la reptation de la neige et l'écoulement des avalanches, phénomène que le maintien d'un pâturage extensif pourrait minimiser.
COL	g.n. : charge de *, phénomène de *, plaques de *.
ID	ESIT MEM22 ABO
Notes :	EXP Plusieurs paramètres peuvent conduire à ce phénomène : sol, exposition, pentes... Il se produit notamment lorsque de fortes chutes de neige ont lieu en début de saison sur un sol insuffisamment gelé. Souvent appelées « gueules de baleine » pour leur forme caractéristique, il s'agit en fait de plaques ouvertes qui glissent très lentement et dont le départ en avalanche peut se provoquer à tout moment. HOM [1] désigne également un des trois mécanismes de transport de la neige par le vent, le premier à se mettre en place une fois le seuil d'arrachement dépassé. REL avalanche de glissement, gueules de baleine
RF	F. Bourjaillat et al., *Mise en place de rondins contre le traitement du phénomène de reptation au Brévent, Chamonix Mt-Blanc*, ISSW, 2013, [en ligne], disponible sur <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW13_paper_P1-50.pdf>, consulté le 19 mai 2022 [DF], [EXP] ; A. Peltier, Université Toulouse II, Thèse, *La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale*, 2005, p. 194 [CTX] ; F. Cabot, *Neige et avalanches, Connaître et comprendre pour limiter le risque*, Glénat., Grenoble, 2020, p. 72 [HOM].

2. Glossaire

avalanche	avalanche
Phénomène naturel qui consiste en un déplacement d'une masse importante de neige (par opposition à une coulée de neige) à des vitesses dépassant le mètre par seconde. RF : C. Ancey, *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Edisud, 1998, p. 323. EXP : L'ordre de grandeur de la masse est le millier de tonnes, celui du volume est le millier de m^3. La dénivelée se mesure en centaine de mètres.	
avalanche à départ ponctuel	point release avalanche, loose snow avalanche
Type d'avalanche constituée de neige sèche ou mouillée ayant une très mauvaise cohésion. RF : EAWS, *Glossaire*, [en ligne], disponible sur <https://www.avalanches.org/glossary/?lang=fr#avalanche-de-neige-molle-avalanche-a-depart-ponctuel>, consulté le 1er juin 2022. EXP1 : Le départ se fait sous forme ponctuelle dans des pentes très raides, puis l'écoulement s'élargit vers le bas en forme de poire. EXP2 : Laisse sur la pente une trace en forme de cône ou de poire, d'où la qualification associée d'écoulement en forme de poire ou de cône.	
avalanche mixte	mixed avalanche, mixed flowing/powder avalanche
Avalanche qui comporte à la fois un phénomène d'aérosol important et un écoulement de type avalanche coulante. RF : *La déferlante blanche - Risques et Savoirs*, [en ligne], disponible sur <https://www.reseau-canope.fr/risquesetsavoirs/la-deferlante-blanche.html>, consulté le 18 mai 2022.	
capillarité, cohésion capillaire	capillarity
Cohésion due à la présence d'une pellicule d'eau liquide autour des grains (ronds). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 324.	
cassure linéaire, fracture linéaire	fracture line
Forme que prend la rupture dans la zone de départ d'une avalanche de plaque.  RF : *Avalanches* | *Géorisques*, [en ligne], disponible sur <https://www.georisques.gouv.fr/risques/avalanches>, consulté le 14 février 2022 [SEC].	

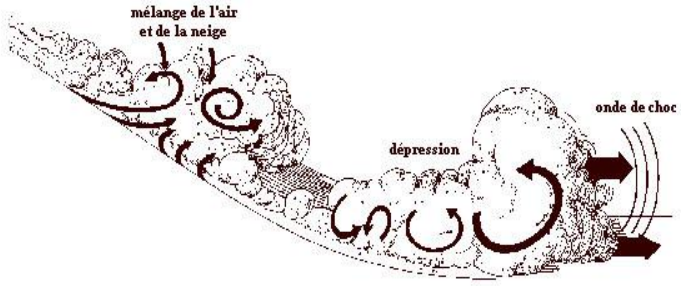
contrainte en cisaillement	shear stress
Contrainte parallèle à la pente à laquelle est soumise le manteau neigeux. RF : Skipass, « Le déclenchement des avalanches de plaque », [en ligne], disponible sur <https://www.skipass.com/news/174631-le-declenchement-des-avalanches-d.html>, consulté le 19 mai 2022, [SEC]. EXP : Dans une configuration de plaque, la contrainte en cisaillement peut entraîner la rupture de ponts entre les grains au sein de la couche fragile et, de proche en proche, mener à une avalanche de plaque. REL : contrainte en compression	
contrainte en compression	compressive stress
Contrainte perpendiculaire à la pente qui, couplée au cisaillement, constitue la composante mixte qu'une couche fragile doit supporter dans une configuration de plaque. RF : Skipass, « Le déclenchement des avalanches de plaque », *op. cit.*, [SEC]. REL : contrainte en cisaillement	
couche fragile, couche faible	weak layer
Couche de neige de faible cohésion. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 324 [SEC]. EXP1 : Toutes les neiges de faible cohésion peuvent constituer une couche fragile. Givre de surface, neige roulée et gobelets sont les plus durables, elles ne perdent leur caractère de couche fragile que par humidification du manteau. Les faces planes ont une durée de vie plus courte car, soumises à un faible gradient, elles reprennent de la cohésion de frittage et évoluent en grains fins. La neige fraîche et les particules reconnaissables constituent des couches fragiles de courte durée de vie après des précipitations ou un épisode de transport. L'instabilité ne dure que quelques heures à un ou deux jours avant que ces couches ne prennent de la cohésion. EXP2 : En cas de déclenchement accidentel d'avalanche de plaque, on retrouve assez souvent les couches fragiles peu durables. USG : « couche faible » est le terme le plus correct puisque renvoie à la faible cohésion, mais « couche fragile » est très largement employé.	
couloir d'avalanche, couloir avalancheux	avalanche corridor
Ravin abrupt ouvert à flanc de montagne et formant un passage emprunté par les avalanches. RF : *Définition de Avalanches*, [en ligne], disponible sur <https://www.cnrtl.fr/definition/academie9/avalanches>, consulté le 6 juin 2022.	
déclenchement préventif d'avalanche	avalanche control work
Contrôle « actif » des avalanches là où des ouvrages de protection passive ne peuvent être installés, ne sont pas appropriés RF : CEMAGREF, *Étude des effets des structures de protection sur les écoulements d'avalanches de neige*, 2002, 21 p., p. 3. EXP1: En France, un Plan d'intervention de déclenchement des avalanches (PIDA) est établi sous l'autorité du maire dans chaque commune concernée. EXP2 : Grenadage, déclenchement à distance, câble transporteur d'explosifs (Catex) ou encore Gazex® (mélange détonant de propane et d'oxygène) sont quelques-unes des techniques utilisées.	

dénivelée, dénivelé	altitude difference, denivelation
Différence de niveau, d'altitude entre deux points. RF : *Définition de Dénivelée*, [en ligne], disponible sur <https://www.cnrtl.fr/definition/d%C3%A9nivel%C3%A9e>, consulté le 14 janvier 2022. CTX : Le skieur progresse normalement et provoque le déclenchement d'une avalanche dont la rupture se produit à une grande distance de sa position (ici, 150 m de dénivelée en amont). USG : Souvent employé au masculin (850 m de dénivelé, un dénivelé positif de 1500 m).	
dépôt de l'avalanche	avalanche deposit
Neige déposée par une avalanche. RF : EAWS, *Glossaire*, [en ligne], *op. cit.* EXP : Les dépôts subsistent souvent sur une plus longue période en fond de vallée.	
diffusion turbulente	turbulent diffusion
Mécanisme de transport de la neige par vent fort. RF : F. Cabot, *Neige et avalanches, Connaître et comprendre pour limiter le risque*, Glénat, Grenoble, 2020, p. 72 [SEC]. EXP : La majeure partie des particules transportées retournent dans l'air par sublimation. REL : saltation, reptation	
équivalent en eau de la neige	snow water equivalent
Quantité d'eau pouvant être obtenue par fonte totale d'un échantillon de neige. RF : Gouvernement du Canada, Termium, [en ligne], disponible sur <https://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&srchtxt=SNOW+WATER+EQUIVALENT&index=alt&codom2nd_wet=1#resultrecs>, consulté le 6 juin 2022. EXP : Dans bien des cas, on peut appliquer un rapport de 10 à 1 pour déterminer l'équivalent en eau. 1 cm de neige, une fois fondu, serait équivalent à 1 mm d'eau.	
faces planes, grains à faces planes	faceted grains
Grain de neige résultant d'un métamorphisme de moyen gradient. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 328 [SEC]. EXP : À l'échelle de deux grains, la partie supérieure du grain de dessous tend à se sublimer, tandis que la partie inférieure du grain de dessus est le siège de condensation solide. Des facettes planes se forment alors sur les sites de condensation. La taille des grains augmente et en conséquence, la cohésion de la couche concernée diminue, par suite de la diminution du nombre de liaisons. USG : L'anglais « faceted grains » désigne à la fois la catégorie des grains anguleux qui englobe les gobelets et les grains à faces planes, et les seuls grains à faces planes. REL : grains anguleux, gobelets, facettage	

facettage	facetting
Processus de transformation de la neige sèche par gradient de température important au sein du manteau neigeux. RF : EAWS, *Glossaire*, [en ligne], *op. cit.* EXP : Les grains grossissent, deviennent plats, avec des arêtes et des angles, et creux en forme de gobelets. Les couches de grains anguleux sont généralement fragiles et diminuent la stabilité du manteau neigeux. REL : grains anguleux, gobelets	
feutrage, cohésion de feutrage	*pas de correspondance attestée*
Enchevêtrement des cristaux de neige fraîche par l'imbrication de leurs dendrites. RF : *Lexique météorologique - Comprendre la météo - Infoclimat*, [en ligne], disponible sur <https://www.infoclimat.fr/lexique-definition-274-cohesion-nivologie.html>, consulté le 1 juin 2022. EXP : Cohésion fragile (neige poudreuse) et de courte durée (quelques heures à quelques dizaines d'heures). USG : Si le terme « cohésion de feutrage » est fréquent en France pour caractériser la neige fraîchement tombée, l'anglais n'a pas de terme consacré et emploie des phrases descriptives telles que *"fresh-fallen dendritic snow characterized by low cohesion"*.	
force de traction	tensile strength
Force subie par une couche de neige qui a tendance à l'entraîner vers l'aval. RF : SKIPASS, « Le déclenchement des avalanches de plaque », [en ligne], *op. cit.* EXP : Fonction du poids de la couche et de l'inclinaison de la pente, elle est plus importante dans les zones de terrain convexes comme les ruptures de pente et peut conduire à la rupture en traction d'une plaque de neige, à savoir l'affaissement du manteau neigeux le long d'une cassure linéaire suivi du glissement dans la pente d'une plaque de neige.	
frittage, cohésion de frittage	sintering
Processus d'agglomération des grains qui se soudent au niveau de leurs points de contact. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 326. EXP : La cohésion devient bonne lorsque le frittage est fort.	
givre de surface	surface hoar
Dépôt de glace résultant de la congélation de gouttelettes en surfusion sur des surfaces. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 326. EXP : Ce givre se présente sous la forme de feuilles ou de pyramides inversées, striées.	

gobelets	cup-crystals, cup-shaped crystal
Grains gros, creux avec des arêtes et des stries sur leur surface, résultat d'un facettage consécutif à un fort gradient de température au sein du manteau neigeux. RF : EAWS, *Glossaire*, [en ligne], *op. cit.* [SEC]. EXP : Sa taille est comprise entre 2 et 5 mm. USG : Le terme givre de profondeur/depth hoar pour désigner les gobelets est à éviter car le gobelet se forme par métamorphisme de fort gradient proche de la surface avant, éventuellement, de se retrouver en profondeur à la suite d'une nouvelle chute de neige ou du transport de neige par le vent. Aussi, le givre de surface peut très bien lui aussi se retrouver en profondeur. REL : métamorphisme, métamorphisme de neige sèche	
grains anguleux	faceted grains, facets
Grains de neige présentant de multiples surfaces planes et des angulosités issus d'un métamorphisme de moyen ou fort gradient. RF : University of British Columbia, [en ligne], disponible sur <https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc113/snow/met_concepts/07-met_concepts/07de-rounding-faceting-snow-crystals/>, consulté le 4 juin 2022 ; EAWS, *Glossaire*, [en ligne], *op. cit.*, consulté le 4 juin 2022 [DF SEC]. REL : facettage, gobelets, grains à faces planes	
grains ronds	melt-forms, snowmelt
Grains sphériques, généralement gros, souvent agglomérés en amas. RF : EAWS, *Glosaire*, [en ligne], *op. cit.* [DF] ; Association internationale des sciences cryosphériques, *The international classification for seasonal snow on the ground*, 2009, 90 p., p. 19. EXP : Ils sont issus du métamorphisme de fonte.	
gueule de baleine	glide crack
Fissure visible à la surface de la neige, due à différents mouvements internes au manteau neigeux et se produisant dans des pentes raides au sol lisse (préférentiellement des pentes herbeuses). RF : EAWS, *Glossaire*, [en ligne], disponible sur <https://www.avalanches.org/glossary/?lang=fr#fissure-gueule-de-baleine>, consulté le 1er juin 2022.	
isotherme	isotherm
Altitude représentant la surface dans l'atmosphère où tous les points (loin de l'influence du sol) sont à la même température. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 327.	
manteau neigeux, couverture neigeuse	snow cover, snowpack
Ensemble résultant de la superposition des couches de neige correspondant chacune à un épisode météorologique (précipitation, transport par le vent). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 327.	

métamorphisme de neige humide, métamorphose de neige humide, métamorphisme de fonte	melt-freeze metamorphism
Métamorphisme concernant la neige humide. (TEL > 0 %). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 327 [SEC]. EXP : Aboutit à la formation de grains ronds.	
métamorphisme de neige sèche	dry-snow metamorphism
Métamorphisme concernant de la neige sèche (TEL = 0 %). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 327 [SEC]. EXP : Selon le gradient de température, on considère les métamorphismes de faible, moyen ou fort gradient. La température influe sur l'efficacité et la rapidité de ces transformations thermodynamiques.	
neige damée	groomed snow
Neige tassée dans le but d'assurer la stabilité du manteau neigeux et de faciliter la pratique du ski. RF : *Définition de Damage*, [en ligne], disponible sur <https://www.cnrtl.fr/definition/damage>, consulté le 30 mai 2022 [DF SEC].	
neige pourrie, neige mouillée	rotten snow, slush snow
DF : Neige très humidifiée possédant une teneur en eau liquide (TEL) importante. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 328 [SEC]. USG : « neige mouillée » : terme familier utilisé par le pratiquant pour désigner une neige difficile à skier qui a trop transformé (subi un fort dégel). REL : teneur en eau liquide	
neige roulée, grésil	graupel
Type de neige précipitée constituée de cristaux ayant traversé ou séjourné dans des masses nuageuses turbulentes formées de gouttelettes surfondues (qui persistent à l'état liquide à des températures négatives). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 328 [SEC] ; EAWS, *Glossaire*,[en ligne], *op. cit.* [SEC].	
nivologie	snow science
Étude scientifique de la neige. RF : P. Descamps et O. Moret, *Avalanches, Comment réduire le risque*, Éditions Paulsen, Chamonix, 2019, p. 262. EXP : En France, elle revient principalement à Météo France, qui a notamment mis au point une modélisation du manteau neigeux en fonction des conditions atmosphériques. USG : Concerne plus globalement tout ce qui se rapporte à la connaissance de la neige.	
plaque	slab
DF : Surface mise en mouvement au moment de la rupture au sein du manteau neigeux. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 329. EXP : Le déclenchement d'une avalanche de plaque de neige résulte de la perte d'équilibre du manteau neigeux sur une pente.	

plaque à vent	wind-slab
Accumulation de neige transportée par le dans des zones de moindre influence. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 329. USG : Désigne souvent des plaques formées par un vent de force suffisante pour que leur localisation soit conforme à ce que l'on admet généralement, à savoir dans les pentes abritées du vent dans des orientations opposées à celle d'où il vient.	
pont de glace	ice bond
Liaison entre deux grains résultant d'un frittage. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 328.	
saltation	drifting snow
Mode de transport de la neige par le vent se manifestant par une mise en mouvement des grains qui rebondissent en effectuant des « sauts de puce ». RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 329. EXP : Le vent est plus fort que lors de la reptation, la particule de neige est éjectée sur quelques centimètres voire décimètres et retombe sous l'effet de la gravité en éjectant d'autres particules. La saltation provoque des accumulations de neige, la prise de cohésion de frittage et donc la formation de plaques. REL : reptation, diffusion turbulente	
souffle de l'avalanche, vent d'avalanche	avalanche blast, avalanche wind
Souffle précédant le front de l'avalanche (en général mixte ou en aérosol). RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 331. EXP : Avec la vitesse, dans certaines configurations de terrain où celui-ci se resserre, une « onde » de surpression peut se former à l'avant de l'aérosol avec un effet très destructeur.  Fig : Skipass, « Avalanche : c'est quoi un aérosol », [en ligne], disponible sur <https://www.skipass.com/news/146384-avalanche-c-est-quoi-un-aerosol-.html>, consulté le 4 juin 2022.	
teneur en eau liquide, TEL	liquid water content
DF : Rapport du volume d'eau liquide sur le volume total de l'échantillon. RF : C. Ancey, *op. cit.*, p. 331.	

3. Lexique

3.1. Lexique français-anglais

VEDETTE FRANÇAISE	SYNONYME	VEDETTE ANGLAISE
aiguilles		needles
aire de départ	zone de départ	starting zone
analyse de la variance	ANOVA	analysis of variance, ANOVA
analyse des cernes des arbres	dendrochronologie	tree-ring analysis
ancrage		anchor
ANENA	Association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches	
ANOVA	analyse de la variance	analysis of variance, ANOVA
Association canadienne des avalanches		Canadian Avalanche Association, CAA
Association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches	ANENA	
artificiers		avalanche blasting crew
avalanche*		avalanche
avalanche à départ ponctuel*		point release avalanche, loose snow avalanche, sluff avalanche
avalanche coulante	avalanche dense	dense avalanche, dense flowing avalanche, flowing avalanche
avalanche de fond[F1]		full-depth avalanche, ground avalanche
avalanche de fonte	avalanche de neige humide, avalanche de neige mouillée	wet snow avalanche, slush avalanche
avalanche de fonte de fond[F2]	avalanche de glissement	glide avalanche, gliding avalanche, wet slab avalanche
avalanche de glissement[F2]	avalanche de fonte de fond	glide avalanche, gliding avalanche, wet slab avalanche

avalanche de neige humide	avalanche de fonte	wet snow avalanche
avalanche de neige mouillée	avalanche de fonte	slush avalanche
avalanche de neige poudreuse		powder snow avalanche
avalanche dense	avalanche coulante	dense avalanche, dense flowing avalanche, flowing avalanche
avalanche en aérosol		airborne avalanche
avalanche mixte*		mixed avalanche, mixed flowing/powder avalanche
avalanche naturelle	avalanche spontanée	natural avalanche, spontaneous avalanche
avalanche spontanée	avalanche naturelle	natural avalanche, spontaneous avalanche
BERA	bulletin d'estimation du risque d'avalanche	
bulletin d'estimation du risque d'avalanche	BERA	
capillarité*		capillarity
Carte de localisation des phénomènes d'avalanche	CLPA	
cassure		crack
cassure linéaire*	fracture linéaire	fracture line
cassure sommitale		crown fracture
CEMAGREF	Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts	
Centre d'études de la neige	CEN	
CEN	Centre d'études de la neige	
Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts	CEMAGREF	
Centre national de la recherche scientifique	CNRS	

Centre national de recherches météorologiques	CNRM	
CLPA	Carte de localisation des phénomènes d'avalanche	
CNRM	Centre national de recherches météorologiques	
CNRS	Centre national de la recherche scientifique	
coefficient de corrélation de rang		rank correlation coefficient
col de montagne		mountain pass
colonnes		columns
contrainte		stress
contrainte en cisaillement*		shear stress
contrainte en compression*		compressive stress
corniche		cornice
couche faible	couche fragile	weak layer
couche fragile*	couche faible	weak layer
couloir d'avalanche	couloir avalancheux	avalanche corridor
couloir avalancheux	couloir d'avalanche	avalanche corridor
couverture neigeuse	manteau neigeux	snow cover, snowpack
croûte de regel[F3]		melt-freeze crust
déclenchement préventif d'avalanche*		avalanche control work
déclenchement provoqué		avalanche trigger
déclivité		declivity
dendrites		dendrites
dendrochronologie	analyse des cernes des arbres	tree-ring analysis
dénivelé*		altitude difference, denivelation
dénivelée*		altitude difference, denivelation
départ spontané		avalanche release
dépôt de l'avalanche*		avalanche deposit
détection de rupture		breakpoint analysis
DGPR	Direction générale de la prévention des risques	

diffusion turbulente*		turbulent diffusion
Direction générale de la prévention des risques	DGPR	
distribution des fréquences	distribution statistique	frequency distribution
distribution statistique	distribution des fréquences	frequency distribution
dureté		hardness
ECANA	Étude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle	
Enquête permanente sur les avalanches	EPA	
Étude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle	ECANA	
ETNA	Érosion torrentielle, neige et avalanches	
EPA	Enquête permanente sur les avalanches	
épaisseur		thickness
équivalent en eau de la neige*		snow water equivalent
Érosion torrentielle, neige et avalanches	ETNA	
estimation du risque d'avalanche		avalanche forecast
événement avalancheux	événement d'avalanche	avalanche event
événement d'avalanche	événement avalancheux	avalanche event
faces planes*	grains à faces planes	faceted grains, facets
facettage*		faceting
fonction constante par morceaux	fonction étagée	step function
force de traction*		tensile strength
fonction étagée	fonction constante par morceaux	step function
fracture linéaire	cassure linéaire*	fracture line
frittage*		sintering
germe de glace		ice germ
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC

givre de surface*		surface hoar
gobelet*		cup-crystals, cup-shaped crystals
grains à faces planes*	faces planes	faceted grains, facets
grains anguleux*		faceted grains, facets
grains fins		rounded grains
grains ronds		snowmelt, melt-forms
grêle		hail
grésil	neige roulée	graupel
Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	GIEC	Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC
gueule de baleine		glide crack
hauteur de neige		snow height, snow depth
hauteur de neige fraîche	HN	height of new snow, depth of snowfall, HN
hauteur de neige fraîche journalière		daily new snow height
hauteur de neige fraîche	HN	depth of snowfall, height of new snow, HN
HN	hauteur de neige fraîche	depth of snowfall, height of new snow, HN
HS	hauteur (totale) de neige	height of snowpack, HS, snow depth, snow height
hauteur (totale) de neige	HS	height of snowpack, HS, snow depth, snow height
INA	Information neige et avalanche	
Information neige et avalanche	INA	
Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture	IRSTEA	
IRSTEA	Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture	
isotherme*		isotherm

LF	limite forestière	tree-line
limite forestière	LF	tree-line
manteau neigeux*	couverture neigeuse	snow cover, snowpack
MEPRA	Modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanche	
métamorphisme[F4]	métamorphose	metamorphism, metamorphosis
métamorphisme de neige humide*	métamorphisme de fonte, métamorphose de neige humide	melt-freeze metamorphism
métamorphisme de fonte	métamorphisme de neige humide, métamorphose de neige humide	melt-freeze metamorphism
métamorphisme de neige sèche*		dry-snow metamorphism
métamorphose[F4]	métamorphisme	metamorphism, metamorphosis
métamorphose de neige humide	métamorphisme de neige humide, métamorphisme de fonte	melt-freeze metamorphism
mode d'écoulement		avalanche runout
Modèle expert d'aide à la prévision du risque d'avalanche	MEPRA	
neige damée*		groomed snow
neige décaillée	neige moquette	ripe corn snow
neige humide		damp snow, wet snow
neige moquette	neige décaillée	ripe corn snow
neige mouillée	neige pourrie	rotten snow, slush snow
neige pourrie*	neige mouillée	rotten snow, slush snow
neige roulée*	grésil	graupel
neige sèche		dry snow
nivologie*		snow science
nivologue		snow scientist
Office national des forêts	ONF	
ONF	Office national des forêts	
ordonnée à l'origine		intercept
parc national des Glaciers	PNG	Glacier National Park, GNP
pisteur		ski patroller
plan local d'urbanisme	PLU	

plan de prévention des risques naturels	PPRN	
plaque*		slab
plaque à vent*		wind slab
PLU	plan local d'urbanisme	
pluviomètre		precipitation gauge
PNG	parc national des Glaciers	Glacier National Park, GNP
PNT	prévision numérique du temps	
point de rupture		breakpoint
pont de glace*		ice bond
PPRN	plan de prévention des risques naturels	
précipitations neigeuses		snowfall
prévision numérique du temps	PNT	
propagation d'une cassure		crack propagation
purger		to clear
qualité de neige du dépôt		deposit moisture content
rapport de précipitations solides	RPS	solid precipitation ratio, SPR
rayon de courbure		radius of curvature
redoux		mild spell
reptation[F5]		creeping, gliding
résistance au battage		ram resistance
résistance au cisaillement		shear resistance
route Transcanadienne	TCH	TCH, Trans-Canada Highway
RPS	rapport de précipitations solides	solid precipitation ratio, SPR
rupture en traction		tensile fracture
SAFRAN	Système d'analyse fournissant des renseignements adaptés à la nivologie	
saltation*		drifting snow

SCAMPEI	Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagne : phénomènes extrêmes, enneigement et incertitudes	
Scénarios climatiques adaptés aux zones de montagne : phénomènes extrêmes, enneigement et incertitudes	SCAMPEI	
sérac		serac
seuil d'arrachement		snow-drift threshold
site		study plot
souffle de l'avalanche*	vent d'avalanche	avalanche blast, avalanche wind
station météorologique		weather station
surfondu		supercooled
surfusion		supercooling, undercooling
surpression		overpressure
statistiques récapitulatives		summary statistics
Système d'analyse fournissant des renseignements adaptés à la nivologie	SAFRAN	
TCH	route Transcanadienne	TCH, Trans-Canada Highway
TEL	teneur en eau liquide	liquid water content
température de l'air moyenne		mean air temperature
teneur en eau liquide*	TEL	liquid water content
unité de prévention des avalanches		ACS, Avalanche Control Section
zone de départ	aire de départ	starting zone

3.2. Lexique anglais-français

VEDETTE ANGLAISE	SYNONYME	VEDETTE FRANÇAISE
ACS	Avalanche Control Section	unité de prévention des avalanches
airborne avalanche		avalanche en aérosol
altitude difference	denivelation	dénivelé, dénivelée*
analysis of variance	ANOVA	analyse de la variance, ANOVA
anchor		ancrage
ANOVA	analysis of variance	analyse de la variance, ANOVA
avalanche		avalanche*
avalanche blast	avalanche wind	souffle de l'avalanche, vent d'avalanche*
avalanche blasting crew		artificiers
Avalanche Control Section	ACS	unité de prévention des avalanches
avalanche control work		déclenchement préventif d'avalanche*
avalanche corridor		couloir d'avalanche, couloir avalancheux
avalanche deposit		dépôt de l'avalanche*
avalanche event		événement avalancheux, événement d'avalanche
avalanche forecast		estimation du risque d'avalanche
avalanche release		départ spontané
avalanche runout		mode d'écoulement
avalanche trigger		déclenchement provoqué
avalanche wind	avalanche blast	souffle de l'avalanche, vent d'avalanche*
breakpoint		point de rupture
breakpoint analysis		détection de rupture
CAA	Canadian Avalanche Association	Association canadienne des avalanches
Canadian Avalanche Association	CAA	Association canadienne des avalanches

capillarity		capillarité*
to clear		purger
columns		colonnes
compressive stress		contrainte en compression*
cornice		corniche
crack		cassure
crack propagation		propagation d'une cassure
creeping[F5]	gliding	reptation
crown fracture		cassure sommitale
cup-crystals	cup-shaped crystal	gobelets*
cup-shaped crystals	cup-crystal	gobelets*
daily new snow height		hauteur de neige fraîche journalière
damp snow	wet snow	neige humide
declivity		déclivité
dendrites		dendrites
denivelation	altitude difference	dénivelé, dénivelée*
dense avalanche	dense flowing avalanche, flowing avalanche	avalanche coulante, avalanche dense
dense flowing avalanche	dense avalanche, flowing avalanche	avalanche coulante, avalanche dense
deposit moisture content		qualité de neige du dépôt
depth of snowfall	height of new snow, HN	hauteur de neige fraiche, HN
drifting snow		saltation*
dry snow		neige sèche
dry-snow metamorphism		métamorphisme de neige sèche*
faceted grains	facets	grains anguleux*, grains à faces planes*
facets	faceted grains	grains anguleux*, grains à faces planes*
faceting		facettage*
flowing avalanche	dense avalanche, dense flowing avalanche	avalanche coulante, avalanche dense
fracture line		cassure linéaire*, fracture linéaire

frequency distribution		distribution statistique, distribution des fréquences
full-depth avalanche[F1]	ground avalanche	avalanche de fond
Glacier National Park	GNP	parc national des Glaciers, PNG
GNP	Glacier National Park	parc national des Glaciers, PNG
glide avalanche[F2]	gliding avalanche, wet slab avalanche	avalanche de glissement, avalanche de fonte de fond
gliding avalanche[F2]	glide avalanche, wet slab avalanche	avalanche de glissement, avalanche de fonte de fond
glide crack		gueule de baleine*
gliding[F5]	creeping	reptation
graupel		neige roulée, grésil*
groomed snow		neige damée*
ground avalanche[F1]	full-depth avalanche	avalanche de fond
hail		grêle
hardness		dureté
height of new snow	depth of snowfall, HN	hauteur de neige fraiche, HN
height of snowpack	HS, snow depth, snow height	hauteur (totale) de neige, HS
HN	depth of snowfall, height of new snow	hauteur de neige fraiche, HN
HS	heigh of snowpack, snow depth, snow height	hauteur (totale) de neige, HS
ice bond		pont de glace*
ice germ		germe de glace
intercept		ordonnée à l'origine
Intergovernmental Panel on Climate Change	IPCC	GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
isotherm		isotherme*
liquid water content		teneur en eau liquide, TEL

loose snow avalanche	point release avalanche, sluff avalanche	avalanche à départ ponctuel*
maximum snow depth		hauteur de neige maximale
melt-forms	snowmelt	grains ronds
melt-freeze crust[F3]	rain crust, snow crust	croûte de regel, croûte de soleil, croûte de pluie
melt-freeze metamorphism		métamorphisme de neige humide, métamorphose de neige humide, métamorphisme de fonte*
metamorphism[F4]	metamorphosis	métamorphisme, métamorphose
metamorphosis[F4]	metamorphism	métamorphisme, métamorphose
mild spell		redoux
mixed avalanche	mixed flowing/powder avalanche	avalanche mixte*
mixed flowing/powder avalanche	mixed avalanche	avalanche mixte*
mountain pass		col de montagne
natural avalanche	spontaneous avalanche	avalanche naturelle, avalanche spontanée
needles		aiguilles
overpressure		surpression
point release avalanche	loose snow avalanche, sluff avalanche	avalanche à départ ponctuel*
powder snow avalanche		avalanche de neige poudreuse
precipitation gauge		pluviomètre
radius of curvature		rayon de courbure
rain crust[F3]	melt-freeze crust, snow crust	croute de regel
ram resistance		résistance au battage
rank correlation coefficient		coefficient de correlation de rang
ripe corn snow		neige décaillée, neige moquette
rotten snow	slush snow	neige pourrie, neige mouillée*
rounded grains		grains fins
serac		sérac
shear resistance		résistance au cisaillement
slab		plaque*

sluff avalanche	loose snow avalanche, point release avalanche	avalanche à depart ponctuel
slush avalanche		avalanche de neige mouillée, avalanche de fonte
slush snow	rotten snow	neige pourrie, neige mouillée*
shear stress		contrainte en cisaillement*
sintering		frittage*
ski patroller		pisteur
snow cover	snowpack	couverture neigeuse, manteau neigeux*
snow depth	height of snowpack, HS, snow height	hauteur (totale) de neige, HS
snow-drift threshold		seuil d'arrachement
snow height	height of snowpack, HS, snow depth	hauteur (totale) de neige, HS
snow water equivalent	SWE	equivalent en eau de la neige*
snowmelt	melt-forms	grains ronds
snowpack	snow cover	couverture neigeuse, manteau neigeux*
snowpack depth		hauteur de neige
snow science		nivologie*
snow scientist		nivologue
solid precipitation ratio	SPR	rapport de précipitations solides, RPS
spontaneous avalanche	natural avalanche	avalanche naturelle, avalanche spontanée
SPR	solid precipitation ratio	rapport de précipitations solides, RPS
starting zone		zone de départ, aire de départ
step function		fonction constante par morceaux, fonction étagée
stress		contrainte
study plot		site

summary statistics		statistiques récapitulatives
sun crust[F3]	melt-freeze crust, rain crust	croûte de regel
supercooled		surfondu
supercooling	undercooling	surfusion
surface hoar		givre de surface*
SWE	snow water equivalent	équivalent en eau de la neige*
TCH	Trans-Canada highway	route Transcanadienne, TCH
Trans-Canada highway	TCH	route Transcanadienne, TCH
tensile fracture		rupture en traction
tensile strength		force de traction*
thickness		épaisseur
tree-line		limite forestière, LF
tree-ring analysis		analyse des cernes des arbres, dendrochronologie
turbulent diffusion		diffusion turbulente, suspension*
undercooling	supercooling	surfusion
weak layer		couche fragile*, couche faible
weather station		station météorologique
wet snow	damp snow	neige humide
wet slab avalanche[F2]	glide avalanche, gliding avalanche	avalanche de glissement, avalanche de fonte de fond
wet snow avalanche		avalanche de fonte, avalanche de neige humide
wind slab		plaque à vent*

PARTIE V : BIBLIOGRAPHIE CRITIQUE SÉLECTIVE

1. Sources de langue anglaise

1.1. Articles scientifiques

- H. Castebrunet, N. Eckert, G. Giraud, “Snow and weather climatic control on snow avalanche occurrence fluctuations over 50 years in the French Alps”, *Climate of the past*, 2012.

Outre le fait qu’elle a été menée dans les Alpes françaises, l’étude présentée dans cet article est assez semblable à celle dont rend compte l’article traduit dans le cadre de ce mémoire. J’y ai retrouvé de la terminologie et de la phraséologie présentes dans le texte source et qu’il était intéressant de voir mobilisées dans d’autres contextes. De plus, les données avalancheuses qui ont été utilisées sont issues de l’EPA et de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA, ce qui m’a permis d’approfondir mes connaissances de ces programmes, et de faire le lien avec l’étude du climat.

- A. Duclos, F. Louchet, “Slab avalanche triggering: a combination of four basic phenomena in series”, 2006.

Cet article qui vise à expliquer la dynamique des avalanches de plaque comporte de nombreux schémas qui aident à la compréhension. Couplée à d’autres, la lecture de cet article suivie de l’étude sources en français traitant du même phénomène m’a permis de dégager la terminologie des avalanches de plaque.

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

Cet article traite des périodes de retour des avalanches extrêmes. Je l’ai consulté lors de la traduction pour me familiariser avec les notions d’extrêmes et de période de retour en météorologie.

- M. Matiu, A. Crespi, G. Bertoldi, M. Carmagnola Carlo, C. Marty, S. Morin, W. Schöner, D. Cat Berro, G. Chiogna et L. De Gregorio, “Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019”, *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, n° 3, p. 1343-1382.

Cet article paru dans *The Cryosphere*, revue publiée par *Copernicus Publications* pour le compte de l’Union européenne des géosciences, rend compte des tendances de hauteur de neige dans les Alpes sur la période 1971-2019. Bien que la zone étudiée soit différente et que moins de variables aient été analysées, la phraséologie recoupe celle rencontrée dans le texte source de la traduction, et m’a donc facilité la compréhension de certains passages.

- S. Morin, S. Horton, F. Techel, M. Bavay, C. Coléou, C. Fierz, A. Gobiet, P. Hagenmuller, M. Lafaysse, M. Ližar, C. Mitterer, F. Monti, K. Müller, M. Olefs, J. Snook, A. Herwijnen et V. Vionnet, "Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future", *Cold Regions Science and Technology*, 2020, vol. 170.

Cet article de synthèse très complet présente et compare les programmes de modélisation du manteau neigeux reposant sur la prévision numérique du temps (PNT) en Suisse, en Autriche, en Norvège, au Canada, en Italie, en Slovénie, en France et aux États-Unis.

- M. Smith, B. Jamieson, C. Fierz, "Observation and modeling of a buried melt-freeze crust", *International Snow Science Workshop Proceedings*, 2008

La lecture de cet article portant sur l'observation et la modélisation d'une croûte de regel enfouie a été riche à bien des égards. En effet, l'un des co-auteurs a également participé à l'étude qui a donné lieu à mon texte source, et la zone d'étude comprend la station de Mt Fidelity, un des deux sites étudiés dans le texte source de ma traduction. En outre, les auteurs s'attachent à expliquer la formation et l'évolution de croûtes de regel dans le manteau neigeux, explicitant ainsi le sous-texte de l'article que j'ai traduit.

1.2. Sources multimédia

- *About ISSW*, [en ligne], disponible sur https://www.issw.net/about-issw.

Les *International Snow Science Workshops* sont un cycle annuel de conférences internationales dans le cadre desquelles de nombreux chercheurs se réunissent pour partager les résultats de leurs recherches. Les comptes-rendus des différentes présentations sont disponibles en ligne, et certains sont ensuite révisés pour aboutir à une publication, comme c'est le cas de l'article traduit dans le cadre de ce mémoire.

- *An Introduction to the North American Avalanche Danger Scale - YouTube*, [en ligne], disponible sur https://www.youtube.com/watch?v=r_-KpOu7tbA.

Présentation courte mais complète de l'échelle nord-américaine du risque d'avalanche.

- *Avalanche science and prevention - SLF*, [en ligne], disponible sur https://www.slf.ch/en/avalanches/avalanche-science-and-prevention.html.

Site internet de l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches suisse, qui établit les bulletins d'avalanche suisses. Disponible en allemand, en français, en italien et en anglais, ce site est une mine d'informations sur la neige et les avalanches. La terminologie et la phraséologie rencontrées doivent néanmoins être recoupées avec d'autres sources puisqu'il s'agit parfois de traductions et que la terminologie varie parfois avec celle employée en France, pour les bulletins d'avalanche par exemple.

- *Avalanche.org - National Avalanche Center*, [en ligne], disponible sur https://avalanche.org/national-avalanche-center/.

Avalanche.org (au pluriel) est le fruit d'un partenariat entre *l'American Avalanche Association* et le *US Forest Service National Avalanche Center*. On y trouve les bulletins de risque d'avalanche pour les États-Unis et des liens vers de nombreuses ressources.

- *EAWS - European Avalanche Warning Services*, [en ligne], disponible sur https://www.avalanches.org/.

Avalanche.org (au singulier cette fois) est le site de l'EAWS, collaboration entre différents services de prévision du risque d'avalanche européens (auxquels viennent s'ajouter la Norvège et la Roumanie). La principale réalisation de l'EAWS est l'échelle européenne de risque d'avalanche, utilisée depuis 1994 dans toute l'Europe. Un glossaire en neuf langues est également disponible. Il doit néanmoins être consulté avec certaines réserves. En effet, les définitions proposées pour certains termes sont parfois des traductions littérales de la version anglaise.

- *National Snow and Ice Data Center*, [en ligne], disponible sur https://nsidc.org/.

Le site internet de ce centre de recherches implanté à Boulder dans le Colorado propose de brefs articles récapitulatifs des connaissances de base en nivologie, sur les avalanches, et sur les rétroactions entre neige et climat.

- *The Facet Factory An Introduction to Snow Metamorphism | Gallatin National Forest Avalanche Center*, [en ligne], disponible sur https://www.mtavalanche.com/blog/facet-factory-introduction-snow-metamorphism.

- *UBC Avalanche Research Group*, [en ligne], disponible sur https://ibis.geog.ubc.ca/avalanche/index.html.

L'université de Colombie-Britannique met à disposition les publications rendant compte des travaux de recherche effectués, et propose certains supports de cours didactiques, notamment sur l'évolution du matériau neige lors du métamorphisme de fort gradient.

1.3. Documents institutionnels

- International Association of Cryospheric Sciences, *The International classification for seasonal snow on the ground*, 2009, [en ligne], disponible sur https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462.

  Ce document de 80 pages est le résultat d'un travail d'harmonisation de la terminologie relative à la neige, mené au sein d'un comité de travail de l'Association internationale des sciences cryosphériques à l'initiative du Programme hydrologique intergouvernemental de l'UNESCO. On y trouve notamment la terminologie préconisée pour décrire les différents grains de neige et leurs symboles, ainsi que des photographies et la définition des techniques de mesures effectuées sur la neige au sol. Le document n'a pas été traduit dans son intégralité en français, mais une traduction française, espagnole, russe et allemande des termes présents dans les tableaux est proposée en annexe.

2. Sources de langue française

2.1. Ouvrages

- C. Ancey, *Guide neige et avalanches : connaissances, pratiques, sécurité*, Edisud., 1998, 335 p.

Ouvrage de référence très complet et technique, coordonné par Christophe Ancey, ingénieur et professeur de mécanique des fluides. La seule réserve vis-à-vis de ce livre est que la recherche a beaucoup évolué en vingt ans, notamment en matière de dynamique des avalanches. Certains passages sont donc obsolètes.

- F. Cabot, *Neige et avalanches, Connaître et comprendre pour limiter le risque*, Glénat., Grenoble, 2020, 239 p.

Ouvrage didactique et très complet permettant une bonne première approche pour comprendre la neige de sa formation dans les nuages à sa fonte, ainsi que le phénomène avalancheux. Se lit très bien et permet d'avoir une bonne compréhension d'ensemble des concepts et de se familiariser avec la terminologie dense du domaine avant d'approfondir par la lecture d'articles scientifiques. Son auteur, Frédéric Cabot, est nivologue-prévisionniste chez Météo France.

- P. Descamps et O. Moret, *Avalanches, Comment réduire le risque*, Éditions Paulsen., Chamonix, (coll. « Guérin »), 2019, 263 p.

Cet ouvrage à destination des pratiquants des sports de pleine nature appréhende les différents outils de réduction du risque d'avalanche. Il propose des cas pratiques pour appliquer à des situations précises les méthodes proposées. Outre son glossaire auquel j'ai eu recours pour l'élaboration de la partie terminologie, j'ai assez peu consulté cet ouvrage orienté vers la pratique.

2.2. Articles scientifiques

- G. Giraud, J.-P. Navarre, C. Coléou, « Estimation du risque avalancheux dans le système expert MEPRA », 2002.

Article expliquant l'intégration de MEPRA dans la chaîne de modèles SAFRAN-CROCUS-MEPRA utilisée pour la prévision du risque d'avalanche.

- P. Hagenmuller, « Le déclenchement des avalanches de plaque », Neige et Avalanches n° 157, 2017, p. 10-19.

Cet article m'a été utile pour rédiger la partie de l'exposé sur les avalanches de plaque et pour les mêmes notions dans la partie terminologie, les étapes du mécanisme de déclenchement y sont exposées clairement.

- H. Kern, V. Jomelli, N. Eckert, D. Grancher et M. 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, vol. 26, 2.

Une partie de la structure et de la phraséologie de cet article consacré à l'étude des volumes de dépôts dans 43 couloirs d'avalanches de Haute-Maurienne se recoupe avec celle de l'article que j'ai traduit.

- B. Lesaffre, Y. Lejeune, S. Morin, J.-M. Panel et D. Poncet, « Impact du changement climatique sur l'enneigement de moyenne montagne : l'exemple du site du col de Porte en Chartreuse », 25e colloque de l'Association internationale de climatologie, 2012.

Cet article m'a été utile pour sa terminologie liée aux définitions des paramètres mesurés et la phraséologie relative aux tendances observées.

- M. Naaim Mohamed, N. Eckert, G. Giraud, T. Faug, G. Chambon, F. Naaim-Bouvet et D. Richard, « Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises », *La Houille Blanche*, 2016, vol. 6, p. 12-20.

La terminologie et la phraséologie employées dans cet article recoupent celles utilisées dans ma traduction puisqu'il s'agit ici de l'étude de tendances de l'activité avalancheuse humide.

2.3. Sources multimédia

- Association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches, [en ligne], disponible sur https://www.anena.org/.

L'ANENA est un acteur majeur de la gestion du risque d'avalanche en France. On peut lire sur le site que : « reconnue d'utilité publique depuis 1976, l'ANENA compte aujourd'hui près de 900 membres, personnes physiques ou organismes, publics ou privés, dont 150 étrangers. Les missions actuelles de l'ANENA sont orientées principalement vers la prévention par le traitement et la diffusion de l'information, la formation grand public et la formation professionnelle. » L'onglet « Comprendre le risque » comporte une section « Nivologie » très bien construite pour acquérir les connaissances de base de la discipline.

- *Avalanches | Géorisques*, [en ligne], disponible sur https://www.georisques.gouv.fr/risques/avalanches.

Cette section du site de la République française Géorisques, qui vise à faire connaître les risques naturels pour une meilleure gestion, traite du risque d'avalanche. Les figures explicatives sont claires et les informations essentielles bien résumées.

- *Montagne : prévoir les dangers et s'adapter au changement climatique | Météo-France*, [en ligne], disponible sur https://meteofrance.fr/actualite/actualite-de-meteo-france/montagne-prevoir-les-dangers-et-sadapter-au-changement-climatique.

Le site de Météo France, organisme chargé d'établir les bulletins d'estimation du risque d'avalanche, comporte également des articles complets et accessibles sur l'évolution de l'enneigement et, par extension, du risque d'avalanche, en lien avec le changement climatique.

- *Projet ECANA*, [en ligne], disponible sur https://www.avalanches.fr/projet-ecana/.

Page de présentation du projet d'Étude climatologique de l'activité avalancheuse naturelle (ECANA), financé par la Direction générale de la prévention des risques du ministère de l'Environnement et mené conjointement par l'unité de recherche Érosion Torrentielle Neige et Avalanches (ETNA) de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA devenu INRAE en 2020) et le Centre d' Étude de la Neige (CEN) de Météo France. Il s'agit de la première grande étude effectuée en France sur la climatologie de l'activité avalancheuse naturelle dans les Alpes françaises.

- *Programmes institutionnels d'observation des avalanches soutenus par le ministère de l'environnement*, [en ligne], disponible sur https://www.avalanches.fr/.

Site gouvernemental présentant essentiellement trois dispositifs : la Carte de localisation permanente des avalanches (CLPA), l'Enquête permanente sur les avalanches (EPA), et l'inventaire des Sites habités sensibles aux avalanches (SSA).

- *RAPPORT N°1540 sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France*, Volume 3, avril 1999, Les avalanches de neige, [en ligne], disponible sur https://www.assemblee-nationale.fr/rap-oecst/risque/R1540-03.asp.

Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques comportant un chapitre très complet sur les avalanches, leur observation, la prévision, la prévention et le secours.

INDEX

A

aiguilles · 7, 133, 144
avalanche · 1, 2, 3, 4, 5, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 60, 61, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 82, 84, 85, 86, 87, 88, 89,90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 153, 154, 155, 156, 157
avalanche à départ ponctuel · 126, 133, 144
avalanche de fond · 19, 114, 117, 119, 133, 143
avalanche de glissement · 19, 114, 117, 119, 125, 133, 143, 146
avalanche mixte · 15, 126, 134, 144
avalanches de fond · 117

C

capillarité · 13, 18, 21, 126, 134, 142
cassure linéaire · 15, 18, 126, 129, 134, 136, 142
changement climatique · 35, 37, 39, 40, 41, 42, 45, 47, 77, 83, 89, 90, 92, 94, 96, 101, 103, 109, 155, 156
cisaillement · 21, 57, 127, 135, 139, 144, 145
climat · 23, 29, 37, 40, 41, 51, 83, 87, 92, 103, 108, 136, 137, 143, 147, 151
cohésion de feutrage · 7, 11, 17, 129
cohésion de frittage · 7, 11, 17, 123, 127, 129, 132
colonne · 7, 135, 142
compression · 127, 135, 142
contrainte en cisaillement · 127, 135, 145
contrainte en compression · 127, 135, 142
couche fragile · 13, 19, 20, 21, 121, 127, 135, 146
couloir · 2, 25, 37, 49, 51, 55, 79, 85, 99, 127, 135, 141, 155
couloir d'avalanche · 49, 51, 55, 79, 85, 99, 127, 135, 141, 155
croûte de regel · 18, 57, 59, 69, 77, 85, 102, 114, 121, 135, 144, 146, 149

D

déclenchement · 1, 2, 15, 18, 20, 22, 23, 25, 31, 33, 39, 45, 51, 79, 85, 89, 100, 109, 117, 119, 127, 128, 129, 131, 135, 141, 154
déclenchement préventif d'avalanche · 2, 51, 79, 100, 109, 127, 135, 141
dendrites · 7, 129, 135, 142
dénivelée · 1, 126, 128, 135, 141, 142
départ spontané · 18, 135, 141
dépôt · 17, 39, 45, 55, 71, 73, 89, 91, 106, 110, 112, 128, 135, 139, 141, 142, 155
dépôt de l'avalanche · 128, 135, 141
diffusion turbulente · 11, 128, 132, 136, 146
distribution · 70, 71, 72, 104, 136, 143
dureté · 27, 57, 136, 143

E

épaisseur · 11, 27, 33, 47, 53, 57, 61, 67, 75, 83, 87, 101, 117, 123, 136, 144, 145, 146
équivalent en eau · 41, 53, 128, 136, 146

F

faces planes · 13, 21, 127, 128, 130, 136, 137, 142
facettage · 123, 128, 129, 130, 136, 142
feutrage · 7, 11, 17, 129
fissure · 117, 119, 130
force de traction · 21, 129, 136, 146
frittage · 7, 11, 17, 21, 123, 127, 129, 132, 136, 145

G

germe · 136, 143
givre de surface · 6, 9, 21, 129, 130, 137, 146
gobelets · 13, 21, 127, 128, 129, 130, 142
grains à faces planes · 13, 128, 130, 136, 137, 142
grains anguleux · 13, 123, 128, 129, 130, 137, 142
grains fins · 11, 13, 127, 137, 144
grains ronds · 13, 18, 21, 57, 130, 131, 137, 144, 145
grésil · 131, 137, 138, 143

gueule de baleine · 117, 119, 125, 130, 137, 143

H

hauteur · 27, 41, 47, 53, 61, 67, 75, 83, 87, 101, 125, 137, 142, 143, 144, 145, 148

I

isotherme · 130, 137, 143

M

manteau neigeux · 1, 2, 5, 9, 11, 17, 19, 21, 23, 27, 29, 33, 45, 47, 57, 61, 69, 77, 83, 85, 87, 89, 102, 117, 119, 121, 123, 125, 127, 129, 130, 131, 135, 138, 145, 149
métamorphisme · 10, 11, 12, 13, 114, 123, 128, 130, 131, 138, 142, 144, 152
métamorphisme de neige humide · 12, 13, 131, 138, 144
métamorphisme de neige sèche · 10, 11, 123, 130, 131, 138, 142

N

neige · ii, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 31, 33, 41, 42, 45, 49, 53, 55, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 75, 77, 81, 83, 85, 87, 89, 90, 91, 92, 94, 101, 106, 107, 110, 117, 119, 121, 123, 125, 126, 127, 128, 129, 130,131, 132, 133, 134, 136, 137, 138, 139, 142, 143, 144, 145, 146, 148, 150, 151, 152, 153, 156, 157
neige damée · 131, 138, 143
neige mouillée · 55, 75, 123, 131, 133, 134, 138, 144, 145
neige pourrie · 131, 138, 144, 145
neige roulée · 6, 9, 127, 131, 137, 138, 143
nivologie · 1, 6, 26, 27, 29, 42, 93, 129, 131, 138, 139, 140, 145, 151

P

plaque · 13, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 117, 121, 126, 127, 129, 131, 132, 139, 144, 146, 147, 154
plaque à vent · 132, 139, 146
pont de glace · 11, 132, 139, 143
précipitations · 27, 33, 47, 53, 61, 75, 83, 85, 87, 94, 101, 106, 127, 139, 145

R

reptation · 10, 114, 117, 119, 125, 128, 132, 142, 143
risque d'avalanche · 1, 2, 3, 15, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 37, 41, 42, 45, 47, 97, 99, 107, 134, 136, 138, 141, 150, 151, 154, 156
rupture · 17, 20, 21, 40, 59, 69, 81, 85, 102, 103, 104, 105, 126, 127, 128, 129, 131, 135, 139, 141, 146

S

saltation · 10, 11, 128, 132, 139, 142
souffle de l'avalanche · 17, 132, 140, 141
statistiques · 40, 41, 61, 73, 95, 102, 105, 140, 146

T

température · 4, 5, 7, 9, 11, 13, 27, 53, 61, 75, 77, 83, 87, 89, 111, 121, 123, 129, 130, 131, 140
teneur en eau liquide · 13, 18, 106, 131, 132, 140, 143
traction · 21, 22, 129, 136, 139, 146

V

vent d'avalanche · 17, 132, 140, 141

Z

zone · 1, 2, 21, 25, 37, 39, 40, 41, 42, 49, 50, 51, 72, 73, 100, 111, 113, 117, 123, 126, 129, 132, 133, 140, 145, 148, 149

Mots clés : avalanche, changement climatique, couloir, manteau neigeux, neige, nivologie, risque d'avalanche

La prévision du risque d'avalanche est fondée sur la nivologie, une science relativement récente étroitement liée à la géographie, la météorologie et la topologie. Le changement climatique a aujourd'hui pour conséquence un bouleversement du nombre et de la dynamique des avalanches. Les chercheurs travaillent à l'identification de tendances relatives au phénomène avalancheux afin d'adapter les mesures de prévision et de prévention à ces évolutions.

Le présent mémoire de traduction débute avec un exposé dans lequel sont expliqués la formation et le métamorphisme de la neige ainsi que le phénomène avalancheux et sa prévision. Il est suivi de la traduction d'un article scientifique intitulé '*'Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, B.C., Canada*'', d'une partie « Stratégie de traduction » qui retrace la méthode suivie ainsi que la résolution des problèmes de traduction rencontrés, et enfin d'une partie terminologie constituée de cinq fiches terminologiques, d'un glossaire et d'un lexique.