

EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE RISQUE D'AVALANCHE EN MONTAGNE

COMMUNE DU GRAND BORNAND



Sommets de la Pointe Percée, du Mont Charvet et l'Ambrevetta (de gauche à droite)

Thierry ARNOU – Directeur avalexpert

Expert Neige et Avalanche

INTRODUCTION

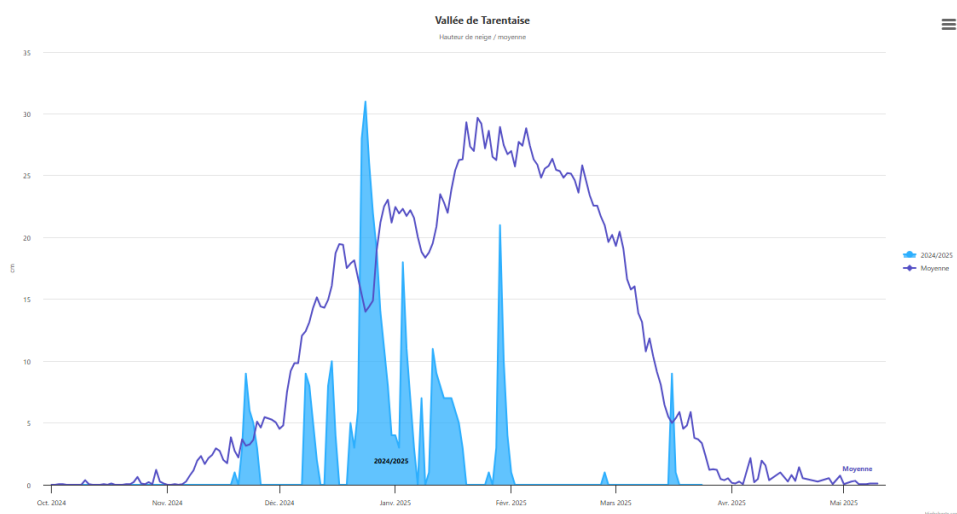
Le changement climatique sur les Alpes se mesure depuis plusieurs décennies avec l'augmentation de la température (+2 degrés depuis 1880 : Auer et al.2007) et s'observe avec un recul des glaciers pour les hauts massifs français.

Pour les précipitations, les mesures ne montrent aucune évolution mais plutôt des cycles et les projections des modèles climatiques à moyen terme ne permettent pas de dégager un scénario fiable. Les différents scénarios proposés sont même parfois contradictoires entre une augmentation des précipitations annuelles et une baisse pour d'autres modèles. Toutefois, il se dégage une légère tendance à l'augmentation des précipitations hivernales pour tous les modèles.

La neige est le résultat d'une précipitation et d'une température associée pendant les chutes. Si l'on combine l'évolution de ces deux paramètres, la tendance générale est plutôt une augmentation des chutes de neige à haute altitude et une baisse des chutes de neige à basse altitude. La limite entre haute altitude et basse altitude se situe vers 1800 mètres actuellement mais cette limite fluctue avec l'augmentation de la température et aussi d'un massif montagneux à un autre.

L'activité avalancheuse est la résultante de plusieurs paramètres météorologiques (température, vent...) et nivologique (quantité de neige mobilisable, nature de la neige, soit humide ou froide). Selon les cas, on parlera d'avalanche de neige poudreuse avec aérosol ou avalanche de neige humide, voir au terrain avec les plaques de fond. L'activité avalancheuse se décrit de plusieurs façons, nature de l'écoulement, altitude d'arrêt, volume, occurrence. Les cycles avalancheux ne concernent que quelques jours dans une saison, rendant parfois délicat une analyse des statistiques.

Dans cette étude, nous allons détailler les impacts du réchauffement climatique à travers les résultats de recherche sur les mesures de neige à l'horizon 2050 et plus, les configurations de type de neige (humide ou poudreuse) selon l'altitude et les conséquences en terme d'activité avalancheuse à l'échelle de grands massifs. Pour descendre à une échelle plus petite (commune...), nous verrons comment on peut rentrer dans quelques détails à l'aide de la topographie.



**Hauteur de neige à 1200m – Vallée de Tarentaise (SAVOIE) en versant SUD
saison 2024-2025 (en bleu) /moyenne (trait) un hiver normal en 2050 ?**

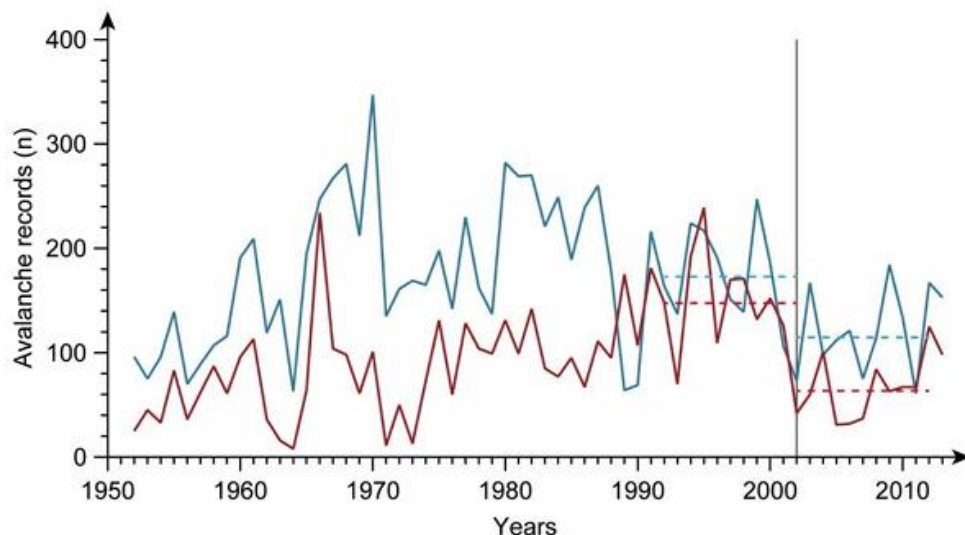
1- L'EPA – enquête permanente des avalanches

L'activité avalancheuse est observée depuis plusieurs décennies par l'ONF dans ce que l'on appelle, enquête permanente des avalanches (EPA).

Des études (Eckert et al, 2010) sur ces observations ont permis de dégager quelques grandes orientations et de démontrer une corrélation entre activité avalancheuse et disponibilité en neige (ce qui est bien sûr évident).

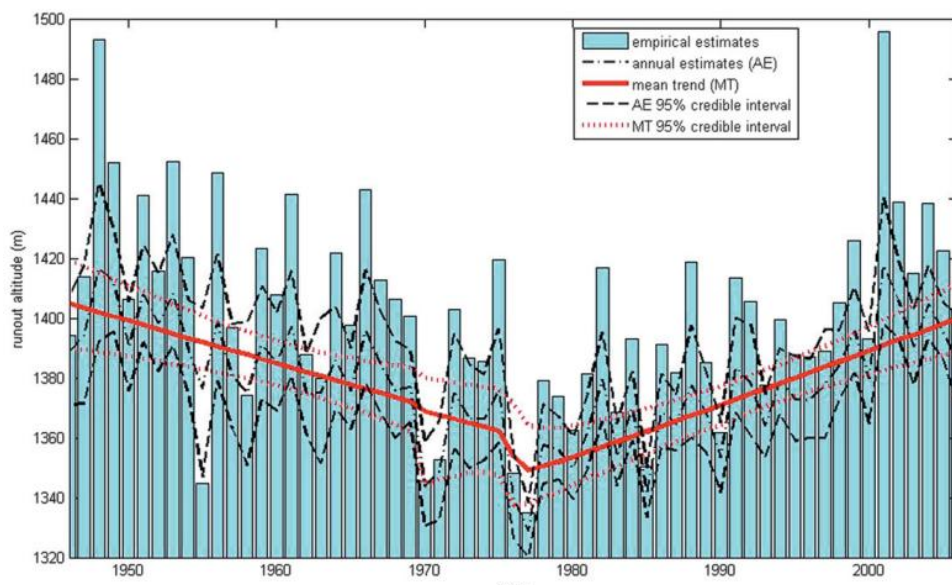
L'ensemble de ces données forme un ensemble statistique homogène qui fournit des indications intéressantes sur l'évolution de l'activité avalancheuse. L'étude de ces données (Eckert et al, 2010) a montré par exemple :

- Une activité maximale observée vers 1980 avant une décroissance jusqu'à nos jours.
- Une altitude d'arrêt des avalanches en augmentation depuis 1980
- Une proportion des écoulements avec aérosol en diminution depuis 1980.
- Une augmentation de la proportion d'avalanches de neige humide depuis 1980
-



En bleu – nombre d'avalanches de neige sèche. En rouge- nombre d'avalanche de neige humide entre 1952 et 2010 (Eckert et al 2010).

Analyse : Sur ce graphique, la courbe rouge (avalanche humide) et la courbe bleue (avalanche poudreuse) ne se croisent jamais avant les hivers 1985 puis ils se recoupent ou se rapprochent plus régulièrement après 1990.



*Variations annuelles de l'altitude moyenne des zones d'arrêt des avalanches
(Eckert et al 2010)*

Analyse : l'altitude moyenne d'arrêt des avalanches a baissé régulièrement jusque dans les années 1978 pour repartir à la hausse jusqu'à nos jours.

Les données d'observations de l'ONF sur l'ensemble des massifs alpins montrent une évolution à partir des années 1978-1980 avec une hausse de la proportion d'avalanche de neige humide et une montée en altitude des zones d'arrêt des avalanches.

Pour comprendre ce phénomène, il faut partir de la physique qui explique les écoulements d'avalanches et en lien avec la température. C'est ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.

2- L'activité avalancheuse

L'activité avalancheuse résulte de plusieurs conditions météorologiques et nivologiques. Pour que se produise un départ d'avalanche, il faut ces 3 conditions :

- Un manteau neigeux au sol suffisamment épais pour un écoulement continu.
- Une quantité ou épaisseur de neige mobilisable suffisante pour créer un volume puis un écoulement si les conditions nivologiques deviennent défavorables.
- La qualité de l'écoulement dépendra de la nature de la neige. En neige humide, on parlera d'avalanches de neige humide et en neige sèche, on parlera d'avalanche de poudreuse avec aérosol.

Notion de nivologie

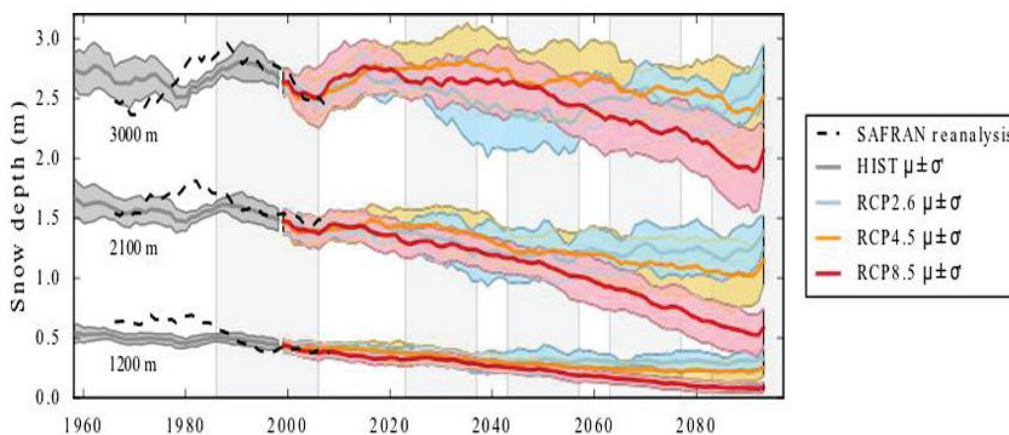
Une avalanche de poudreuse descend dans la pente avec une vitesse rapide et composée d'un aérosol de neige. Son « carburant » est la neige poudreuse si bien qu'elle s'arrête lorsqu'il n'y a plus de neige poudreuse. La quantité de neige poudreuse va impacter la vitesse et la puissance de l'aérosol. Sa trajectoire est parfois difficile à prévoir et sort des limites envisagées.

Une avalanche de neige humide descend dans la pente avec une vitesse lente. Elle reste canalisée dans les couloirs envisagés. Le dépôt dépend de l'épaisseur de neige humide et la quantité de neige totale.

Le manteau neigeux au sol est directement impacté par l'élévation de la température observée depuis plusieurs décennies. L'augmentation envisagée est de 0.3 degrés par décennie, tendance à laquelle il faut rajouter +1 à +4 degrés selon les scénarios d'émissions de CO₂.

La baisse de l'enneigement hivernal dépend de l'altitude. Ainsi, les simulations d'enneigement à 1200m, 2100m et 3000m montrent une baisse drastique de l'enneigement pour les altitudes sous 2000 mètres en 2050.

L'enneigement à 3000 mètres ne baisse que faiblement car compensée par une tendance à la hausse des précipitations hivernales.



Epaisseur moyenne à 1200m, 2100m et 3000m avec les différents scénarios d'émissions de CO₂ (Gobiet et al, 2018).

Analyse : la baisse de l'enneigement au sol est proche de 30 à 50% en 2050 à 1200m mais seulement de 5 à 10% à 3000 mètres. En 2100, cette baisse peut atteindre 85% à 1200m selon la trajectoire la plus pessimiste.

Il faut bien sûr tenir compte aussi de l'exposition. Les derniers hivers laissent apparaître un déficit important de l'enneigement au sol, y compris en versant N.

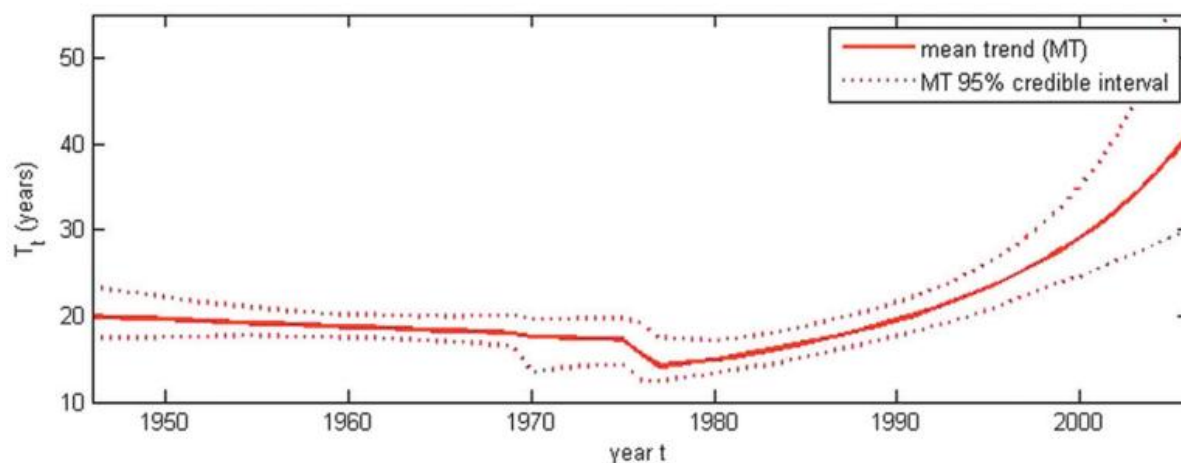
Evolution de l'enneigement en % par rapport au moyenne des 30 dernières années

	Versant Nord	Versant Sud
1200 mètres	-60%	-90%
1600-1800 mètres	-20%	-45%
2000-2100 mètres	-15%	
2300 mètres	0	0

Analyse : Les scénarios climatiques et les mesures actuelles montrent une baisse très importante de l'enneigement en versant N à basse altitude et une couverture neigeuse qui tend à disparaître en versant SUD à 1200 mètres. Ce sont notamment sur le début d'hiver (avant le 15 décembre) et au printemps (à partir du 1 mars) que les absences de neige sont les plus visibles. Le pic d'épaisseur du manteau neigeux reste positionné fin février mais il diminue en hauteur jusqu'à 2300 mètres. En dessous de 1600-1800m, ce pic d'enneigement chute plus fortement qu'au dessus.

Vu la physique des écoulements d'avalanche expliquée auparavant, l'activité avalancheuse découle directement de l'enneigement au sol pour les avalanches.

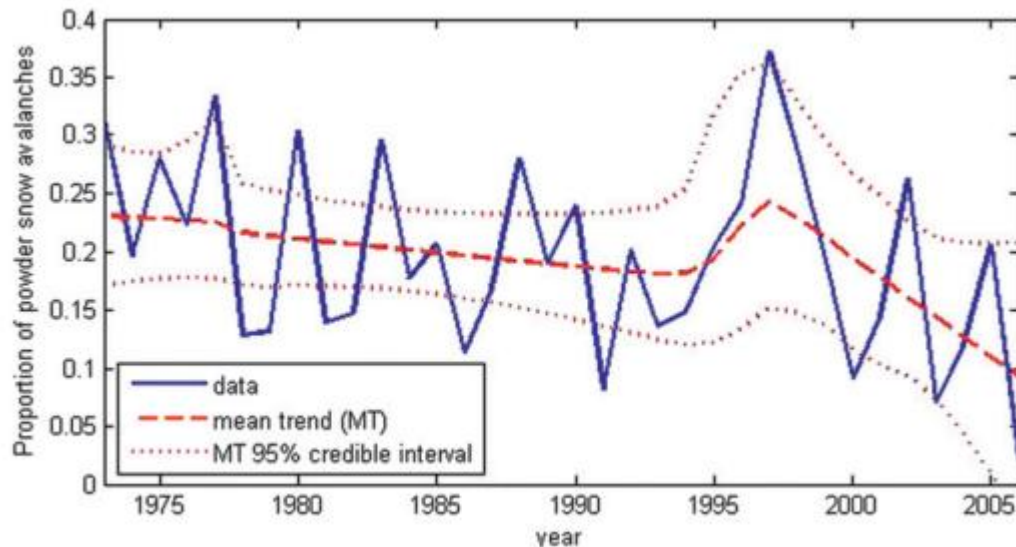
Celle-ci va donc décroître de façon très significative dans les fonds de vallées situés sous 1200 mètres.



Probabilité annuelle d'atteinte du fond de vallée par les avalanches, associée à l'occurrence ou période de retour (Eckert et al 2010).

Analyse : après une période de probabilité assez forte vers 1980 (10 ou 15 ans), la probabilité d'occurrence tend à diminuer et dépasser les 40-50 ans pour les fonds de vallée sous 1200m. Cette courbe augmente de façon exponentielle, ce qui laisse envisager des périodes centennales ou tri-centennales à l'horizon 2050.

Dans un graphique précédent, nous avons vu que la proportion d'écoulements de neige humide augmentait et recouvrait la proportion des écoulements en neige sèche. Dans cette même étude, la proportion d'écoulement en aérosol, tend à diminuer depuis les années 1975 avec toutefois une petite hausse en 1999. Depuis 20 ans, la baisse s'accroît.



Evolution des proportions des écoulements en neige poudreuse avec aérosol (Eckert et al 2010)

Cette diminution des avalanches de poudreuse avec aérosol est directement liée à l'élévation de la température qui provoque d'une part une perte du manteau neigeux à basse altitude et une moindre épaisseur de neige dans les altitudes inférieures à 2300 mètres.

Comme on l'a vu dans la physique des écoulements avec aérosol, la poudreuse est le « carburant » nécessaire à l'écoulement, l'élévation de la température conduit à une hausse de l'humidification des couches de neige mobilisable. Celle-ci est d'autant plus marquée en-dessous de 1600-1800 mètres à l'échelle des Alpes.

Avec l'augmentation des précipitations hivernales au-dessus de 2300-2400 mètres et le quasi maintien d'un enneigement jusqu'en 2050, il ne faut pas sous-estimer par contre le cas des avalanches mixtes, départ en poudreuse avec aérosol et en neige humide sur le bas. Ce cas pourrait devenir plus fréquent.

En conséquence, les fonds de vallée sous 1200 mètres ne seraient quasiment plus atteints par l'aérosol. Dans les zones bien identifiées, le dépôt resterait bien canalisé mais pourrait être plus important.

Pour ce qui est des avalanches de poudreuse, une zone d'arrêt de l'aérosol, identifiée vers 1600-1800 mètres, devrait se produire plus souvent dans les prochains hivers, compte tenu de l'élévation de la température.

3 – Commune du Grand Bornand (74)

Maintenant que nous connaissons les grandes lignes générales à l'échelle des massifs des Alpes, nous allons étudier les conséquences du changement climatique sur la commune du Grand Bornand à l'aide de la topographie.

La commune se trouve dans le massif des Aravis. Ce massif situé dans les Alpes du Nord subit bien sûr les effets du changement climatique comme tous les autres massifs de France et les observations du Grand Bornand font parties de nombreuses données analysées.

A- L'enneigement

L'enneigement diminue également comme partout et avec les mêmes pourcentages. Même si c'est très difficile de prévoir l'enneigement futur, commune par commune, le changement climatique étant global, il semble difficile pour la commune du Grand Bornand d'échapper à cette tendance globale.

Pour le massif des ARAVIS, la seule différence peut venir de cette limite que l'on détermine entre haute altitude et basse altitude pour les évolutions climatiques. Celle-ci moyennée à 1600-1800m sur les Alpes, est proche de 1400-1600m dans les ARAVIS.

Les caractéristiques de l'enneigement au Grand Bornand devraient donc connaître les mêmes évolutions, marquées par :

- Une baisse très importante de l'enneigement sous 1400-1600 mètres et notamment en versant SUD
- Une quantité de neige poudreuse mobilisable en baisse sous 1400-1600m et une quasi disparition en versant SUD.
- Une augmentation des chutes de neige au-dessus de 2300 mètres.

B- L'activité avalancheuse

La prévision de l'activité avalancheuse est trop complexe pour que des scénarios de projections climatiques puissent s'appliquer à l'échelle locale d'une commune ou d'un hameau.

Pour les phénomènes extrêmes, il n'existe aucune projection fiable (étude SLF).

Pour la dynamique statistique des avalanches et les caractéristiques des écoulements, on peut juste évaluer la situation de la commune du Grand Bornand au regard de l'altitude moyenne de ses sommets.

C'est donc plutôt la topographie de la commune qui permet de faire une projection plus précise en particulier. La commune du Grand Bornand dispose de sommets qui culminent à 2500-2700 mètres et les fonds de vallées sont proches de 1000 mètres. Les résultats des projections globales ne seront pas les mêmes pour Chamonix où les sommets culminent à plus de 4000 mètres ou sur Val d'Isère avec un fond de vallée se situe à 1800 mètres

Les études d'évolution de l'activité avalancheuse en général (Castebrunet et al, 2012) montrent quand même une baisse de 20 à 30% pour le 21^{ème} siècle en hiver et encore plus importante au printemps et à basse altitude. L'activité avalancheuse n'augmenterait qu'à haute altitude, essentiellement en neige humide.

Pour la commune du Grand Bornand avec un fond de vallée à 1000 mètres et des sommets proches de 2500-2700 mètres, les projections des scénarios climatiques à l'horizon 2050-2100 seraient en conséquence d'activité avalancheuse :

- Une baisse de la proportion des avalanches de poudreuse avec aérosol de 20-30%
- Une distance d'arrêt qui tend à monter en altitude vers 1400-1600 mètres en versant N.
- Une absence d'écoulement de neige poudreuse avec aérosol en versant S à 1200 mètres.
- Une diminution de l'épaisseur de neige mobilisable, que ce soit en neige poudreuse ou en neige humide, notamment sous 1400-1600m en versant Nord et une quasi disparition en versant SUD à 1200m.

C- Urbanisme et Zonage

Votre question porte sur un hameau précis, les Troncs, situé à 1200 mètres dans un versant S et potentiellement touché par une avalanche de poudreuse qui part du Mont Charvet à 2538 mètres, avalanche dite de « la Tollarde ». Cette avalanche est plutôt orientée N et numérotée N°38 sur la CLPA.

Le zonage actuel (rouge, bleu, blanc et jaune hachuré) est fixé avec l'historique des avalanches (EPA...), les témoignages, la CLPA du secteur ainsi que la photo interprétation de la topographie. Il est clair que ce zonage risque d'évoluer dans les prochaines décennies avec la raréfaction de l'enneigement d'une part à basse altitude en versant S, la diminution progressive des avalanches de poudreuse et la tendance à l'élévation des distances d'arrêt à 1400 mètres.

Dans ce hameau des Troncs plus particulièrement, le zonage jaune hachuré qui indique l'emprise d'une avalanche par conditions exceptionnelles, donc au-delà du centennale, pourrait ne plus être valable pour le fond de vallée et à 1200 mètres en versant S, lorsque les sommets environnants se trouvent à des altitudes moyennes comme le Mont Charvet à 2500 mètres.

Le hameau des Troncs ne serait plus trop touché vu le changement climatique par des écoulements d'avalanches, soit par le manque de neige au sol ou bien par l'absence d'une certaine quantité suffisante de neige poudreuse et mobilisable pour un écoulement. Le fond de vallée en versants N serait également moins touché dans les prochaines décennies sous 1400 mètres avec plus de neige humide.

Les années de construction de ces chalets situés dans la zone jaune hachurée se situent en 1775 soit il y a 250 ans. Durant la période de hausse de l'activité avalancheuse en neige poudreuse observée avant 1980, si le chalet n'a pas été touché, c'est un argument supplémentaire pour évaluer à la baisse son exposition au risque d'avalanche pour les prochaines décennies. Pour la commune du Grand Bornand, les hivers 1978 ou 1981 constituent les références et 1999 plus récemment.

CONCLUSION

Dès lors qu'un chalet ancien datant de plus de 250 ans, placé en fond de vallée en versant S à 1200 mètres, n'a subi aucun dommage d'avalanches jusqu'à ce jour, les scénarios climatiques élaborés à l'échelle des Alpes laissent envisager une baisse du risque et de son exposition à une avalanche de poudreuse avec aérosol.

Cette conclusion peut s'appliquer à la commune du Grand Bornand compte tenu de sa topographie avec les fonds de vallée à 1000 mètres et les sommets environnants à 2500-2700m.

Dans le cas précis du hameau des Troncs et une maison construite en 1774 et située en versant S à 1200 mètres, si elle a échappé à une destruction lors des hivers 1978, 1981 et 1999, les scénarios climatiques et les conséquences en terme d'écoulement en neige poudreuse avec aérosol montrent une baisse importante du risque pour les prochaines décennies, voir une absence de risque.

Fait à AIME-LA-PLAGNE le 25 mars 2025

Bibliographie

Adrien Favillier, Nicolas Eckert, Jérôme Lopez-Saez, Markus Stoffel and Christophe Corona *EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON SNOW AVALANCHE ACTIVITY IN THE ALPS: INSIGHTS FROM A 456-YEAR TREE-RING DERIVED CHRONOLOGY IN THE QUEYRAS MASSIF (FRANCE)*, ISSW, 2023

Andreas Gobiet, Sven Kotlarski, Prisco Frei, Jan Rajczak, Deborah Verfaillie, Samuel Morin *CLIMATE CHANGE IN THE ALPS AND ITS CONSEQUENCES FOR SNOW*, ISSW 2018

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

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

Eckert N., Baya H., Deschâtres M. (2010) — *Assessing the response of snow avalanche runout altitudes to climate fluctuations using hierarchical modeling: application to 61 winters of data in France*. *Journal of Climate*. 23, 3157-3180

Eckert, N., Keylock, C. J., Castebrunet, H., Lavigne, A., and Naaim, M.: *Temporal trends in avalanche activity in the French Alps and subregions: From occurrences and runout altitudes to unsteady return periods*, *J. Glaciol.*, 59, 93-114, <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J091>, 2013