RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne

INRAE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, DE LA BIODIVERSITÉ, DE LA FORÊT, DE LA MER ET DE LA PÊCHE
Liberté
Égalité
Fraternité

Changement climatique et avalanches : Note de synthèse sur l'état des connaissances

Juin 2025

Historique de la diffusion

Version	Date	Commentaires
V1	30/06/2025	Version initiale

Rédacteur(s) et relecteurs

Rédacteurs du rapport	Relecteurs
Nicolas Eckert (INRAE) Florie Giacona (INRAE) Antoine Blanc (RTM 38)	Rémy Martin (Référent technique RTM national) Yann Quefféléan (Responsable technique national RTM, DRN-Pôle RTM)

Avant-propos

Ce travail a été financé par le ministère en charge de l'écologie, DGPR/SRN/SDAOH/BRNT (Direction Générale de la Prévention des Risques, Service des Risques Naturels, Sous-Direction des Aléas et des Ouvrages Hydrauliques, Bureau des Risques Naturels Terrestres), dans le cadre du programme de travail 2024.

Photo en couverture : Dépôts d'avalanche humide de grande ampleur lors de l'hiver 2017-18, (INRAE).

1. Cadre

Cette note de synthèse a été produite par l'INRAE et l'ONF-RTM dans le cadre du programme de travail 2024 financé par la DGPR. Elle synthétise les connaissances disponibles sur l'évolution de l'activité avalancheuse dans le contexte du changement climatique en cours. D'autres notes ont été produites pour d'autres phénomènes naturels en montagne générateurs de risque (crues torrentielles, phénomènes rocheux, glissements de terrain). **Une note générale présente le contexte dans lequel s'inscrit cette action ainsi que la méthodologie utilisée.**

2. L'activité avalancheuse et son lien avec les conditions nivo-météorologiques et le climat

Les avalanches sont des écoulements soudains de neige qui se déplacent rapidement le long des pentes sur des distances de quelques dizaines de mètres à plusieurs kilomètres. Bien que toutes les avalanches possèdent des caractéristiques communes (déclenchement sur des pentes en général supérieures à 30° par exemple), elles présentent en réalité une grande diversité, en fonction du type de déclenchement (spontané ou provoqué, par exemple par le passage d'un skieur ou une charge explosive), de la forme de la cassure (ponctuelle ou linéaire), du régime d'écoulement (dense, en aérosol, mixte) et/ou de la nature de la neige mobilisée (sèche ou humide).

L'activité avalancheuse est contrôlée par la topographie, l'état du manteau neigeux, l'occupation des sols (état de surface, notamment présence ou non de forêt, présence d'ouvrages de protection) et, pour ce qui est des déclenchements provoqués, par les pratiques sociales. L'état du manteau neigeux détermine de manière cruciale sa stabilité, la quantité de neige mobilisable (déclenchement et érosion/dépôt au cours de l'écoulement) de même que la distance et la vitesse de propagation. En particulier, pour générer de grandes avalanches (volume et/ou distance parcourue) il faut des volumes importants de neige mobilisable, en zone départ et, souvent, le long du couloir (phénomène d'érosion au cours de l'écoulement). Par conséquent, la variabilité temporelle de l'activité avalancheuse d'un jour sur l'autre **est principalement régie par les conditions nivo-météorologiques.** Par exemple, les précipitations (neige fraiche, épisodes de pluie sur neige) et le transport de neige par le vent jouent un rôle essentiel dans le déclenchement. De même, une activité avalancheuse intense, sous la forme de crues avalancheuses ou d'avalanches uniques de grande ampleur, est souvent liée à l'occurrence d'événements météorologiques composés, par exemple, la conjonction de fortes précipitations et de vents forts. La stratigraphie du manteau neigeux et sa variabilité temporelle contribuent également, notamment du fait du rôle crucial joué par les couches fragiles dans le déclenchement.

Ce contrôle direct de l'activité avalancheuse (intensité, fréquence, typologie, etc.) à des échelles de temps courtes par les conditions nivo-météorologiques rend intuitif **une réponse marquée de l'activité avalancheuse aux évolutions du climat** à des échelles temporelles plus longues. La question reste toutefois complexe, compte tenu des différents types d'avalanches et de la multiplicité des variables potentiellement affectées (nombre d'événements, distances parcourues, etc.). En outre, certains paramètres de contrôle peuvent, selon les conditions, accroître ou diminuer la stabilité du manteau neigeux. Ainsi, des températures plus élevées peuvent signifier moins de neige, donc moins d'avalanches, mais également, à manteau neigeux constant, plus d'instabilité.

La suite de cette note synthétise les connaissances actuelles concernant la réponse de l'activité avalancheuse aux évolutions du climat, en analysant successivement les données et méthodes disponibles et les principaux faits avérés. Le travail se base sur une revue publiée en 2024 et compilant 180 articles et actes de conférences[1], complétée par quelques résultats plus récents.

[1]Eckert, N., Corona, C., Giacona, F., Gaume, J., Mayer, S., van Herwijnen, A., ... & Stoffel, M. (2024). Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. Nature Reviews Earth & Environment, 5(5), 369-389.

3. Données et approches existantes pour mettre en évidence l'évolution de l'activité avalancheuse

Les données relatives à l'activité avalancheuse passée sont nombreuses et diversifiées (Figure 1) mais elles présentent toutes des limites. Par exemple, les données issues d'images satellite ne couvrent que quelques années. L'analyse de l'activité avalancheuse par cet outil reste donc limitée à une période très récente.

Les inventaires systématiques d'événements avalancheux (comme l'Enquête Permanente sur les Avalanches en France) collectés en temps quasi réel, souvent par de l'observation visuelle humaine, fournissent des informations sur la date et le lieu de déclenchement, ainsi que sur le type d'écoulement et le volume de dépôt. Cependant, de tels inventaires ne sont pas toujours complètement représentatifs de l'activité globale d'une région[2]. En outre les protocoles d'observation peuvent être imprécis et la qualité des enregistrements variée, ce qui nécessite un prétraitement rigoureux des données avant leur analyse. Enfin, les rapports d'accidents d'avalanche ne fournissent généralement des informations détaillées que sur les avalanches déclenchées accidentellement et leur évolution n'a souvent qu'un lien lointain avec celle du climat.

Des chronologies d'avalanches peuvent être reconstituées rétroactivement à partir d'archives historiques, sur des durées couvrant plusieurs siècles. Cependant, les sources historiques mentionnent principalement sur les avalanches de grande taille et/ou ayant fait des dommages (notion d'événement dont on a pu retrouver la trace, car il a été remarqué et a été préservé). De plus, les évolutions documentées reflètent souvent des variations de vulnérabilité ou d'exposition plutôt que d'activité naturelle (notamment l'exposition liée aux pratiques récréatives de la montagne).

Les données issues d'observations indirectes, telles que celles issues de l'étude des cernes des arbres ou des sédiments lacustres, offrent une autre méthode pour retracer l'histoire des avalanches. Toutefois, ces techniques sont souvent limitées à quelques couloirs et peuvent être biaisées par divers facteurs environnementaux.

Enfin, des diagnostics de stabilité du manteau neigeux peuvent être utilisés comme substituts à l'activité naturelle. Ceux-ci sont obtenus via une cascade de modèle allant du climat au diagnostic de stabilité local. Bien qu'utiles pour évaluer les changements passés et futurs (pour lesquels elles constituent les seules sources d'information existantes à l'heure actuelle), ces données ne sont disponibles que pour certaines régions, ne couvrent que le passé récent et seulement quelques scénarios climatiques futurs. Elles restent en outre tributaires d'un ensemble d'hypothèses de modélisation entachées de nombreuses incertitudes (processus physiques, méthodes de désagrégation, etc.).
Pour estimer l'évolution de l'activité avalancheuse à partir de ces données, des analyses statistiques sont utilisées pour identifier des tendances ou des points de rupture, puis pour établir des liens avec les évolutions climatiques. Des modèles de manteau neigeux et de propagation d'avalanche permettent d'aller plus loin pour comprendre les modifications de certaines variables caractéristiques des écoulements des avalanches telles que la vitesse et la pression.

La relation causale au changement climatique est toutefois difficile à identifier pour un ensemble de raisons liées à la qualité et quantité des données disponibles et aux limites des méthodes statistiques existantes. En particulier, l'utilisation de sources historiques et de données indirectes de type cernes d'arbres nécessite un travail rigoureux de contextualisation et la mise en œuvre de techniques de correction de biais. Enfin il est à noter que l'activité

[2] En France, dans les Alpes et les Pyrénées, la densité des sites dont l'activité est suivie dans l'Enquête Permanente sur les Avalanches est importante. Bien que ces sites ne soient sans doute pas tout à fait représentatifs de l'activité totale (sous-enregistrements dans les couloirs de très haute altitude notamment), ils offrent une couverture suffisante pour appréhender la réponse de l'activité avalancheuse aux évolutions du climat.

avalancheuse peut être influencée indirectement par le changement climatique du fait de la remontée de la limite forestière et du recul des glaciers qui modifient l'état de surface par exemple. Ainsi une analyse systémique de l'ensemble des facteurs en jeu est généralement requise pour identifier les évolutions et en déterminer les causes, climatiques ou non.

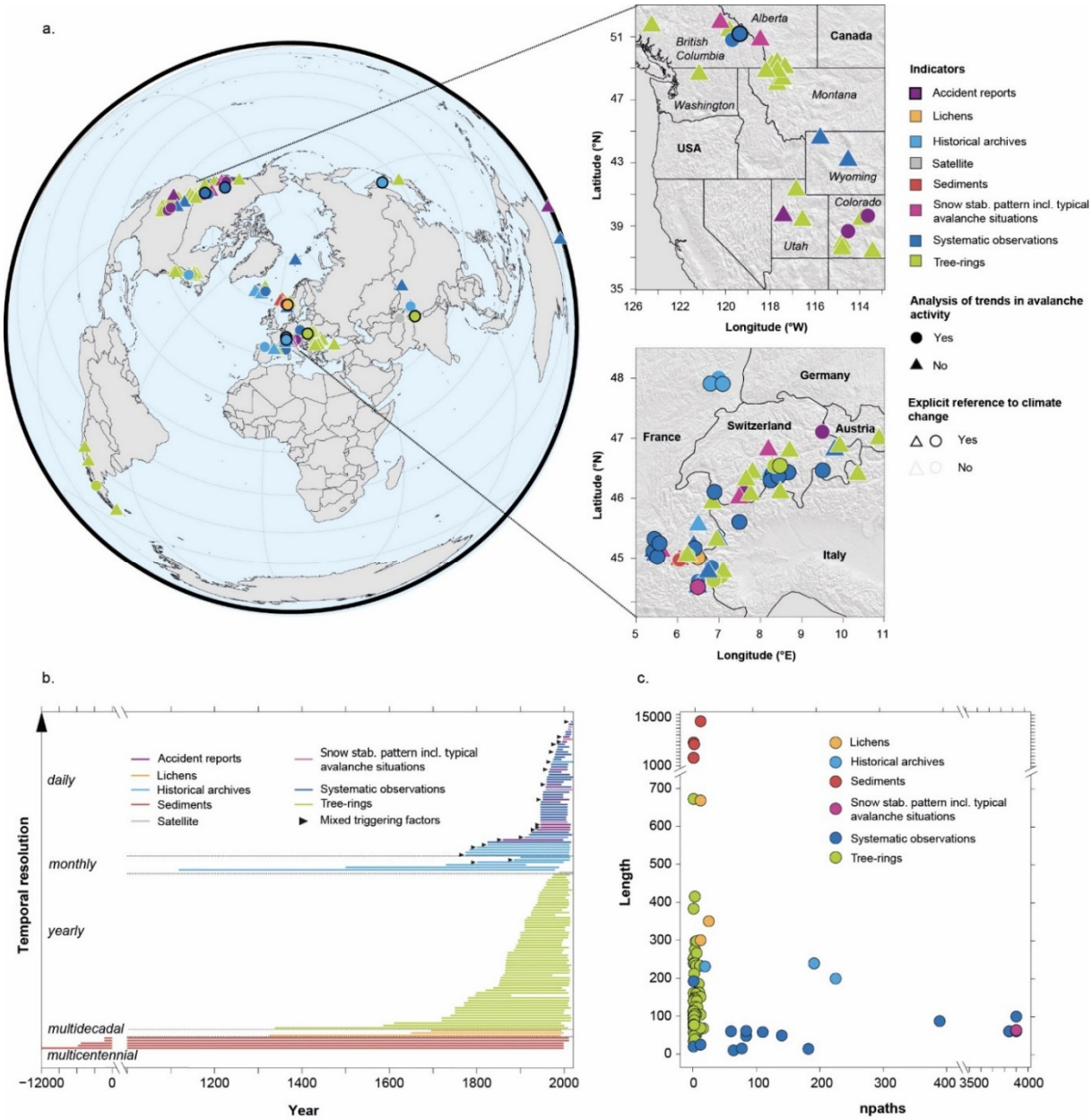

Figure 1 : Données existantes relatives à l'activité avalancheuse passée[3]: a) localisation des séries dont l'évolution a été (cercles) ou pas (triangles) analysée. Un contour sombre indique que l'impact du changement climatique a été spécifiquement étudié ; b) périodes, résolution et type de données ; c) nombre de couloirs d'avalanche.

4. Evolution passée et future de l'activité avalancheuse

En termes quantitatifs, les études relatives à l'évolution de l'activité avalancheuse avec le climat **sont relativement plus nombreuses que pour d'autres phénomènes générateurs de risque en montagne** (Figure 1). Néanmoins, le panorama reste incomplet car la plupart des études se concentrent sur l'activité avalancheuse spontanée, et certaines régions du monde sont bien mieux couvertes que d'autres. En outre, la variable « occurrence » a été bien

[3]Eckert, N., Corona, C., Giacona, F., Gaume, J., Mayer, S., van Herwijnen, A., ... & Stoffel, M. (2024). Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. Nature Reviews Earth & Environment, 5(5), 369-389.

plus étudiée que les variables d'intensité, et les projections futures restent encore peu nombreuses, de même que, pour le passé, des profondeurs temporelles supérieures à quelques décennies.

Dans le détail, l'analyse des données issues de séries temporelles multi décennales et centennales montre, notamment pour les basses altitudes, une diminution de la fréquence des avalanches dans diverses régions du monde. **Par exemple, dans les Alpes françaises, le nombre moyen d'avalanches par hiver a baissé de 19 % entre 1980 et 2009**. Dans les massifs de basse altitude comme le Massif vosgien, la réduction a été exacerbée. Ces baisses sont liées à l'augmentation des températures hivernales, qui, de fait, implique une réduction du couvert neigeux (extension, épaisseur, durée) via un « double effet » : modification de la phase des précipitation et fonte plus précoce qui réduisent la fréquence des avalanches et la durée de la saison durant laquelle elles se produisent. Cependant, certains résultats indiquent que, dans le même temps, il y a eu une augmentation de l'activité avalancheuse à des altitudes ou des latitudes élevées, du fait de précipitations accrues sous forme de neige, notamment en termes de valeurs rares à extrêmes. Par exemple, dans les Alpes françaises, il a été constaté une nette diminution de l'activité avalancheuse dans les zones de départ en-dessous de 2000 m d'altitude mais une augmentation de cette activité dans les zones au-dessus de cette altitude, et des nombres d'avalanche en augmentation ont pu être documentés également à partir des cernes d'arbres en Himalaya au-dessus de 4000 m.

Les données montrent également que la taille des avalanches (distance d'écoulement ou altitude la plus basse de la zone de dépôt) a sensiblement diminué au cours des dernières décennies.

Par exemple, dans les Alpes françaises, l'altitude moyenne d'arrêt des écoulements s'est élevée de 55 m entre 1980 et 2005. Cette tendance est encore plus prononcée pour les avalanches de grande taille (période de retour égale ou supérieure à 10 ans), un résultat mis en évidence sur la période 1946-2009. Ces diminutions sont, elles-aussi, corrélées avec l'évolution des températures hivernales moyennes et de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux.

Les avalanches humides sont devenues plus fréquentes, notamment à basse altitude, en raison du réchauffement climatique et de la fonte plus précoce de la neige. Par exemple, dans la vallée de Chamonix, la proportion d'avalanche humides est passée de 5% dans les années 1970 à 20% en 2009. Des études montrent des augmentations similaires dans d'autres régions alpines ainsi qu'un début d'activité humide plus tôt dans la saison. En corolaire, **la proportion d'avalanches avec une phase en aérosol a été divisée par deux entre 1973 et 2009 dans les Alpes françaises**. En ce qui concerne les écoulements très humides s'apparentant aux slushs, mieux connus en Norvège et au Canada dans le contexte de climats maritimes, des évidences statistiques font encore défaut mais des observations de terrain semblent indiquer une recrudescence, notamment liée aux épisodes de pluie sur neige intenses au cœur de l'hiver. Pour ce qui concerne les avalanches de glissements (gueules de baleine), aucun résultat spécifique concernant leur évolution n'est pour l'instant disponible.

Les projections existantes pour le futur (Alpes françaises et suisses, Norvège, Japon, montagnes rocheuses aux USA) sont concordantes avec les évolutions déjà observées. Elles suggèrent **qu'il y aura à l'avenir une poursuite de l'augmentation de la fréquence des avalanches humides par rapport à celle des avalanches de neige sèche.** De la même manière, le début de l'activité avalancheuse humide continuera à avancer dans la saison. Globalement, la diminution de l'activité se poursuivra et elle sera exacerbée au printemps. Ainsi, **l'activité avalancheuse naturelle devrait diminuer de 20% environ vers 2050 et de 30% environ vers 2100 à l'échelle de l'ensemble des Alpes françaises par rapport à 1990**. Seules les altitudes très élevées, au-delà de 3000m, devraient connaitre une activité plus importante à cet horizon, notamment au cœur de l'hiver, sans doute principalement du fait de l'augmentation des chutes de neige extrêmes du fait de l'augmentation des précipitations

extrêmes à des altitudes où la phase solide restera encore relativement préservée. Ces résultats, obtenus à partir de scenarii anciens d'évolution du climat (AR4, avec des hypothèses de réchauffement considérés à l'époque comme moyens à forts mais qui correspondent à des niveaux de réchauffement qui seront selon toute vraisemblance dépassés) sont en cours de mise à jour et restent bien sûr tributaires des choix socioéconomiques qui seront faits au cours des années à venir.

En parallèle **les extensions des avalanches devraient continuer à, en moyenne, diminuer dans les fonds de vallée, notamment pour les couloirs dont les zones de départ sont situées à des altitudes peu à moyennement élevées**. Si la fréquence des avalanches de grande ampleur de neige sèche et froide va indubitablement continuer à diminuer, il est néanmoins à souligner **qu'elles resteront possibles, en particulier dans les couloirs ou les zones de départ sont très élevées**. En outre, même si les avalanches de neige humide ont en moyenne tendance à être plus lentes et de taille plus réduite que les avalanches de neige sèche elles peuvent i) générer des pressions d'impact très importantes, ii) présenter occasionnellement des distances d'écoulement très longues dans le cas d'écoulements très humides impliquant de l'eau liquide en grande quantité, voire de la boue et d'autres matériaux (écoulements s'apparentant aux phénomènes de slushs). **L'augmentation du nombre de telles avalanches humides potentiellement dommageables n'est pas démontrée statistiquement mais l'occurrence possible de tels événements doit être envisagée, notamment pour des couloirs et/ou à des saisons où ils ne se produisaient pas par le passé sous des climats plus froids**.

5. Synthèse, implications et perspectives

Il reste difficile d'évaluer de manière précise l'impact du changement climatique sur l'activité avalancheuse. Pour le passé, si différents types de données existent pour mettre en évidence une tendance et l'attribuer (ou pas) à une cause climatique, les séries longues restent peu nombreuses et des évolutions significatives peuvent être liées à des facteurs non climatiques (évolution de l'occupation des sols, voire de la source de données elle-même) qu'il est difficile de déconvoluer. En ce qui concerne le futur, les principales sources d'incertitude concernent les scenarii d'émission des gaz à effet de serre mais aussi la cascade de modèles nécessaire pour passer du réchauffement global à l'impact local (modèle de circulation général, modèle de circulation régional, désagrégation statistique, relation entre conditions météorologique et déclenchement, etc.).

Néanmoins, les données et résultats disponibles sont déjà suffisants pour être combinés dans un modèle conceptuel unique résumant comment le réchauffement en cours (et qui s'accélère) modifie la fréquence, l'ampleur, la typologie et la saisonnalité des avalanches, de même que les zones préférentielles d'occurrence (Figure 2) :

- Il existe aujourd'hui des preuves **d'une réduction progressive du nombre total d'avalanches, de leur taille et du nombre de couloirs actifs, de même que de la durée de la saison d'activité** et ces changements peuvent être attribués à des enneigements de plus en plus faibles. Cette tendance, modulée par l'exposition, peut être amplifiée par le boisement progressif des couloirs résultant du réchauffement ou de la diminution généralisée des pratiques pastorales ;
  Dans le même temps, **la saison pendant laquelle les avalanches de neige humide se produisent s'allonge**, tandis que **la proportion d'avalanches de neige sèche, en particulier avec une phase aérosol, diminue ;**

- Les changements observés dans l'activité avalancheuse **dépendent de l'altitude** et sont contrôlés, entre autres, par l'influence de l'isotherme zéro sur la répartition pluie-neige, de sorte que les déterminants de l'activité se déplacent des altitudes les plus basses vers les altitudes les plus élevées à mesure que le réchauffement se poursuit. En outre, **la diminution de l'activité avalancheuse est exacerbée à basse altitude.** En revanche, i) un état transitoire d'augmentation de l'activité avalancheuse existe vraisemblablement à (très) haute altitude (au-dessus de 3000m environ dans les Alpes françaises en climat actuel si l'on assimile cette altitude de transition à celle ou les tendances dans les chutes de neige extrêmes s'inversent dans les conditions actuelles), où les conditions hivernales sont/seront encore suffisamment froides pour que les précipitations extrêmes accrues tombent sous forme de neige, mais ii) **l'altitude à laquelle les tendances s'inversent augmente continuellement avec le réchauffement.**

Ces changements ont des implications directes sur la dynamique des écoulements et les caractéristiques des dépôts, modifiant les aléas et ainsi les risques associés pour les personnes, le bâti, et les infrastructures critiques :

- A très basse altitude et/ou dans les chaînes de montagnes de basse altitude où l'activité avalanche disparaît progressivement, les aléas se réduisent et les risques associés s'estompent mécaniquement eux-aussi ;
- En revanche, l'augmentation probable, même transitoire, du nombre d'avalanches très humides « surprenantes » (lieu, saison) reste une source de préoccupation, surtout aux altitudes élevées et au cœur de la saison hivernale ;
- L'impact du changement climatique sur les déclenchements accidentels (effet des évolutions de la stratigraphie du manteau neigeux sur sa réponse à la surcharge) reste à ce jour non quantifié, de sorte que l'évolution du risque pour les pratiquants et professionnels de la montagne hivernale reste largement inconnue ;

Toutefois l''évolution des risques étant multifactorielle, elle reste bien moins connue que

celle de l'activité, et la prudence reste de mise, notamment en termes de stratégies de prévention et de protection. Ainsi, si les connaissances disponibles permettent déjà dans une certaine mesure d'anticiper le futur de l'activité avalancheuse et des risques associés, de nombreux défis restent à relever pour la recherche. Ces derniers concernent l'acquisition des données, le développement de techniques d'analyse et de traitement permettant de mieux exploiter les séries disponibles, une meilleure compréhension systémique des interactions complexes entre l'ensemble des facteurs en jeu et le développement de projections précises de l'activité et des risques à l'échelle locale.

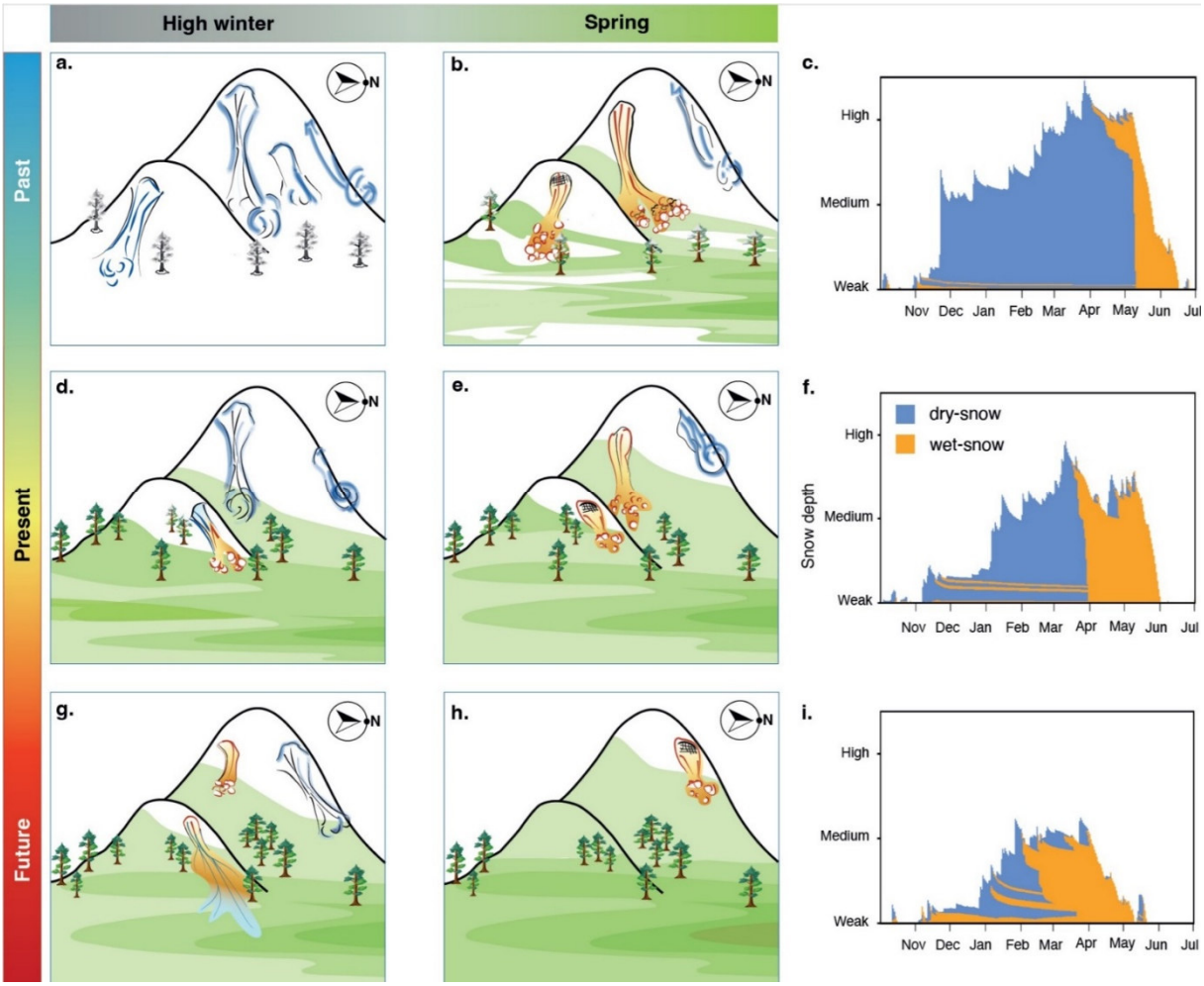

Figure 2 : *Modèle conceptuel de l'évolution de l'enneigement et de l'activité avalancheuse[4]. La figure représente des conditions archétypales de l'hémisphère nord (passé, présent et futur, en distinguant plein hiver/printemps.*

[4]Eckert, N., Corona, C., Giacona, F., Gaume, J., Mayer, S., van Herwijnen, A., ... & Stoffel, M. (2024). Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. Nature Reviews Earth & Environment, 5(5), 369-389.

6. Références mobilisées pour la rédaction de cette note

Textes généraux / de revue :

- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., ... & Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. The Cryosphere, 12(2), 759-794.
- Eckert, N., Corona, C., Giacona, F., Gaume, J., Mayer, S., van Herwijnen, A., ... & Stoffel, M. (2024). Climate change impacts on snow avalanche activity and related risks. Nature Reviews Earth & Environment, 5(5), 369-389.
- Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., ... & Schoeneich, P. (2015). Climate change and natural hazards in the Alps. Observed and potential impacts on physical and socio-economic systems. Revue de géographie alpine, (103-2).[5]
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., ... & Zhang, Y. (2019). High mountain areas. IPCC SROCC, chap 2
- Jacquemart, M., Weber, S., Chiarle, M., Chmiel, M., Cicoira, A., Corona, C., ... & Stoffel, M. (2024). Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps. Earth-Science Reviews, 104886.
- Mock, C. J., Carter, K. C., & Birkeland, K. W. (2017). Some perspectives on avalanche climatology. Annals of the American Association of Geographers, 107(2), 299-308.
- ONERC (2018). Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. La documentation française, 199p.
- Stoffel, M., & Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Progress in physical geography, 36(3), 421-439.

Analyses de tendances observées dans des données d'avalanches (directes ou indirectes) :

- Ballesteros-Cánovas, J. A., Trappmann, D., Madrigal-González, J., Eckert, N., & Stoffel, M. (2018). Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(13), 3410-3415.
- Bellaire, S., Jamieson, B., Thumlert, S., Goodrich, J., & Statham, G. (2016). Analysis of long-term weather, snow and avalanche data at Glacier National Park, BC, Canada. Cold Regions Science and Technology, 121, 118-125.
- 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(12), 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. Journal of Glaciology, 59(213), 93-114.
- Eckert, N., Parent, E., Kies, R., & Baya, H. (2010). A spatio-temporal modelling framework for assessing the fluctuations of avalanche occurrence resulting from climate change: application to 60 years of data in the northern French Alps. Climatic change, 101(3), 515-553.
- Fouinat, L., Sabatier, P., David, F., Montet, X., Schoeneich, P., Chaumillon, E., ... & Arnaud, F. (2018). Wet avalanches: long-term evolution in the Western Alps under climate and human forcing. Climate of the Past, 14(9), 1299-1313.
- Gądek, B., Kaczka, R. J., Rączkowska, Z., Rojan, E., Casteller, A., & Bebi, P. (2017). Snow avalanche activity in Żleb Żandarmerii in a time of climate change (Tatra Mts., Poland). Catena, 158, 201-212.
- Giacona, F., Eckert, N., Corona, C., Mainieri, R., Morin, S., Stoffel, M., ... & Naaim, M. (2021). Upslope migration of snow avalanches in a warming climate. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(44), e2107306118.
- Jomelli, V., & Pech, P. (2004). Effects of the Little Ice Age on avalanche boulder tongues in the French Alps (Massif des Ecrins). Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 29(5), 553-564.
- Laternser, M., & Schneebeli, M. (2002). Temporal trend and spatial distribution of avalanche activity during the last 50 years in Switzerland. Natural Hazards, 27(3), 201-230.

[5] *Les références apparaissant en vert foncé concernent exclusivement ou principalement le territoire français (métropole).*

- Lavigne, A., Eckert, N., Bel, L., & Parent, E. (2015). Adding expert contributions to the spatiotemporal modelling of avalanche activity under different climatic influences. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 64(4), 651-671.
- McCarroll, D., Matthews, J. A., & Shakesby, R. A. (1995). Late-holocene snow-avalanche activity in southern norway: Interpreting lichen size–frequency distributions using an alternative to simulation modelling. Earth Surface Processes and Landforms, 20(5), 465-471.
- Naaim, M., Eckert, N., Giraud, G., Faug, T., Chambon, G., Naaim-Bouvet, F., & Richard, D. (2016). Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalancheuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises. La Houille Blanche, (6), 12-20.
- Peitzsch, E. H., Pederson, G. T., Birkeland, K. W., Hendrikx, J., & Fagre, D. B. (2021). Climate drivers of large magnitude snow avalanche years in the US northern Rocky Mountains. Scientific reports, 11(1), 1-13.
- Pielmeier, C., Techel, F., Marty, C., & Stucki, T. (2013, October). Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps–trend analysis for mid-winter season. In Proceedings of the international snow science workshop, grenoble and chamonix (pp. 1240-1246).
- Schneebeli, M., Laternser, M., & Ammann, W. (1997). Destructive snow avalanches and climate change in the Swiss Alps. Eclogae Geologicae Helvetiae, 90(3), 457-461.
- Teich, M., Marty, C., Gollut, C., Grêt-Regamey, A., & Bebi, P. (2012). Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: Rare situations with decreasing trends during the last 41 years. Cold Regions Science and Technology, 83, 77-88.

Projections futures de l'activité avalancheuse :

- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y., & Morin, S. (2014). Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. The Cryosphere, 8(5), 1673-1697.
- Katsuyama, Y., Katsushima, T., & Takeuchi, Y. (2022). Large-ensemble climate simulations to assess changes in snow stability over northern Japan. Journal of Glaciology, 1-14.
- Laute, K., & Beylich, A. A. (2018). Potential effects of climate change on future snow avalanche activity in western Norway deduced from meteorological data. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 100(2), 163-184.
- Lazar, B., & Williams, M. (2008). Climate change in western ski areas: Potential changes in the timing of wet avalanches and snow quality for the Aspen ski area in the years 2030 and 2100. Cold regions science and technology, 51(2-3), 219-228.
- Mayer, S., Hendrick, M., Michel, A., Richter, B., Schweizer, J., Wernli, H., & van Herwijnen, A. (2024). Impact of climate change on snow avalanche activity in the Swiss Alps. The Cryosphere, 18(11), 5495-5517.
- Ortner, G., Michel, A., Spieler, M. B., Christen, M., Bühler, Y., Bründl, M., & Bresch, D. N. (2025). A novel approach for bridging the gap between climate change scenarios and avalanche hazard indication mapping. *Cold Regions Science and Technology*, *230*, 104355.
- Stoffel, M., & Corona, C. (2018). Future winters glimpsed in the Alps. Nature Geoscience, 11(7), 458-460.