

Evolution de l'activité avalancheuse naturelle et liens avec le climat :

Une synthèse rapide des résultats disponibles pour les Alpes Françaises (et un peu au-delà)

N. Eckert^[1], T. Zgheib^[1-2], S. Morin^[2], F. Giacona^[1], P. Hagenmuller^[2], M. Naaim^[1], C. Corona^[3] et al.

[1] Université Grenoble Alpes / INRAE UR ETNA, Saint Martin d'Hères, France

[2] Météo-France - CNRS, CNRM/CEN, Grenoble

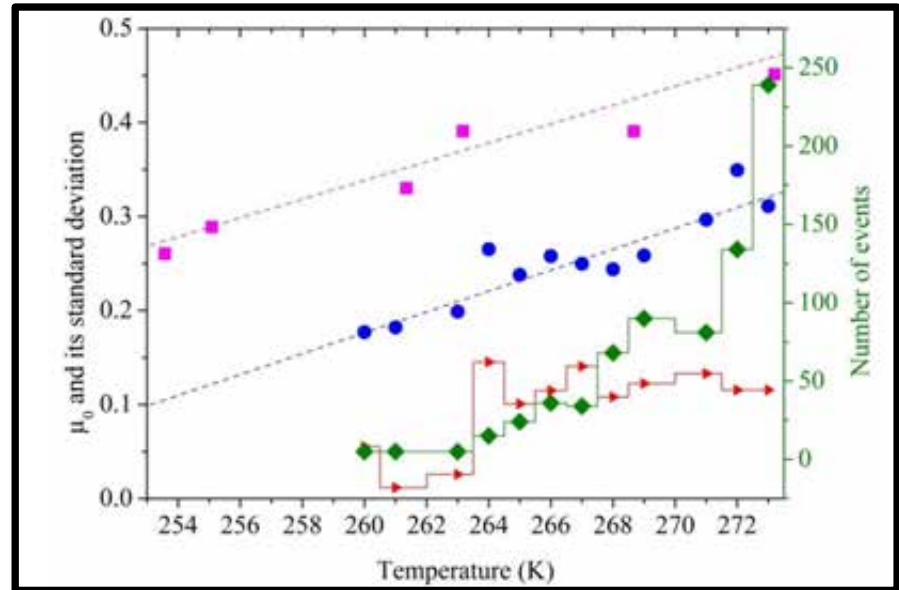
[3] Géolab, Clermont Ferrand, France

Atelier neige OSUG « Avalanches et Climat », 29 janvier 2021

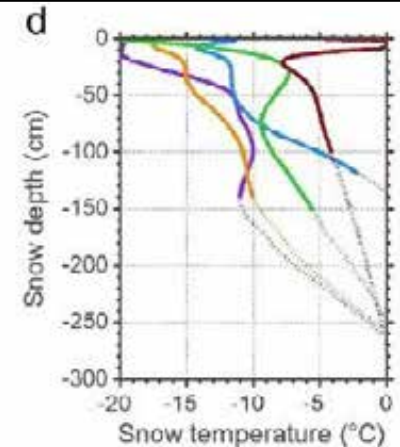
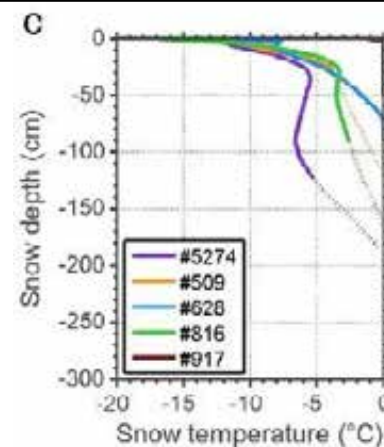
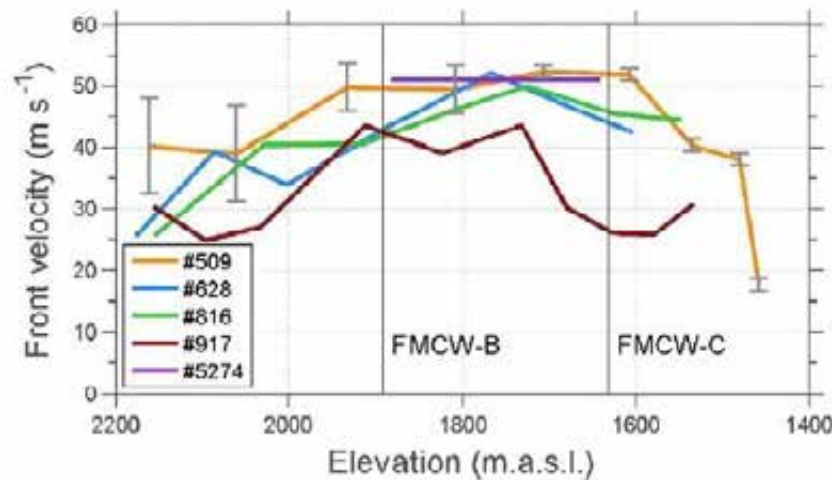


Pourquoi penser « climat » lorsqu'on s'intéresse aux avalanches?

- o Lien « évident » entre avalanches et présence de neige
- o Liens démontrés entre propriétés physiques de la neige et dynamique des avalanches
- o Importance de la température de la neige



Link between snow temperature and avalanche friction law (Naaim, et al., J. Glaciol., 2013)



Velocity longitudinal profiles and snow cover temperature profiles at two positions along the path for 4 avalanches artificially triggered at Vallee de la Sionne (Steinkogler et al., CRST 2014).

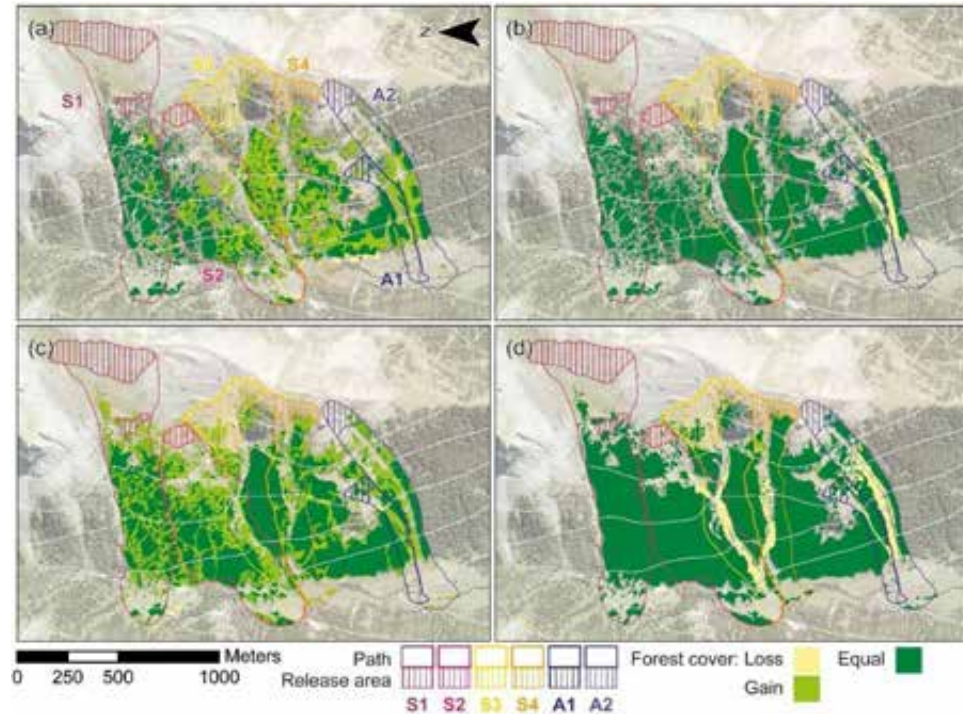
Une relation avalanche-climat difficile à appréhender

- Un contrôle climatique intuitif mais complexe:
 - Réponse non-linéaire aux évolutions du manteaux neigeux;
 - Non linéarité additionnelle liée à l'isotherme zéro;
 - Peu de longues séries de données.

- Des facteurs multiples à considérer:
 - Sources (archives, témoignages, etc.)
 - Usages des sols et pratiques sociales
 - Ouvrages de protection / mesures de gestion
 - Tordeuse du mélèze, etc.

- Un sujet qui reste débattu (IPCC SROCC 2019)

- Des résultats sur l'activité spontanée uniquement:
 - Evolution du manteau neigeux et de l'activité avalancheuse associée (Lazard & Williams, 2007);
 - Données indirectes: dendrogeomorphologie et lichénométrie (McCarroll, 1993; Corona et al., 2013, etc.);
 - Rares analyses statistiques de « vraies » données d'avalanche, en général post 1950, et largement dans les Alpes françaises.



Diachronic evolution of the forest stands at Grand Bois de Souliers between 1945 and 2015: (a) 1945-1971, (b) 1971-1981, (c) 1981-2003, and (d) 2003-2015, Mainieri et al., Anthropocene 2020.

Les Alpes françaises, un contexte très favorable (1)

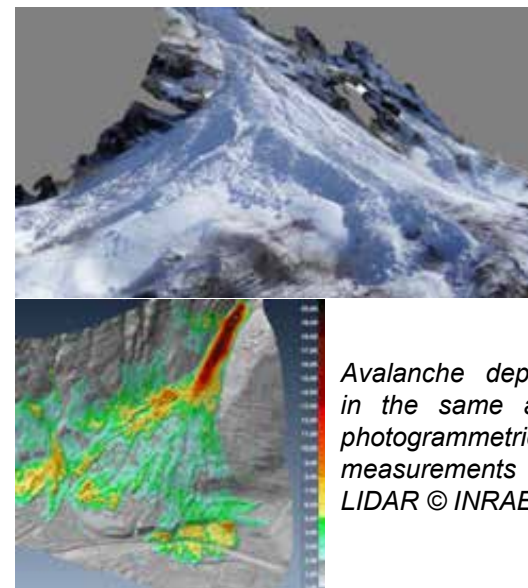
- o Excellentes données d'avalanche:
 - L'EPA: un « observatoire » unique (environ ~ 4000 couloirs suivis depuis plus d'un siècle);
 - Observations complémentaires (stations de ski, BD citoyennes);
 - Mesures « modernes » (LIDAR, télédétection);
 - Archives historiques et proxies (dendrogéomorphologie).



EPA (www.avalanches.fr), © MEDD-ONF-INRAE



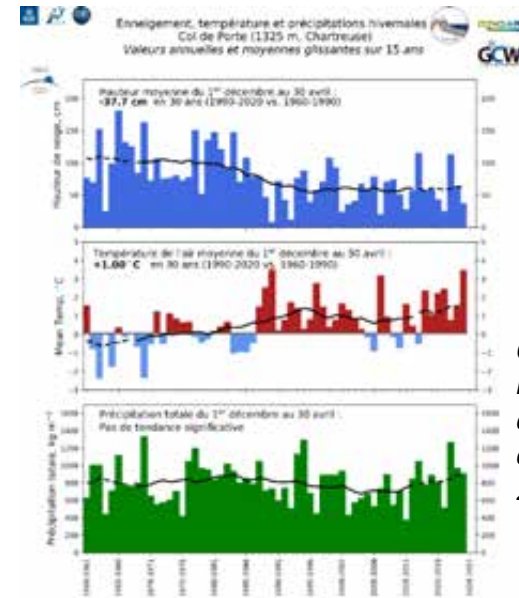
Historical avalanche map (Mougin, 1922) on which avalanche paths were drawn manually



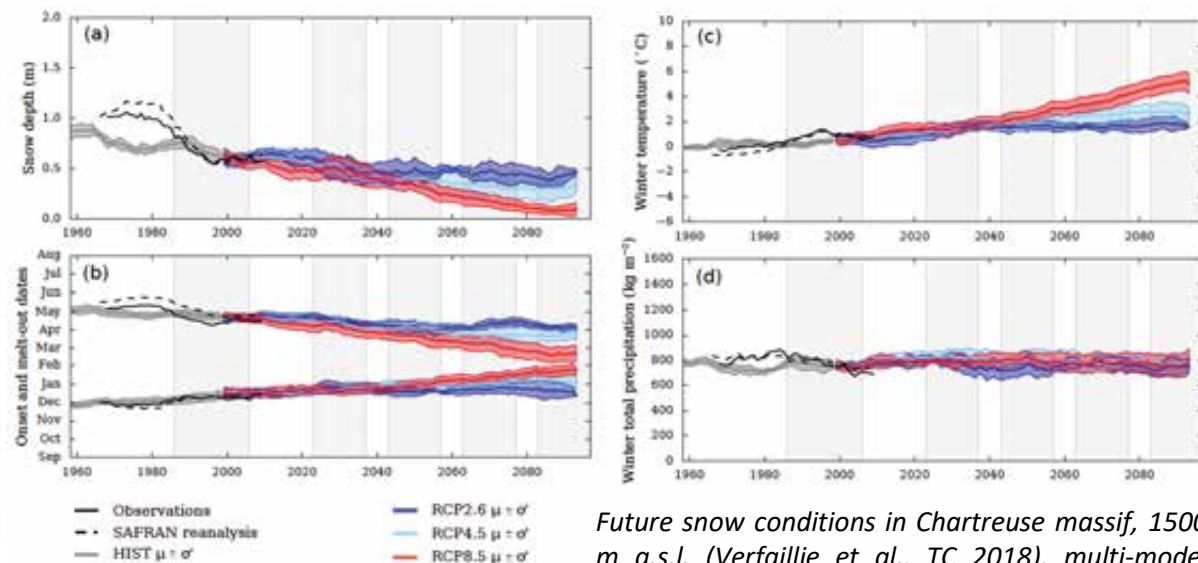
Avalanche deposits in the same area: photogrammetric measurements and LIDAR © INRAE.

Les Alpes françaises, un contexte très favorable (2)

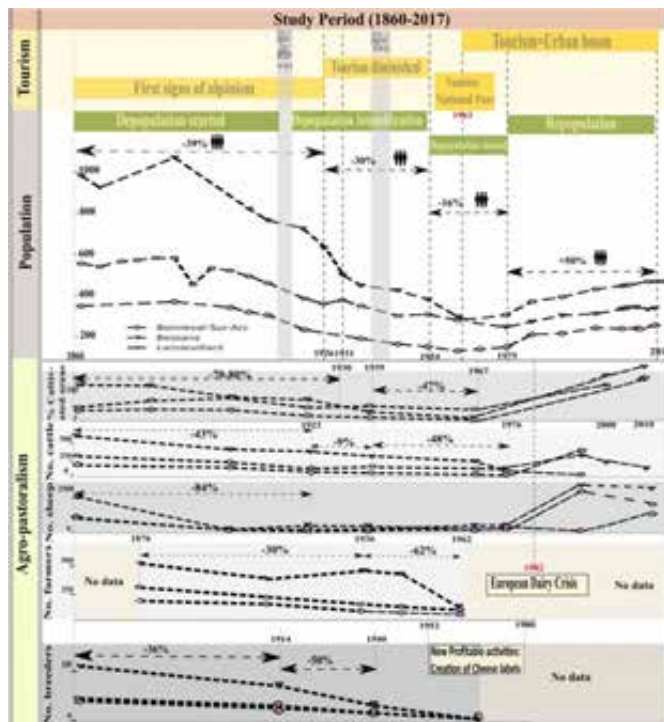
- o Ensemble « complet » de données socio-environnementales:
 - Evolution passée des sociétés, des pratiques, de l'usage des sols;
 - Evolution passée du climat et de l'enneigement;
 - Projections multi-modèles (GCM-RCM-modèle de neige) et multi-scénarios.



Observed snow and meteorological conditions at Col de Porte (1325m a.s.l., Lejeune et al., ESSD 2019)

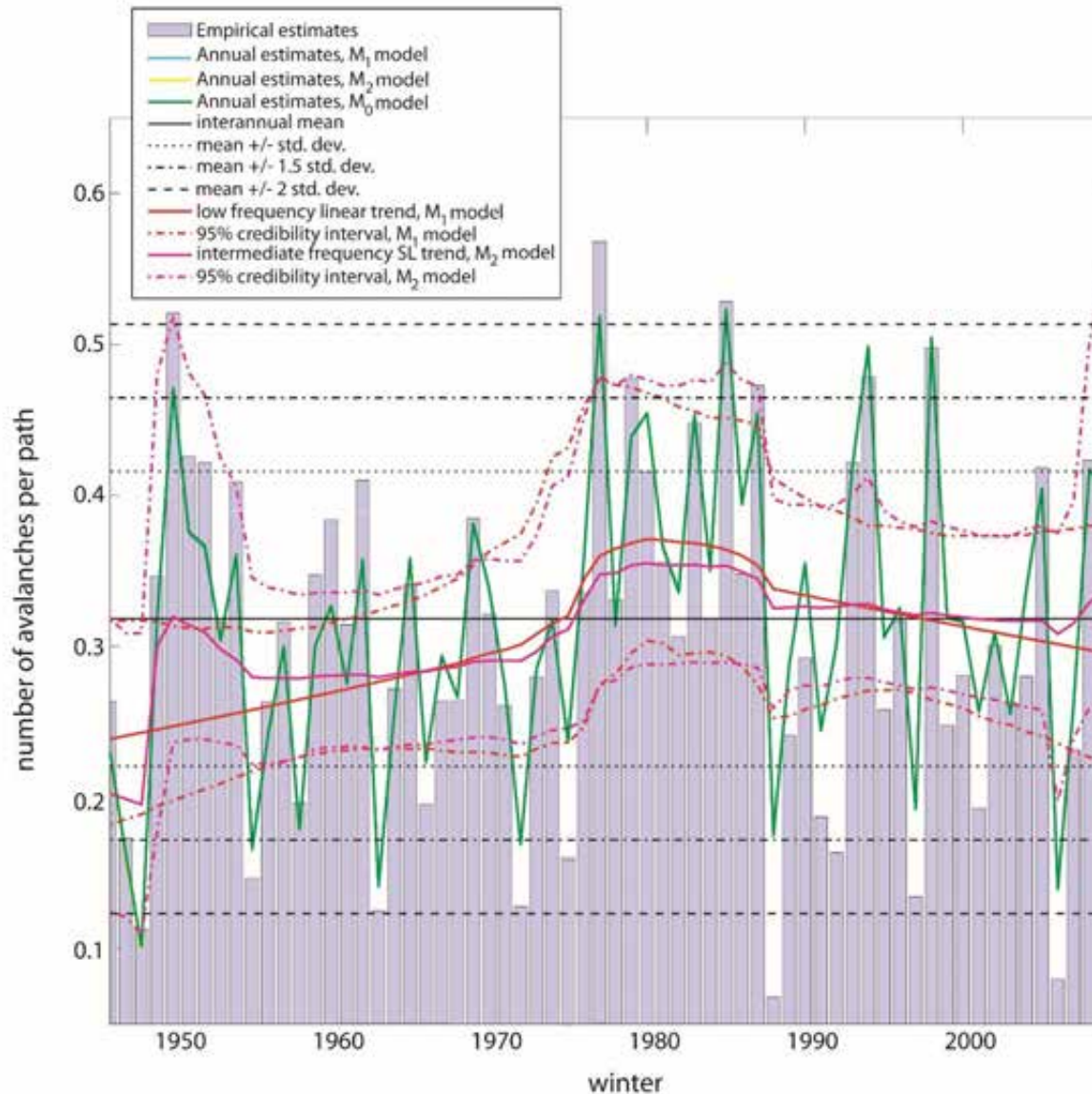


Future snow conditions in Chartreuse massif, 1500 m a.s.l. (Verfaillie et al., TC 2018), multi-model EURO-CORDEX projections grounding on CMIP5



Socio-environmental changes in a high valley of the French Alps. (Zgheib et al., GEC 2020)

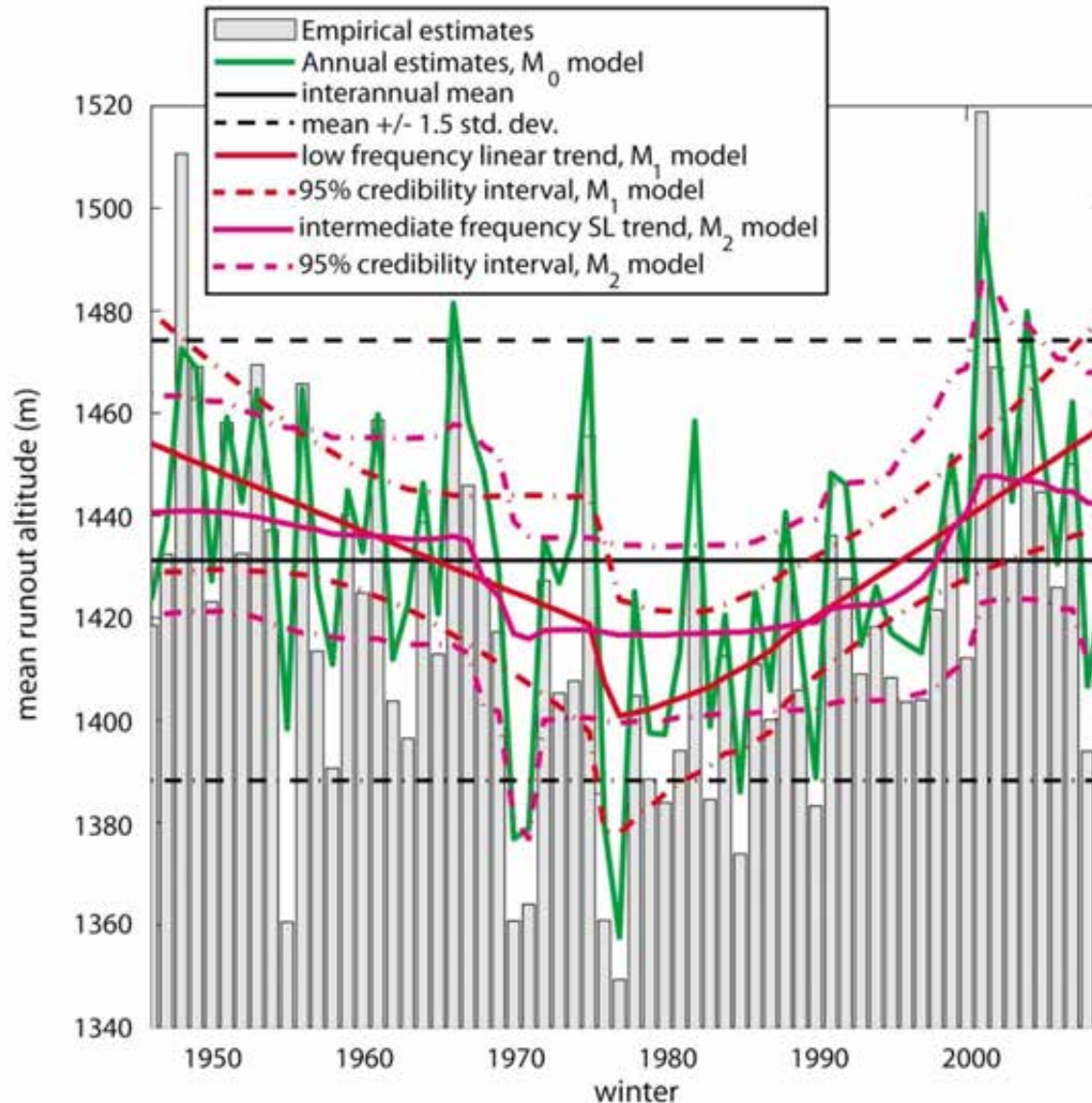
Nombre moyen d'avalanches par couloir et par hiver



- Modèles hiérarchiques Bayésiens spatio-temporels;
- Sur un couloir archétypal, motif prédominant «en cloche», avec une très forte variabilité interannuelle;
- Patterns supplémentaires aux échelles décadales.

Mean number of avalanches per winter and path at the entire French Alps scale: annual signal and underlying trends, derived from Eckert et al., *Clim. Change* 2010.

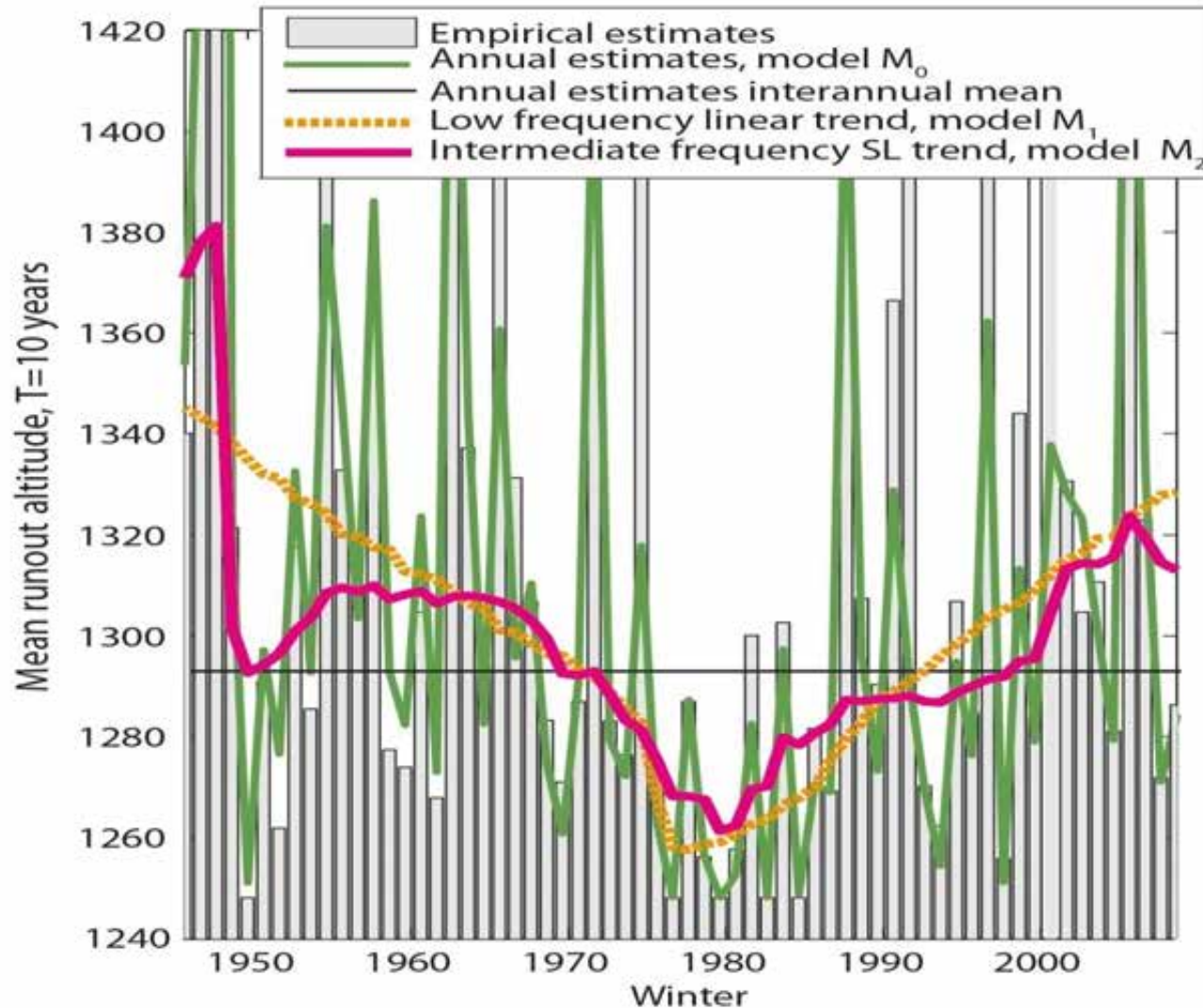
Altitude d'arrêt moyenne



- Point de rupture net en 1976 et tendance temporelle plus marquée que pour les occurrences (moins de variabilité interannuelle);
- Diminution de 55 m de l'altitude moyenne d'arrêt entre 1946 et 1976;
- Augmentation entre 1976 et ~2000 pour retrouver l'état initial, légère diminution 2000-2010.

Mean runout altitude per winter on a mean path from the French Alps: annual signal and underlying trends, derived from Eckert et al., J. Climate 2010.

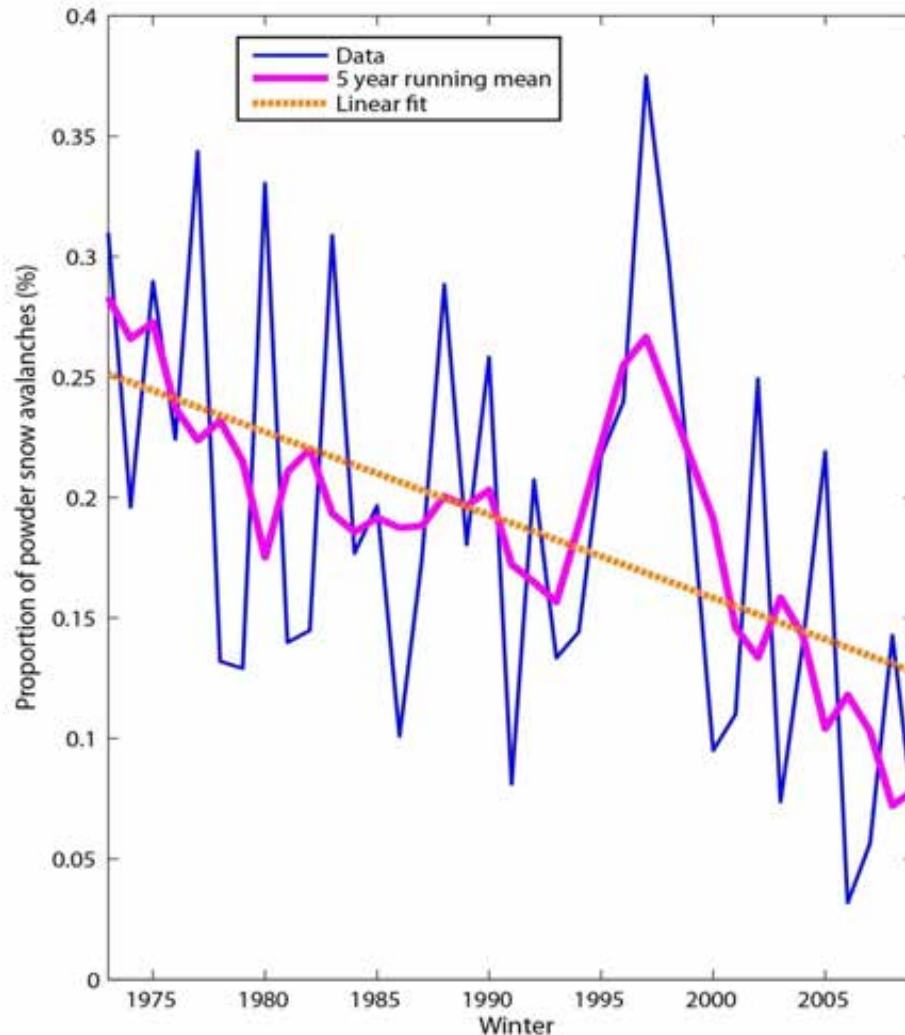
Niveau de retour décennal



- Niveau de retour conditionnel à des conditions hivernales données;
- Résume les changements d'ampleur et de fréquence;
- La corrélation entre occurrences et altitudes d'arrêt amplifie les tendances (différence de 80 m entre 1980/85 et 2000/05).

Runout altitude corresponding to a return period of 10 years (10 year return level) on a mean path from the French Alps: annual signal and underlying trends, from Eckert et al., J. Glaciol. 2013.

Régime d'écoulement

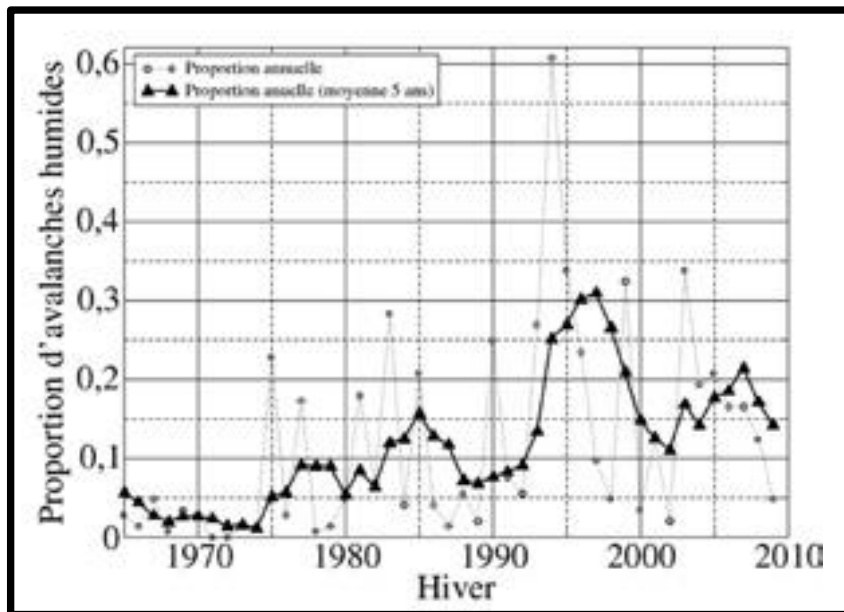


- Diminution générale d'environ 12% de la proportion d'avalanches de neige poudreuse entre 1973 et 2010;
- Très bonnes corrélations avec les occurrences / altitudes atteintes;
- Lien «physique» entre les différents résultats: la neige «plus chaude» et moins abondante diminue la proportion d'avalanches avec une partie poudreuse de même que la distance d'arrêt.

Proportion of powder-snow avalanches in the French Alps : annual signal and underlying trends, from Eckert et al., J. Glaciol 2013.

Nature de la neige en écoulement

- o Augmentation des avalanche de neige humide : première question (intuitive) abordée dans le cadre du thème avalanches / changement climatique (Martin et al., Ann. Glac. 2001).
- o Etayé depuis lors mais « pas tant que ça » : confusion nombre / proportion, définition compliquée, confusion déclenchement/neige érodée/transformation dans le dépôt, etc.
- o Dynamique / rhéologie spécifique encore mal connue: [cf. présentation Guillaume/Thierry](#)



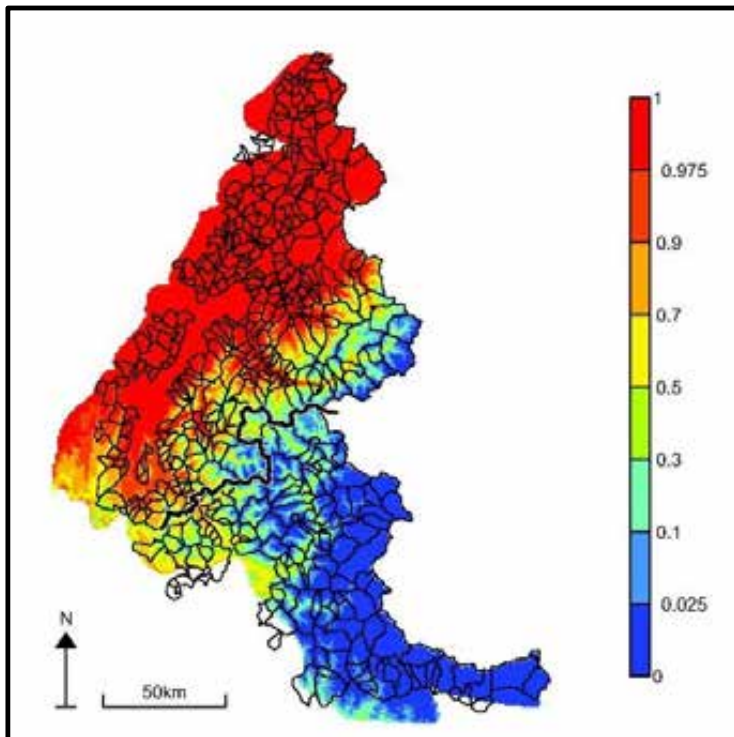
Proportion of wet snow avalanches in the Mont Blanc massif
(Naaïm et al., LHB 2016)



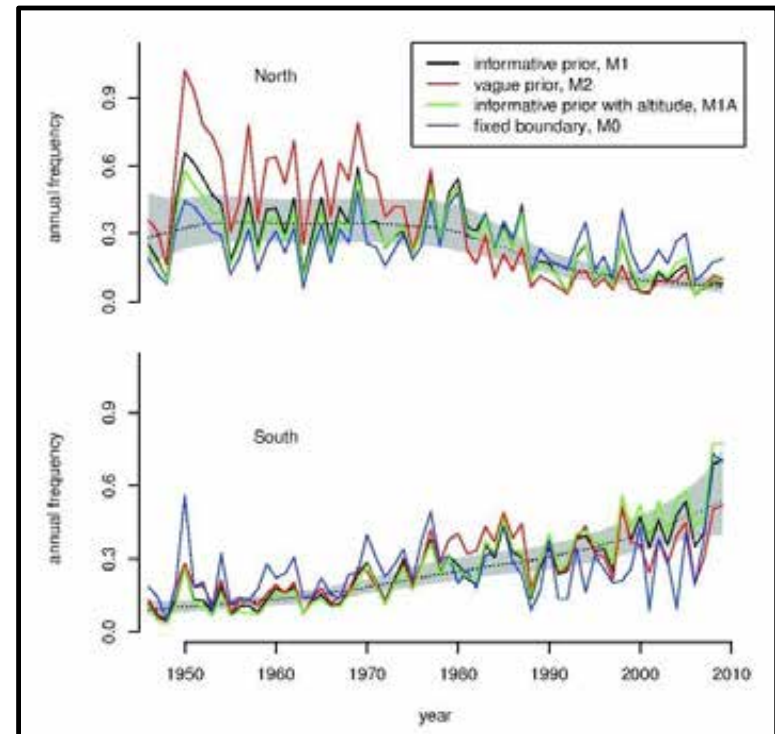
Wet snow avalanche deposit, january 2018 Bessans, Savoie (© INRAE ETNA).

Effets spatio-temporels et gradients altitudinaux

- o Différences Nord / Sud dans les régimes d'occurrence des avalanches résultent d'interactions complexes entre flux atmosphériques prédominants et topographie avec une ségrégation altitudinale claire entre deux tendances (Lavigne et al., JRSSC 2015)
- o Diminution « définitive » aux altitudes « basses »: [cf. présentation Florie](#)
- o Augmentation «transitoire» en haute altitude ?



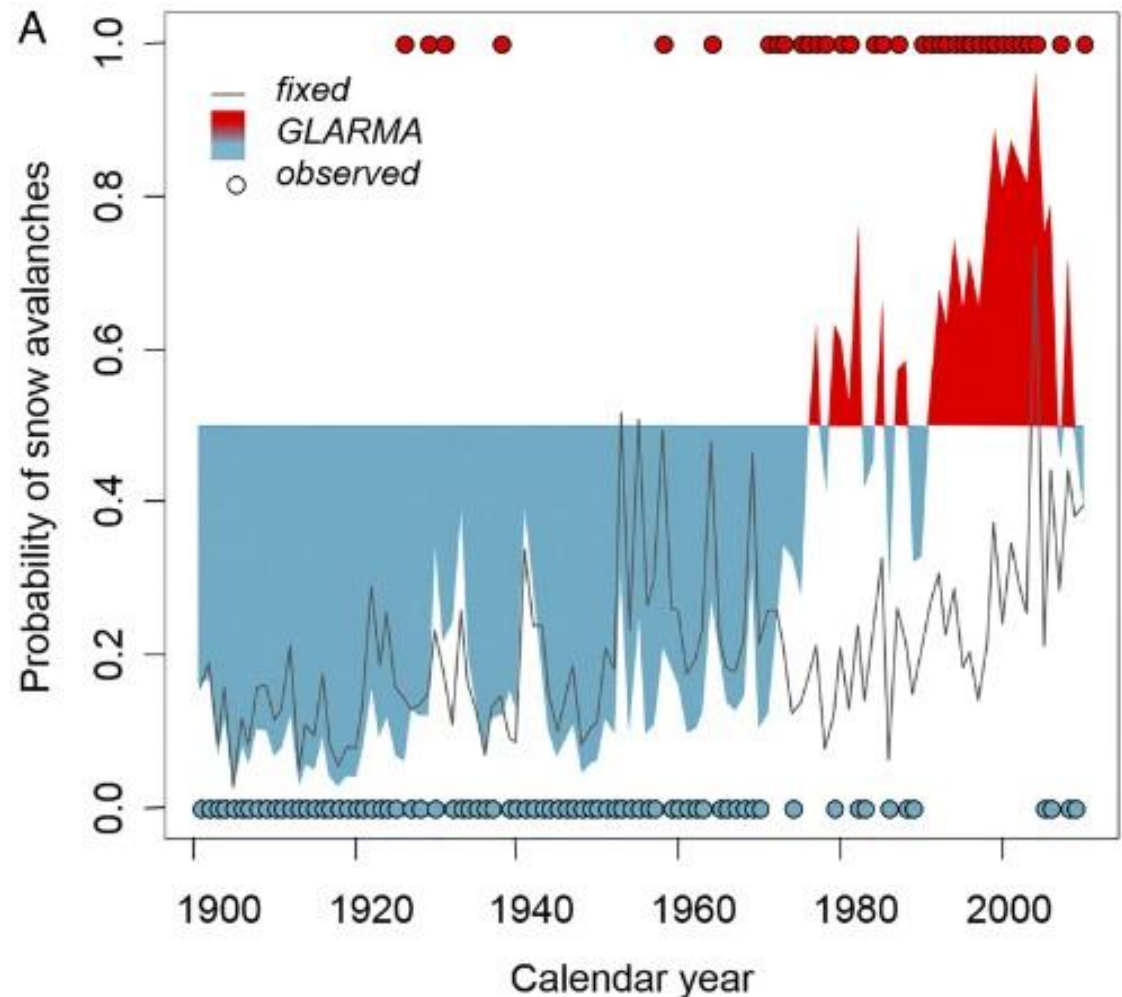
Probability for each township to belong to the “north zone”, with altitude included in the classification, from Lavigne et al. (JRSSC 2015).



Corresponding time trends, from Lavigne et al. (JRSSC 2015). Shows the altitudinal control on north decrease / south increase.

Augmentation aux hautes altitudes ?

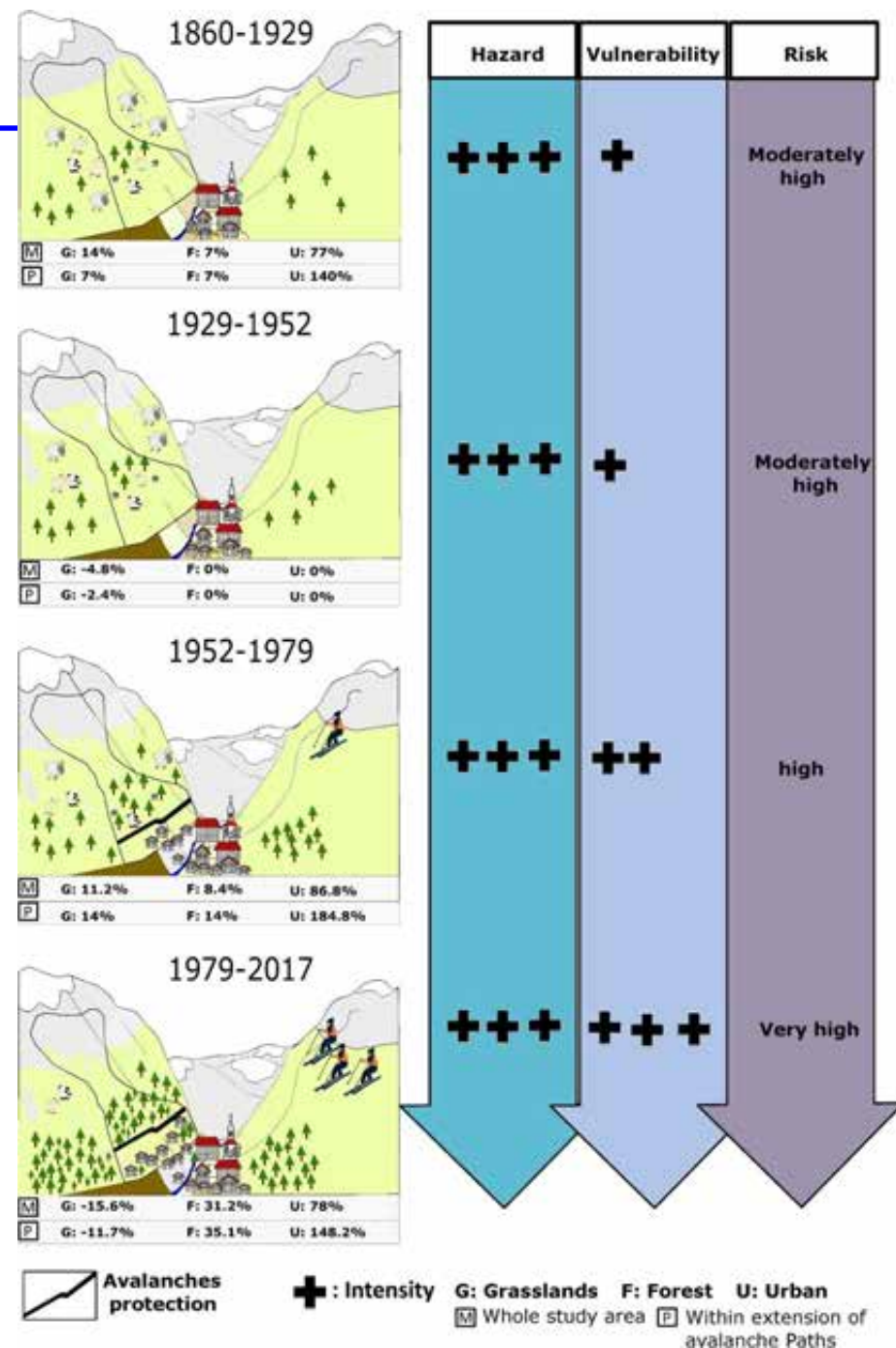
- Un exemple lointain:
 - 120 ans de données sur les cernes d'arbres dans l'Himalaya (> 3000 m d'altitude);
 - forte augmentation depuis ~ 1975;
 - lié à l'augmentation de la température;
- Régime «transitoire» d'activité accrue en haute altitude et en «plein hiver» sur le modèle de l'hiver 2018 dans les Alpes (Stoffel et Corona, 2018)?
- Effet combiné de l'augmentation de l'activité de neige humide et des extrêmes neigeux ([cf. présentation Erwan](#))?



Past changes in avalanche activity in the Himalayas as inferred from tree rings (Ballesteros Canovas... et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2018)

Augmentation du risque pour les habitations aux hautes altitudes ?

- Le risque a diminué au tournant du 19^{ème} siècle (déprise agricole)
- Augmentation drastique de l'exposition au cours des dernières décennies (tourisme)
- Enneigement / activité avalancheuse toujours importants, voir en légère augmentation
- Le risque au cœur d'interactions complexe entre activité avalancheuse, usage des sols et enjeux.
- [Pour en savoir plus: soutenance de thèse de Taline Zgheib le 5 mars 202& \(matinée\)](#)

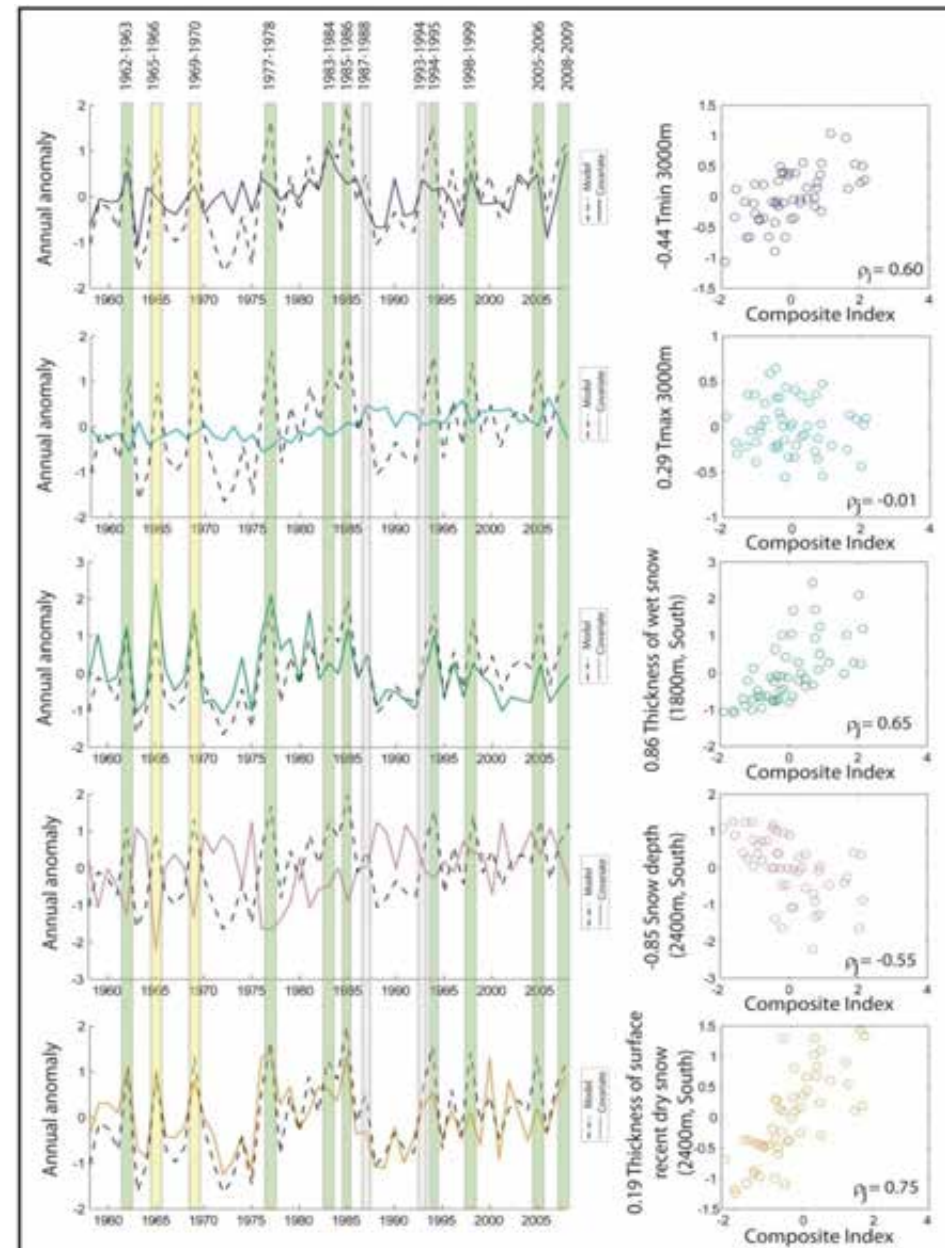


Joint evolution of land cover, avalanche risk and its components from 1860 to 2017 in the upper Maurienne valley. For each of the four sub-periods, this qualitative model sums-up changes in land-cover and in the different components of avalanche risk to settlements, Zgheib et al., GEC 2020

Modéliser empiriquement le lien aléas-climat

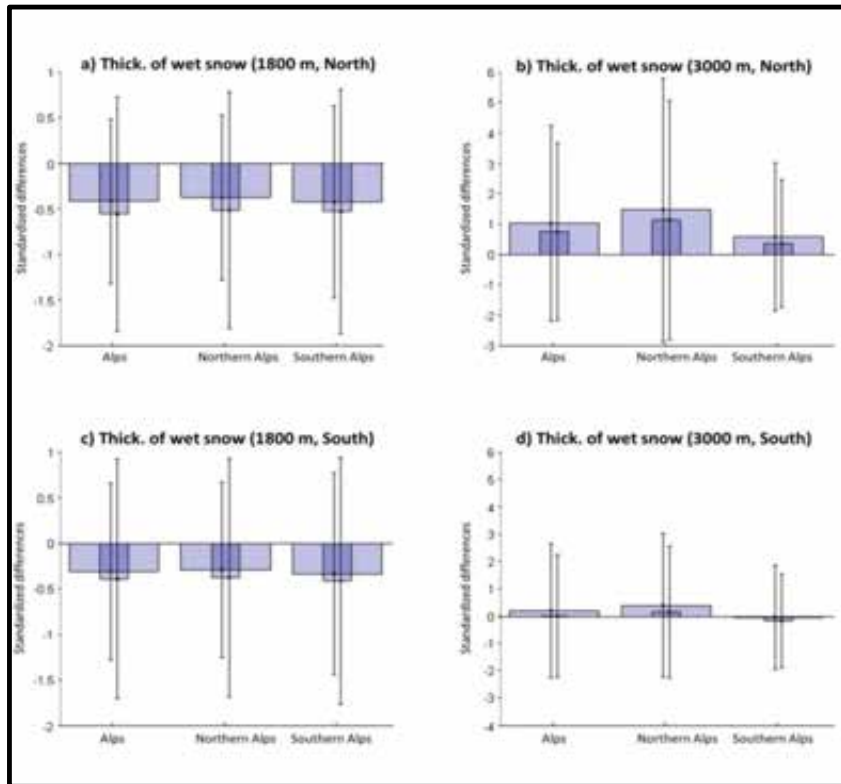
- o Modélisation implicite du temps via conditions nivo-météorologiques (elles-mêmes fonction du temps): distingue les tendances d'origine climatique des évolutions ayant une autre origine
- o Empiriquement, bonnes corrélations entre activité avalancheuse et conditions hivernales: confirme le contrôle par l'enneigement et la température aux échelles de temps climatiques
- o Permet les projections futures

Avalanche activity (composite index CI) as a function of its snow and weather drivers (Castebrunet et al., Clim. Past 2012). Temporal evolution of the covariates retained. Green bands correspond to years for which the CI and its regression model exceed the 80th percentile of their interannual distribution. Yellow and grey bands correspond to years for which only the model or the CI exceeds this threshold, respectively.

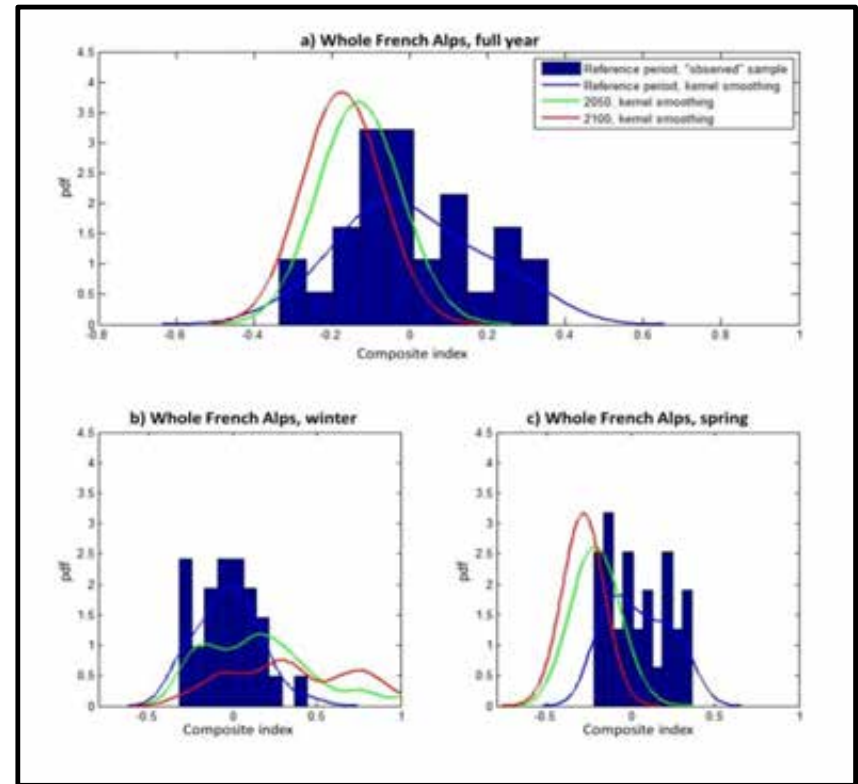


Projection des relations inférées en climat futur

- o Scenarios climatiques futurs du GIEC selon l'AR4 (GCM, RCM, adaptation à la topographie des montagnes, correction des biais et modélisation de la couverture neigeuse) et risque futur selon les relations avalanches-climat du passé
- o Projections climat-enneigement de l'IPCC AR5 (AR6!) encore à implémenter dans ce cadre



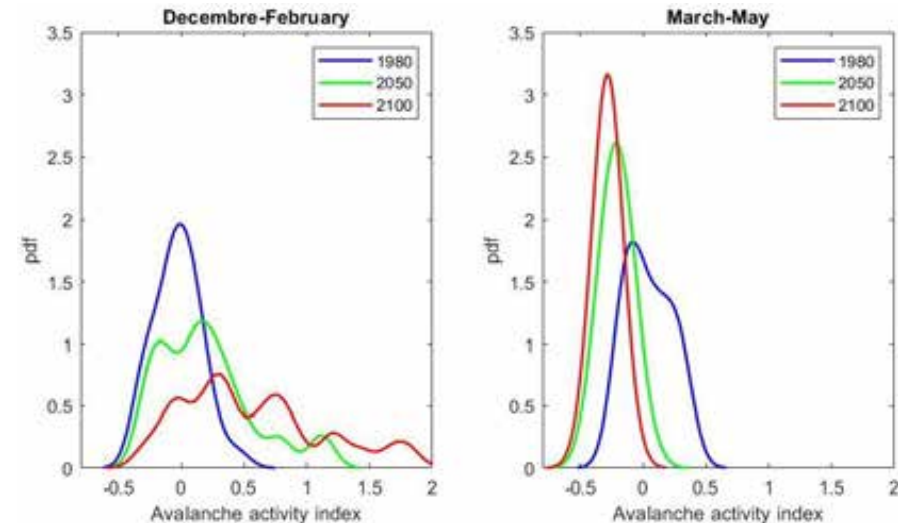
Forecasted future wet snow amounts in the French Alps. Safran-Crocus simulations forced with downscaled IPCC 2007 scenarios. Results are expressed as standardized anomalies with regards to the 1960-1990 period (Castebrunet et al., TC 2014).



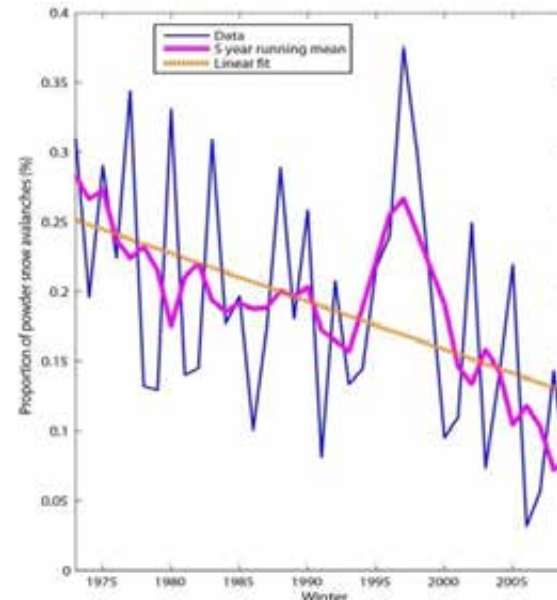
Distribution of the avalanche activity CI over the reference period (1960-90, Castebrunet et al., Clim Past 2012) and in 2020-50 and 2070-2100. Results are expressed as standardized anomalies with regards to the 1960-1990 period (Castebrunet et al., TC 2014).

Synthèse : état de l'art et principaux verrous

- o Les Alpes françaises: un terrain exceptionnel pour étudier les relations avalanche-climat
- o IPCC SROCC (résumé à l'intention des décideurs): «Les glissements de terrain et les avalanches devraient se produire dans de nouveaux endroits et à de nouvelles saisons»
- o Résultats existants fiables pour l'activité naturelle: changements importants et contrôle altitudinal fort
- o Quelques pistes pour la suite:
 - Mise à jour des résultats avec les données de la dernière décennie et les projections AR5-AR6 (accélération du réchauffement)
 - Échelle de temps centennale : du PAG à l'anthropocène
 - Cycles avalancheux / tempêtes hivernales
 - Typologie des avalanches / situations avalancheuses
 - Déclenchements et risque accidentel



*Avalanche activity index: future versus 1960-90
(Castebrunet et al., TC, 2014)*



*Proportion of powder-snow avalanches in the French Alps
(Eckert et al., J. Glaciol, 2013)*