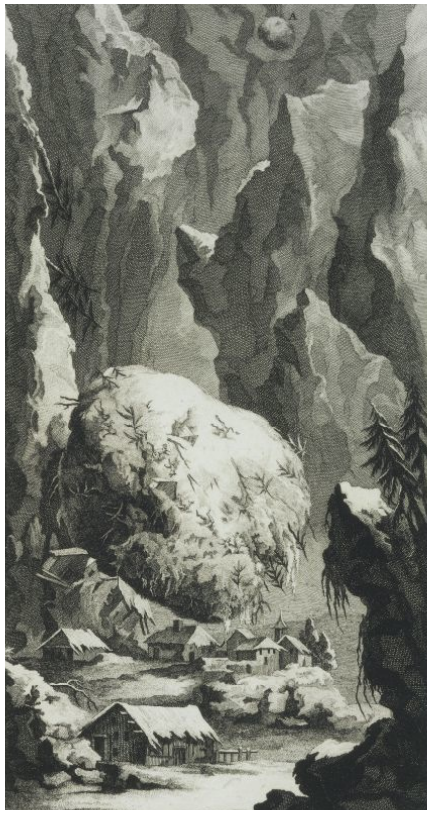
Evolution des avalanches dans un climat changeant

Pascal Hagenmuller[1], Samuel Morin[1], Léo Viallon-Galinier[1,7], Benjamin Reuter[1,6], Isabelle Gouttevin[1], Matthieu Lafaysse[1], Nicolas Eckert[3], Jean-Michel Soubeyroux[4], Raphaëlle Samacoïts[1,4]

[1]Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France
[2]Univ. Grenoble Alpes, Inrae, LESSEM, Grenoble, France,
[3]Univ. Grenoble Alpes, Inrae, ETNA, Grenoble, France,
[4]Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France,
[5]CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France
[6]WSL-SLF, Davos, Suisse
[7]École des Ponts, Champs-sur-Marne, France"

Contexte

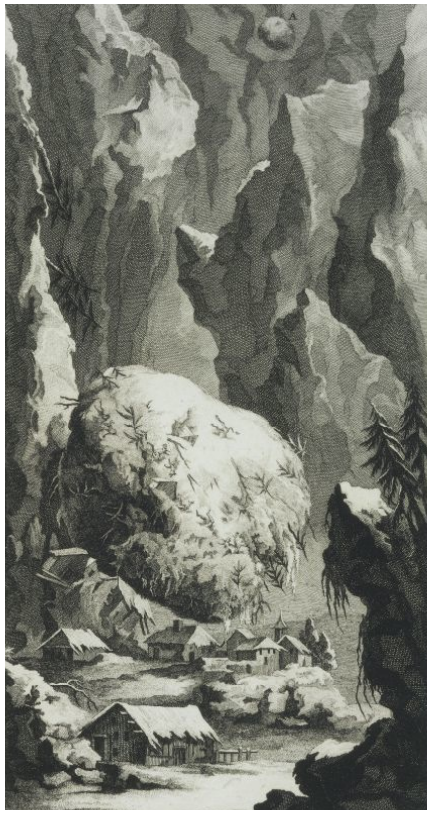
Avalanche = masse de **neige** qui se détache puis dévale une **pente**



D. Herrliberger, 1754-1758

Contexte

Avalanche = masse de **neige** qui se détache puis dévale une **pente**

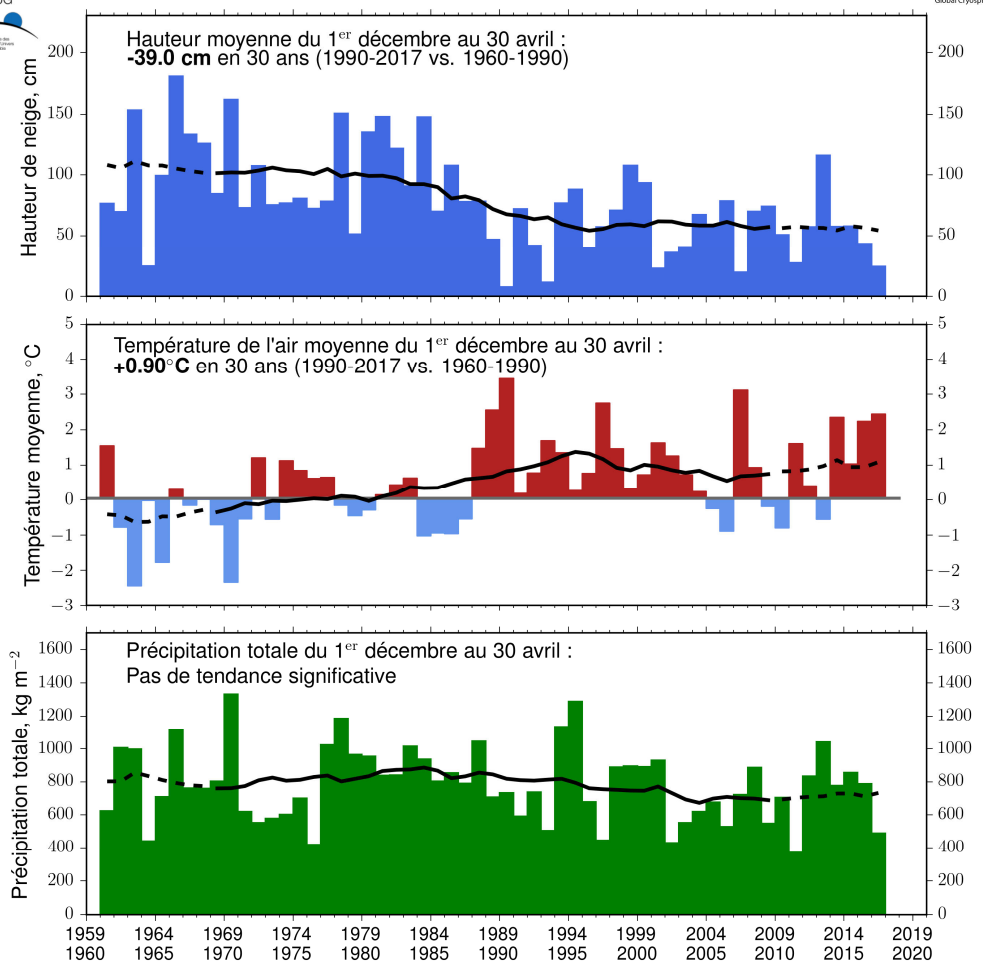


D. Herrliberger, 1754-1758

CNRM UMR 3589

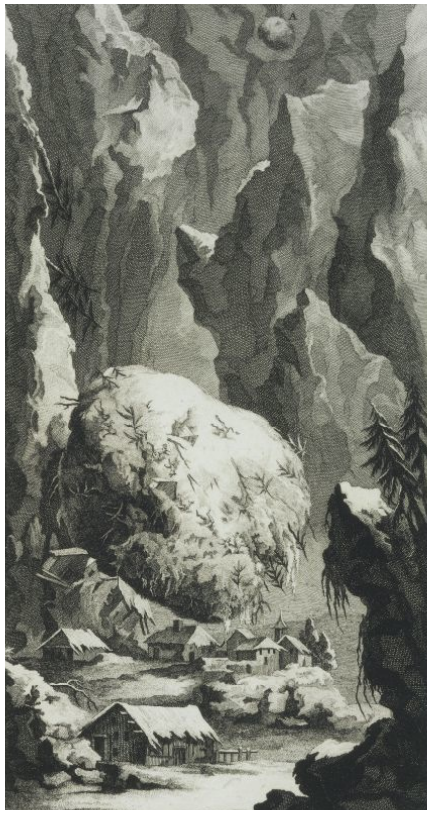
OSUG

Enneigement, température et précipitations hivernales
Col de Porte (1325 m, Chartreuse)
Valeurs annuelles et moyennes glissantes sur 15 ans



Contexte

Avalanche = masse de **neige** qui se détache puis dévale une **pente**

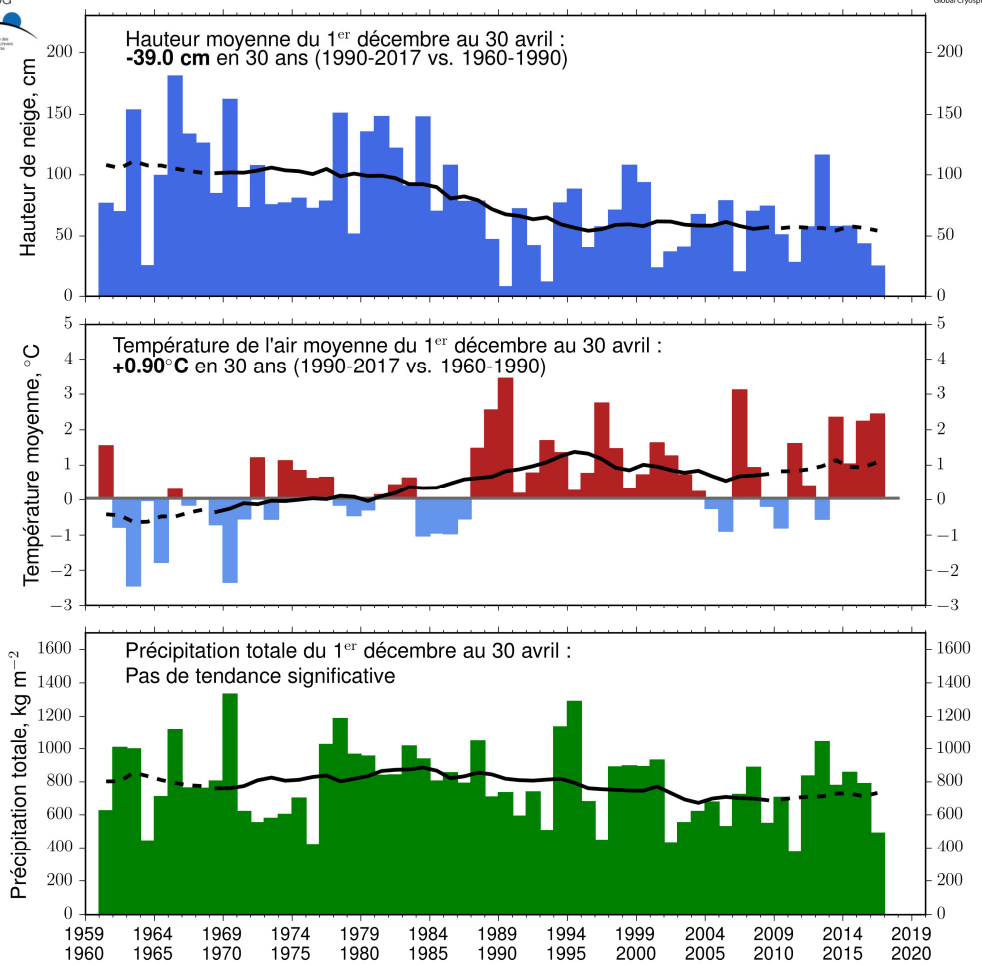


D. Herrliberger, 1754-1758

CNRM UMR 3589

OSUG

Enneigement, température et précipitations hivernales
Col de Porte (1325 m, Chartreuse)
Valeurs annuelles et moyennes glissantes sur 15 ans



Moins de neige, moins d'avalanches ?

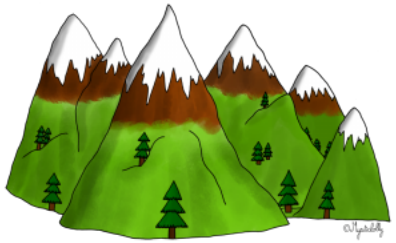
Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

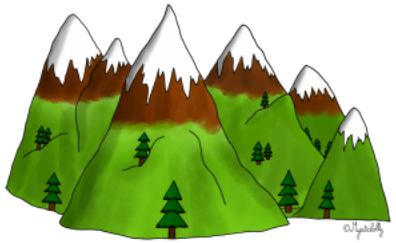
Terrain : topographie + végétation



Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

Terrain : topographie + végétation

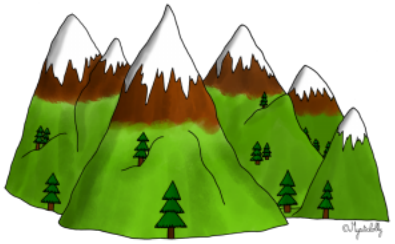


Cumul de neige récente

Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

Terrain : topographie + végétation



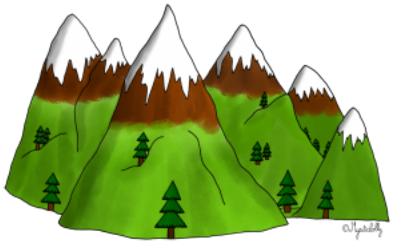
Cumul de neige récente

Vent

Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

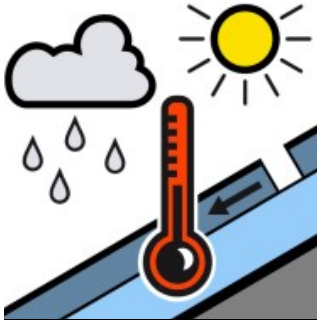
Terrain : topographie + végétation



Cumul de neige récente

Vent

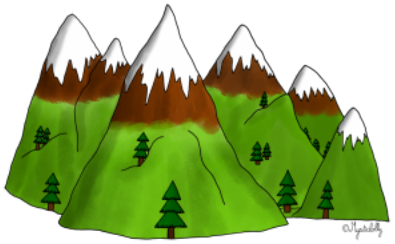
Bilan thermique



Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

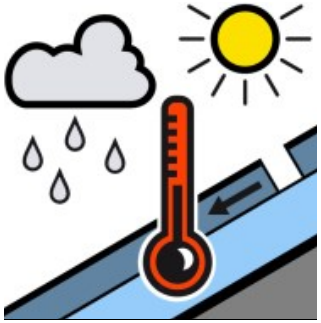
Terrain : topographie + végétation



Cumul de neige récente

Vent

Bilan thermique

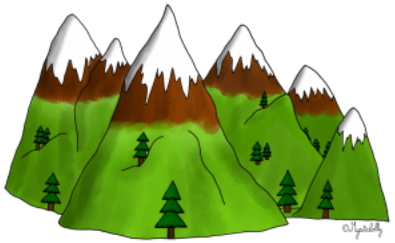


Stratigraphie

Rappels : aléa avalanche

Les avalanches : un aléa multi-factoriel

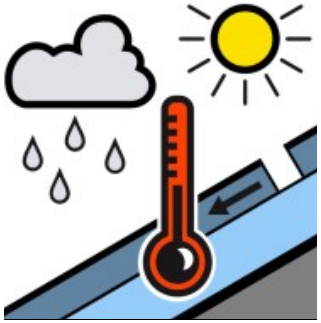
Terrain : topographie + végétation



Cumul de neige récente

Vent

Bilan thermique



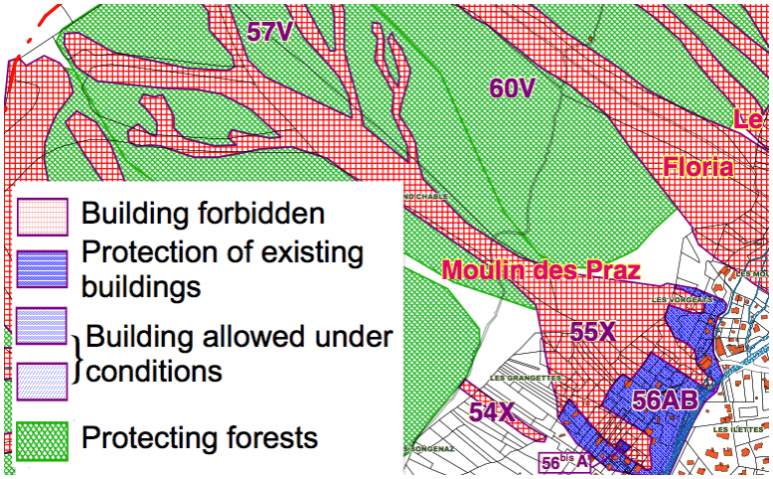
Stratigraphie

Un contrôle climatique intuitif mais complexe et difficile à établir

Rappels : enjeux

Les avalanches : des enjeux différenciés

Terrain controlé
(départ spontané)

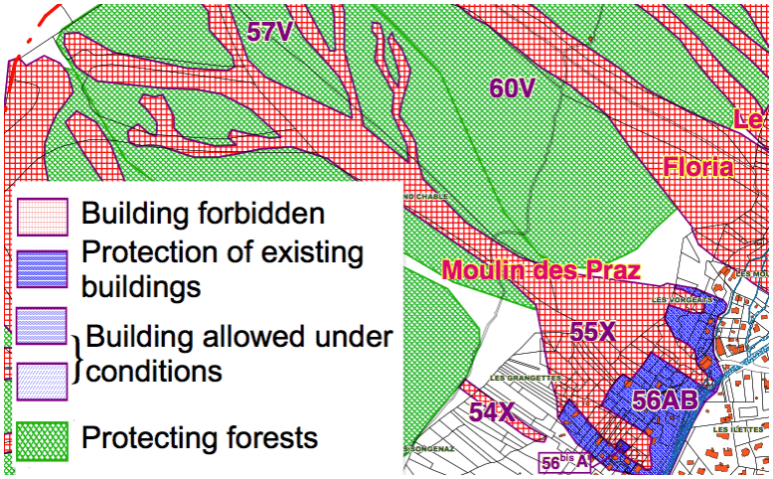


Zones urbanisées, routes, etc.

Rappels : enjeux

Les avalanches : des enjeux différenciés

Terrain controlé
(départ spontané)



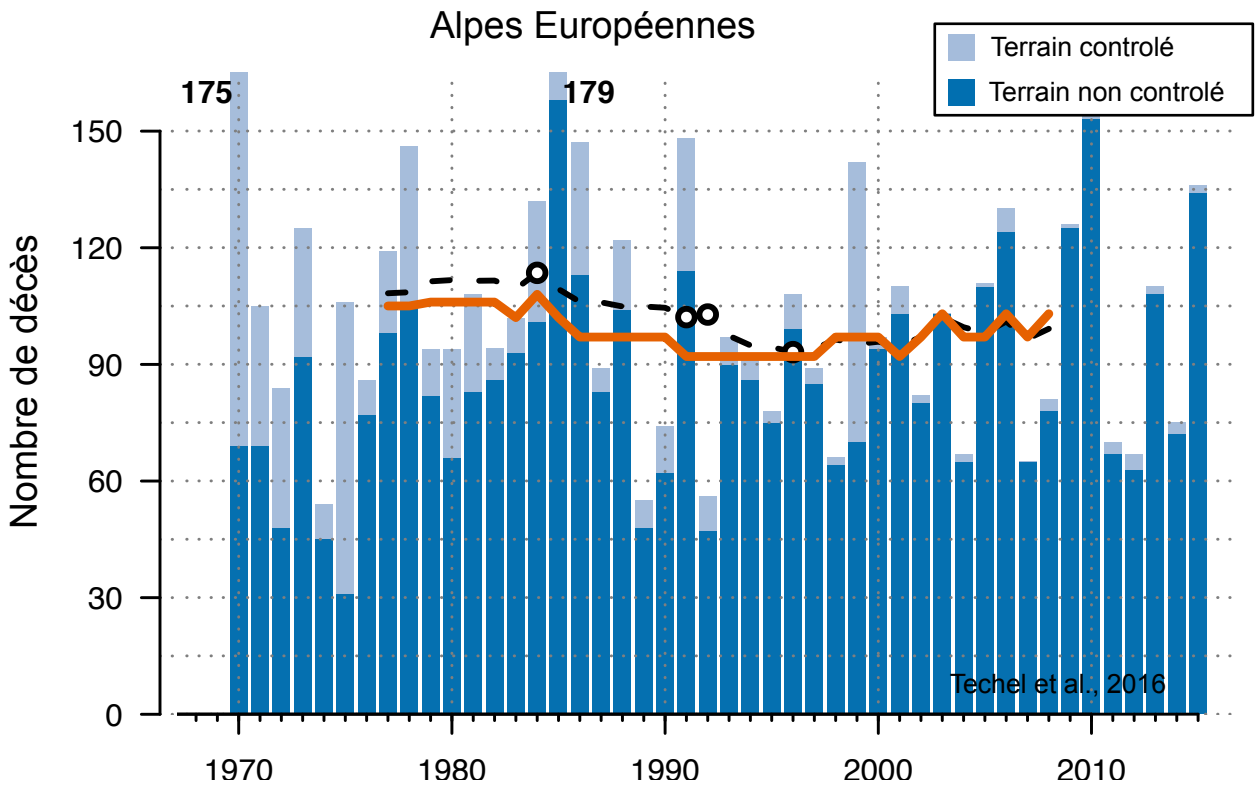
Zones urbanisées, routes, etc.

Terrain non controlé
(déclenchement provoqué)

Pratiquants de la montagne: ski de randonnée, etc.

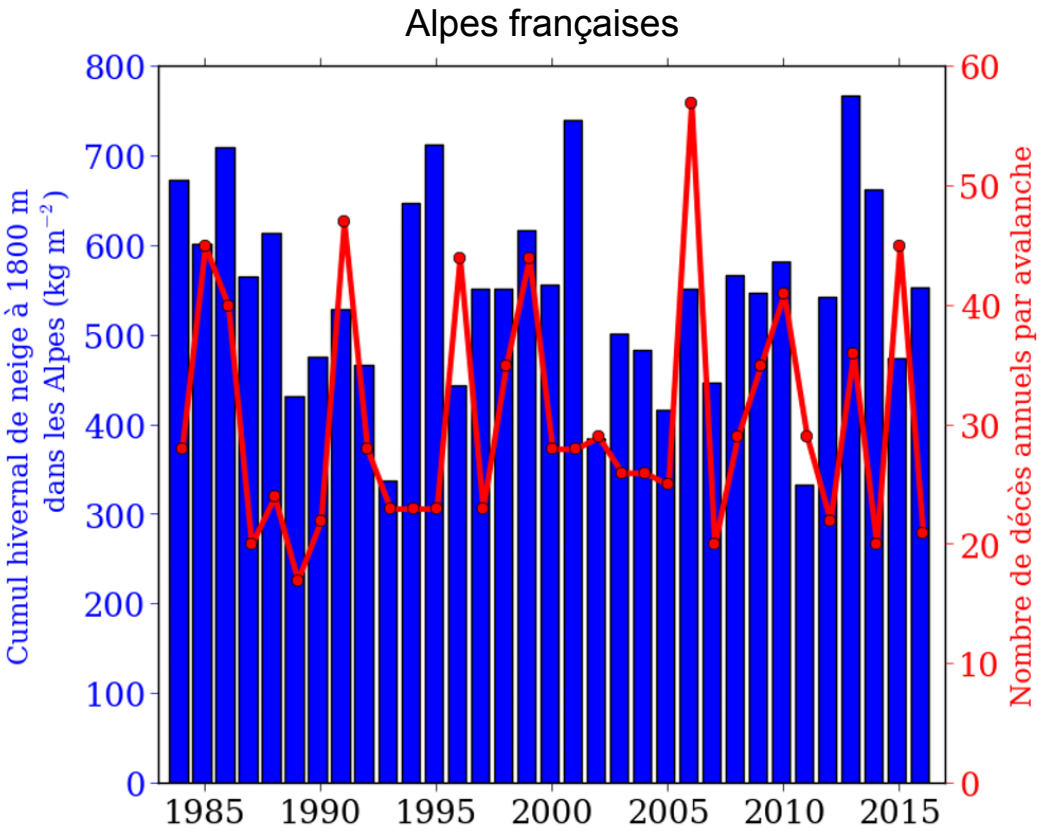
Rappels : enjeux

Les avalanches : des enjeux différenciés



Rappels : enjeux

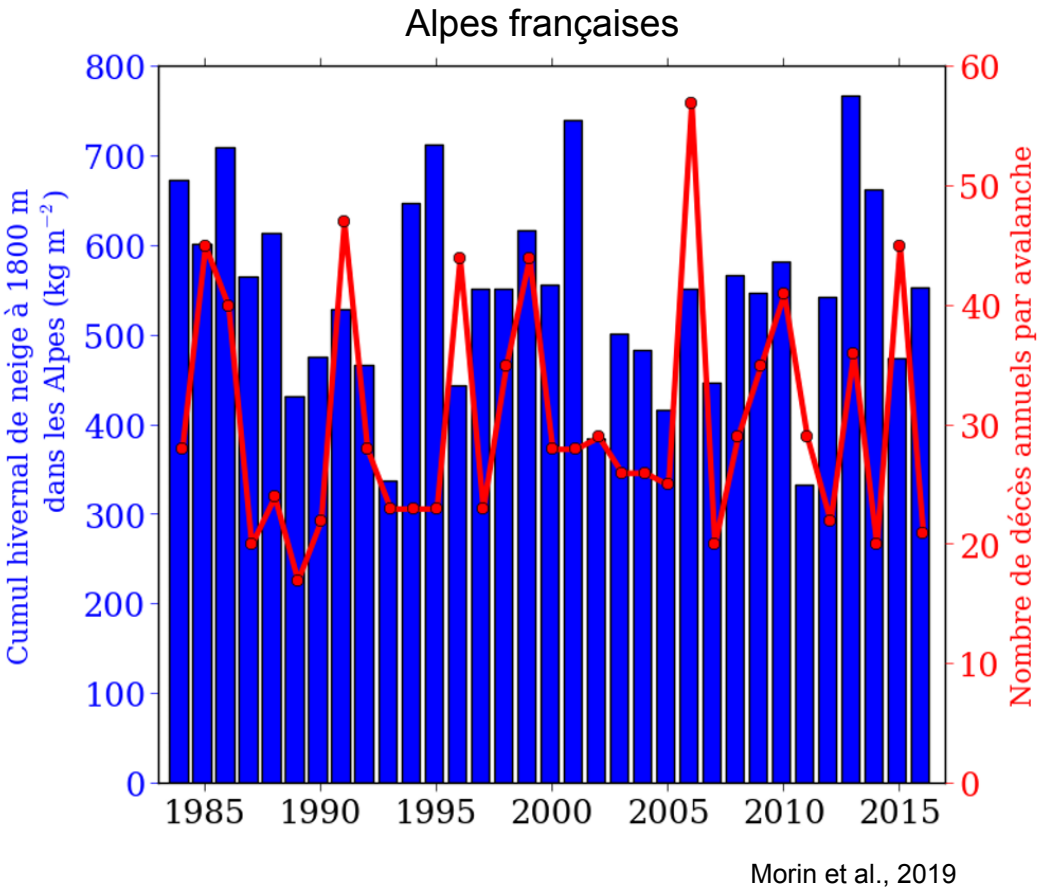
Terrain non controlé : des accidents liés aux pratiques



Morin et al., 2019

Rappels : enjeux

Terrain non controlé : des accidents liés aux pratiques



Morin et al., 2019

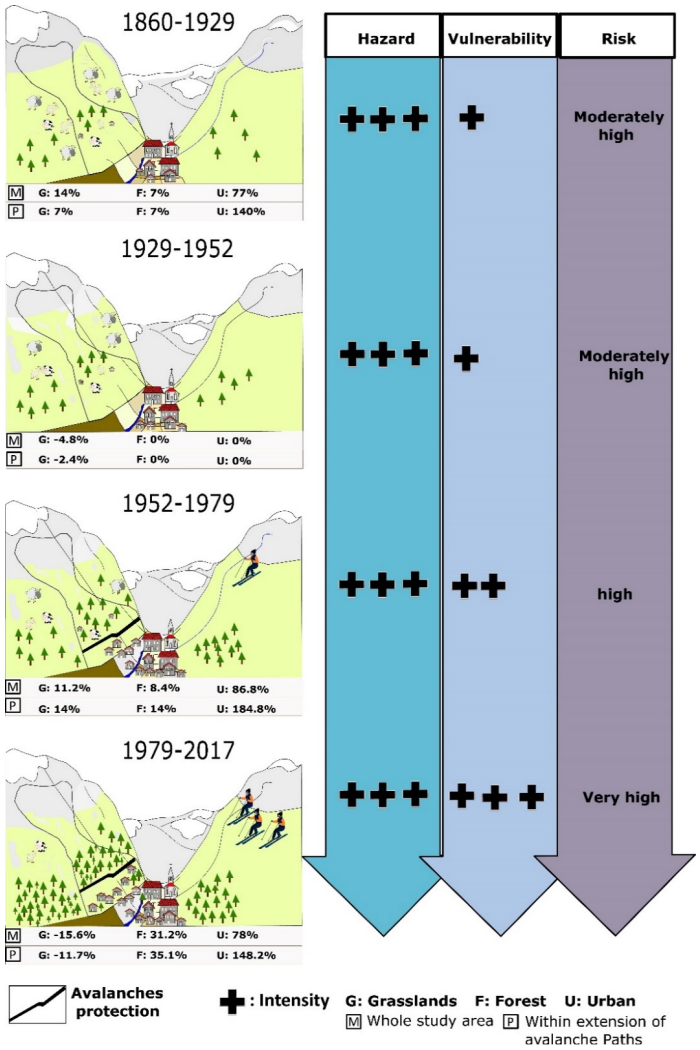
- Environ 30 décès / an en France depuis 1980 malgré explosion de la pratique
- Pas de corrélation entre enneigement moyen et décès en terrain non controlé.
- Accidentologie liée au comportement, secours, etc.
- Contrôle climatique difficile voire impossible à établir

Rappels : enjeux

Zgheib et al., 2020

Terrain controlé : une vulnérabilité en évolution

Exemple de la Haute-Maurienne



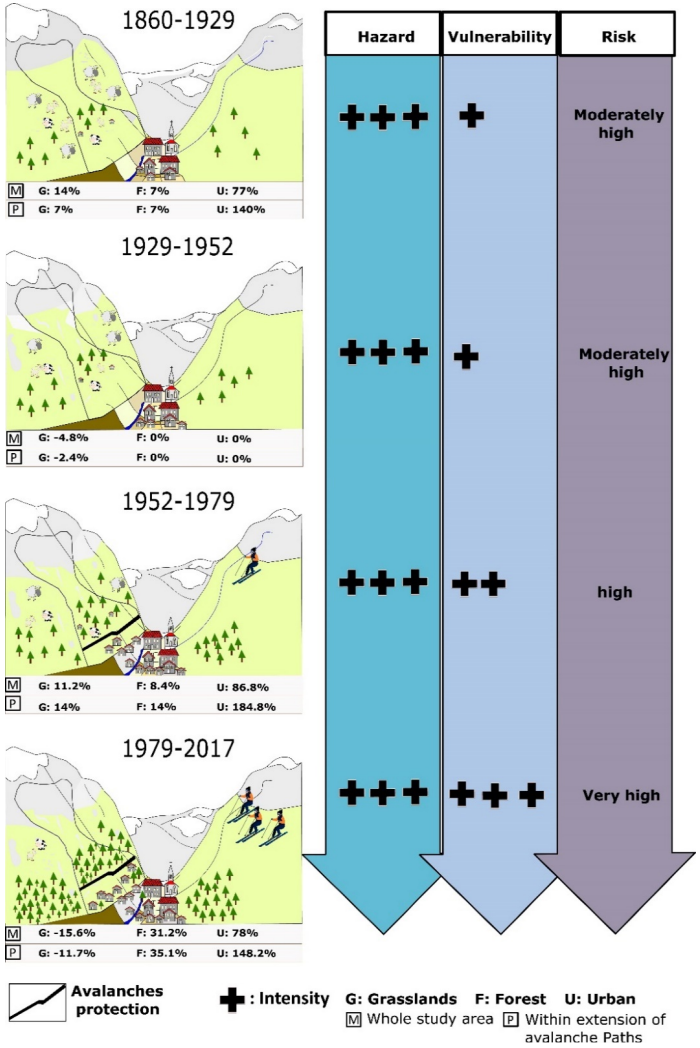
- Coût matériel direct ou indirect (e.g. protection, zonage) très important difficilement chiffrable
- Coût humain très variable (e.g. Hotel Rigopiano dans les Abruzzes <2000 m, 29 décès en 2017)

Rappels : enjeux

Zgheib et al., 2020

Terrain controlé : une vulnérabilité en évolution

Exemple de la Haute-Maurienne



- Coût matériel direct ou indirect (e.g. protection, zonage) très important difficilement chiffrable
- Coût humain très variable (e.g. Hotel Rigopiano dans les Abruzzes <2000 m, 29 décès en 2017)

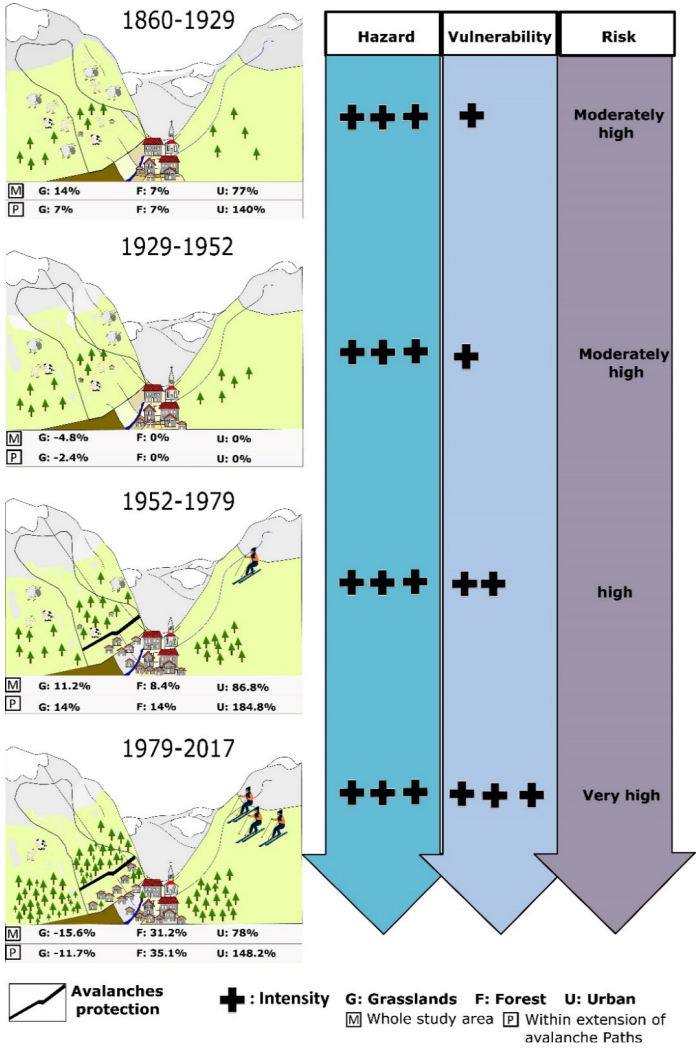
- Risque = aléa x vulnérabilité
- Vulnérabilité non constante dans les Alpes notamment avec le développement de stations de ski
- Re-forestation en cours mais insuffisante pour assurer une stabilisation du manteau neigeux dans les zones de départ des avalanches
- Futur ?

Rappels : enjeux

Zgheib et al., 2020

Terrain controlé : une vulnérabilité en évolution

Exemple de la Haute-Maurienne



- Coût matériel direct ou indirect (e.g. protection, zonage) très important difficilement chiffrable
- Coût humain très variable (e.g. Hotel Rigopiano dans les Abruzzes <2000 m, 29 décès en 2017)

- Risque = aléa x vulnérabilité
- Vulnérabilité non constante dans les Alpes notamment avec le développement de stations de ski
- Re-forestation en cours mais insuffisante pour assurer une stabilisation du manteau neigeux dans les zones de départ des avalanches
- Futur ?

Nous allons surtout évoquer ici l'évolution de l'aléa avalanche avec départ spontané

Plan

- Rappels
- **Observations du passé**
- Projections du futur

Observations du passé dans les Alpes

L'enquête permanente avalanche (EPA) : une base de données unique

Commune : 38073 - CHANTELOUVE

N° site : 013 Nom actuel du site LES PEYROUSES Nombre total d'événements : 47

Historique : Filiations entre les sites définies lors du toilettage du 09/02/2006 :
Site 38073 013 (id 2019) --> site 38073 013 (id 11709)

Site	Dates		Altitudes				Dépôt			Caractéristiques						Météo 3 jours précédents					Météo 4h précédentes						Causes				Vic-times			Dégâts ou lieux atteints							Obs	
numro id	date1	date2	altitude départ	altitude arrivée	versant opposé	zone plane	longeur (m)	largeur (m)	hauteur (m)	A - type départ	B - sol visible ?	C - humidité départ	D - couloir / versant	E - aérosol ?	F - neige dépôt	hauteur de neige	vent fort	direction vent	redoux	pluie	neige	pluie	vent fort	ciel clair	nuages	brouillard	naturelle	involontaire	artificielle	inconnue	néant	blessés	morts	néant	construction	poteaux	forêt	routes	cours d'eau	visibilité	alerte bd event
n°013 id 11709	15/01/18 12:05	22/01/18 12:05	?	1100			100	15	1.5	9	9	9	2	9	9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B S	N
Date du constat : 22/01/2018.																																								
n°013 id 11709	04/01/18 08:00	06/01/18 10:00	?	1120			180	30	2.0	9	9	9	2	2	2	?		?	X	X	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B S	N
Date du constat : 09/01/2018.																																								
n°013 id 11709	11/12/17 10:33	18/12/17 15:00	?	1150			80	15	1.5	9	9	9	2	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B	N
Date du constat : 18/12/2017.																																								

www.avalanches.fr

Observations du passé dans les Alpes

L'enquête permanente avalanche (EPA) : une base de données unique

- Environ 4000 couloirs suivis en France, parfois depuis plus d'un siècle
- Méthodologie codifiée la plus systématique possible
- Information sur l'occurence et aussi sur la zone de départ, le volume d'écoulement, l'altitude d'arrêt, le type de neige, etc.
- Caractérisation de l'activité avalancheuse pertinente **en terrain contrôlé** (départ spontané dans couloirs)

Commune : 38073 - CHANTELOUVE
N° site : 013 Nom actuel du site LES PEYROUSES Nombre total d'événements : 47

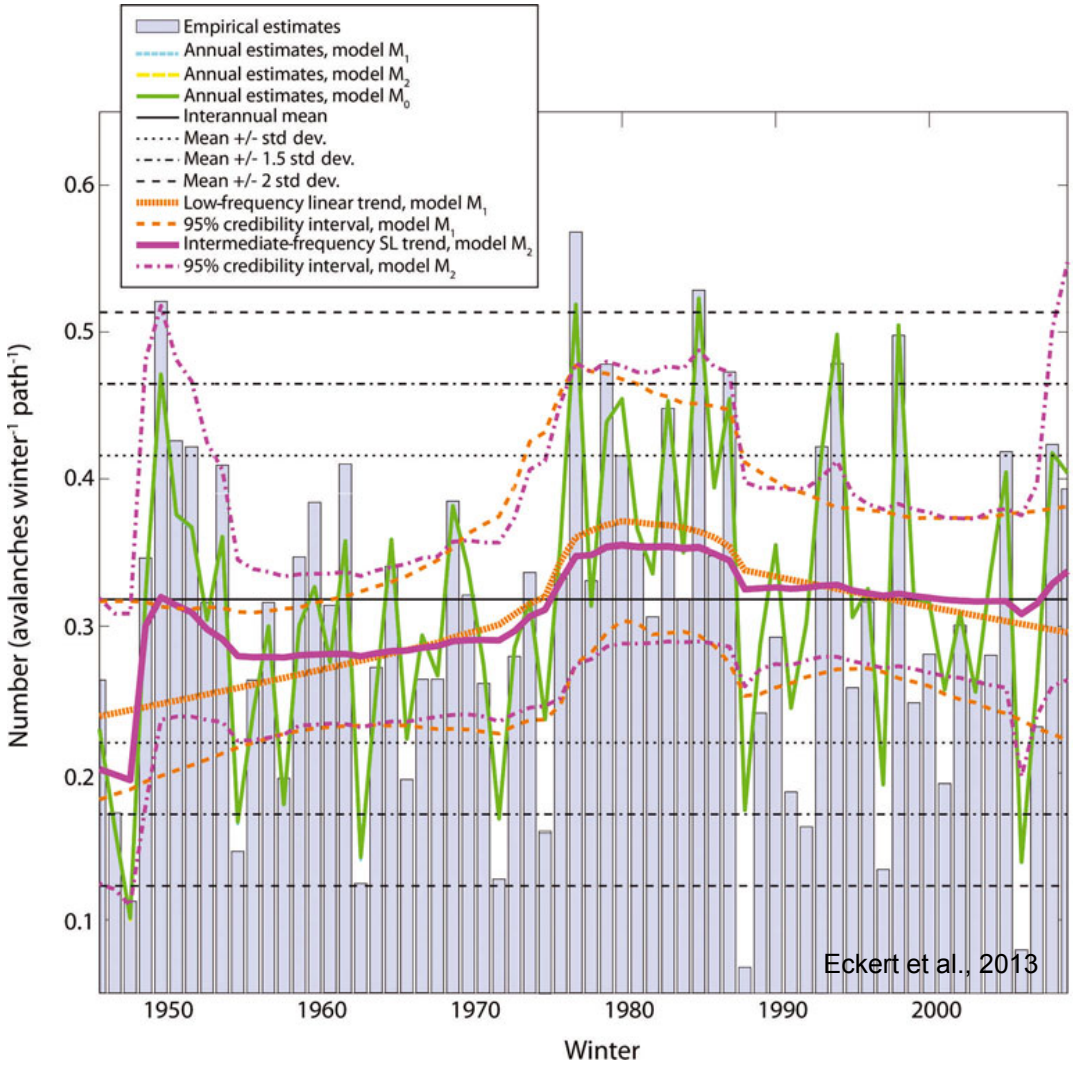
Historique : Filiations entre les sites définies lors du toilettage du 09/02/2006 :
Site 38073 013 (id 2019) --> site 38073 013 (id 11709)

Site	Dates		Altitudes				Dépôt			Caractéristiques						Météo 3 jours précédents					Météo 4h précédentes							Causes				Vic-times			Dégâts ou lieux atteints							Obs	
numro id	date1	date2	altitude départ	altitude arrivée	versant opposé	zone plane	longeur (m)	largeur (m)	hauteur (m)	A - type départ	B - sol visible ?	C - humidité départ	D - couloir / versant	E - aérosol ?	F - neige dépôt	hauteur de neige	vent fort	direction vent	redoux	pluie	neige	pluie	vent fort	ciel clair	nuages	brouillard	naturelle	involontaire	artificielle	inconnue	néant	blessés	morts	néant	construction	poteaux	forêt	routes	cours d'eau	visibilité	alerte bd event
n°013 id 11709	15/01/18 12:05	22/01/18 12:05	?	1100			100	15	1.5	9	9	9	2	9	9	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B S	N
Date du constat : 22/01/2018.																																									
n°013 id 11709	04/01/18 08:00	06/01/18 10:00	?	1120			180	30	2.0	9	9	9	2	2	2	?		?	X	X	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B S	N
Date du constat : 09/01/2018.																																									
n°013 id 11709	11/12/17 10:33	18/12/17 15:00	?	1150			80	15	1.5	9	9	9	2	2	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	X				X			X						B	N
Date du constat : 18/12/2017.																																									

www.avalanches.fr

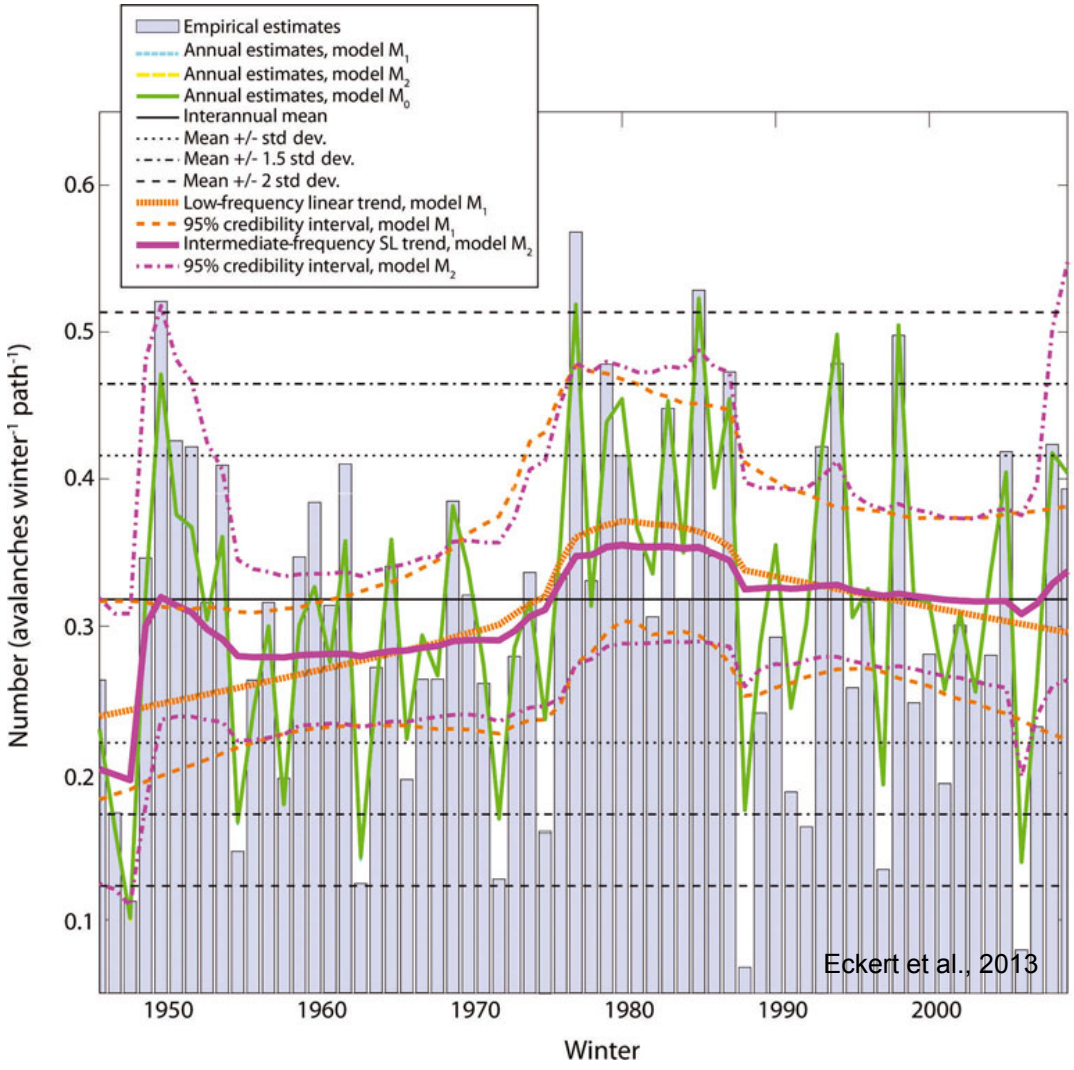
Observations du passé dans les Alpes

Nombre d'avalanches dans les Alpes françaises (EPA)



Observations du passé dans les Alpes

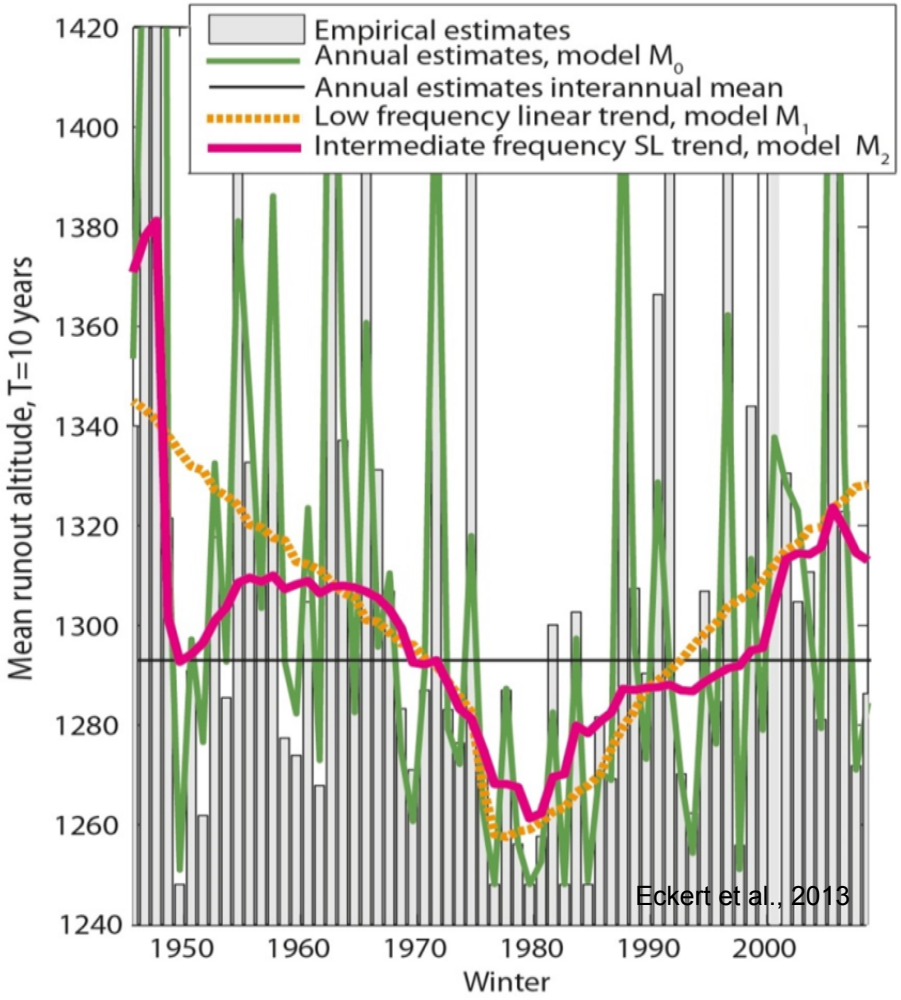
Nombre d'avalanches dans les Alpes françaises (EPA)



- Pas de tendance générale évidente
- Pic d'activité autour de 1980 correspondant à des hivers plus enneigés et plus froids
- Tendance à la baisse depuis les années 1980
- A mettre à jour sur 2010-2020

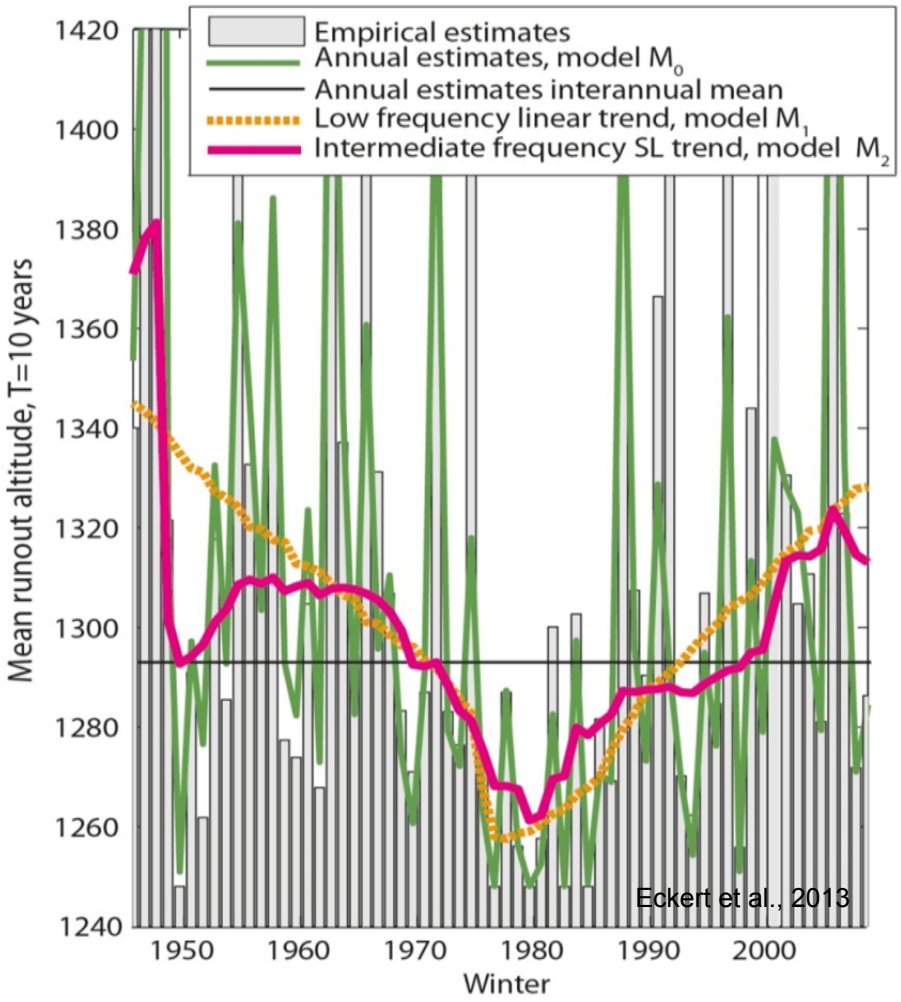
Observations du passé dans les Alpes

Altitude d'arrêt de l'écoulement (EPA)



Observations du passé dans les Alpes

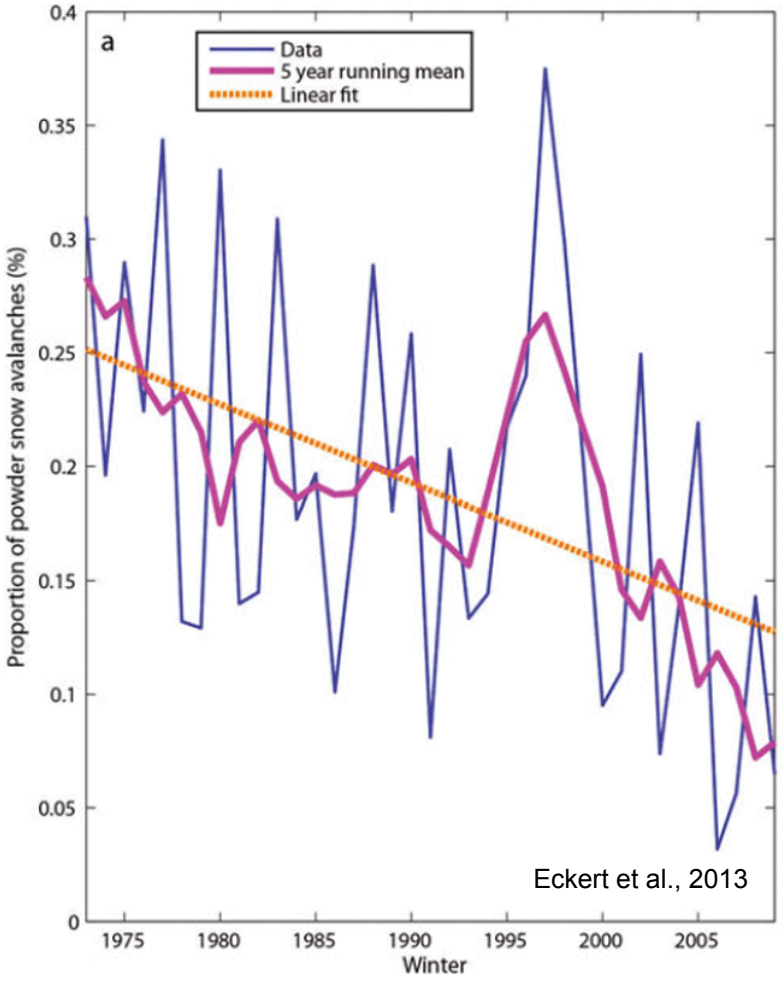
Altitude d'arrêt de l'écoulement (EPA)



- Avalanche descendant plus bas autour de 1980, correspondant à des hivers plus enneigés et plus froids
- Depuis 1980, remontée de l'altitude d'arrêt, notamment marquée pour les « grosses » avalanches (T=10 ans) de 80 m
- Se traduit par une probabilité d'atteindre le bas de la vallée (enjeux) plus faible.

Observations du passé dans les Alpes

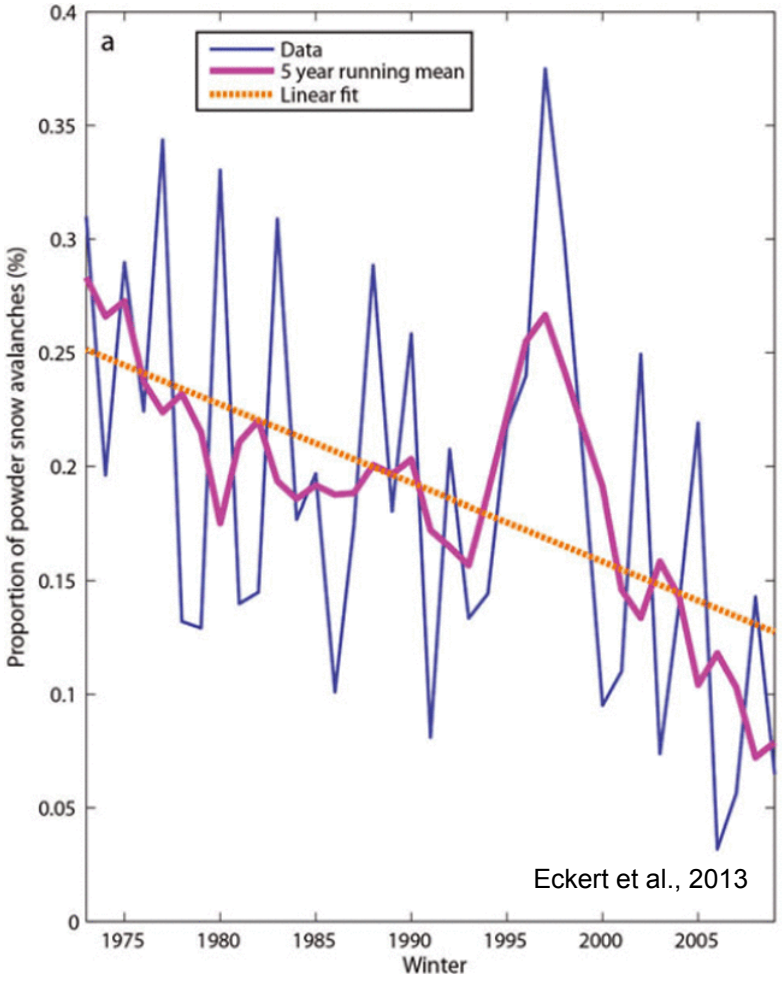
Nature de l'écoulement (EPA)



Eckert et al., 2013

Observations du passé dans les Alpes

Nature de l'écoulement (EPA)

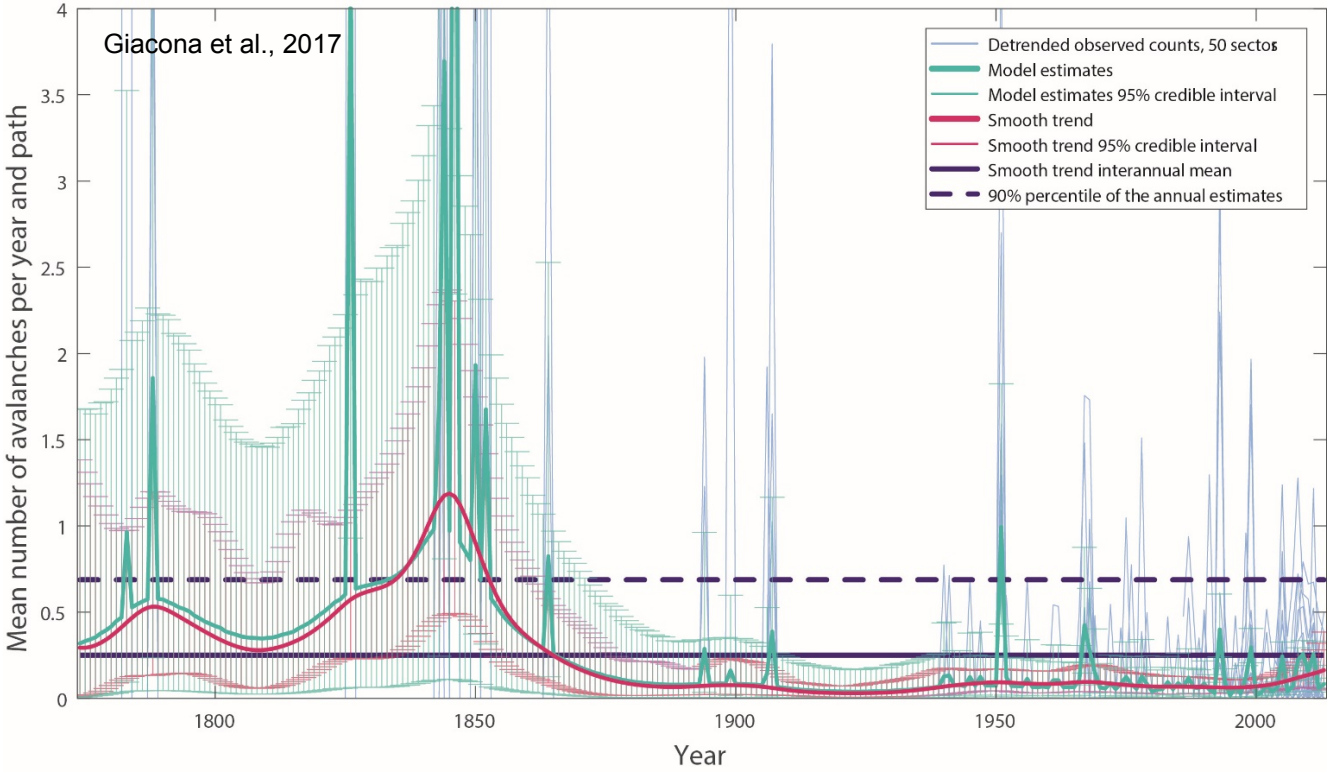


- De moins en moins d'écoulements présentant un aérosol
- De la neige plus humide
- Impacte la rhéologie de la neige et potentiellement sa trajectoire (Naaim et al., 2013)

Eckert et al., 2013

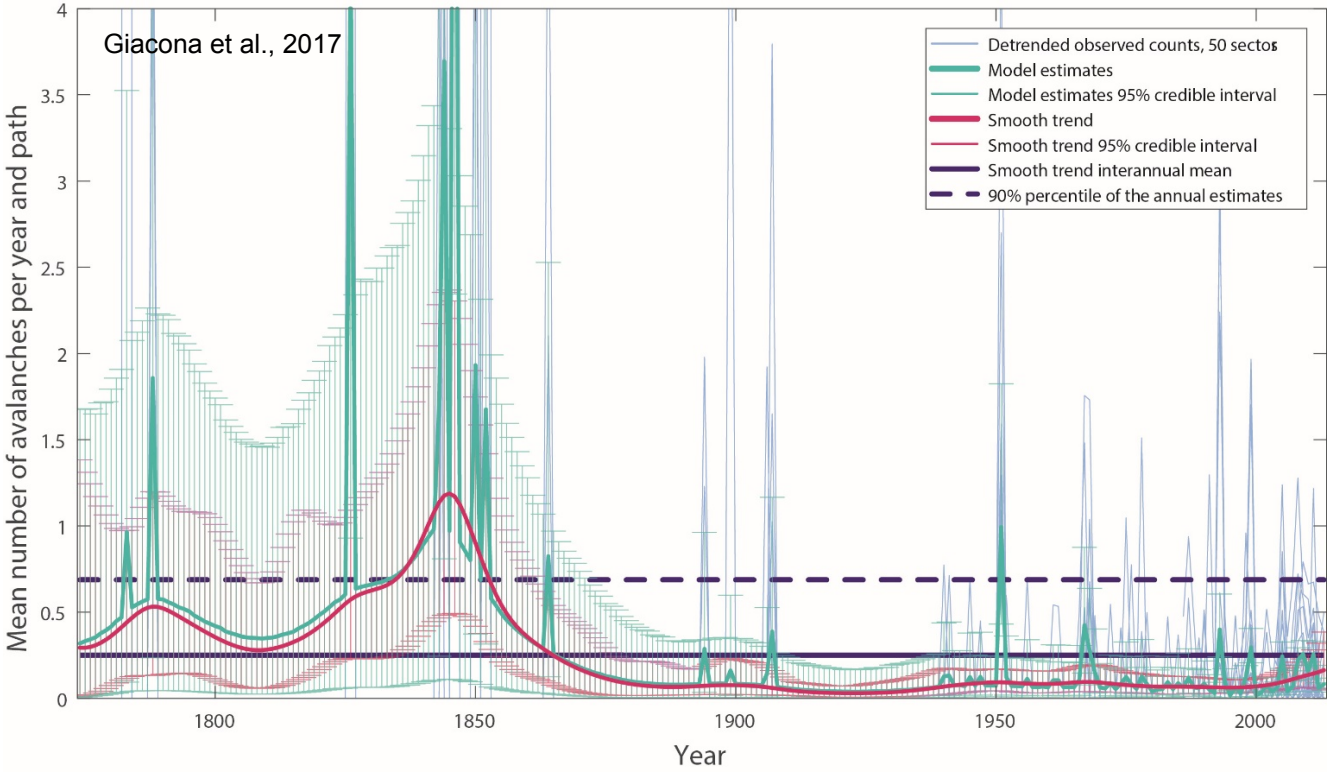
Observations du passé : ailleurs

L'activité avalancheuse à très basse altitude et sur le long terme les Vosges 1750-2010



Observations du passé : ailleurs

L'activité avalancheuse à très basse altitude et sur le long terme les Vosges 1750-2010

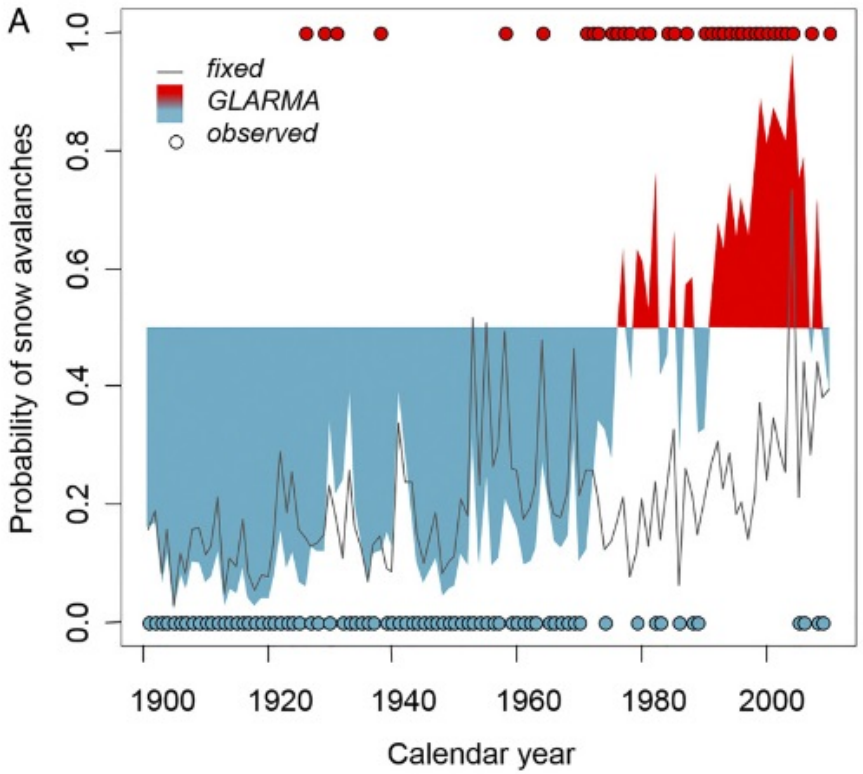


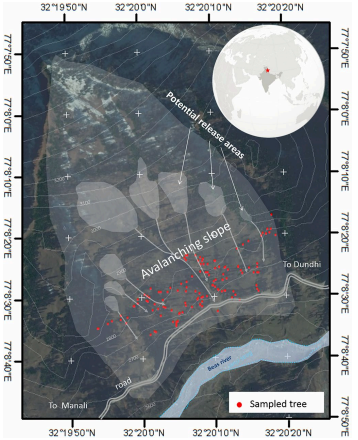
- Source de données : archive hétérogène qui nécessite traitement avancé
- **Diminution très importante** de l'activité avalancheuse vers 1860 (fin du petit âge glaciaire)

Observations du passé : ailleurs

L'activité avalancheuse à haute altitude et sur le long terme Himalaya 1900-2020

Ballesteros-Canovas et al., 2018

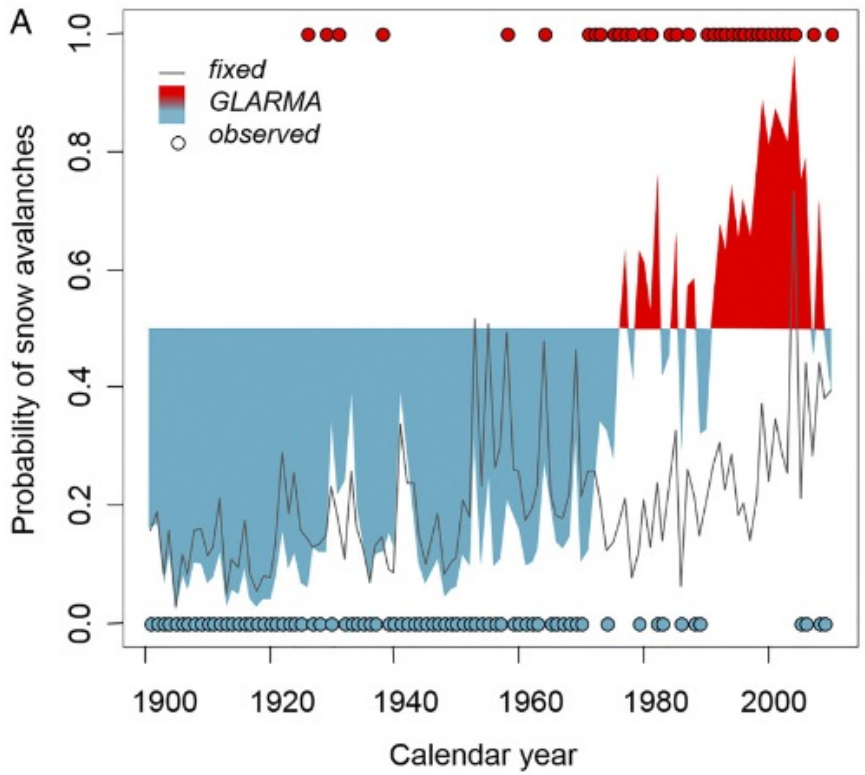


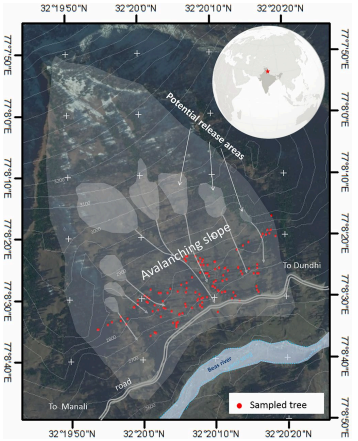


Observations du passé : ailleurs

L'activité avalancheuse à haute altitude et sur le long terme Himalaya 1900-2020

Ballesteros-Canovas et al., 2018

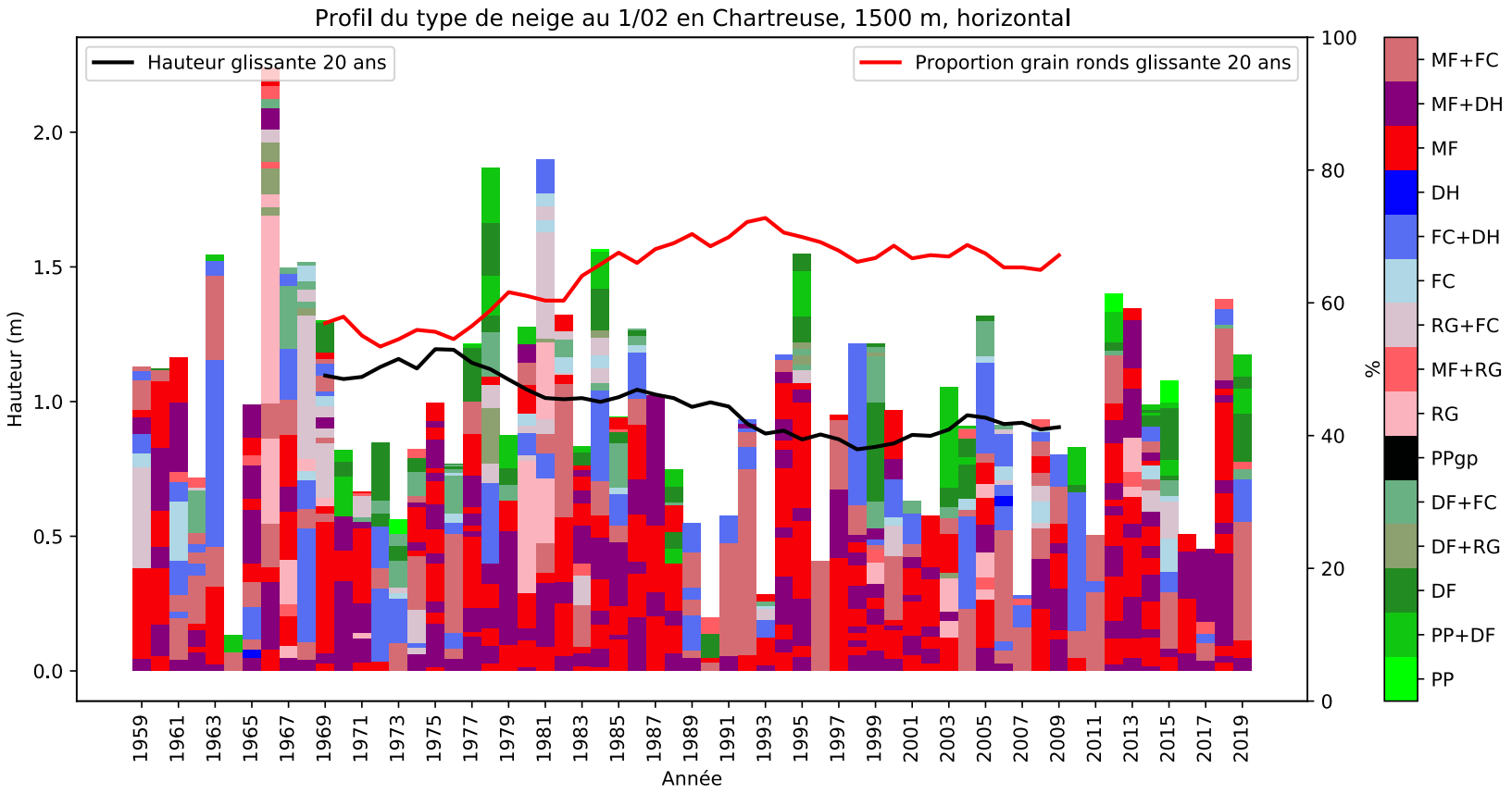




- Données : cernes d'arbre dans l'Himalaya (> 3000 m)
- **Forte augmentation** depuis 1975
- Induite par les températures en hausse et l'augmentation d'avalanches de neige humide

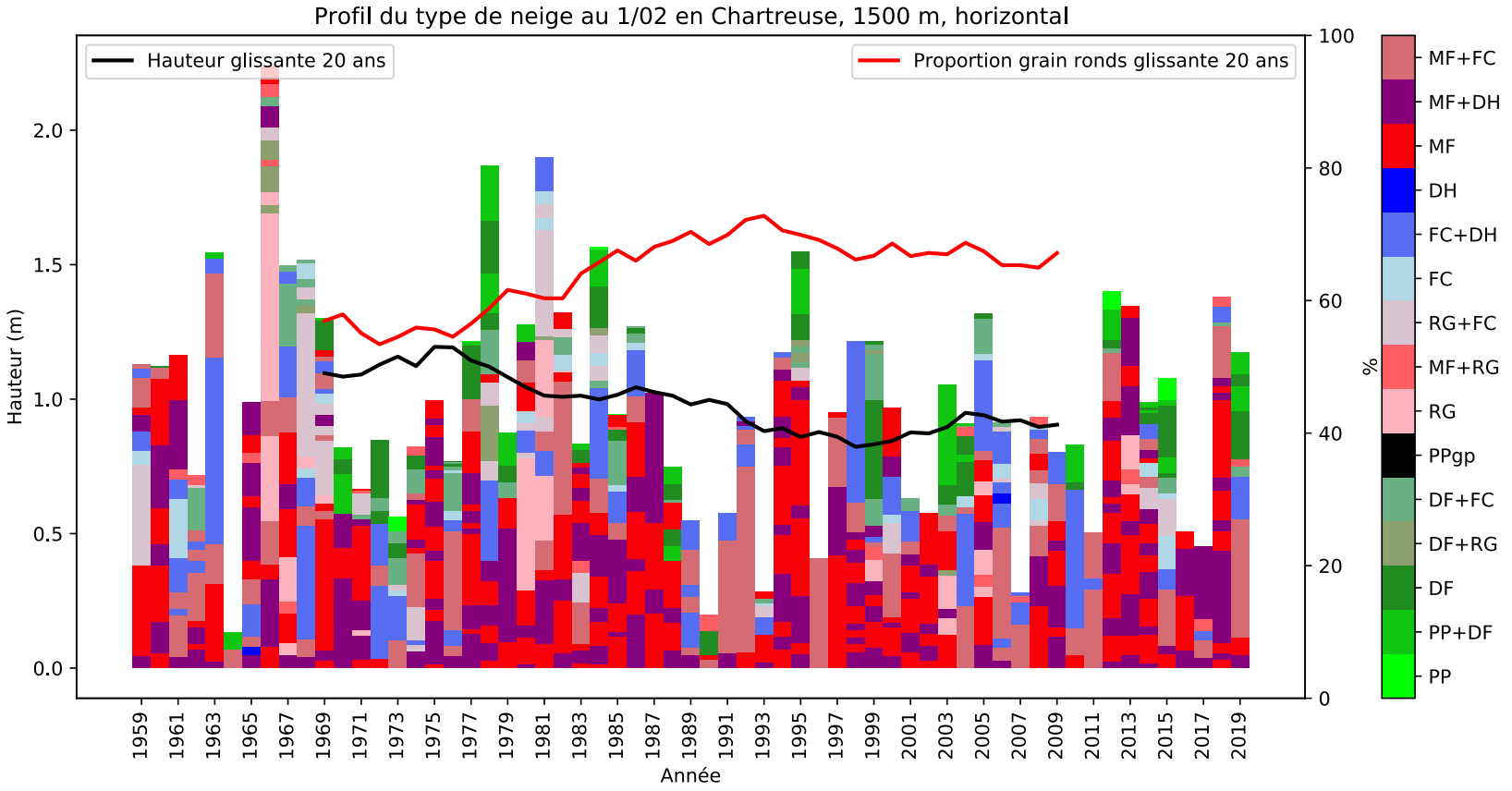
Pseudo-observations nivologiques

Réanalyse nivo-météorologique depuis 1958



Pseudo-observations nivologiques

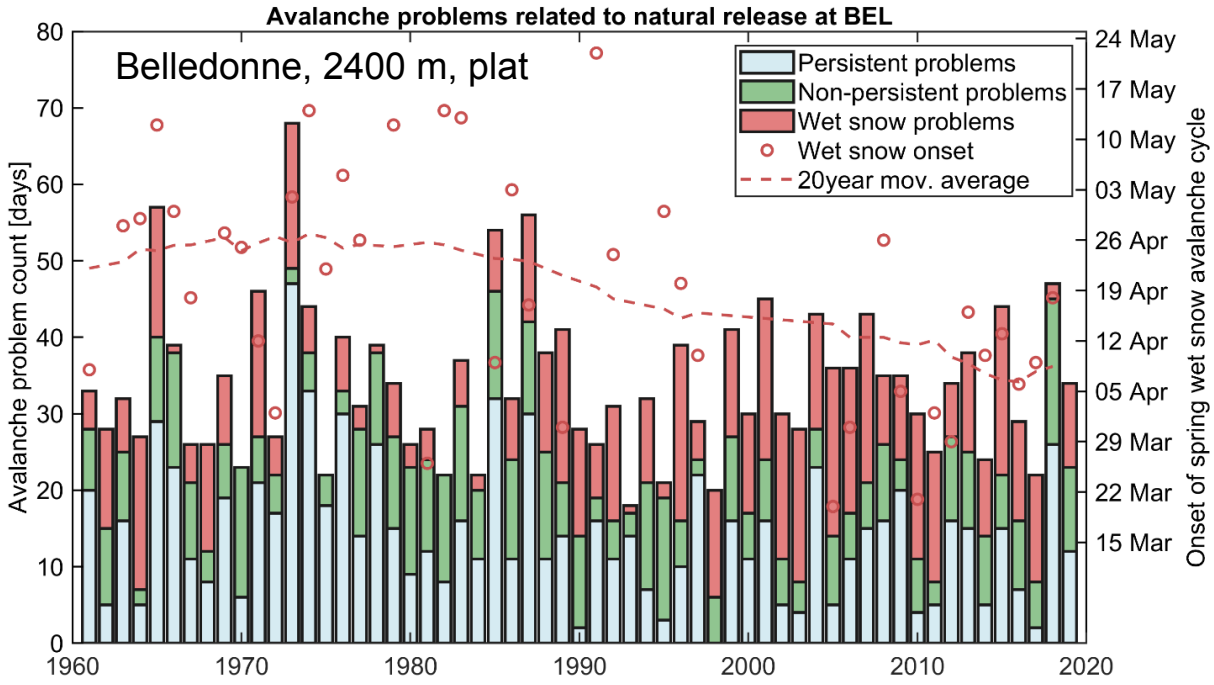
Réanalyse nivo-météorologique depuis 1958

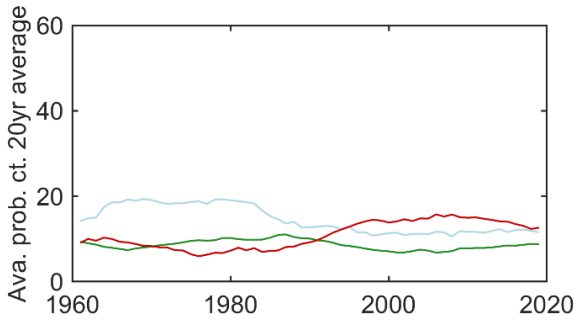


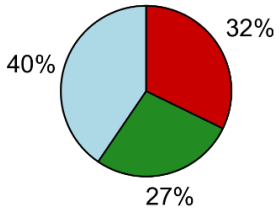
- Estimation du manteau neigeux dans le passé.
- Permet d'analyser le lien aléa - climat

Pseudo-observations nivologiques

Réanalyse nivo-météorologique depuis 1958







Reuter et al., 2020 + ongoing

- Avalanches liées à la présence de neige humide environ 15 jours plus tôt par rapport 1960-1990 et en proportion plus grande

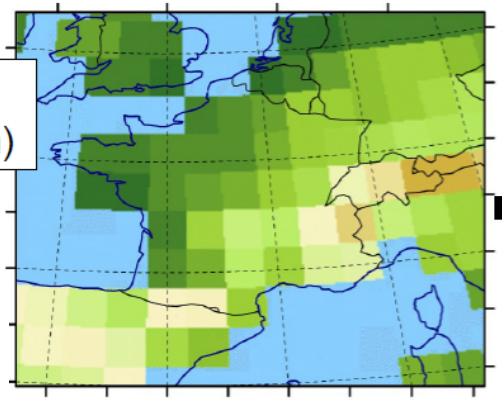
Plan

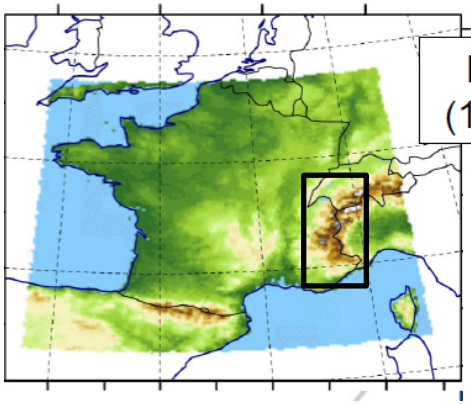
- Rappels
- Observations du passé
- **Projections du futur**

Projections du futur

Projections météorologiques adaptées à la montagne

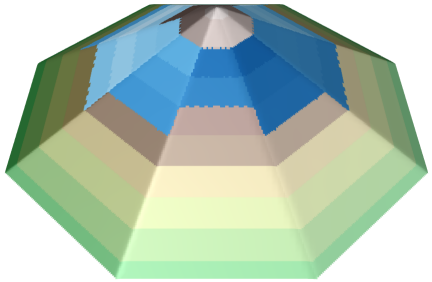
GCM
(150 km)





RCM
(12 km)

SAFRAN:
Altitude, aspect, massif



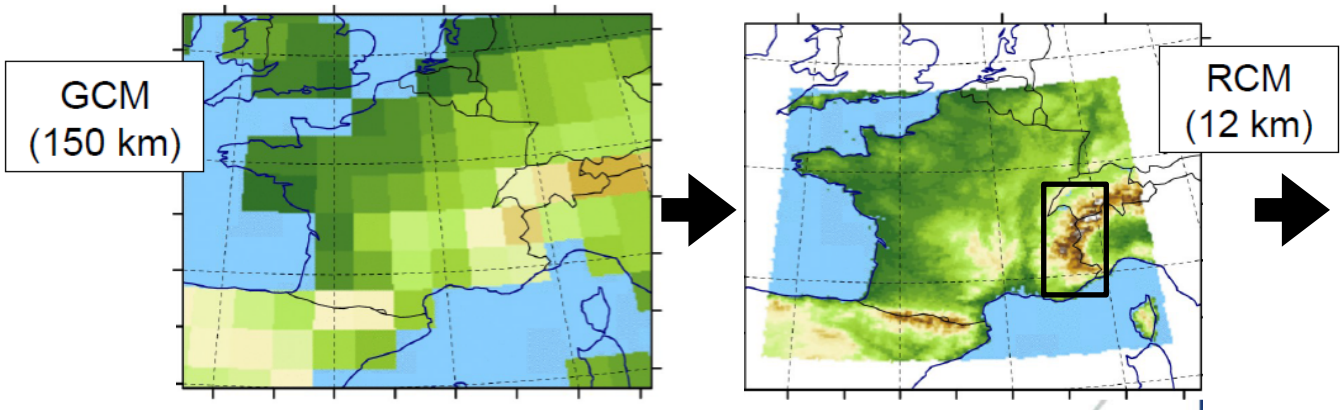
Modèle climatique global

Modèle climatique régional

Ajustement statistique sur
domaine adapté au relief

Projections du futur

Projections météorologiques adaptées à la montagne



Modèle climatique global

Modèle climatique régional

Ajustement statistique sur domaine adapté au relief

- Cadre ensembliste pour prendre en compte l'incertitude liée:
  - au scénario d'émission de GES
  - au modèle climatique global
  - au modèle climatique régional
  - au modèle nivologique

Projections du futur

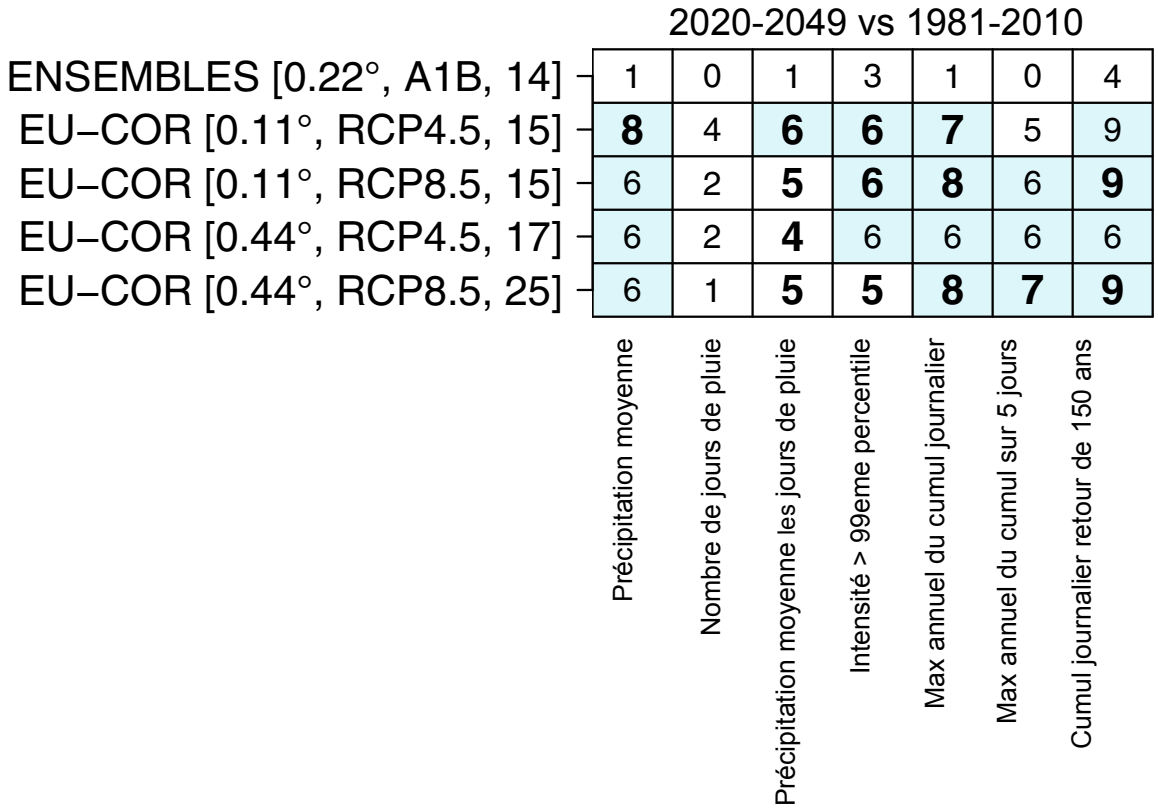
Rajczak and Schär (2017)

Précipitations hivernales Alpes (Décembre- Février)

Projections du futur

Rajczak and Schär (2017)

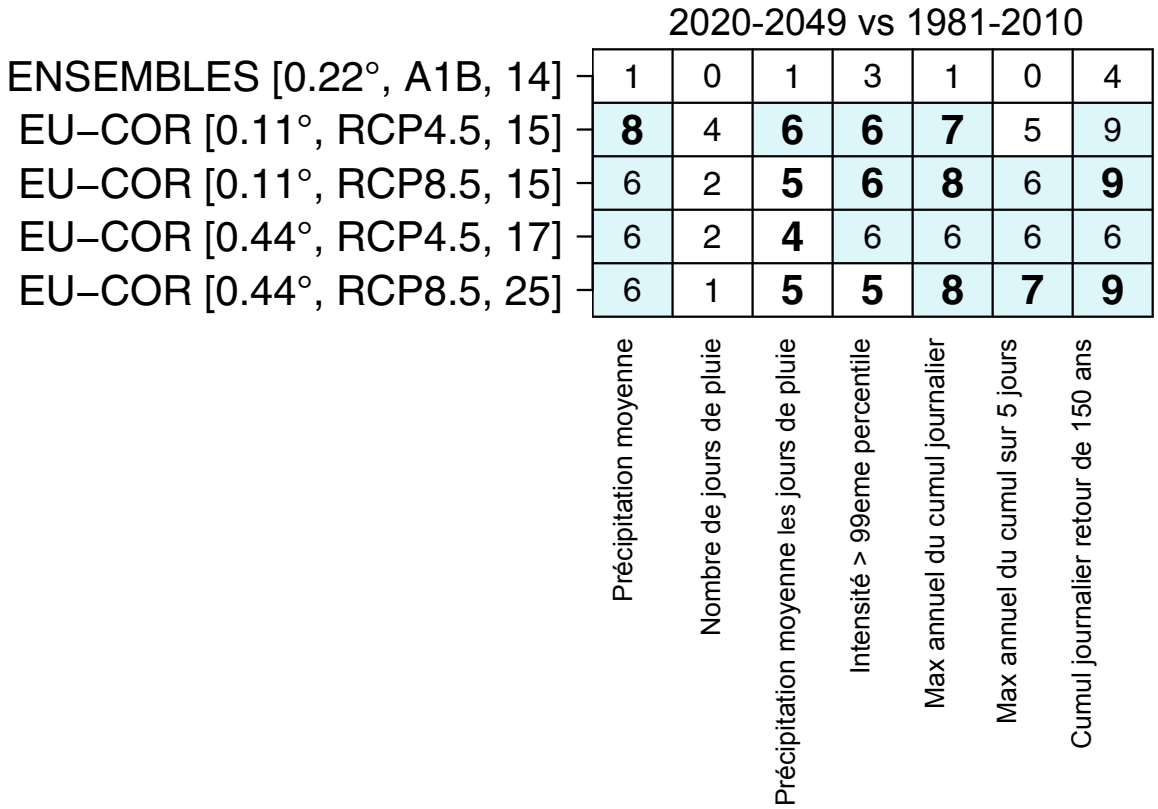
Précipitations hivernales Alpes (Décembre- Février)



Projections du futur

Rajczak and Schär (2017)

Précipitations hivernales Alpes (Décembre- Février)

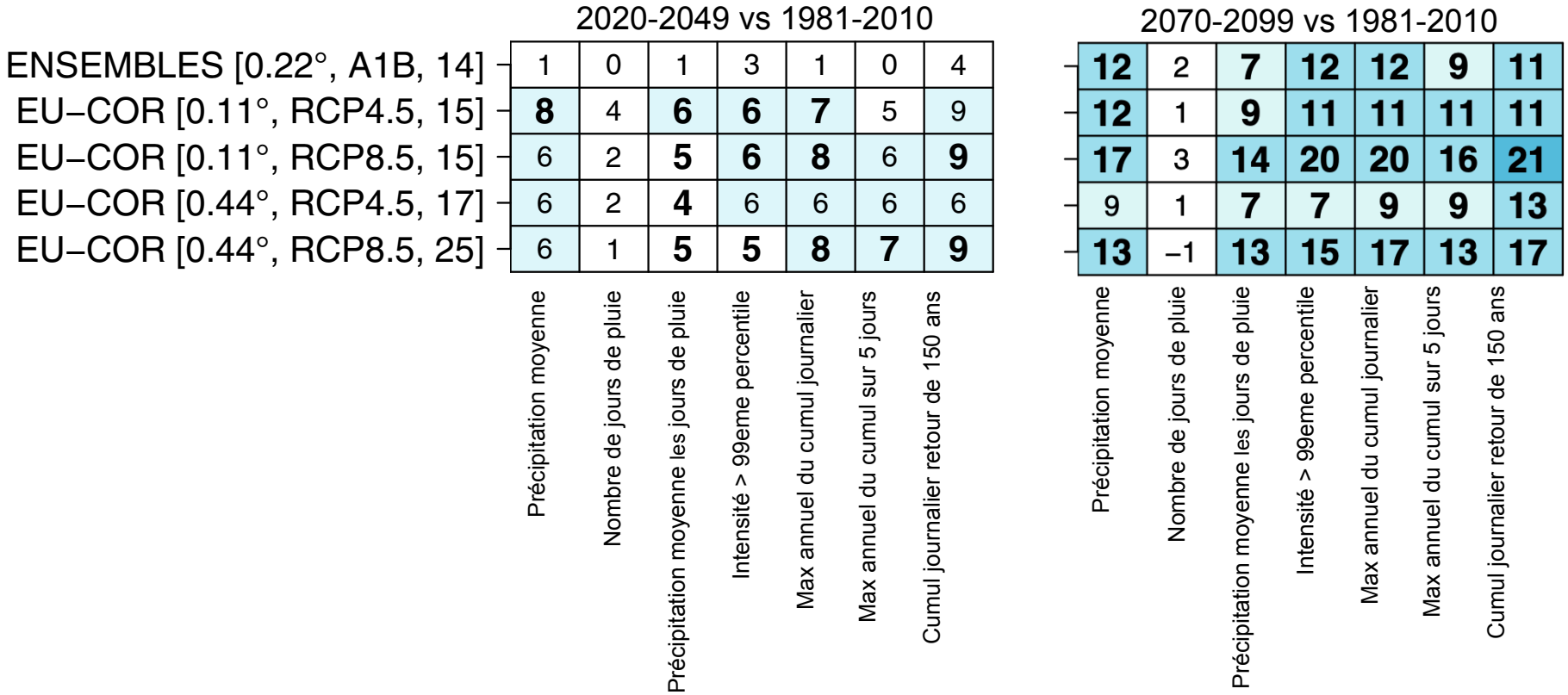


- En milieu de siècle, hausse sensible des précipitations hivernales (dont extrêmes), sans impact du scénario

Projections du futur

Rajczak and Schär (2017)

Précipitations hivernales Alpes (Décembre- Février)

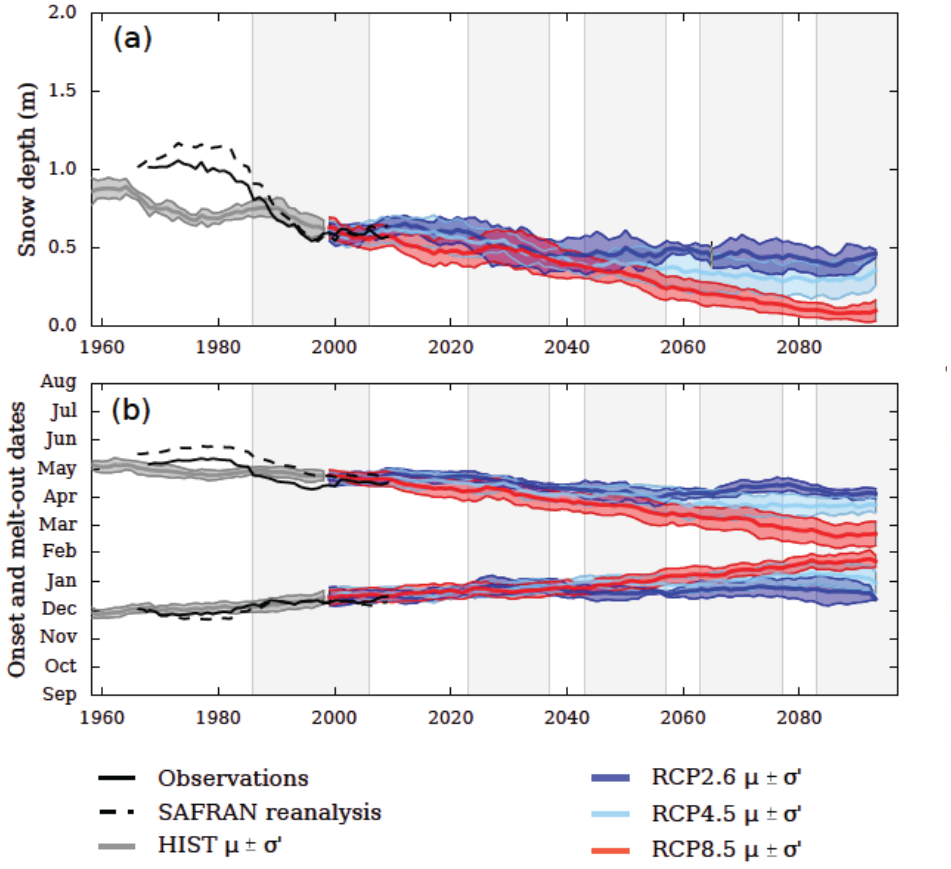


- En milieu de siècle, hausse sensible des précipitations hivernales (dont extrêmes), sans impact du scénario
- En fin de siècle, renforcement de la hausse des précipitations hivernales (dont extrêmes) avec une distinction RCP4.5 / 8.5

Projections du futur

Projections nivo-météorologiques

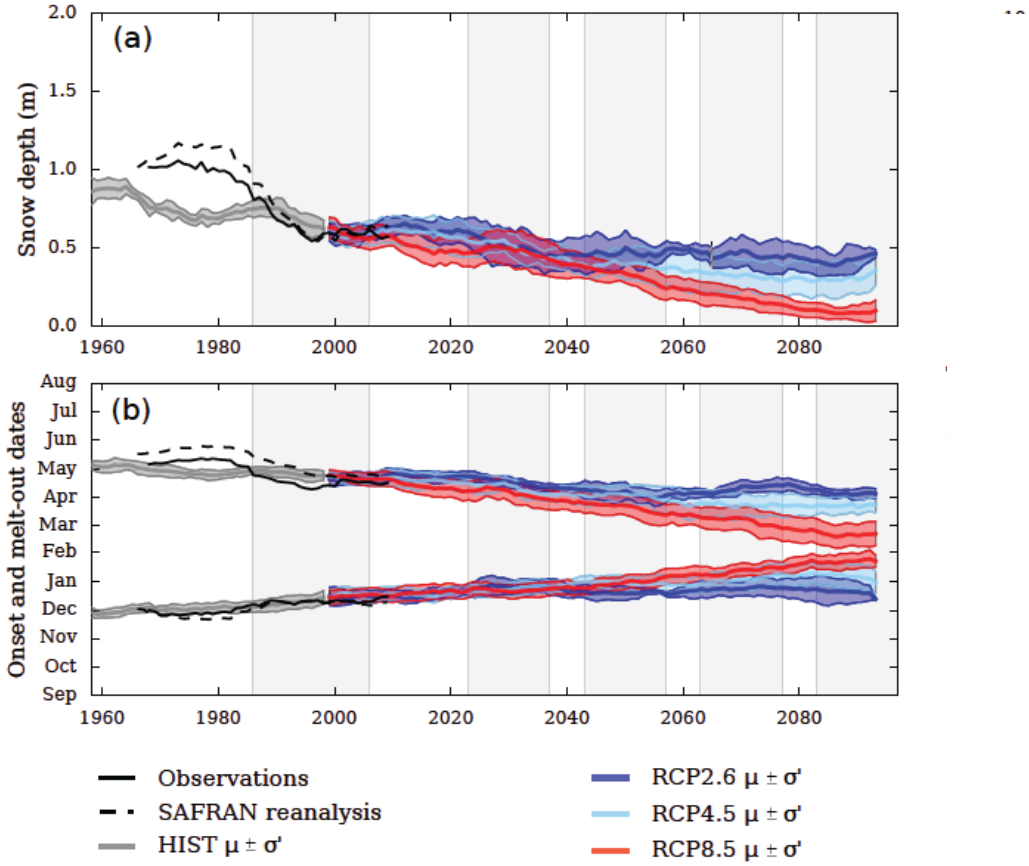
Chartreuse, 1500 m, à plat



Projections du futur

Projections nivo-météorologiques

Chartreuse, 1500 m, à plat

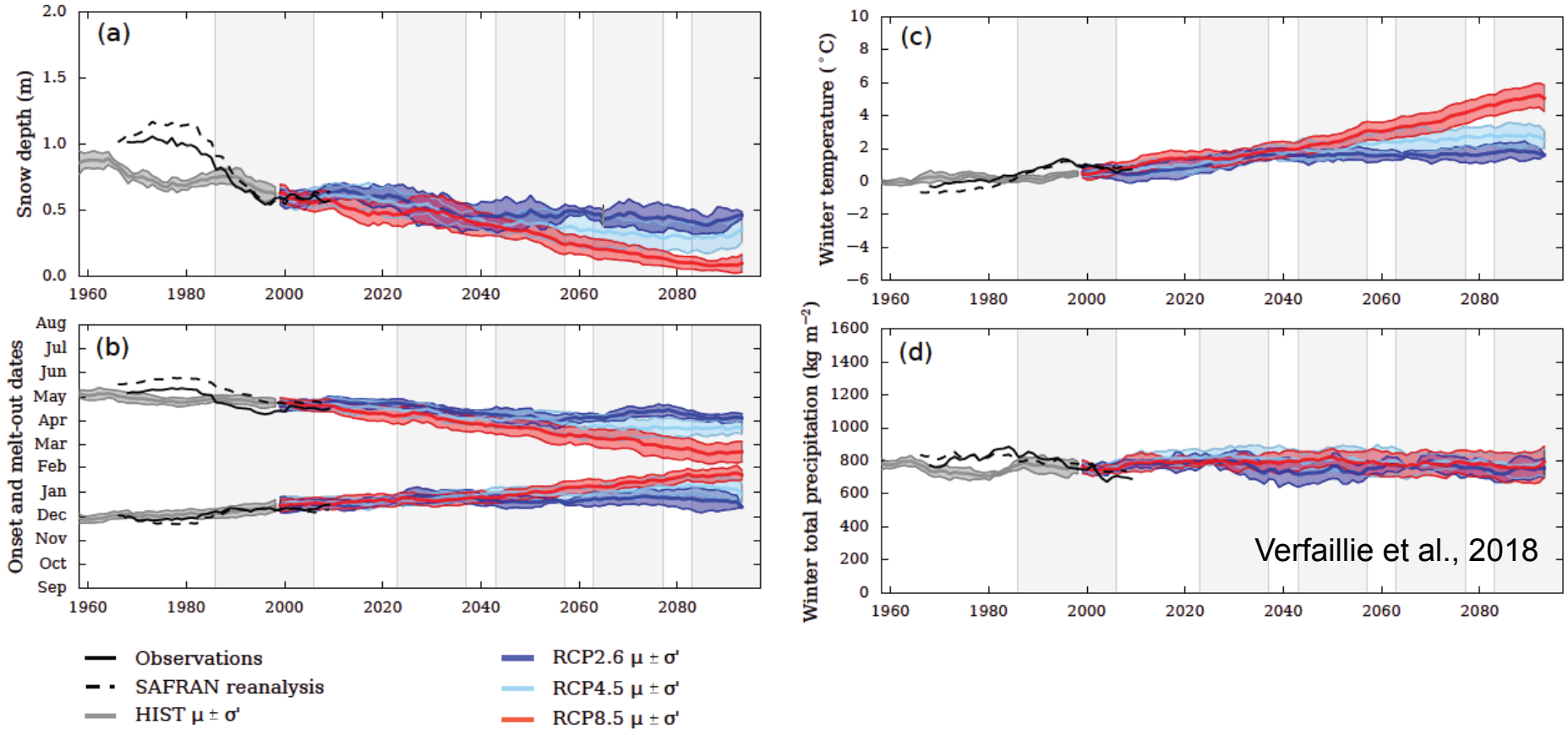


- Moins de neige, moins longtemps

Projections du futur

Projections nivo-météorologiques

Chartreuse, 1500 m, à plat

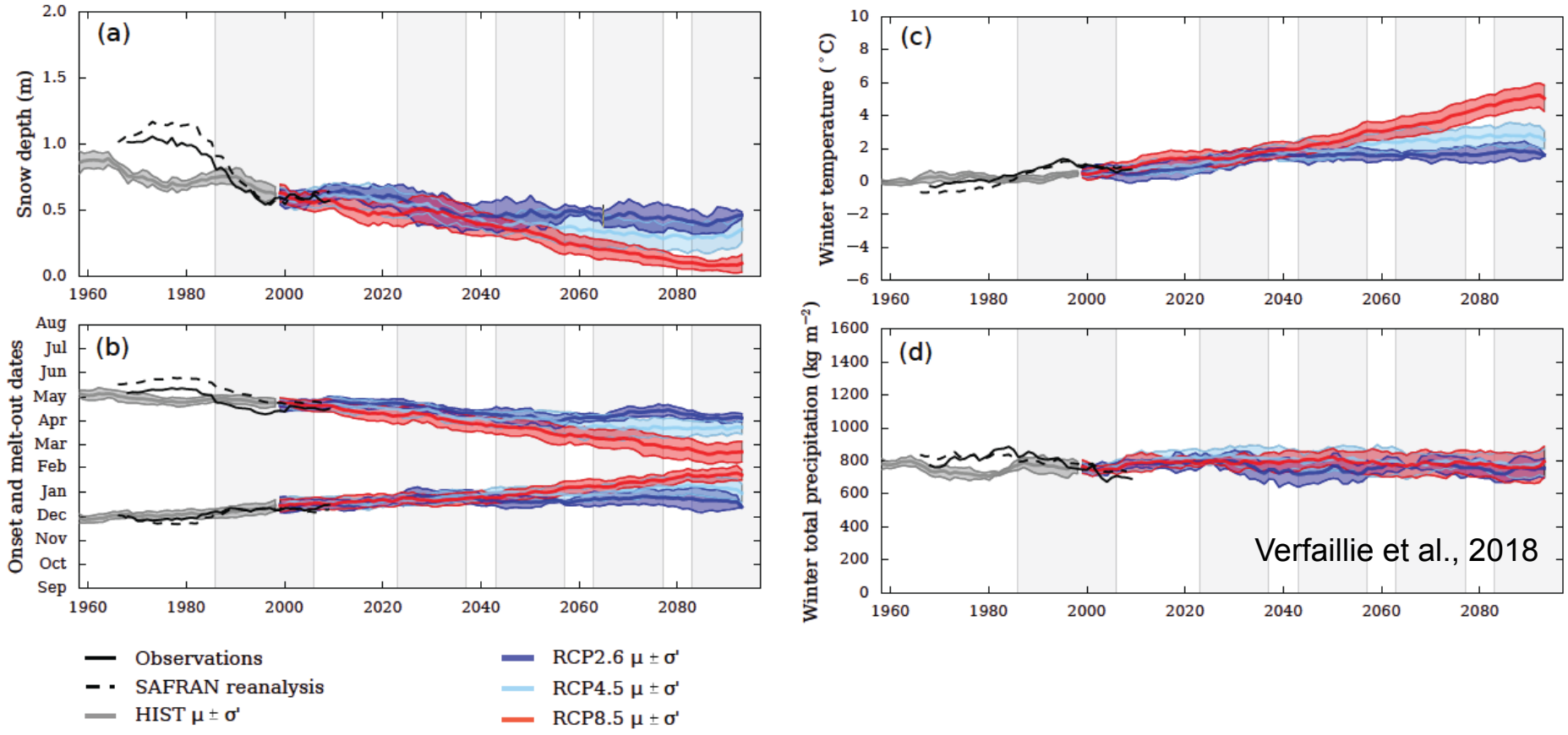


- Moins de neige, moins longtemps

Projections du futur

Projections nivo-météorologiques

Chartreuse, 1500 m, à plat

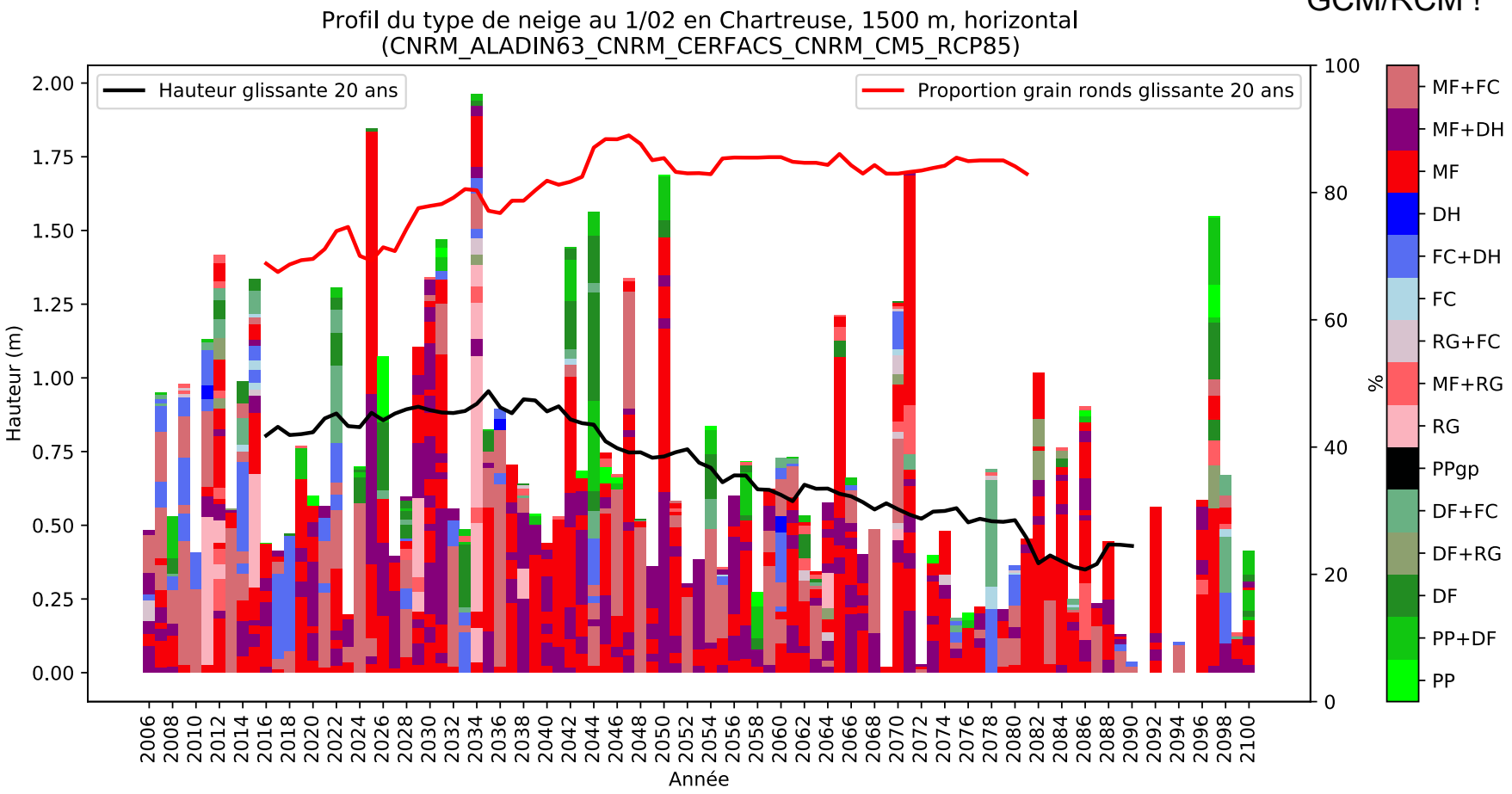


- Moins de neige, moins longtemps
- Essentiellement lié à la hausse des températures (pluie, fonte)

Projections du futur

Chartreuse, 1500 m, plat (e.g. « Col de Porte »)

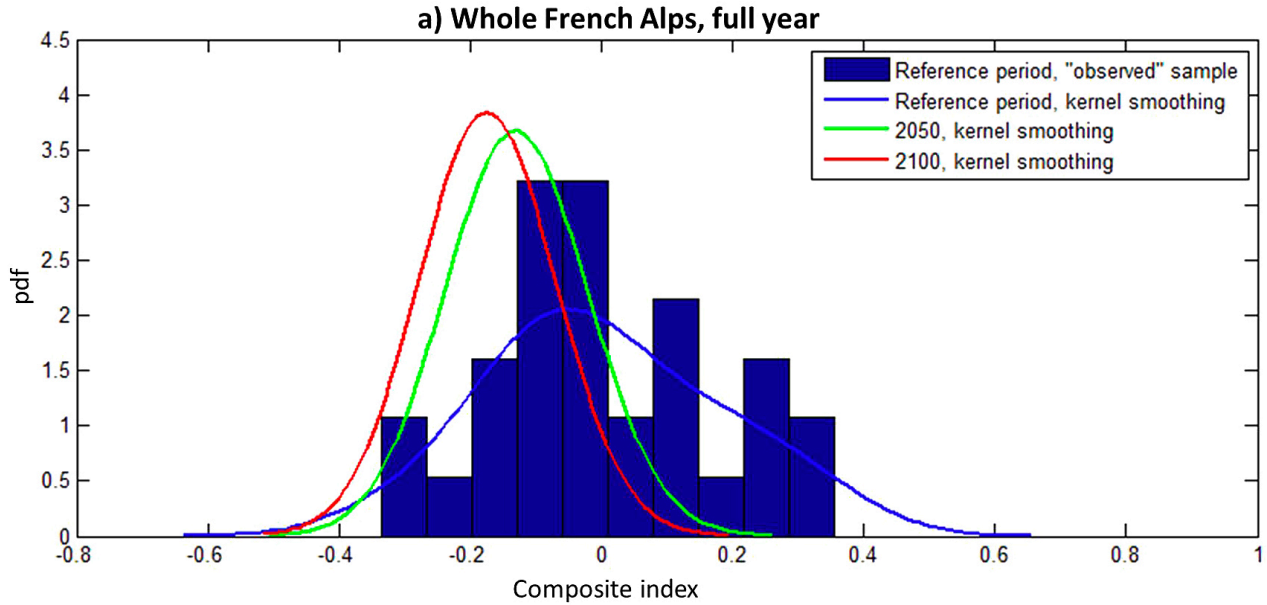
Un seul couple GCM/RCM !



Maintien d'une variabilité inter-annuelle

Projections du futur

Activité avalancheuse Alpes



Castebrunet et al. 2014

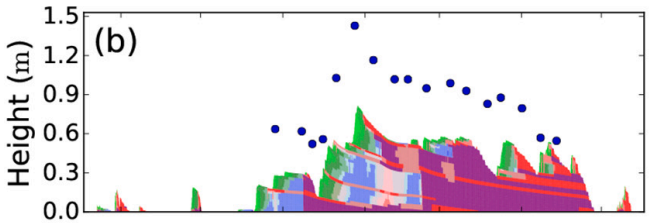
- Indicateur de l'activité avalancheuse calibré avec l'Etude Permanente des Avalanches (EPA) et d'un modèle à base physique (MEPRA)
- En moyenne, décroissance de l'activité avalancheuse (nombre: -20% / -30%). Sévérité associée ?
- Mais plus d'avalanches à plus haute altitude et/ou au coeur de l'hiver dont des avalanches de neige humide.

Projections du futur

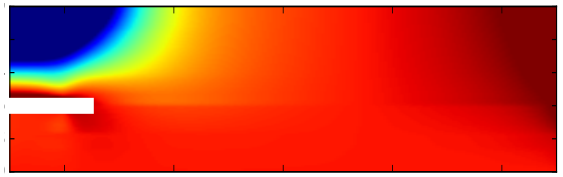
Recherche en cours

Amélioration du lien nivo-météo - aléa avalanche

Approche « physique »

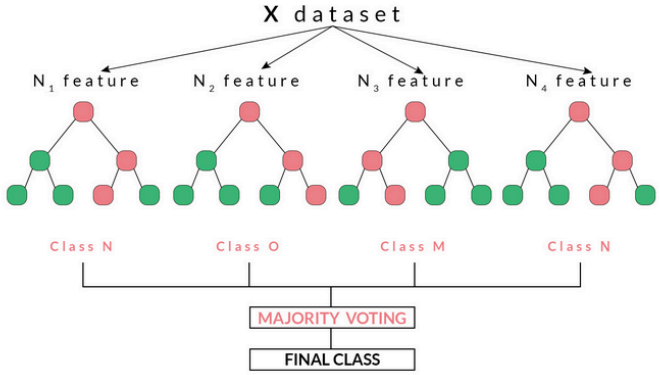


Modélisation du manteau neigeux



Modélisation mécanique

Approche « machine learning » à partir des observations du passé



Mise à jour des résultats à partir des nouvelles projections

Conclusion, messages clés

Moins de neige, moins d'avalanches ?

Conclusion, messages clés

Moins de neige, moins d'avalanches ?

- On a observé et on s'attend à moins d'avalanches à basse altitude et à des avalanches qui « descendent » moins bas.
- Néanmoins, l'occurence d'une avalanche exceptionnelle à basse altitude n'est pas à exclure complètement du fait de l'augmentation de la variabilité interne du climat et la dépendance à de courtes mais intenses séquences météorologiques (e.g. cumul de neige sur 3 jours)
- On a observé et on s'attend à un changement de la nature des avalanches avec l'occurence de davantage d'avalanche de neige humide (même en plein hiver) ce qui peut changer leur rhéologie.
- On a observé une augmentation du nombre d'avalanches à haute altitude.
- Avalanche provoquée en terrain non controlé : essentiellement lié aux pratiques

« Les risques liés […] aux avalanches se manifesteront aussi à d'autres saisons et en d'autres endroits [NDLR : autres altitudes] ». GIEC Océan & Cryosphère (2019)

Merci de votre attention

pascal.hagenmuller@meteo.fr

Pascal Hagenmuller[1], Samuel Morin[1], Léo Viallon-Galinier[1,7], Benjamin Reuter[1,6], Isabelle Gouttevin[1], Matthieu Lafaysse[1], Nicolas Eckert[3], Jean-Michel Soubeyroux[4], Raphaëlle Samacoïts[1,4]

[1]Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France
[2]Univ. Grenoble Alpes, Irstea, LESSEM, Grenoble, France,
[3]Univ. Grenoble Alpes, Irstea, ETNA, Grenoble, France,
[4]Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France,
[5]CNRM, Météo-France, CNRS, Université de Toulouse, Toulouse, France
[6]WSL-SLF, Davos, Suisse
[7]École des Ponts, Champs-sur-Marne, France"