

Le changement climatique en montagne : impacts, risques et adaptation¹

Par Samuel MORIN

Université de Toulouse, Univ. Grenoble Alpes, Météo-France, CNRS,
Centre national de recherches météorologiques, Toulouse et Grenoble

Les régions de montagne concentrent des caractéristiques qui rendent les effets du changement climatique particulièrement visibles. Elles constituent ainsi des sentinelles du changement en cours et à venir. Elles disposent d'atouts naturels et socio-économiques qui les distinguent d'autres zones géographiques, notamment sur le plan des ressources en eau, de la biodiversité et du patrimoine agricole et culturel. L'environnement spécifique de haute montagne est le support d'activités emblématiques de loisirs et de tourisme. Les régions de montagne sont également le siège de nombreux aléas naturels gravitaires qui complexifient et renchérissent leur développement socio-économique. Le changement climatique agit sur la quasi-totalité de ces enjeux interconnectés, en modifie les caractéristiques et ébranle les modes de gestion traditionnels des atouts et difficultés intrinsèques des régions de montagne. Connaissances interdisciplinaires et outils se développent pour pouvoir tenir compte de ces enjeux dans leurs stratégies territoriales de développement.

Changement climatique en montagne : observations et projections

L'environnement de montagne et les activités humaines qui s'y développent sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques. Ces dernières ont évolué depuis plusieurs décennies et constituent des manifestations locales du changement climatique à l'œuvre au niveau planétaire. En montagne comme ailleurs, le changement climatique modifie non seulement la moyenne multi-annuelle des conditions météorologiques propres à chaque saison (température, précipitations, enneigement, etc.), mais aussi la distribution de phénomènes rares, qui peuvent être intenses, voire extrêmes. Dans les Alpes françaises et les Pyrénées, l'augmentation de la température moyenne annuelle a atteint près de 2°C depuis le début du XX^e siècle. L'ampleur de cette augmentation dépasse celle de l'accroissement de la température mondiale, comme c'est le cas pour la plupart des continents. Le réchauffement a été au cours des dernières décennies particulièrement marqué en été. L'amplification du réchauffement dans les régions de montagne, en fonction de l'altitude, est souvent évoquée, mais elle est difficile

à mettre en évidence de façon claire sur la base des observations disponibles. Il s'avère cependant que les milieux de montagne et les conditions météorologiques afférentes varient en fonction de l'altitude, ce qui explique pourquoi les manifestations du changement climatique sont aussi fortement dépendantes de l'altitude. Par exemple, le manteau neigeux est généralement éphémère à basse altitude et est peu épais et fortement variable d'une année sur l'autre à moyenne altitude (1 000 à 2 000 m d'altitude), tandis qu'il est beaucoup plus abondant en haute montagne. Le réchauffement, qui entraîne en général une transition favorisant les chutes de pluie au détriment des chutes de neige à basse et moyenne altitude, et une intensification de la fonte printanière à toutes les altitudes, se manifeste donc par une raréfaction du manteau neigeux qui est variable selon l'altitude et les mois de l'année : une raréfaction forte tout l'hiver et au printemps à basse et moyenne altitude (près d'un mois de réduction de la durée d'enneigement depuis les années 1970) et une baisse au printemps à haute altitude (Matiu *et al.*, 2021). Ces évolutions différenciées ont des conséquences en cascade sur les aléas naturels : par exemple, l'aléa avalancheux change de caractère, avec une raréfaction globale de celui-ci (mais pas de disparition totale)

¹ **Remerciements** : cette synthèse s'est nourrie des travaux menés dans le cadre d'une collaboration interdisciplinaire avec de nombreux collègues travaillant au CNRM (Météo-France, CNRS), à Météo-France (direction de la Climatologie et des Services climatiques), au LESSEM et à l'ETNA (INRAE), à l'Institut des géosciences de l'environnement (Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD) et au CESBIO (Université Toulouse, CNRS, IRD, CNES), et notamment l'équipe de rédaction du rapports GIEC SROCC (2019), ainsi que de contacts et d'interactions établis avec les praticiens et acteurs socio-économiques de la montagne.



Figure 1 : Évolution de la Mer de glace (glacier situé dans le massif du Mont-Blanc, Haute-Savoie) entre 1919 et 2019. Crédits : Institut de géosciences de l'environnement (<http://ige-vis.univ-grenoble-alpes.fr/glacioclim/glacioclim.html>).

et davantage d'avalanches de neige humide, y compris en plein hiver, ce qui affecte les stratégies de gestion de ce risque. Le recul des glaciers est probablement l'illustration la plus spectaculaire du changement climatique sous nos latitudes (voir la Figure 1 ci-dessus). Il est la conséquence d'un déséquilibre croissant entre l'accumulation (surtout hivernale) de neige et la fonte estivale accrue sous l'effet de l'augmentation de la température, en particulier lors des vagues de chaleur.

Du fait d'émissions de gaz à effet de serre (issues de la combustion des ressources fossiles et du changement d'usage des sols) continuant à se situer à des niveaux comparables à ceux actuels au cours des prochaines décennies – même si une réduction s'amorce –, l'aggravation du changement climatique et de ses effets est inévitable à cette échelle de temps (GIEC, 2021). La vitesse et l'ampleur de la réduction dès à présent des émissions de gaz à effet de serre conditionneront fortement l'évolution climatique au cours de la seconde moitié du XXI^e siècle. La fréquence et l'intensité des vagues de chaleur ainsi que les caractéristiques du manteau neigeux saisonnier sont directement liées au niveau de réchauffement atteint une fois stabilisé : dans le cas de tels phénomènes, une éventuelle stabilisation du climat lorsque l'humanité aura atteint la neutralité carbone conduira concomitamment à une stabilisation de leurs caractéristiques (voir la Figure 2 de la page suivante). Pour les glaciers, la situation est très différente,

car cette stabilisation s'effectuera à des niveaux de température, et donc d'intensité de fonte, défavorables aux glaciers qui poursuivront leur recul – c'est déjà le cas aujourd'hui. C'est pour cette raison que, dans tous les scénarios, la disparition de la grande majorité des glaciers de montagne est attendue en Europe au cours de ce siècle, à l'exception des zones de plus haute altitude dans le cas de scénarios de très fortes réductions des émissions de gaz à effet de serre permettant d'atteindre la neutralité carbone planétaire d'ici à la moitié du XXI^e siècle (Hock *et al.*, 2019 ; Vincent *et al.*, 2019).

Conséquences du changement sur les ressources en eau, les aléas naturels, les écosystèmes

Les conséquences du recul des glaciers pour les ressources en eau dépendent de la saison et de la distance des zones concernées par rapport aux zones englacées. En effet, même s'ils constituent des objets majestueux et spectaculaires, les glaciers recouvrent des surfaces relativement restreintes et influencent les ressources en eau surtout en été et à faible distance. La raréfaction du manteau neigeux et l'évolution de la saisonnalité des précipitations (accroissement hivernal et baisse estivale) conduisent à une modification de la sai-

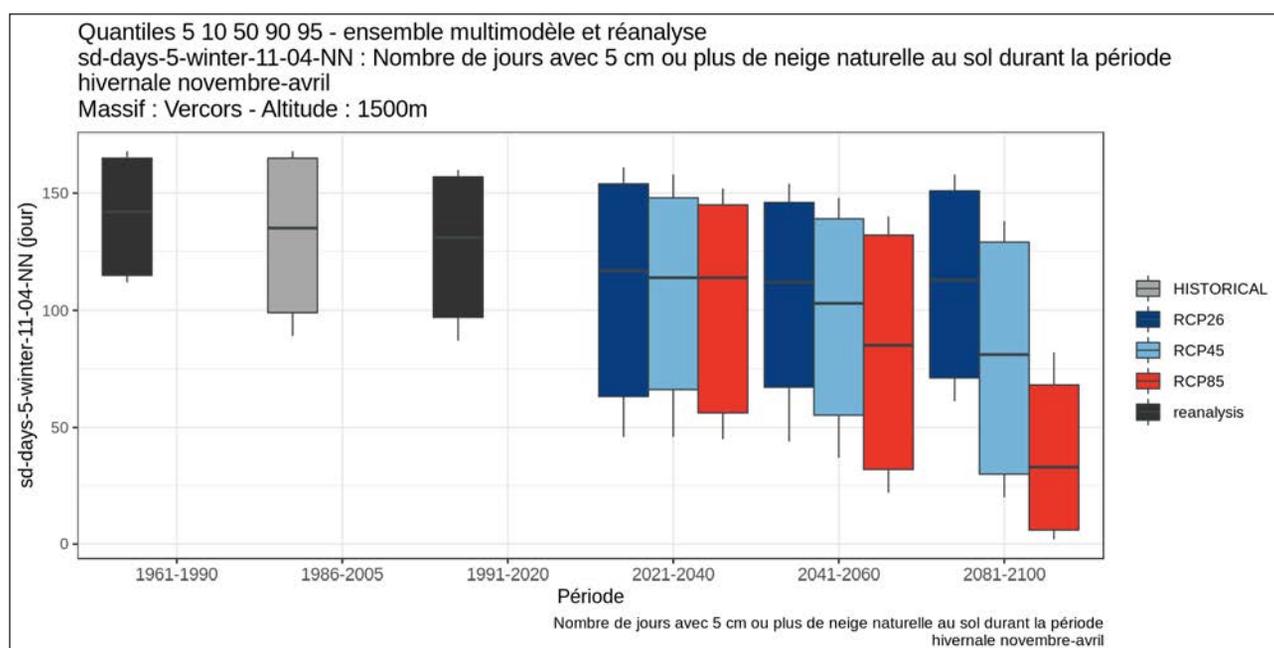


Figure 2 : Évolution passée (1961-1990 et 1991-2019) et future en fonction de plusieurs scénarios de concentration en gaz à effet de serre au XXI^e siècle et de l'enneigement naturel (nombre de jours avec plus de 5 cm de hauteur de neige) dans le massif du Vercors à 1 500 m d'altitude. Méthode d'après Verfaillie *et al.* (2018).

sonnalité du débit des rivières, avec une augmentation de celui-ci en hiver, l'avancée du pic de fonte au printemps, et une baisse en été – sauf à proximité immédiate des glaciers, tant que ceux-ci n'auront pas vu leur surface réduite de façon trop substantielle (Hock *et al.*, 2019 ; Laurent *et al.*, 2020). À ces tendances de fond concernant les ressources en eau se superposent les effets de l'intensification des précipitations, qui, paradoxalement, conduisent à une augmentation de l'ampleur des précipitations intenses, avec des conséquences accrues en termes de crues, de glissements de terrain et d'autres phénomènes que favorisent de telles précipitations, et ce malgré une raréfaction globale des ressources en eau en été. Le recul des glaciers conduit aussi à un accroissement d'un certain nombre d'aléas gravitaires, tels que des glissements de terrain dans les régions de moraine instables ou des chutes de séracs, voire à l'imbrication et à l'enchaînement de plusieurs aléas. Le réchauffement entraîne également le dégel et la déstabilisation du pergélisol (permafrost), avec des conséquences telles que l'effondrement de parois en très haute altitude, là où le pergélisol est actuellement présent.

L'évolution des conditions météorologiques et hydrologiques sous l'effet du changement climatique a des conséquences pour les écosystèmes de montagne. L'accroissement de la température entraîne une augmentation de la productivité primaire des prairies de montagne (verdissement), sauf dans les situations de sécheresse, qui sont de plus en plus fréquentes. Cela illustre la nécessité d'analyser de façon combinée plusieurs variables climatiques. L'augmentation des températures et les sécheresses répétées exercent une pression croissante sur de nombreuses forêts de montagne, ce qui, outre les effets directs sur leur mortalité, les fragilise vis-à-vis de parasites tels que les scolytes

et accentue donc leur dégradation. Ces changements entraînent des migrations vers de plus hautes altitudes pour de nombreux écosystèmes. Toutefois, cette vitesse de migration n'est pas toujours suffisante pour contrecarrer l'effet d'évolution climatique. De surcroît, les surfaces potentiellement disponibles à plus haute altitude sont plus restreintes, voire inexistantes dans les massifs de moyenne montagne.

Impacts et risques pour les activités humaines

Les rapports successifs du GIEC ont permis de doter la communauté scientifique de cadres conceptuels de plus en plus clairs pour décrire et quantifier les impacts et les risques climatiques. Le « risque » climatique fait référence au potentiel de conséquences néfastes sur un système naturel ou humain. Il résulte de la combinaison entre un « aléa » (la modification des caractéristiques d'un phénomène physique par le changement climatique, aussi appelé « facteur climatique générateur d'impact » – *climatic impact-driver* – dans le rapport du GIEC de 2021) et l'« exposition » et la « vulnérabilité » du système analysé vis-à-vis de cet aléa. Un « impact » climatique correspond à un risque réalisé ; il fait donc généralement référence à des observations passées. La Figure 3 de la page suivante synthétise les changements passés et les impacts physiques liés au recul de la cryosphère (glaciers, manteau neigeux, pergélisol) de montagne dans les Alpes et les Pyrénées (Hock *et al.*, 2019).

En montagne, les activités humaines, dans leur très grande majorité, sont sensibles aux conditions météorologiques et sont donc susceptibles d'être concernées par le risque climatique. Dans le domaine de la gestion

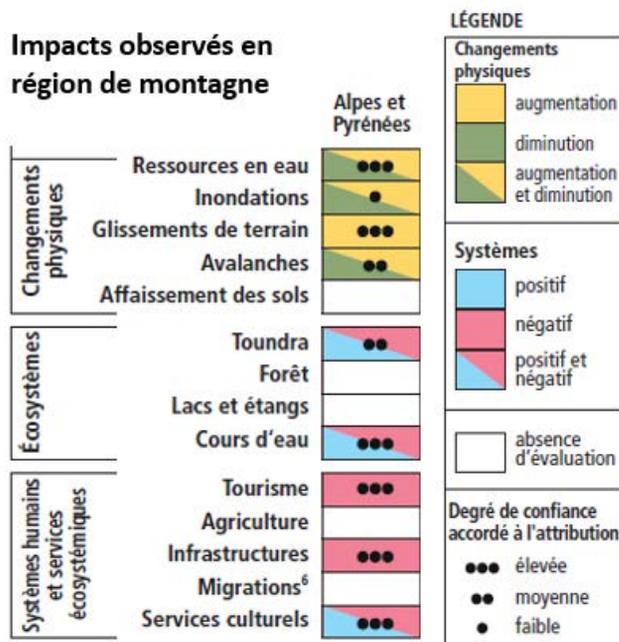


Figure 3 : Synthèse des impacts observés du recul de la cryosphère de montagne (manteau neigeux saisonnier, glaciers, pergélisol) sur les composants physiques, les écosystèmes et les services humains et écosystémiques de l'environnement de montagne. D'après le résumé à l'intention des décideurs du rapport spécial « Océan & Cryosphère » (GIEC, 2019).

des risques naturels, laquelle a des conséquences sur les conditions d'habitabilité des régions de montagne ainsi que sur leur développement économique, les effets du changement climatique se combinent à des évolutions de l'exposition et de la vulnérabilité. Les mesures de prévention adoptées, telles que des ouvrages de protection (paravalanches, filets de protection contre les chutes de blocs, etc.) ou la présence de forêts ayant une fonction de protection, contribuent à limiter l'aléa ou l'exposition des enjeux. Par ailleurs, l'évolution des trois composantes précitées du risque suit parfois des trajectoires contrastées (Zgheib *et al.*, 2022). Pour la plupart des aléas gravitaires, le changement climatique conduit à élargir la gamme des possibles, en étendant la plage d'altitude et des saisons où ces aléas peuvent être rencontrés, ce qui peut conduire à revisiter les stratégies de prévention et de réduction des risques. L'activité touristique, en particulier la pratique des sports d'hiver, est particulièrement dépendante des conditions météorologiques, notamment de la fiabilité de l'enneigement naturel ainsi que de la capacité à produire de la neige. Cela requiert des conditions météorologiques particulières (des températures suffisamment basses combinées à un vent faible). La production de neige, à l'instar du damage, fait partie des méthodes courantes de travail et de gestion de la ressource neige dans les domaines skiables. Elle a été initialement développée pour réduire l'impact des situations de faible enneigement naturel rencontrées lors de certains hivers. Les projections climatiques indiquent toutes une dégradation des conditions d'enneigement sur les pistes au cours des prochaines décennies, dans des proportions variables selon les stations. Toutefois, les études récentes montrent que l'impact passé du changement climatique et les risques futurs qu'il fait

peser sur les conditions d'exploitation des domaines skiables dépendent fortement de la prise en compte ou non de l'effet de la production de neige, ainsi que du contexte local de la station, tant en ce qui concerne sa gamme d'altitude et son emplacement que le modèle économique de la destination considérée et de son degré de dépendance – plus ou moins exclusive – à un niveau d'enneigement suffisant garanti (Spandre *et al.*, 2019). Les conditions de la pratique de l'alpinisme ont elles aussi été fortement affectées par le changement climatique, en particulier le recul des glaciers qui s'accompagne de conséquences fortes sur le niveau de danger des itinéraires classiques (Mourey *et al.*, 2019). Ces modifications concernent, plus généralement, le rapport qu'entretiennent les sociétés humaines avec les zones de haute montagne, y compris l'évolution majeure du paysage qu'entraîne le recul glaciaire et qui touche à l'image même du patrimoine naturel et culturel des sociétés européennes (Bosson *et al.*, 2019).

Options et enjeux de l'adaptation

L'adaptation au changement climatique a pour objectif de réduire les risques climatiques induits par les modifications inévitables des facteurs climatiques générateurs d'impacts, et ce en minorant l'exposition et la vulnérabilité des systèmes humains concernés. En parallèle des efforts portant sur la réduction massive des émissions de gaz à effet de serre, seuls à même de réduire durablement l'ampleur de l'augmentation des risques climatiques, une adaptation est d'ores et déjà à l'œuvre, implicitement ou explicitement, dans les territoires de montagne. Dans certains cas, les méthodes de réduction des risques mises en œuvre en matière de variabilité interannuelle des conditions météorologiques (par exemple, la gestion et la production de neige pour faire face à la variabilité de l'enneigement naturel) peuvent être considérées comme des méthodes d'adaptation au changement climatique, de façon plus ou moins assumée par les acteurs qui les utilisent. Le cas de la production de neige, dite aussi de culture ou artificielle, est emblématique d'un certain nombre des débats et des controverses qui traversent les communautés de montagne : leur rapport au développement touristique local, leur positionnement vis-à-vis du changement climatique et de ses conséquences actuelles et futures, la nature des relations nouées entre les divers acteurs concernés (Berard-Chenu, 2021). Le développement de méthodes scientifiques dans le but d'estimer la fiabilité de l'enneigement naturel et de gérer les domaines skiables (Spandre *et al.*, 2019) a permis de contribuer à accroître la prise de conscience par l'ensemble des acteurs des risques climatiques. Dans certains cas, notamment à la suite de la réalisation d'études dédiées permettant d'analyser finement les conséquences de l'évolution climatique à l'échelle d'une station de sport d'hiver donnée en mobilisant une approche tenant compte des caractéristiques locales et des questionnements de plusieurs acteurs du territoire (voir, par exemple, www.climsnow.org), il a été possible de produire des éléments de diagnostic ayant permis une discussion locale plus riche et parfois de dépasser les antagonismes et les controverses qui caracté-

risent souvent le traitement politique ou médiatique de ce sujet. Cette expérience rejoint les conclusions du rapport spécial « Océan & Cryosphère » du GIEC sur ce sujet : le succès des démarches d'adaptation est avant tout un enjeu de gouvernance, qui est facilité par la production et la mise à disposition de connaissances et d'informations sur l'évolution du climat régional et ses effets. Cela s'applique également aux enjeux d'adaptation au changement climatique dans les domaines des risques naturels et de la gestion des ressources en eau. Là aussi, la prise en compte du changement climatique est porteuse de sens quand elle vient nourrir une structure de gouvernance adaptée à la délibération et à la prise de décision sur ce type de sujets qui engagent des intérêts divergents à des échelles de temps et d'espace différentes, et ce pour l'ensemble des parties prenantes. En complément, les enjeux de l'adaptation sont fortement transverses en zone de montagne (ArLOT, 2019 ; Tschanz *et al.*, 2022) ; ils constituent une entrée commune permettant de renouveler le dialogue intersectoriel à l'aune d'une menace considérée comme nouvelle et touchant l'ensemble des domaines d'activité. L'adaptation au changement climatique constitue donc une opportunité pour rénover les cadres délibératifs et de décision aux échelles territoriales dans les régions de montagne, et de mettre ceux-ci au service d'une ambition commune, celle visant à faire face à l'urgence climatique touchant l'ensemble des composantes socio-économiques et environnementales interconnectées des zones de montagne.

Références bibliographiques

- ARLOT M.-P. (2019), « Le projet AdaMont : enjeux, valeurs et fondements méthodologiques », *Changement climatique : quelle stratégie d'adaptation pour les territoires de montagne ?*, *Revue Science, Eaux & Territoires* 28, pp. 8-11, <https://dx.doi.org/10.14758/SET-REVUE.2019.2.03>
- BERARD-CHENU L., « Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : la place de la production de neige », thèse de l'Université Grenoble – Alpes (2021), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03555501>
- BOSSON J.-B., HUSS M. & OSIPOVAE. (2019), "Disappearing World Heritage Glaciers as a Keystone of Nature Conservation in a Changing Climate", *Earth's Future* 7 (4), pp. 469-479, doi:10.1029/2018ef001139
- HOCK R., RASUL G., ADLER C., CÁCERES B., GRUBER S., HIRABAYASHI Y., JACKSON M., KÄÄB A., KANG S., KUTUZOV S., MILNER A., MOLAU U., MORIN S., ORLOVE B. & STELTZER H. (2019), "High Mountain Areas", In : "IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate", PÖRTNER H.-O., ROBERTS D. C., MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., TIGNOR M., POLOCZANSKA E., MINTENBECK K., ALEGRÍA A., NICOLAI M., OKEM A., PETZOLD J., RAMA B. & WEYER N. M. (eds.), https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf (sous presse).
- GIEC (2021), "Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A., CONNORS S. L., PÉAN C., BERGER S., CAUD N., CHEN Y., GOLDFARB L., GOMIS M. I., HUANG M., LEITZELL K., LONNOY E., MATTHEWS J. B. R., MAYCOCK T. K., WATERFIELD T., YELEKÇI O., YU R. & ZHOU B. (eds.), Cambridge University Press (In Press).
- LAURENT L., BUONCRISTIANI J.-F., POHL B. *et al.* (2020), "The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif", *Sci. Rep.* 10, 10420, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67379-7>
- MATIU M., CRESPI A., BERTOLDI G., CARMAGNOLA C. M., MARTY C., MORIN S., SCHÖNER W., CAT BERRO D., CHIOGNA G., DE GREGORIO L., KOTLARSKI S., MAJONE B., RESCH G., TERZAGO S., VALT M., BEOZZO W., CIANFARRA P., GOUTTEVIN I., MARCOLINI G., NOTARNICOLA C., PETITTA M., SCHERRER S. C., STRASSER U., WINKLER M., ZEBISCH M., CICOGNA A., CREMONINI R., DEBERNARDI A., FALETTO M., GADDO M., GIOVANNINI L., MERCALLI L., SOUBEYROUX J.-M., SUŠNIK A., TRENTI A., URBANI S. & WEILGUNI V. (2021), "Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019", *The Cryosphere* 15, pp. 1343-1382, <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- MOUREY J., MARCUZZI M., RAVANEL L. & PALLANDRE F. (2019), "Effects of climate change on high Alpine environments: the evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century", *Arct. Antarct. Alp. Res.* 51(1), pp. 176-189, <https://dx.doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>
- SPANDRE P., FRANÇOIS H., VERFAILLIE D., LAFAYSSÉ M., DÉQUÉ M., ECKERT N., GEORGE E. & MORIN S. (2019), "Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts", *Sci. Rep.* 9, p. 8043, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>
- TSCHANZ L., ARLOT M.-P., PHILIPPE F., VIDAUD L., MORIN S., MALDONADO E., GEORGE E. & SPIEGELBERGER T. (2022), "A transdisciplinary method, knowledge model and management framework for climate change adaptation in mountain areas applied in the Vercors, France", *Reg. Environ. Change* 22, 15, <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01862-3>
- VERFAILLIE D., LAFAYSSÉ M., DÉQUÉ M., ECKERT N., LEJEUNE Y. & MORIN S. (2018), "Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1.500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps", *The Cryosphere* 12, pp. 1249-1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>
- VINCENT C., PEYAUD V., LAARMAN O., SIX D., GILBERT A., GILLET-CHAULET F., BERTHIER É., MORIN S., VERFAILLIE D., RABATEL A., JOURDAIN B. & BOLIBAR J. (2019), « Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI^e siècle : Argentière et Mer de glace », *La Météorologie*, série 8, 106, pp. 49-58, <https://doi.org/10.4267/2042/70369>
- ZGHEIB T., GIACONA F., GRANET-ABISSET A.-M., MORIN S., LAVIGNE A. & ECKERT N. (2022), "Spatio-temporal variability in avalanche risk trajectories in the French Alps", *Reg. Environ. Change* 22, 8, <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01838-3>