

VARIABILITÉ DU MANTEAU NEIGEUX DES ALPES EUROPÉENNES ENTRE 1950 ET 2016 DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Geoffrey KLEIN ^{1,2}

¹ Université de Neuchâtel, Institut de Géographie – Espace Louis Agassiz 1, Neuchâtel, Suisse

² Institut Fédéral de Recherches sur la Forêt, la Neige et le Paysage WSL – Neuchâtel, Suisse
geoffrey.klein@unine.ch

Résumé

Les régions de montagne, particulièrement vulnérables aux fluctuations du climat, ont subi d'importantes modifications environnementales au cours du XX^e siècle. L'augmentation observée des températures de l'air depuis les années 1950 a notamment engendré un net recul des glaciers, mais aussi du manteau neigeux à toutes les altitudes. Cette réduction de l'enneigement en montagne est un facteur préoccupant dans de multiples domaines, qu'il s'agisse des écosystèmes, des cycles hydrologiques, ou encore du tourisme alpestre. De nombreux travaux de recherche à travers le monde témoignent du réchauffement de l'air et de la réduction observée du manteau neigeux dans les massifs montagneux depuis les années 1950, essentiellement à basse et moyenne altitude, mais peu de synthèses de ces différents changements ont été faites jusque-là. Cette revue bibliographique a pour but de faire l'état des lieux des principaux changements observés du manteau neigeux depuis le XX^e siècle dans les Alpes européennes et leur mise en relation avec les changements climatiques relevés sur la même période. Un aperçu des différentes conséquences déjà observées sur les cycles hydrologiques, le tourisme hivernal et les écosystèmes est également présenté, ainsi que les projections futures d'évolution des paramètres du manteau neigeux d'ici la fin du XXI^e siècle. Cette revue bibliographique fournit une source d'information utile pour les futures recherches se focalisant sur l'étude de la saisonnalité du manteau neigeux en région de montagne et ses implications directes, en particulier dans les zones alpines et subalpines.

Mots-clés : Alpes européennes, écosystèmes, manteau neigeux, changement climatique, réchauffement de l'air.

Abstract

Snowpack variability from 1950 to 2016 in the European Alps under climate change: a review

In the European Alps, air temperature warming has been particularly pronounced during the last decades, leading to glacier retreat and snowpack reduction as well as strong phenological shifts for numerous plant and animals. This observed decline of the snowpack is a major cause of concern, as mountains areas are humanly and economically of great importance (water supply, winter tourism), but also for ecosystems, as mountain regions are biodiversity hotspots. A large number of studies across the world already show climatic changes and snowpack reduction in mountain areas since the 1950s, particularly at low and mid-elevations, but only few overviews have so far synthesized all the observed changes in snowpack and their relation with climate change. This review aims to summarize snowpack variability since the XXth century in the European Alps, and its connection with climatic changes over the same period. Some of the impacts on hydrology, winter tourism and ecosystems that have been already reported will also be presented, as well as future projections of snowpack changes. Overall, this review provides a valuable source of information for future research focusing on snowpack seasonality and its implications in mountain regions, particularly in alpine and subalpine areas.

Keywords: European Alps, ecosystems, snowpack, climate change, temperature warming.

Introduction

Le réchauffement progressif des températures de l'air observé à l'échelle mondiale depuis le début du XX^e siècle est probablement l'un des plus importants défis auquel la société

humaine devra faire face au cours des prochaines décennies. Avant la révolution industrielle du XIX^e siècle, les variations de la température de l'air s'expliquaient essentiellement par les fluctuations de l'activité volcanique et du rayonnement solaire (Crowley, 2000). Depuis, ces variations sont en revanche majoritairement dues au forçage lié aux émissions de gaz à effet de serre anthropiques, prenant progressivement le dessus sur la variabilité naturelle (Crowley, 2000 ; Allen *et al.*, 2019). Depuis le début des années 1980, ce réchauffement s'est accéléré à l'échelle mondiale, avec une augmentation de la température moyenne du globe d'environ 0,5°C entre 1979 et 2010 (Foster et Rahmstorf, 2011), contre 0,4°C sur la période 1900-1980 (Jones *et al.*, 2012). Cette décennie a ainsi été le théâtre d'importantes modifications de tous les systèmes biophysiques à l'échelle mondiale, engendrant en cascade d'abrupts changements environnementaux à travers la planète, en lien avec cette accélération de l'augmentation des températures de l'air (Reid *et al.*, 2016). Cependant, bon nombre d'espèces animales et végétales ne pourraient être capables d'adapter leur mode de vie au même rythme que le réchauffement climatique, ceci pouvant aller jusqu'à leur extinction d'ici la fin du XXI^e siècle (Jump et Penuelas, 2005 ; Corlett et Westcott, 2013).

De fortes disparités géographiques existent néanmoins quant à l'intensité de ce réchauffement à l'échelle globale, notamment entre les régions de plaine et de montagne. Dans la plupart des massifs montagneux de l'hémisphère Nord, il a été observé que l'augmentation des températures de l'air est plus importante que dans les plaines environnantes (Rangwala et Miller, 2012 ; Mountain Research Initiative, 2015). Cela a également pu être observé dans les Alpes européennes comme par exemple en Suisse, où l'augmentation des températures de l'air a été deux fois plus rapide que dans l'hémisphère Nord au cours du XX^e siècle (Rebetez et Reinhard, 2008 ; figure 1). Il reste cependant encore de nombreuses incertitudes à l'échelle mondiale à propos de la généralisation de ce phénomène d'intensification du réchauffement climatique avec l'altitude (Pepin *et al.*, 2015 ; Tudoroiu *et al.*, 2016).

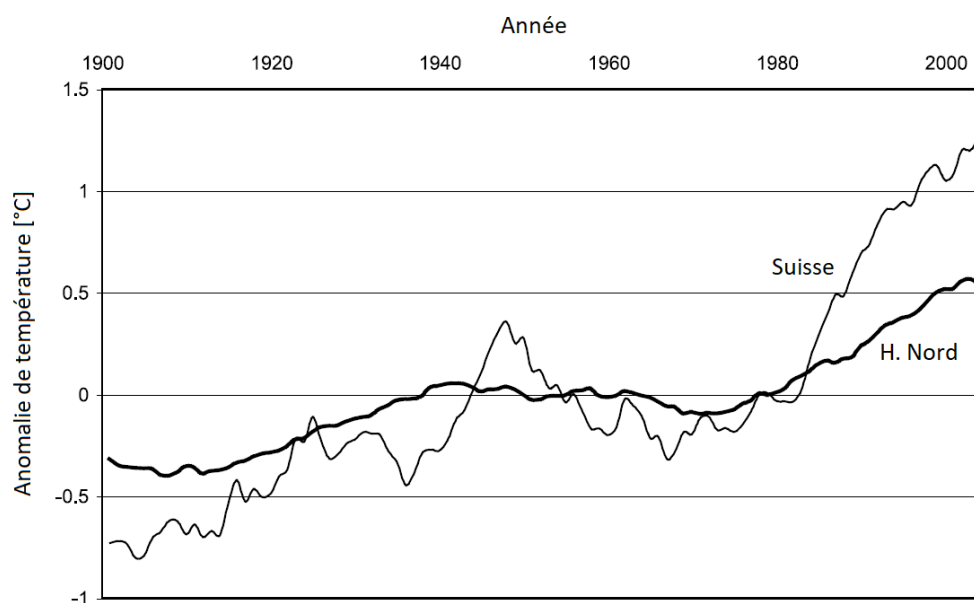


Figure 1. Anomalies annuelles de température de l'air (en °C) en Suisse comparé à l'hémisphère Nord sur la période 1901-2004 (adapté de Rebetez et Reinhard, 2008). *Annual temperature anomalies (°C) in Switzerland compared to the Northern Hemisphere 1901-2004 (adapted from Rebetez et Reinhard, 2008).*

Les Alpes européennes (abrégé Alpes par la suite) sont une chaîne de montagnes située en Europe centrale, formant un arc d'environ 800 km d'est en ouest et de 200 km de large et possédant plus de 1500 sommets dépassant 2000 m d'altitude, dont une trentaine au-delà des 4000 m. Avec cette situation géographique, elles se positionnent à un véritable carrefour

climatique, combinant à la fois des influences océaniques venues de l'ouest, méditerranéennes venues du sud et enfin continentales venues du nord et de l'est. Cette combinaison entre une grande diversité climatique et une importante variabilité altitudinale fait des Alpes un lieu privilégié pour l'étude des conséquences du changement climatique sur l'environnement à toutes les altitudes. Le massif est d'ailleurs considéré comme un véritable berceau pour la biodiversité, en raison de la grande variété de climats et d'habitats disponibles sur de petites distances (Körner, 2003).

Le climat des Alpes est principalement contrôlé par certains régimes météorologiques bien définis et majoritairement influencés par la circulation atmosphérique sur le proche atlantique (Plaut et Simonnet, 2001), dont les récentes et rapides fluctuations ont d'ailleurs entraîné une augmentation plus importante de la température de l'air en Europe de l'Est qu'initialement annoncée par les modèles climatiques (Van Oldenborgh *et al.*, 2009). La variabilité de la couverture neigeuse dans les Alpes dépend ainsi beaucoup des conditions climatiques de large échelle (Scherrer et Appenzeller, 2006), incluant notamment l'oscillation Nord-Atlantique (Seager *et al.*, 2010). Les fluctuations de ce phénomène océanique et atmosphérique jouent un rôle prépondérant sur le climat alpin, puisqu'elles peuvent directement influencer sur la température de l'air en Europe et donc, sur la couverture neigeuse au sol (Bednorz, 2004 ; Scherrer *et al.*, 2004 ; Seager *et al.*, 2010), contribuant à la réduction de son extension au début du printemps dans l'hémisphère Nord depuis les années 1970 (Brown et Robinson, 2011). Contrairement aux régions avoisinantes, la variabilité spatiotemporelle des précipitations hivernales dans les Alpes est moins sensible aux régimes de temps de large échelle comme l'oscillation Nord-Atlantique (Bartolini *et al.*, 2009). Le régime des chutes de neiges printanières est toutefois influencé par l'Oscillation Atlantique Multidécennale (fluctuation naturelle périodique de la température de surface de l'océan Atlantique Nord), qui a particulièrement contribué à la réduction de ces précipitations neigeuses et à celle du manteau neigeux depuis les années 1990 (Zampieri *et al.*, 2013).

En milieu de montagne, la topographie possède une influence importante sur les conditions climatiques locales. L'altitude est le facteur majeur expliquant la variation naturelle de la température de l'air, essentiellement au printemps et en été (Joly *et al.*, 2012), avec une diminution moyenne d'environ 0,6°C par tranche de 100 m d'altitude, pouvant varier selon les saisons et les contextes topoclimatiques (Rolland, 2003 ; Dumas, 2013). Les précipitations, qu'elles soient sous forme de pluie ou de neige, sont également dépendantes de l'altitude, bien que la relation soit moins évidente et universelle, avec une augmentation progressive de leur fréquence et intensité généralement jusqu'à des altitudes oscillant entre 2000 et 2500 m d'altitude (Sevruk, 1997 ; Frei et Schär, 1998 ; Blanchet *et al.*, 2009). Les principaux paramètres du manteau neigeux (épaisseur, durée, etc.) sont quant à eux fortement corrélés avec la température de l'air et les précipitations, et donc avec l'altitude (Hantel et Hirtl-Wielke, 2007 ; Gajić-Čapka, 2011 ; Serquet *et al.*, 2011). L'orientation et l'inclinaison des versants des massifs montagneux, en particulier pour ceux davantage exposés au soleil, sont aussi responsables d'une partie de la variabilité de l'épaisseur et de la durée du manteau neigeux (López-Moreno *et al.*, 2014).

A moyenne et haute altitude à travers le monde, l'augmentation des températures de l'air au cours du XX^e siècle a été la plus importante autour de l'altitude de l'isotherme 0°C, en lien notamment avec le phénomène de rétroaction de l'albédo des surfaces enneigées et des glaciers (Pepin et Lundquist, 2008 ; Scherrer *et al.*, 2012). A l'inverse, le réchauffement de l'air est plus modéré lorsque de la neige est présente au sol (Pepin *et al.*, 2011), ce qui explique en partie les tendances plus faibles à l'augmentation des températures de l'air observées en hiver dans les zones de montagne telles que les Alpes (Rebetez et Reinhard, 2008).

Cette revue bibliographique a pour but de faire l'état des lieux des principaux changements du manteau neigeux observés entre 1950 et 2016 dans les Alpes européennes, essentiellement dans la partie occidentale et centrale du massif (France, Suisse, Italie), ainsi qu'un aperçu des conséquences socio-économiques et environnementales associées à ces changements. Dans le détail, cette revue permet de résumer (i) l'évolution de la température de l'air et des précipitations au cours de cette période, deux facteurs climatiques prépondérants sur la présence de neige au sol, (ii) les principaux changements résultants constatés sur le manteau neigeux, et enfin (iii) les différentes conséquences déjà observées de ces changements sur les cycles hydrologiques, le tourisme hivernal et les écosystèmes (faune et flore alpine). Les projections futures d'évolution du manteau neigeux d'ici la fin du XXI^e siècle sont également évoquées.

1. Évolution du climat alpin

1.1. La température de l'air

Entre la fin du XIX^e siècle et le début des années 2000, la température de l'air dans les Alpes s'est élevée en moyenne d'un peu plus de 1°C (Böhm *et al.*, 2001 ; Begert *et al.*, 2005 ; Rebetez et Reinhard, 2008). Cette tendance s'est ensuite progressivement affirmée depuis la deuxième moitié du XX^e siècle à toutes les altitudes (Auer *et al.*, 2007 ; Acquotta *et al.*, 2015), puisqu'une augmentation moyenne de 0,35°C par décennie entre 1959 et 2008 (Ceppi *et al.*, 2012), puis de 0,57°C par décennie entre 1975 et 2004 ont été observées (Rebetez et Reinhard, 2008). Ce réchauffement représente de 1,6 à plus de 2,5 fois la tendance moyenne observée dans l'hémisphère Nord (Foster et Rahmstorf, 2011), bien que d'importantes augmentations de la température de l'air soient également visibles sur la même période dans d'autres massifs tels que l'Himalaya et ce, même à très haute altitude (Xu *et al.*, 2016). Ces tendances cachent cependant de fortes disparités entre les saisons. En effet, à moyenne et haute altitude dans les Alpes, l'augmentation des températures de l'air est nettement plus marquée au printemps et en été depuis 1970 (Diolaiuti *et al.*, 2012), avec un réchauffement moyen de 0,85°C par décennie (Rebetez et Reinhard, 2008), le tout de manière uniforme sur le massif indiquant qu'il s'agit d'un phénomène climatique de grande ampleur (Marty et Meister, 2012). L'augmentation significative de la durée d'ensoleillement dans les Alpes (en fond de vallée tout comme proche des sommets) depuis les années 1970 (Sanchez-Lorenzo et Wild, 2012) et particulièrement au printemps (Auer *et al.*, 2007) est en partie responsable de ce réchauffement, puisqu'elle est fortement corrélée aux variations de la température de l'air (Bristow et Campbell, 1984).

1.2. Les précipitations

De manière générale, le cumul annuel moyen des précipitations au cours du XX^e siècle ne montre pas de changement significatif dans les Alpes, quelle que soit l'altitude (Bartolini *et al.*, 2009 ; Brugnara *et al.*, 2012 ; Diolaiuti *et al.*, 2012). Certaines tendances significatives sont toutefois observées pour les précipitations hivernales malgré une forte variabilité interannuelle (Bartolini *et al.*, 2009), mais ces tendances sont assez contrastées selon les régions des Alpes. En effet, plusieurs études soulignent une augmentation des précipitations totales hivernales dans les Alpes suisses (Schmidli et Frei, 2005 ; Scherrer *et al.* 2016), tandis que des tendances à la baisse sont plutôt observées du côté italien du massif (Brunetti *et al.*, 2009 ; Terzago *et al.*, 2013). Les événements de chutes de neige extrêmes sont cependant en diminution significative en-dessous de 800 m d'altitude, sous l'influence majeure de l'augmentation des températures de l'air (Marty et Blanchet, 2012).

Une réduction marquée du nombre de jours et de la quantité de précipitation tombant sous forme de neige au lieu de pluie a en revanche été observée à toutes les altitudes au cours du

XX^e siècle dans de nombreuses régions des Alpes, notamment depuis les années 1970 (Laternser et Schneebeli, 2003 ; Pellicciotti *et al.*, 2010 ; Valt et Cianfarra, 2010 ; Serquet *et al.*, 2011 ; Diolaiuti *et al.*, 2012 ; Marty et Blanchet, 2012 ; Nicolet *et al.*, 2018) (figure 2). Avec l'absence d'un signal clair et uniforme au niveau des précipitations totales, ces mêmes études démontrent que cette réduction des précipitations neigeuses est en grande partie liée à l'augmentation des températures de l'air observée au cours de la même période. En 2008, la fréquence des précipitations neigeuses en hiver dans les Alpes est ainsi progressivement devenue équivalente à celle observée au mois de novembre ou mars dans les années 1960 (Serquet *et al.*, 2013).

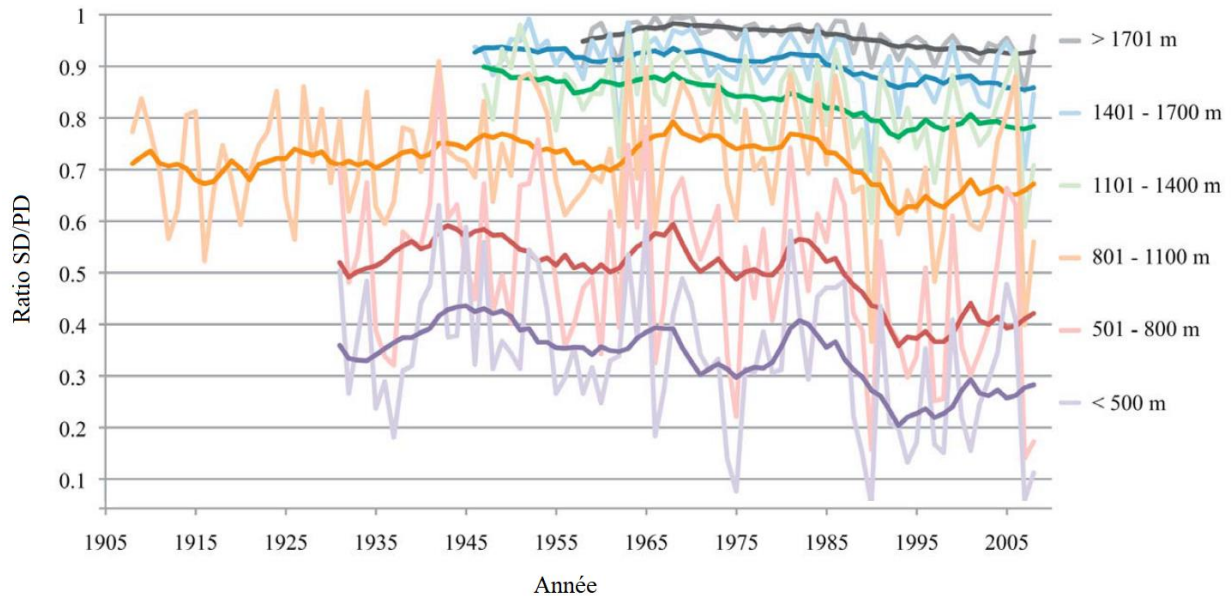


Figure 2. Ratio moyen entre le nombre de jours avec des chutes de neige et ceux avec de la pluie (SD/PD) sur la saison d'hiver (Décembre-Janvier-Février) et par catégories altitudinales entre 1908 et 2008. Les lignes en gras représentent les moyennes mobiles simples calculées sur des fenêtres de 11 ans (adapté de Serquet *et al.*, 2011). *Winter (December-January-February) mean ratio of snowfall versus precipitation days (SD/PD) by altitudinal categories from 1908 to 2008. Bold lines are unweighted moving averages with an 11-year window (adapted from Serquet et al., 2011).*

2. Évolution des paramètres du manteau neigeux

2.1. Observations passées

La combinaison entre l'augmentation des températures de l'air et la stabilité de la quantité de précipitations, avec cependant une proportion toujours plus grande tombant sous forme de pluie, a engendré au cours du XX^e siècle une baisse générale de l'équivalent en eau du manteau neigeux dans les Alpes, surtout au printemps (Bocchiola et Diolaiuti 2010 ; Marty et Meister, 2012 ; Marty *et al.*, 2017a). Depuis les années 1950, la durée du manteau neigeux continu et celle du nombre de jours avec de la neige au sol sont également en diminution dans les Alpes à toutes les altitudes (Scherrer *et al.*, 2004 ; Marty, 2008 ; Durand *et al.*, 2009 ; Pellicciotti *et al.*, 2010 ; Valt et Cianfarra, 2010 ; Diolaiuti *et al.*, 2012 ; Scherrer *et al.*, 2013 ; Hüsler *et al.*, 2014 ; Klein *et al.*, 2016) (tableau 1). Cette réduction est en outre bien visible à l'échelle de l'hémisphère Nord depuis les années 1970 (Hernández-Henríquez *et al.*, 2015) et notamment au printemps (Brown et Mote, 2009 ; Brown et Robinson, 2011), incluant les principaux massifs montagneux comme le Kilimandjaro en Afrique (Park *et al.*, 2012), les montagnes rocheuses en Amérique du Nord (Pederson *et al.*, 2013), ou encore l'Himalaya en Asie (Xu *et al.*, 2016). L'épaisseur moyenne du manteau neigeux s'est aussi significativement réduite au cours de la

même période dans les Alpes à toutes les altitudes et pour toutes les saisons (Durand *et al.*, 2009 ; Schöner *et al.*, 2009 ; Pellicciotti *et al.*, 2010 ; Marty et Blanchet, 2012 ; Marty et Meister, 2012 ; Terzago *et al.*, 2013 ; Klein *et al.*, 2016 ; Schöner *et al.*, 2019) (tableau 1). L'intensité des tendances observées de la diminution de la durée tout comme de l'épaisseur du manteau neigeux dans les Alpes en fonction de l'altitude semble en revanche plus contrastée. Certaines études soulignent que ces tendances sont globalement plus faibles en montant en altitude, en particulier au-dessus de 2000 m (Latarnser et Schneebeli, 2003 ; Scherrer *et al.*, 2004 ; Valt et Cianfarra, 2010), tandis que d'autres illustrent une certaine homogénéité entre 1000 et 2700 m (Durand *et al.*, 2009 ; Klein *et al.*, 2016).

Paramètre du manteau neigeux (période)	Variation moyenne (par décennie)	Altitude (m)	Année	Pays	Auteurs
Durée (année)	-10,5 jours	1500-2500	1974-2004	Suisse	Pellicciotti <i>et al.</i> , 2010
Durée (décembre-avril)	-3,3 jours	800-2100	1950-2009	Italie	Valt et Cianfarra, 2010
Durée (année)	-8,9 jours	1140-2540	1970-2015	Suisse	Klein <i>et al.</i> , 2016
Durée (année)	-4,8 jours	1500-2700	1958-2005	France	Durand <i>et al.</i> , 2009
Nb de jours \geq 10 cm de neige au sol (juin-septembre)	-10,0 jours	2230-2540	1980-2011	Suisse	Marty et Meister, 2012
Nb de jours \geq 1 cm de neige au sol (novembre-avril)	- 6,0 jours	1000-2000	1961-2012	Autriche, Suisse	Schöner <i>et al.</i> , 2019
Épaisseur moyenne (novembre-mars)	-5,3 cm	960-2180	1951-2010	Italie	Terzago <i>et al.</i> , 2013
Épaisseur moyenne (novembre-avril)	-5,0 cm	1000-2000	1961-2012	Autriche, Suisse	Schöner <i>et al.</i> , 2019
Épaisseur maximale (année)	-12,1 cm	1140-2540	1970-2015	Suisse	Klein <i>et al.</i> , 2016
Date de fonte des neiges (année)	-5,8 jours	1140-2540	1970-2015	Suisse	Klein <i>et al.</i> , 2016
Date de fonte des neiges (année)	-3,5 jours	2090	1975-2010	Suisse	Rixen <i>et al.</i> , 2012
Date de fonte des neiges (année)	-12,0 jours	2230-2540	1980-2011	Suisse	Marty et Meister, 2012
Date de début du manteau neigeux (année)	+2,8 jours	1140-2540	1970-2015	Suisse	Klein <i>et al.</i> , 2016
Date de début du manteau neigeux (année)	+2,7 jours	2230-2540	1980-2011	Suisse	Marty et Meister, 2012
Chutes de neige cumulées (décembre-avril)	-18,7 cm	800-2530	1960-2009	Italie	Valt et Cianfarra, 2010

Tableau 1. Résumé des principales évolutions du manteau neigeux des Alpes observées entre 800 et 2700 m d'altitude de 1950 à 2015. *Summary of the main observed snow cover trends between 1000 and 2700 m asl in the Alps from 1950 to 2015.*

Le recul de la durée du manteau neigeux continu est essentiellement dû à une fonte des neiges plus précoce au printemps, plutôt qu'à des premières chutes de neige plus tardives à l'automne (Latarnser et Schneebeli, 2003 ; Klein *et al.*, 2016). Ce constat a également pu être établi aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord (Choi *et al.*, 2010 ; Chen *et al.*, 2015). Par exemple, entre 1970 et 2015, la date de fonte des neiges a en moyenne avancé de près de 4 semaines dans les Alpes suisses à toutes les altitudes, contre un retard d'environ 2 semaines pour la mise en place du manteau neigeux à l'automne (Klein *et al.*, 2016) (tableau 1 et figure

3). Cette diminution de près de 40 jours en 45 ans de la durée du manteau neigeux continu est particulièrement liée à un réchauffement important des températures de l'air au printemps et en été au cours de la même période, avec une augmentation de 0,4 à 0,6°C par décennie (Rixen *et al.*, 2012, Klein *et al.*, 2018) (figure 3).

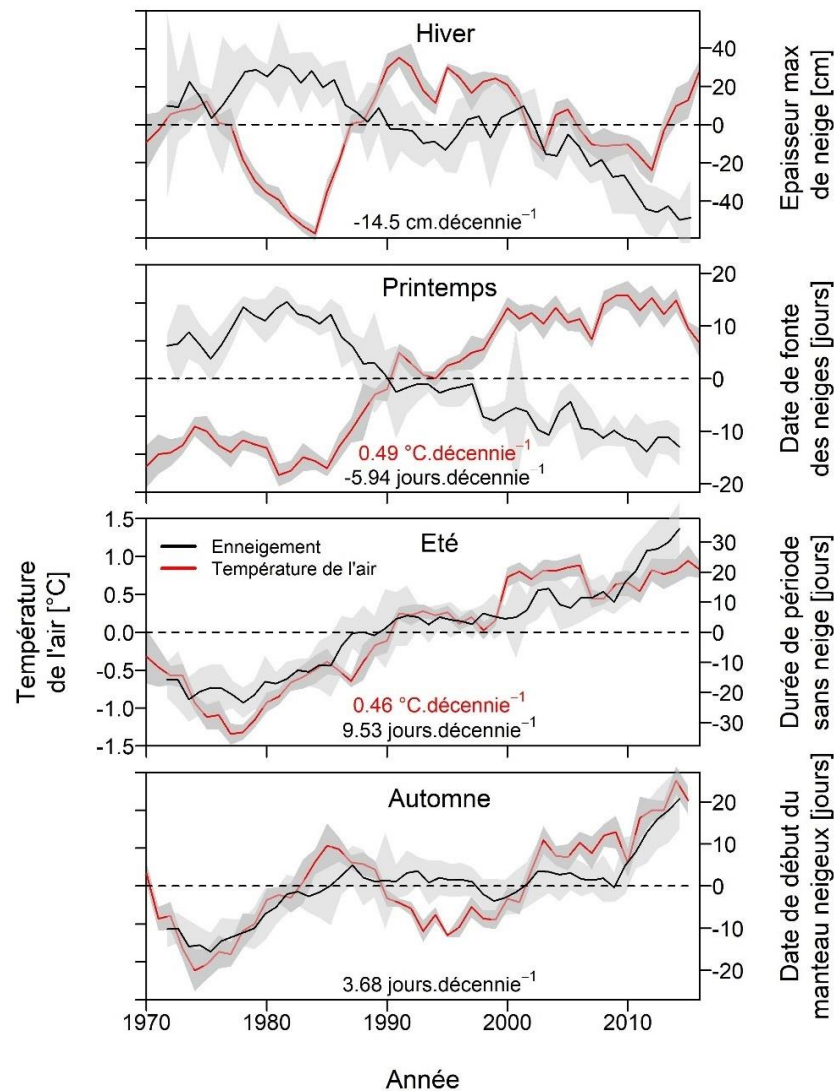


Figure 3. Température de l'air et principaux paramètres du manteau neigeux, agrégés par saison dans les Alpes suisses sur la période 1970-2016 (anomalies moyennes de 6 stations MétéoSuisse situées entre 1298 et 2540 m d'altitude). Les tendances correspondantes sont reportées sur les graphes lorsqu'elles sont significatives ($P < 0,05$). *Long-term series of temperature and snow related parameters aggregated by season in the Swiss Alps (average anomalies from 6 sites ranged between 1298 and 2540 m asl over the 1970-2016 period). Corresponding trends are reported on the graphs when significant ($P < 0.05$).*

La durée du manteau neigeux est ainsi très sensible à l'évolution de la température de l'air (Hantel et Hirtl-Wielke, 2007), notamment au printemps (Hantel *et al.*, 2000 ; Wielke *et al.*, 2004), ce qui est donc aussi le cas pour sa date de démarrage à l'automne, sa date de fonte au printemps, ou encore à l'inverse, la durée sans présence de neige au sol en été (figure 3). A moyenne altitude, les études de Rebetz (1996), Bednorz (2004) et Schöner *et al.* (2019) indiquent que cette sensibilité du manteau neigeux existe également en hiver, puisque des températures de l'air plus élevées pendant cette saison ont pu être mises en relation avec un manteau neigeux moins épais. La sensibilité du manteau neigeux à la température de l'air a pareillement pu être constatée à l'échelle de l'Hémisphère Nord, particulièrement pendant la

période de fonte printanière, avec une réduction de l'extension du manteau neigeux et une avancée de la date de fonte des neiges principalement engendrées par une augmentation des températures de l'air au cours du XX^e siècle (Brown et Robinson, 2011 ; Peng *et al.*, 2013). A haute altitude dans les Alpes, l'épaisseur de la couverture neigeuse semble en revanche davantage sensible aux variations du cumul des précipitations plutôt qu'aux températures de l'air (Schöner *et al.*, 2019). De manière générale, les changements dans la quantité des précipitations ne semblent avoir qu'une petite influence sur l'évolution du manteau neigeux alpin (Scherrer *et al.*, 2004). Toutefois, la diminution observée de l'apport en précipitations solides, contrôlé majoritairement par l'augmentation des températures de l'air, joue un rôle notable sur la réduction observée de la durée du manteau neigeux (Pellicciotti *et al.*, 2010).

La forte sensibilité du manteau neigeux à la température de l'air a entraîné une importante variabilité interannuelle de la limite altitudinale moyenne de l'enneigement continu dans les Alpes, mais aussi sa remontée progressive en altitude d'environ 120 à 170 m par degré de réchauffement des températures de l'air selon les saisons (Hantel et Maurer, 2011 ; Hantel *et al.*, 2012). Les mêmes auteurs soulignent également que cette limite altitudinale moyenne d'enneigement en hiver correspond à la zone où la durée du manteau neigeux est la plus sensible aux variations de la température de l'air. Le phénomène de rétroaction de l'albédo des surfaces enneigées et des glaciers joue par ailleurs un rôle important dans cette zone altitudinale. En effet, plus il y a de neige avec un sol ainsi recouvert par une surface très claire, plus les jours avec une température minimale inférieure à 0°C sont fréquents (Bednorz, 2004).

2.2. Projections futures d'ici 2100

Alors que le cumul moyen annuel des précipitations ne devrait pas beaucoup évoluer au cours du XXI^e siècle, notamment en hiver (Jasper *et al.*, 2004 ; CH2011, 2011 ; Zimmermann *et al.*, 2013), la plupart des modèles numériques et scénarios d'émissions de gaz à effet de serre envisagent une augmentation significative des températures de l'air de 2 à 5°C en moyenne à l'échelle du globe d'ici 2100 (IPCC, 2013), incluant les Alpes (Jasper *et al.*, 2004 ; CH2011, 2011 ; Zimmermann *et al.*, 2013). Ce réchauffement devrait engendrer une réduction des précipitations neigeuses sur l'ensemble des Alpes, plus limitée à haute altitude mais pouvant atteindre plus de 80 % dans certaines zones de basse altitude (Frei *et al.*, 2018), ainsi qu'une augmentation de la quantité de neige humide par rapport à la neige sèche, surtout au printemps (Castebrunet *et al.*, 2014).

Avec une réduction annoncée des précipitations neigeuses, combinée à une poursuite de l'augmentation des températures de l'air, les différents scénarios climatiques prévoient une forte réduction de l'épaisseur moyenne de la couverture neigeuse des Alpes d'ici la fin du XXI^e siècle (Jasper *et al.*, 2004 ; Rousselot *et al.*, 2012). Celle-ci pourrait être visible à toutes les altitudes, avec une diminution envisagée de l'ordre de 35 à 50 % à haute altitude et jusqu'à plus de 90 % à basse et moyenne altitude selon l'intensité du réchauffement à venir (Schmucki *et al.*, 2015 ; Marty *et al.*, 2017b ; Hanzer *et al.*, 2018 ; Verfaillie *et al.*, 2018). Une réduction significative de la durée du manteau neigeux continu est également prévue (Marke *et al.*, 2015), pouvant entraîner un retard de un mois dans sa mise en place à l'automne et une fonte des neiges jusqu'à trois mois plus précoce par rapport au début des années 2000 selon les scénarios (Bavay *et al.*, 2013 ; Marty *et al.*, 2017b). Cette réduction de la couverture neigeuse, tant sur sa durée que sur son épaisseur, est donc particulièrement présagée au printemps, principale période de fonte des neiges (Magnusson *et al.*, 2010 ; Steger *et al.*, 2013). En été aux plus hautes altitudes, une fonte totale du manteau neigeux permanent pourrait aussi se produire d'ici 2100 (Bavay *et al.*, 2009 ; Magnusson *et al.*, 2010). A l'échelle de l'Europe, une forte diminution de la durée du manteau neigeux est également attendue au cours du XXI^e siècle (Jylhä *et al.*, 2008), tout comme une réduction de l'extension de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord,

pouvant aller de 7 à 25 % entre le scénario de réchauffement climatique le plus optimiste et le plus pessimiste (IPCC, 2013).

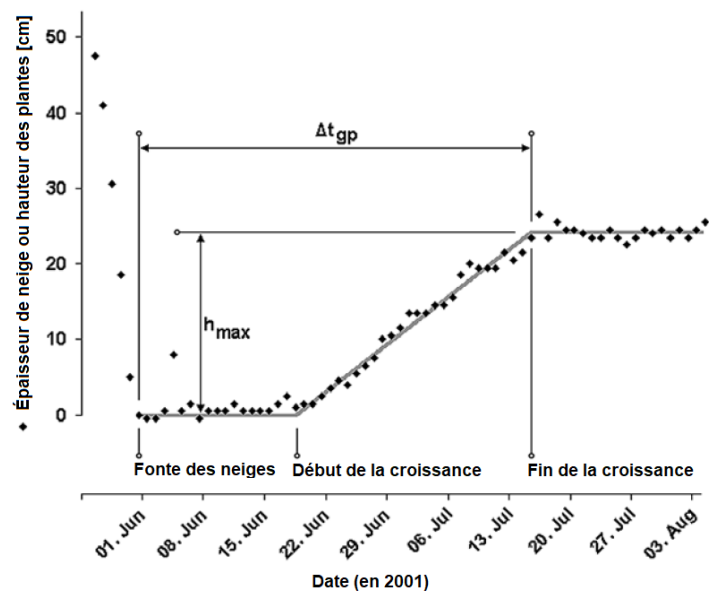
Ainsi, d'ici la fin du XXI^e siècle, un manteau neigeux continu en hiver ne pourrait vraisemblablement être garanti dans les Alpes qu'au-delà de 2000 m d'altitude, tandis que les altitudes moyennes (1000-1700 m) seraient concernées par des manteaux neigeux continus aléatoires, environ un hiver sur deux (Schmucki *et al.*, 2017). Ces futurs changements attendus dans l'épaisseur et la durée de la couverture neigeuse correspondraient approximativement à une remontée moyenne de l'enneigement continu en altitude équivalente à 800 m d'ici la fin du siècle (Bavay *et al.*, 2013 ; Marty *et al.*, 2017b).

3. Conséquences des variations du manteau neigeux

3.1. Sur les écosystèmes

Des changements dans les conditions d'enneigement peuvent avoir de multiples effets bioclimatiques sur la dynamique des communautés de plantes dans les Alpes, pouvant significativement varier d'une espèce à l'autre (Wipf *et al.*, 2009). Parmi ces changements, l'occurrence de la fonte des neiges au printemps joue un rôle important sur le contrôle de la date de démarrage de la croissance des plantes. En effet, après la disparition du manteau neigeux continu, la plupart des espèces démarrent leur croissance au bout d'un certain délai (Jonas *et al.*, 2008a) (figure 4), dont la durée est très dépendante des conditions de températures de l'air. Le cumul de ces températures après la fonte des neiges est un élément majeur déterminant le temps moyen nécessaire au déclenchement de la croissance des plantes (Huelber *et al.*, 2006). Il faut compter en moyenne entre deux et trois semaines après la date de déneigement (correspondant approximativement à un cumul de 100 degrés-jours) pour que la plupart des communautés de plantes démarrent leur croissance (Vitasse *et al.*, 2017).

Figure 4. Données issues d'un capteur ultrasonique (SR50), illustrant la fonte des neiges puis le démarrage de la croissance de la végétation alpine à la fin du printemps sur le site de Tujetsch en Suisse (2270 m d'altitude). La ligne grise représente l'ajustement linéaire effectué sur ces données, afin de déterminer un indice de croissance pour les plantes. Δt_{gp} matérialise la période de croissance et h_{max} la hauteur maximale de la végétation (adapté de Jonas *et al.*, 2008a). *Data from an ultrasonic sensor (SR50), showing the snowmelt and the beginning of alpine vegetation growth at the end of spring (Tujetsch, Switzerland, 2270 m asl). The gray line represent the linear fit used to determine a plant-growth indice. Δt_{gp} denotes the growth period and h_{max} the maximum vegetation height (adapted from Jonas *et al.*, 2008a).*



Une date de fonte des neiges plus avancée dans la saison a pu être ainsi mise en relation avec un démarrage plus précoce de la croissance de la plupart des espèces, que ce soit dans les Alpes (Wipf *et al.*, 2009 ; Vitasse *et al.*, 2017), ou encore dans d'autres zones montagneuses du globe telles que l'Alaska (Livensperger *et al.*, 2016) ou les Montagnes Rocheuses (Inouye, 2008 ; Sherwood *et al.*, 2017). Ce déneigement plus avancé dans la saison permet aux plantes de

disposer d'une plus longue période végétative (Wheeler *et al.*, 2016), engendrant notamment une augmentation de leur taille moyenne (Jonas *et al.*, 2008a ; Sherwood *et al.*, 2017), avec toutefois une vitesse de croissance ralentie pour les espèces adaptées à la présence d'un manteau neigeux en raison d'une plus grande fréquence d'événements de gel (Wipf *et al.*, 2009). Des études réalisées dans les Alpes et à travers le monde suggèrent que la date de fonte des neiges est le principal facteur contrôlant la vitesse, la floraison et la capacité de croissance de la plupart des communautés de plantes alpines (Livensperger *et al.*, 2016 ; Sherwood *et al.*, 2017 ; Vitasse *et al.*, 2017), avec de surcroît une importance des conditions de température de l'air juste après le déneigement (Jonas *et al.*, 2008a ; Hülber *et al.*, 2010 ; Petraglia *et al.*, 2014). Dans les Montagnes Rocheuses, il a par exemple été démontré qu'un déneigement avancé engendre une floraison plus abondante et précoce de certaines communautés (Inouye *et al.*, 2002 ; Inouye, 2008), mais aussi une richesse en espèces accrue (Winkler *et al.*, 2018), ce qui est également visible dans les Alpes (Wipf et Rixen, 2010).

La date de la fonte des neiges influence aussi significativement la phénologie et les dommages sur certaines communautés de plantes, liés à différentes espèces d'insectes herbivores. En raison d'une fonte de plus en plus précoce, le saule herbacé a par exemple vu une baisse dans son aptitude à se reproduire (Wheeler *et al.*, 2016).

Malgré les effets positifs d'un allongement de la période végétative des communautés de plantes alpines, permis par une fonte des neiges progressivement plus précoce, les événements de gel ayant lieu en fin d'hiver et en début de printemps risquent de mettre en péril la croissance de ces plantes adaptées à la neige, voire de leur causer des dégâts irréversibles (Inouye *et al.*, 2002). Il a par exemple été observé dans les Alpes que des événements de gel ayant eu lieu après la fonte des neiges étaient responsables d'une diminution de la croissance et de la floraison de la myrtille (Rixen *et al.*, 2010 ; Gerdol *et al.*, 2013). La plupart des dommages liés au gel et observés sur les communautés de plantes alpines surviennent dans les deux à trois semaines suivant la date de fonte des neiges, constituant alors une période de grande vulnérabilité face à ce risque de gel tardif (Rixen *et al.*, 2012). La date de fonte des neiges constitue ainsi une période clé pour ces plantes, puisque dans le cas d'une occurrence plus précoce, elle peut significativement augmenter leur risque d'exposition au gel tardif pendant cette période de vulnérabilité (Choler, 2015 ; Klein *et al.*, 2018) ainsi que les dommages liés à ces événements (Inouye, 2008 ; Sherwood *et al.*, 2017), ou encore diminuer leur résistance face aux températures de l'air négatives (Wipf *et al.*, 2009 ; Wheeler *et al.*, 2014). Des variations d'épaisseur et de durée de la couverture neigeuse peuvent aussi affecter sensiblement la résistance au gel d'un certain nombre de communautés de plantes alpines au moment de la fonte des neiges, qui est par conséquent un moteur essentiel à la réponse de ces plantes face au changement climatique (Palacio *et al.*, 2015).

Avec un climat futur plus chaud et un avancement progressif de la date de déneigement, ces communautés risquent de se retrouver de plus en plus face à des événements de gel tardif, ce qui pourrait contrebalancer le bénéfice d'une période de croissance plus longue grâce à une fonte des neiges plus précoce (Rixen *et al.*, 2012). Comme de fortes corrélations existent entre la température de l'air au printemps, la date de fonte des neiges, le début de croissance et la taille maximale des communautés de plantes alpines, il est envisagé d'ici la fin du XXI^e siècle une augmentation de la taille des plantes et de la production de biomasse, mais sans néanmoins tenir compte de ce risque d'exposition au gel (Rammig *et al.*, 2010 ; Carlson *et al.*, 2017). L'augmentation envisagée des températures de l'air devrait toutefois permettre de contrebalancer les effets néfastes d'une fonte des neiges plus précoce, en limitant les événements de gel tardif après la fonte des neiges et donc, en freinant le risque d'exposition et de dommages liés à ce gel pour les communautés de plantes alpines (Sherwood *et al.*, 2017). Cette compensation a d'ailleurs déjà pu être observée dans les Alpes suisses, où le risque

d'exposition au gel de ces plantes est resté inchangé depuis 1970 malgré une fonte des neiges progressivement plus précoce à toutes les altitudes, notamment grâce à une augmentation des températures minimales et maximales de l'air au cours de la même période (Klein *et al.*, 2018).

Le réchauffement de l'air engendre également une déstabilisation des habitats des communautés de plantes alpines dans les Alpes, surtout pour celles qui se sont adaptées à une couverture neigeuse régulière (Carbognani *et al.*, 2014). Ces espèces souffrent particulièrement du recul observé du manteau neigeux en se faisant progressivement coloniser par des espèces végétales venues d'étages altitudinaux inférieurs, et sont donc les plus menacées à terme (Matteodo *et al.*, 2016). Dans les Alpes, ce sont donc surtout les communautés de plantes alpines de moyenne et haute altitude plutôt que les prairies qui sont en déclin à cause du réchauffement des températures de l'air, colonisées petit à petit par d'autres espèces provenant de l'étage subalpin et donc mieux adaptées aux températures de l'air plus douces (processus de thermophilisation) (Cannone *et al.*, 2008 ; Vittoz *et al.*, 2009 ; Gottfried *et al.*, 2012). Ce mécanisme est un bon indicateur du réchauffement climatique, car il a été plus important dans les régions de montagne où la température de l'air a davantage augmenté lors de ces dernières décennies (Gottfried *et al.*, 2012). Au cours du XX^e siècle dans les Alpes, une remontée progressive en altitude de l'habitat de certaines communautés de plantes alpines a déjà pu être observée, entraînant une augmentation de la richesse en espèces à haute altitude aux abords des sommets (Walther *et al.*, 2005 ; Erschbamer *et al.*, 2011 ; Grytnes *et al.*, 2014 ; Steinbauer *et al.*, 2018), en lien avec l'augmentation des températures de l'air (Pauli *et al.*, 2007 ; Lenoir *et al.*, 2008 ; Frei *et al.*, 2010 ; Matteodo *et al.*, 2013 ; Wipf *et al.*, 2013 ; Lamprecht *et al.*, 2018). En outre, le même phénomène se reproduit pour les arbres à travers le monde, où une remontée progressive en altitude de la plupart des espèces est observée afin de retrouver des conditions climatiques plus favorables à leur survie (Gehrig-Fasel *et al.*, 2007 ; Harsch *et al.*, 2009).

Le manteau neigeux hivernal affecte aussi la faune de montagne, même si toutefois les effets de sa variation avec le changement climatique sont moins bien connus et plus contrastés selon les espèces que pour les communautés de plantes alpines. Tout d'abord, le déclin de la couverture neigeuse tout comme la précocité de la fonte des neiges peuvent être bénéfiques pour certaines espèces. Les rongeurs ou les ongulés voient ainsi par exemple leur accessibilité à la nourriture facilitée avec la réduction de l'épaisseur et de la durée du manteau neigeux (Korslund et Steen, 2006 ; Robinson et Merrill, 2012). Une couverture neigeuse moins épaisse en hiver et un déneigement plus précoce permettent également un meilleur succès reproductif pour le renne (Helle et Kojola, 2008) ou le lagopède alpin (Novoa *et al.*, 2008 ; Imperio *et al.*, 2013 ; Novoa *et al.*, 2016), mais aussi un taux de survie plus élevé pour le chamois (Jonas *et al.*, 2008b), ou encore une mobilité et une zone d'habitat plus étendues pour le bouquetin (Grignolio *et al.*, 2004 ; Mignatti *et al.*, 2012). En revanche, la diminution observée de la couverture neigeuse au cours de ces dernières décennies a entraîné une réduction de la taille des portées des marmottes dans les zones alpines (Tafani *et al.*, 2013).

3.2. Sur les cycles hydrologiques

L'accumulation de neige et notamment sa fonte au printemps ont un rôle prépondérant sur l'importance des débits des rivières en montagne selon les saisons : en hiver, ces débits sont faibles et continus, tandis qu'ils sont beaucoup plus importants au printemps, essentiellement en raison de l'apport lié à la neige fondue (López-Moreno et García-Ruiz, 2004). Avec une fonte des neiges prévue pour être de plus en plus précoce en moyenne au cours du XXI^e siècle, le ruissellement maximal des cours d'eau devrait progressivement s'avancer dans la saison, à savoir en hiver et au printemps, alors que les besoins en eau sont moins importants qu'en été (Barnett *et al.*, 2005). Cette augmentation du ruissellement en hiver et au printemps a déjà pu être observée dans les Alpes lors des dernières décennies et n'a pas pu être expliquée par un

unique changement des quantités des précipitations totales. La raison viendrait plutôt d'une transformation progressive des précipitations neigeuses sous forme de pluie, en lien avec une réduction significative du nombre de jours avec des températures de l'air négatives (Birsan *et al.*, 2005). Dans les Alpes, la contribution de la fonte des neiges à l'approvisionnement en eau reste actuellement significative jusqu'en milieu d'été (Bavay *et al.*, 2009). Néanmoins, d'ici 2100 et quel que soit le scénario de réchauffement climatique envisagé, l'augmentation progressive des températures de l'air risque d'affecter notablement les régimes d'écoulement des eaux via l'impact de la fonte du manteau neigeux. Ce décalage du ruissellement des eaux de fonte, progressivement plus important en hiver et au printemps et plus faible en été, devrait se poursuivre dans les Alpes au cours du XXI^e siècle, avec un pic maximal lié à la fonte des neiges décalé au printemps (Zierl et Bugmann, 2005 ; Bavay *et al.*, 2013 ; Hanzer *et al.*, 2018), pouvant entraîner des sécheresses plus importantes en été (Confortola *et al.*, 2013) et poser des problèmes d'approvisionnement en eau. D'ici la fin du siècle, la contribution de la fonte des glaces et du manteau neigeux à la décharge hydrologique devrait en outre nettement diminuer, tout comme les flux hydriques et la disponibilité en eau dans les Alpes, en particulier dans les zones de basse et moyenne altitude (Jasper *et al.*, 2004 ; Farinotti *et al.*, 2012).

Les glaciers alpins souffrent également du changement climatique. En effet, leur bilan de masse dépend des conditions climatiques extérieures, dont la température de l'air et les précipitations. L'évolution annuelle de ce bilan de masse est donc particulièrement sensible aux variations annuelles de ces deux paramètres climatiques (Rabatel *et al.*, 2013 ; Reveillet *et al.*, 2017). Des précipitations totales relativement inchangées avec toutefois une part plus faible tombant sous forme de neige, combinées à une augmentation significative des températures de l'air au cours de ces dernières décennies ont engendré un déséquilibre du bilan de masse des glaciers. Une remontée progressive de 170 m en altitude de la limite séparant leurs zones de bilan de masse excédentaires et déficitaires (ligne d'équilibre) a ainsi déjà pu être observée dans les Alpes occidentales depuis les années 1980, en lien essentiellement avec l'augmentation des températures de l'air (Rabatel *et al.*, 2013). Ce déséquilibre, majoritairement commandé par une fusion liée à l'augmentation des températures de l'air, plutôt que par une diminution des apports en précipitations neigeuses (Vincent, 2002 ; Rabatel *et al.*, 2013 ; Thibert *et al.*, 2013), tend à réduire progressivement la surface des glaciers. Une perte de 45 % de leur surface a été constatée en moyenne dans les Alpes entre 1900 et 2011 (Huss, 2012), dont près de 30 % a été perdue depuis les années 1970 (Haeberli *et al.*, 2007 ; Diolaiuti *et al.*, 2012 ; Fischer *et al.*, 2014 ; Gardent *et al.*, 2014). Cette réduction de surface s'accélère surtout depuis le début des années 1990, que ce soit à l'échelle du globe (Zemp *et al.*, 2015) ou de l'ensemble des Alpes (Cannone *et al.*, 2008 ; Abermann *et al.*, 2009 ; Huss, 2012) et devrait vraisemblablement se poursuivre jusqu'à la fin du XXI^e siècle (Huss, 2012). Un potentiel réchauffement d'environ 3 à 4°C d'ici 2100 pourrait entraîner une réduction d'environ 80 à 90 % du volume tout comme de la surface des glaciers alpins actuels (Zemp *et al.*, 2006 ; Linsbauer *et al.*, 2013 ; Radić *et al.*, 2014 ; Hanzer *et al.*, 2018).

Depuis les années 1970, la fonte accélérée du manteau neigeux et le recul des glaciers alpins engendrent aussi une augmentation des débits des cours d'eau au printemps et en été. Cette augmentation est à mettre principalement en lien avec le ratio pluie/neige plus faible et donc, avec une accumulation plus faible de neige et un réchauffement de l'air (Pellicciotti *et al.*, 2010), ce qui est également envisagé à terme dans les futurs scénarios climatiques, comme par exemple en Himalaya (Sharma *et al.*, 2013). A l'automne, l'évolution progressive des chutes de neige en précipitations liquides au cours des prochaines décennies risque par ailleurs d'engendrer une plus grande probabilité de crues (Bavay *et al.*, 2009).

3.3. Sur le tourisme hivernal

L'influence du changement climatique et notamment de la fonte rapide du manteau neigeux sur les activités économiques humaines telles que le tourisme hivernal est un phénomène complexe et encore assez mal connu de nos jours. Selon une étude réalisée dans les Alpes autrichiennes, une relation significative existe entre la variation de l'épaisseur du manteau neigeux et celle de la durée des séjours des touristes pour les stations de basse et moyenne altitude : plus l'enneigement naturel moyen est faible et plus la durée des séjours est courte (Falk, 2010). L'étude de Pütz *et al.* (2011) confirme que les touristes perçoivent comme très important la fiabilité de l'enneigement hivernal de leurs potentielles futures destinations à la montagne. Les conditions météorologiques possèdent également une incidence sur la fréquentation touristique des stations de ski. En effet, un temps ensoleillé semble être un atout suffisant pour maintenir la fréquentation dans les stations en cas de mauvaises conditions d'enneigement (Gonseth, 2013), comme cela a par exemple pu être le cas lors de l'hiver 2010-2011 dans les Alpes françaises (François *et al.*, 2014). L'étude de Falk (2013) soutient en revanche que les conditions météorologiques et d'enneigement ont un faible impact sur la demande touristique. Il a été calculé qu'une diminution de 10 % de l'épaisseur de la couverture neigeuse ne réduit que d'environ 1 % le nombre de nuitées, essentiellement grâce à la compensation permise par l'enneigement artificiel.

Afin d'établir la viabilité actuelle et future d'une station de ski par rapport à son enneigement, un principe appelé « règle des 100 jours » a été internationalement admis et stipule qu'une station est viable si au cours d'un hiver, un enneigement minimal de 30 cm est observé pendant au moins 100 jours aux altitudes intermédiaires de la station, et si cela se retrouve au minimum 7 hivers sur 10 (Abegg *et al.*, 2007). L'altitude moyenne de cette ligne de viabilité est variable selon les régions, s'étendant de 1050 m dans la partie Nord des Alpes (Allemagne, Autriche) à 1500 m dans sa partie Sud (Alpes françaises du Sud, Italie). Cette viabilité risque d'être mise à rude épreuve avec le réchauffement climatique annoncé et la réduction progressive de l'épaisseur tout comme de la durée moyenne du manteau neigeux lors des prochaines décennies. Une augmentation de la température de l'air de 2°C pourrait ainsi diminuer d'environ 25 % le nombre de stations de ski possédant un enneigement naturel moyen satisfaisant en hiver afin d'assurer l'ouverture de leur domaine (Koenig et Abegg, 1997 ; Elsasser et Messerli, 2001 ; Steiger et Abegg 2018), voire près de 50 % des stations en cas d'augmentation de 4°C de la température de l'air (Elsasser et Messerli, 2001).

La fabrication de neige artificielle serait alors de plus en plus privilégiée, tout comme les stations de ski se situant à des altitudes plus élevées, au détriment de celles de basse et moyenne altitude, engendrant un grand nombre de nouveaux problèmes, notamment économiques et environnementaux (Elsasser et Messerli, 2001). L'enneigement naturel hivernal est d'ores et déjà partiellement critique dans les Alpes autour de 1200 m d'altitude, tandis qu'il est encore significatif à partir de 2000 m et devrait a priori le rester jusqu'en 2050 environ (Rixen *et al.*, 2011). Afin de maintenir leur viabilité et une offre de ski d'ici la fin du XXI^e siècle, la plupart des stations pourraient devoir multiplier leur fabrication de neige artificielle par deux en cas d'augmentation de 2°C des températures de l'air (Steiger et Abegg, 2018), voire par quatre si celle-ci dépasse les 3°C (Steiger, 2010 ; Steiger et Stötter 2013).

Avec ce réchauffement de l'air envisagé, l'enneigement artificiel deviendra rapidement critique à son tour à basse et moyenne altitude dans les décennies à venir (Rixen *et al.*, 2011). Cette neige artificielle supplémentaire ne pourra pas totalement compenser les effets du réchauffement climatique, dans le sens où l'augmentation des températures de l'air au-delà de 2°C ne permettra probablement plus de fabriquer cette neige en quantité suffisante (Pons *et al.*, 2015) et donc assurer une durée d'enneigement satisfaisante pour l'activité des stations de

sports d'hiver de basse et moyenne altitude, surtout pour celles se situant en-dessous de 1600 m (Steiger et Mayer, 2008). Dans les Alpes, la viabilité du tourisme hivernal se limitera progressivement aux altitudes supérieures à 1800 m à l'horizon 2050 (Elsasser et Bürki, 2002 ; Steger *et al.*, 2013), puis au-delà de 2000 m vers 2100 (Steger *et al.*, 2013). La fabrication de neige artificielle pourrait permettre aux stations de retarder les effets du réchauffement climatique sur le manteau neigeux et de maintenir une certaine offre de skiabilité jusqu'au milieu du XXI^e siècle (Steiger, 2010). Toutefois, en raison de la limitation technique de ce procédé et des besoins toujours plus grands par rapport aux potentiels de production, l'enneigement artificiel risque de ne pas être une solution durable à terme (Spandre *et al.*, 2015).

L'étude de Wolfsegger *et al.* (2008) montre pourtant que le changement climatique n'est pas forcément perçu comme une menace sérieuse par certains dirigeants de stations de ski de basse altitude, qui estiment qu'avec l'adaptation technologique, la société devrait trouver des solutions efficaces au cours du XXI^e siècle afin de compenser la diminution progressive envisagée de l'enneigement naturel, essentiellement grâce à la fabrication de neige artificielle.

Conclusion

Cet état des lieux bibliographique a permis de mettre en évidence la dimension du récent changement climatique observé depuis le XX^e siècle à travers les Alpes européennes (notamment occidentales et centrales), avec de fortes disparités selon l'altitude ou les saisons. L'augmentation de près de 2°C des températures de l'air observée au cours de ces dernières décennies et une diminution de la part des précipitations tombant sous forme de neige ont entraîné une importante réduction du manteau neigeux alpin, que ce soit dans sa durée ou son épaisseur. Cette réduction devrait vraisemblablement se poursuivre au cours du XXI^e siècle, pouvant aller certains hivers jusqu'à priver de couverture neigeuse les zones se situant sous 2000 m d'altitude. La disparition progressive observée et envisagée de la couverture neigeuse en hiver et au printemps ne porte pas atteinte qu'au tourisme hivernal dans les stations de sports d'hiver, mais aussi à l'approvisionnement général et la distribution des ressources en eau, ou encore à l'ensemble des écosystèmes d'altitude adaptés à cette présence de neige régulière. Ces derniers voient en effet leur habitat naturel lentement se modifier ou disparaître, en les contraignant à migrer en altitude, tant que cela reste possible. Migrer vers les sommets pour ces écosystèmes ou pour les stations de sports d'hiver ne semble pas être une solution durable, car les zones de haute altitude n'apparaissent pas forcément beaucoup plus épargnées à terme que celles de basse ou moyenne altitude par ce réchauffement planétaire des températures de l'air, qui tend à s'accélérer de plus en plus depuis les années 1980.

De nouvelles études plus approfondies sur les variations et la saisonnalité du manteau neigeux dans les Alpes devraient permettre d'améliorer les connaissances sur les conséquences socio-économiques et environnementales de ces fluctuations, particulièrement à moyenne et haute altitude où les effets du changement climatique se font également ressentir.

Remerciements : Je remercie Yann Vitasse et Martine Rebetez pour leur aide et leurs précieux conseils dans la réalisation de cette revue bibliographique. Je remercie également MétéoSuisse pour avoir gracieusement fourni les données climatiques qui ont permis l'élaboration de la Figure 3, ainsi que Blandine Rimaud, Christophe Randin et Samuel Morin pour leurs améliorations éditoriales.

Références bibliographiques

Abegg B., Agrawala S., Crick F., de Montfalcon A., 2007. *Climate change impacts and adaptation in winter tourism*. In: Agrawala S (ed) *Climate change in the European Alps. Adapting winter tourism and natural hazards management*. OECD, Paris, 25-60.

- Abermann J., Lambrecht A., Fischer A., Kuhn M., 2009. Quantifying changes and trends in glacier area and volume in the Austrian Ötztal Alps (1969-1997-2006). *The Cryosphere*, 3, 205.
- Acquaotta F., Fratianni S., Garzena D., 2015. Temperature changes in the North-Western Italian Alps from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 619-634.
- Allen M., Antwi-Agyei P., Aragon-Durand F., Babiker M., Bertoldi P., Bind M., Brown S., Buckeridge M., Camilloni I., Cartwright A., 2019. *Technical Summary: Global warming of 1.5°C*. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27, 17-46.
- Barnett T.P., Adam J.C., Lettenmaier D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303.
- Bartolini E., Claps P., D'odorico P., 2009. Interannual variability of winter precipitation in the European Alps: relations with the North Atlantic Oscillation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 17-25.
- Bavay M., Grünewald T., Lehning M., 2013. Response of snow cover and runoff to climate change in high Alpine catchments of Eastern Switzerland. *Advances in Water Resources*, 55, 4-16.
- Bavay M., Lehning M., Jonas T., Löwe H., 2009. Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments. *Hydrological Processes*, 23, 95-108.
- Bednorz E., 2004. Snow cover in eastern Europe in relation to temperature, precipitation and circulation. *International Journal of Climatology*, 24, 591-601.
- Begert M., Schlegel T., Kirchhofer W., 2005. Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25, 65-80.
- Birsan M.-V., Molnar P., Burlando P., Pfaundler M., 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314, 312-329.
- Blanchet J., Marty C., Lehning M., 2009. Extreme value statistics of snowfall in the Swiss Alpine region. *Water Resources Research*, 45.
- Bocchiola D., Diolaiuti G., 2010. Evidence of climate change within the Adamello Glacier of Italy. *Theoretical and Applied Climatology*, 100, 351-369.
- Böhm R., Auer I., Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Schöner W., 2001. Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *International Journal of Climatology*, 21, 1779-1801.
- Bristow K.L., Campbell G.S., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31, 159-166.
- Brown R.D., Mote P.W., 2009. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climate*, 22, 2124-2145.
- Brown R.D., Robinson D.A., 2011. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5, 219-229.
- Brugnara Y., Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Simolo C., 2012. High- resolution analysis of daily precipitation trends in the central Alps over the last century. *International Journal of Climatology*, 32, 1406-1422.

- Brunetti M., Lentini G., Maugeri M., Nanni T., Auer I., Boehm R., Schoener W., 2009. Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multi-variable analysis. *International Journal of Climatology*, 29, 2197-2225.
- Cannone N., Diolaiuti G., Guglielmin M., Smiraglia C., 2008. Accelerating climate change impacts on alpine glacier forefield ecosystems in the European Alps. *Ecological Applications*, 18, 637-648.
- Carbognani M., Tomaselli M., Petraglia A., 2014. Current vegetation changes in an alpine late snowbed community in the south-eastern Alps (N-Italy). *Alpine Botany*, 124, 105-113.
- Carlson B.Z., Corona M.C., Dentant C., Bonet R., Thuiller W., Choler P., 2017. Observed long-term greening of alpine vegetation—a case study in the French Alps. *Environmental Research Letters*, 12, 114006.
- 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, 1673-1697.
- Ceppi P., Scherrer S.C., Fischer A.M., Appenzeller C., 2012. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *International Journal of Climatology*, 32, 203-213.
- CH2011, 2011. *Swiss climate change scenarios CH2011*. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, und OcCC, Zurich.
- Chen X., Liang S., Cao Y., He T., Wang D., 2015. Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001–2014. *Scientific reports*, 5, 16820.
- Choi G., Robinson D.A., Kang S., 2010. Changing northern hemisphere snow seasons. *Journal of Climate*, 23, 5305-5310.
- Choler P., 2015. Growth response of temperate mountain grasslands to inter-annual variations in snow cover duration. *Biogeosciences*, 12, 3885-3897.
- Confortola G., Soncini A., Bocchiola D., 2013. Climate change will affect hydrological regimes in the Alps. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 101, 3.
- Corlett R.T., Westcott D.A., 2013. Will plant movements keep up with climate change? *Trends in ecology & evolution*, 28, 482-488.
- Crowley T.J., 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289, 270-277.
- Diolaiuti G., Bocchiola D., Vagliasindi M., D'agata C., Smiraglia C., 2012. The 1975–2005 glacier changes in Aosta Valley (Italy) and the relations with climate evolution. *Progress in Physical Geography*, 36, 764-785.
- Dumas D., 2013. Changes in temperature and temperature gradients in the French Northern Alps during the last century. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, 223-233.
- Durand Y., Giraud G., Laternser M., Etchevers P., Mérindol L., Lesaffre B., 2009. Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958–2005): climatology and trends for snow cover. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 2487-2512.
- Elsasser H., Bürki R., 2002. Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research*, 20, 253-257.
- Elsasser H., Messerli P., 2001. The vulnerability of the snow industry in the Swiss Alps. *Mountain research and development*, 21, 335-339.
- Erschbamer B., Unterluggauer P., Winkler E., Mallaun M., 2011. Changes in plant species diversity revealed by long-term monitoring on mountain summits in the Dolomites (northern Italy). *Preslia*, 83, 387.

- Falk M., 2010. A dynamic panel data analysis of snow depth and winter tourism. *Tourism Management*, 31, 912-924.
- Falk M., 2013. Impact of long- term weather on domestic and foreign winter tourism demand. *International Journal of Tourism Research*, 15, 1-17.
- Farinotti D., Usselman S., Huss M., Bauder A., Funk M., 2012. Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high- alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26, 1909-1924.
- Fischer M., Huss M., Barboux C., Hoelzle M., 2014. The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46, 933-945.
- Foster G., Rahmstorf S., 2011. Global temperature evolution 1979–2010. *Environmental Research Letters*, 6, 044022.
- François H., Morin S., Lafaysse M., George-Marcelpoil E., 2014. Crossing numerical simulations of snow conditions with a spatially-resolved socio-economic database of ski resorts: A proof of concept in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 108, 98-112.
- Frei C., Schär C., 1998. A precipitation climatology of the Alps from high- resolution rain-gauge observations. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18, 873-900.
- Frei E., Bodin J., Walther G.-R., 2010. Plant species' range shifts in mountainous areas - all uphill from here? *Botanica Helvetica*, 120, 117-128.
- Frei P., Kotlarski S., Liniger M.A., Schär C., 2018. Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12, 1.
- Gajić-Čapka M., 2011. Snow climate baseline conditions and trends in Croatia relevant to winter tourism. *Theoretical and Applied Climatology*, 105, 181-191.
- Gardent M., Rabatel A., Dedieu J.-P., Deline P., 2014. Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120, 24-37.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N.E., 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18, 571-582.
- Gerdol R., Siffi C., Iacumin P., Gualmini M., Tomaselli M., 2013. Advanced snowmelt affects vegetative growth and sexual reproduction of *Vaccinium myrtillus* in a sub- alpine heath. *Journal of Vegetation Science*, 24, 569-579.
- Gonseth C., 2013. Impact of snow variability on the Swiss winter tourism sector: implications in an era of climate change. *Climatic Change*, 119, 307-320.
- Gottfried M., Pauli H., Futschik A., Akhalkatsi M., Barančok P., Alonso J.L.B., Coldea G., Dick J., Erschbamer B., Kazakis G., 2012. Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2, 111.
- Grignolio S., Rossi I., Bassano B., Parrini F., Apollonio M., 2004. Seasonal variations of spatial behaviour in female Alpine ibex (*Capra ibex ibex*) in relation to climatic conditions and age. *Ethology Ecology & Evolution*, 16, 255-264.
- Grytnes J.A., Kapfer J., Jurasinski G., Birks H.H., Henriksen H., Klanderud K., Odland A., Ohlson M., Wipf S., Birks H.J.B., 2014. Identifying the driving factors behind observed elevational range shifts on European mountains. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 876-884.

- Haerberli W., Hoelzle M., Paul F., Zemp M., 2007. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. *Annals of Glaciology*, 46, 150-160.
- Hantel M., Ehrendorfer M., Haslinger A., 2000. Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. *International Journal of Climatology*, 20, 615-640.
- Hantel M., Hirtl-Wielke L.M., 2007. Sensitivity of Alpine snow cover to European temperature. *International Journal of Climatology*, 27, 1265-1275.
- Hantel M., Maurer C., 2011. The median winter snowline in the Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 20, 267-276.
- Hantel M., Maurer C., Mayer D., 2012. The snowline climate of the Alps 1961–2010. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 517-537.
- Hanzer F., Förster K., Nemeč J., Strasser U., 2018. Projected cryospheric and hydrological impacts of 21st century climate change in the Ötztal Alps (Austria) simulated using a physically based approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1593-1614.
- Harsch M.A., Hulme P.E., McGlone M.S., Duncan R.P., 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology letters* 12:1040-1049.
- Helle T., Kojola I., 2008. Demographics in an alpine reindeer herd: effects of density and winter weather. *Ecography*, 31, 221-230.
- Hernández-Henríquez M.A., Déry S.J., Derksen C., 2015. Polar amplification and elevation-dependence in trends of Northern Hemisphere snow cover extent, 1971–2014. *Environmental Research Letters*, 10, 044010.
- Huelber K., Gottfried M., Pauli H., Reiter K., Winkler M., Grabherr G., 2006. Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Central Alps: implications for climate warming. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38, 99-103.
- Hülber K., Winkler M., Grabherr G., 2010. Intraseasonal climate and habitat-specific variability controls the flowering phenology of high alpine plant species. *Functional Ecology*, 24, 245-252.
- Hüsler F., Jonas T., Riffler M., Musial J.P., Wunderle S., 2014. A satellite-based snow cover climatology (1985–2011) for the European Alps derived from AVHRR data. *The Cryosphere*, 8, 73-90.
- Huss M., 2012. Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere Discuss.*, 6, 1117-1156.
- Imperio S., Bionda R., Viterbi R., Provenzale A., 2013. Climate change and human disturbance can lead to local extinction of Alpine rock ptarmigan: New insight from the Western Italian Alps. *PLoS ONE*, 8, e81598.
- Inouye D.W., 2008. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology*, 89, 353-362.
- Inouye D.W., Morales M.A., Dodge G.J., 2002. Variation in timing and abundance of flowering by *Delphinium barbeyi* Huth (Ranunculaceae): the roles of snowpack, frost, and La Nina, in the context of climate change. *Oecologia*, 130, 543-550.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jasper K., Calanca P., Gyalistras D., Fuhrer J., 2004. Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research*, 26, 113-129.

- Joly D., Bois B., Zakšek K., 2012. Rank-ordering of topographic variables correlated with temperature. *Atmospheric and Climate Sciences*, 2, 139-147.
- Jonas T., Rixen C., Sturm M., Stoeckli V., 2008a. How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113, G03013.
- Jonas T., Geiger F., Jenny H., 2008b. Mortality pattern of the Alpine chamois: the influence of snow–meteorological factors. *Annals of Glaciology*, 49, 56-62.
- Jones P., Lister D., Osborn T., Harpham C., Salmon M., Morice C., 2012. Hemispheric and large- scale land- surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117, D05127.
- Jump A.S., Penuelas J., 2005. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters*, 8, 1010-1020.
- Jylhä K., Fronzek S., Tuomenvirta H., Carter T.R., Ruosteenoja K., 2008. Changes in frost, snow and Baltic sea ice by the end of the twenty-first century based on climate model projections for Europe. *Climatic Change*, 86, 441-462.
- Klein G., Rebetez M., Rixen C., Vitasse Y., 2018. Unchanged risk of frost exposure for subalpine and alpine plants after snowmelt in Switzerland despite climate warming. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1755-1762.
- Klein G., Vitasse Y., Rixen C., Marty C., Rebetez M., 2016. Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139, 637-649.
- Koenig U., Abegg B., 1997. Impacts of climate change on winter tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5, 46-58.
- Körner C., 2003. *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems*. With 47 tables, Springer Science & Business Media.
- Korslund L., Steen H., 2006. Small rodent winter survival: snow conditions limit access to food resources. *Journal of Animal Ecology*, 75, 156-166.
- Lamprecht A., Semenchuk P.R., Steinbauer K., Winkler M., Pauli H., 2018. Climate change leads to accelerated transformation of high- elevation vegetation in the central Alps. *New Phytologist*, 220, 447-459.
- Laternser M., Schneebeli M., 2003. Long- term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). *International Journal of Climatology*, 23, 733-750.
- Lenoir J., Gégout J.-C., Marquet P., De Ruffray P., Brisse H., 2008. A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320, 1768-1771.
- Linsbauer A., Paul F., Machguth H., Haeberli W., 2013. Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 54, 241-253.
- Livensperger C., Steltzer H., Darrouzet-Nardi A., Sullivan P.F., Wallenstein M., Weintraub M.N., 2016. Earlier snowmelt and warming lead to earlier but not necessarily more plant growth. *AoB Plants*, 8, plw021.
- López-Moreno J., García-Ruiz J.M., 2004. Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees/Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles. *Hydrological Sciences Journal*, 49, 787-802.
- López-Moreno J., Revuelto J., Gilaberte M., Morán-Tejeda E., Pons M., Jover E., Esteban P., García C., Pomeroy J., 2014. The effect of slope aspect on the response of snowpack to climate warming in the Pyrenees. *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 207-219.

- Magnusson J., Jonas T., López-Moreno I., Lehning M., 2010. Snow cover response to climate change in a high alpine and half-glacierized basin in Switzerland. *Hydrology Research*, 41, 230-240.
- Marke T., Strasser U., Hanzer F., Stötter J., Wilcke R.A.I., Gobiet A., 2015. Scenarios of future snow conditions in Styria (Austrian Alps). *Journal of Hydrometeorology*, 16, 261-277.
- Marty C., 2008. Regime shift of snow days in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 35, L12501.
- Marty C., Blanchet J., 2012. Long-term changes in annual maximum snow depth and snowfall in Switzerland based on extreme value statistics. *Climatic Change*, 111, 705-721.
- Marty C., Meister R., 2012. Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 573-583.
- Marty C., Tilg A.-M., Jonas T., 2017a. Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18, 1021-1031.
- Marty C., Schlögl S., Bavay M., Lehning M., 2017b. How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, 11, 517-529.
- Matteodo M., Ammann K., Verrecchia E.P., Vittoz P., 2016. Snowbeds are more affected than other subalpine–alpine plant communities by climate change in the Swiss Alps. *Ecology and Evolution*, 6, 6969-6982.
- Matteodo M., Wipf S., Stöckli V., Rixen C., Vittoz P., 2013. Elevation gradient of successful plant traits for colonizing alpine summits under climate change. *Environmental Research Letters*, 8, 024043.
- Mignatti A., Casagrandi R., Provenzale A., von Hardenberg A., Gatto M., 2012. Sex- and age-structured models for Alpine ibex *Capra ibex* population dynamics. *Wildlife Biology*, 18, 318-333.
- Mountain Research Initiative EDWWG, 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5, 424.
- Nicolet G., Eckert N., Morin S., Blanchet J., 2018. Assessing climate change impact on the spatial dependence of extreme snow depth maxima in the French Alps. *Water Resources Research*, 54, 7820-7840.
- Novoa C., Astruc G., Desmet J.-F., Besnard A., 2016. No short-term effects of climate change on the breeding of Rock Ptarmigan in the French Alps and Pyrenees. *Journal of Ornithology*, 157, 797-810.
- Novoa C., Besnard A., Brenot J.F., Ellison L.N., 2008. Effect of weather on the reproductive rate of Rock Ptarmigan *Lagopus muta* in the eastern Pyrenees. *Ibis*, 150, 270-278.
- Palacio S., Lenz A., Wipf S., Hoch G., Rixen C., 2015. Bud freezing resistance in alpine shrubs across snow depth gradients. *Environmental and Experimental Botany*, 118, 95-101.
- Park S.-H., Lee M.-J., Jung H.-S., 2012. Analysis on the snow cover variations at Mt. Kilimanjaro using Landsat satellite images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 28, 409-420.
- Pauli H., Gottfried M., Reiter K., Klettner C., Grabherr G., 2007. Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology*, 13, 147-156.
- Pederson G.T., Betancourt J.L., McCabe G.J., 2013. Regional patterns and proximal causes of the recent snowpack decline in the Rocky Mountains, US. *Geophysical Research Letters*, 40, 1811-1816.

- Pellicciotti F., Bauder A., Parola M., 2010. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. *Water Resources Research*, 46, W10522.
- Peng S., Piao S., Ciais P., Friedlingstein P., Zhou L., Wang T., 2013. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environmental Research Letters*, 8, 014008.
- Pepin N., Bradley R., Diaz H., Baraër M., Caceres E., Forsythe N., Fowler H., Greenwood G., Hashmi M., Liu X., 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5, 424.
- Pepin N., Daly C., Lundquist J., 2011. The influence of surface versus free- air decoupling on temperature trend patterns in the western United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116.
- Pepin N., Lundquist J., 2008. Temperature trends at high elevations: patterns across the globe. *Geophysical Research Letters*, 35, L14701.
- Petraglia A., Tomaselli M., Bon M.P., Delnevo N., Chiari G., Carbognani M., 2014. Responses of flowering phenology of snowbed plants to an experimentally imposed extreme advanced snowmelt. *Plant Ecology*, 215, 759-768.
- Plaut G., Simonnet E., 2001. Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Research*, 17, 303-324.
- Pons M., López-Moreno J.I., Rosas-Casals M., Jover È., 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic Change*, 131, 591-605.
- Pütz M., Gallati D., Kytzia S., Elsasser H., Lardelli C., Teich M., Waltert F., Rixen C., 2011. Winter tourism, climate change, and snowmaking in the Swiss Alps: tourists' attitudes and regional economic impacts. *Mountain Research and Development*, 31, 357-362.
- Rabatel A., Letréguilly A., Dedieu J., Eckert N., 2013. Changes in glacier equilibrium-line altitude in the western Alps from 1984 to 2010: evaluation by remote sensing and modeling of the morpho-topographic and climate controls. *The Cryosphere*, 7, 1455-1471.
- Radić V., Bliss A., Beedlow A.C., Hock R., Miles E., Cogley J.G., 2014. Regional and global projections of twenty-first century glacier mass changes in response to climate scenarios from global climate models. *Climate Dynamics*, 42, 37-58.
- Rammig A., Jonas T., Zimmermann N., Rixen C., 2010. Changes in alpine plant growth under future climate conditions. *Biogeosciences*, 7, 2013.
- Rangwala I., Miller J.R., 2012. Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. *Climatic Change*, 114, 527-547.
- Rebetez M., 1996. Seasonal relationship between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region. *Theoretical and Applied Climatology*, 54, 99-106.
- Rebetez M., Reinhard M., 2008. Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology*, 91, 27-34.
- Reid P.C., Hari R.E., Beaugrand G., Livingstone D.M., Marty C., Straile D., Barichivich J., Goberville E., Adrian R., Aono Y., 2016. Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology*, 22, 682-703.
- Reveillet M., Vincent C., Six D., Rabatel A., 2017. Which empirical model is best suited to simulate glacier mass balances? *Journal of Glaciology*, 63, 39-54.
- Rixen C., Dawes M.A., Wipf S., Hagedorn F., 2012. Evidence of enhanced freezing damage in treeline plants during six years of CO₂ enrichment and soil warming. *Oikos*, 121, 1532-1543.

- Rixen C., Schwoerer C., Wipf S., 2010. Winter climate change at different temporal scales in *Vaccinium myrtillus*, an Arctic and alpine dwarf shrub. *Polar Research*, 29, 85-94.
- Rixen C., Teich M., Lardelli C., Gallati D., Pohl M., Pütz M., Bebi P., 2011. Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mountain Research and Development*, 31, 229-236.
- Robinson B.G., Merrill E.H., 2012. The influence of snow on the functional response of grazing ungulates. *Oikos*, 121, 28-34.
- Rolland C., 2003. Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in Alpine regions. *Journal of Climate*, 16, 1032-1046.
- Rousselot M., Durand Y., Giraud G., Mérindol L., Dombrowski-Etchevers I., Déqué M., Castebrunet H., 2012. Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps-application to future climate and snow cover. *The Cryosphere*, 6, 785-805.
- Sanchez-Lorenzo A., Wild M., 2012. Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12, 8635-8644.
- Scherrer S., Ceppi P., Croci-Maspoli M., Appenzeller C., 2012. Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends. *Theoretical and Applied Climatology*, 110, 509-516.
- Scherrer S.C., Appenzeller C., 2006. Swiss Alpine snow pack variability: major patterns and links to local climate and large-scale flow. *Climate Research*, 32, 187-199.
- Scherrer S.C., Appenzeller C., Laternser M., 2004. Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large- scale climate variability. *Geophysical Research Letters*, 31, L13215.
- Scherrer S.C., Begert M., Croci-Maspoli M., Appenzeller C., 2016. Long series of Swiss seasonal precipitation: regionalization, trends and influence of large- scale flow. *International Journal of Climatology*, 36, 3673-3689.
- Scherrer S.C., Wüthrich C., Croci-Maspoli M., Weingartner R., Appenzeller C., 2013. Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009. *International Journal of Climatology*, 33, 3162-3173.
- Schmidli J., Frei C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25, 753-771.
- Schmucki E., Marty C., Fierz C., Lehning M., 2015. Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs. *International Journal of Climatology*, 35, 3262-3273.
- Schmucki E., Marty C., Fierz C., Weingartner R., Lehning M., 2017. Impact of climate change in Switzerland on socioeconomic snow indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 127, 875-889.
- Schöner W., Auer I., Böhm R., 2009. Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23, 1052-1063.
- Schöner W., Koch R., Matulla C., Marty C., Tilg A.M., 2019. Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss- Austrian Alps for the past half century (1961 to 2012) and linkages to climate change. *International Journal of Climatology*, 39, 1589-1603.
- Seager R., Kushnir Y., Nakamura J., Ting M., Naik N., 2010. Northern Hemisphere winter snow anomalies: ENSO, NAO and the winter of 2009/10. *Geophysical Research Letters*, 37, L14703.

- Serquet G., Marty C., Dulex J.P., Rebetez M., 2011. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation- day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 38, L07703.
- Serquet G., Marty C., Rebetez M., 2013. Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, 437-444.
- Sevruk B., 1997. *Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps. Climatic change at high elevation sites*. Springer, 123-137.
- Sharma V., Mishra V.D., Joshi P.K., 2013. Implications of climate change on streamflow of a snow-fed river system of the Northwest Himalaya. *Journal of Mountain Science*, 10, 574-587.
- Sherwood J., Debinski D., Caragea P., Germino M., 2017. Effects of experimentally reduced snowpack and passive warming on montane meadow plant phenology and floral resources. *Ecosphere*, 8(3), e01745.
- Spandre P., François H., Morin S., George-Marcelpoil E., 2015. Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises. Contexte climatique et état des lieux. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine*, 103, 2.
- Steger C., Kotlarski S., Jonas T., Schär C., 2013. Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics*, 41, 735-754.
- Steiger R., 2010. The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research*, 43, 251-262.
- Steiger R., Abegg B., 2018. *Ski areas' competitiveness in the light of climate change: Comparative analysis in the Eastern Alps. Tourism in Transitions*. Springer, 187-199.
- Steiger R., Mayer M., 2008. Snowmaking and climate change: Future options for snow production in Tyrolean ski resorts. *Mountain Research and Development*, 28, 292-298.
- Steiger R., Stötter J., 2013. Climate change impact assessment of ski tourism in Tyrol. *Tourism Geographies*, 15, 577-600.
- Steinbauer M.J., Grytnes J.-A., Jurasinski G., Kulonen A., Lenoir J., Pauli H., Rixen C., Winkler M., Bardy-Durchhalter M., Barni E., 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, 556, 231-234.
- Tafari M., Cohas A., Bonenfant C., Gaillard J.-M., Allainé D., 2013. Decreasing litter size of marmots over time: a life history response to climate change? *Ecology*, 94, 580-586.
- Terzago S., Fratianni S., Cremonini R., 2013. Winter precipitation in Western Italian Alps (1926–2010). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 119, 125-136.
- Thibert E., Eckert N., Vincent C., 2013. Climatic drivers of seasonal glacier mass balances: an analysis of 6 decades at Glacier de Sarennes (French Alps). *The Cryosphere*, 7, 47-66.
- Tudoroiu M., Eccel E., Gioli B., Gianelle D., Schume H., Genesio L., Miglietta F., 2016. Negative elevation-dependent warming trend in the Eastern Alps. *Environmental Research Letters*, 11, 044021.
- Valt M., Cianfarra P., 2010. Recent snow cover variability in the Italian Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 64, 146-157.
- Van Oldenborgh G.J., Drijfhout S., Van Ulden A., Haarsma R., Sterl A., Severijns C., Hazeleger W., Dijkstra H., 2009. Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 5, 1-12.
- Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y., Morin S., 2018. Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12, 1249-1271.

- Vincent C., 2002. Influence of climate change over the 20th century on four French glacier mass balances. *Journal of Geophysical Research*, 107(D19), 4375.
- Vitasse Y., Rebetez M., Filippa G., Cremonese E., Klein G., Rixen C., 2017. Hearing' alpine plants growing after snowmelt: ultrasonic snow sensors provide long-term series of alpine plant phenology. *International Journal of Biometeorology*, 61, 349-361.
- Vittoz P., Randin C., Dutoit A., Bonnet F., Hegg O., 2009. Low impact of climate change on subalpine grasslands in the Swiss Northern Alps. *Global Change Biology*, 15, 209-220.
- Walther G.-R., Beißner S., Burga C.A., 2005. Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, 16, 541-548.
- Wheeler J., Hoch G., Cortés A.J., Sedlacek J., Wipf S., Rixen C., 2014. Increased spring freezing vulnerability for alpine shrubs under early snowmelt. *Oecologia*, 175, 219-229.
- Wheeler J.A., Cortes A.J., Sedlacek J., Karrenberg S., Kleunen M., Wipf S., Hoch G., Bossdorf O., Rixen C., 2016. The snow and the willows: earlier spring snowmelt reduces performance in the low-lying alpine shrub *Salix herbacea*. *Journal of Ecology*, 104, 1041-1050.
- Wielke L.-M., Haimberger L., Hantel M., 2004. Snow cover duration in Switzerland compared to Austria. *Meteorologische Zeitschrift*, 13, 13-17.
- Winkler D.E., Butz R.J., Germino M.J., Reinhardt K., Kueppers L.M., 2018. Snowmelt timing regulates community composition, phenology, and physiological performance of alpine plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1140.
- Wipf S., Rixen C., 2010. A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Research*, 29, 95-109.
- Wipf S., Stöckli V., Herz K., Rixen C., 2013. The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. *Plant Ecology & Diversity*, 6, 447-455.
- Wipf S., Stoeckli V., Bebi P., 2009. Winter climate change in alpine tundra: plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change*, 94, 105-121.
- Wolfsegger C., Gössling S., Scott D., 2008. Climate change risk appraisal in the Austrian ski industry. *Tourism Review International*, 12, 13-23.
- Xu Y., Ramanathan V., Washington W., 2016. Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 1303-1315.
- Zampieri M., Scoccimarro E., Gualdi S., 2013. Atlantic influence on spring snowfall over the Alps in the past 150 years. *Environmental Research Letters*, 8, 034026.
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlstrøm A.P., Anderson B., 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61, 745-762.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F., 2006. Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters*, 33.
- Zierl B., Bugmann H., 2005. Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research*, 41, W02028.
- Zimmermann N., Gebetsroither E., Züger J., Schmatz D., Psomas A., 2013. *Future Climate of the European Alps, Management Strategies to Adapt Alpine Space Forests to Climate Change Risks*. Gillian Ann Cerbu, Marc Hanewinkel, Giacomo Gerosa and Robert Jandl, IntechOpen.