

Thèse dirigée par **Christophe Gauchon**, PU, USMB et
codirigée par **Ludovic Ravanel**, CR CNRS, USMB et
Clémence Perrin-Malterre, MCF, USMB

préparée au sein du **Laboratoire EDYTEM**
dans l'**École Doctorale SISEO (Science de l'Ingénierie des
Systèmes de l'Environnement et des Organisations)**

L'alpinisme à l'épreuve du changement climatique

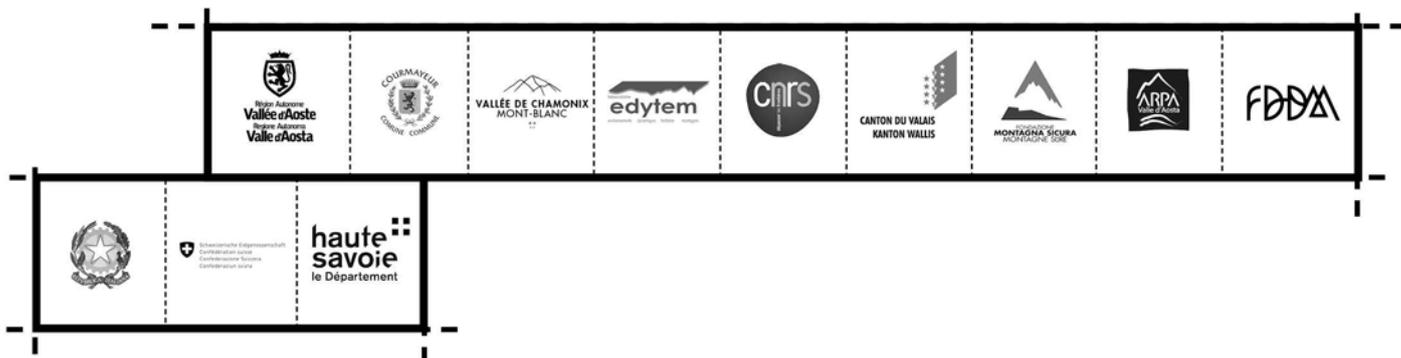
Évolution géomorphologique des itinéraires, impacts sur la pratique estivale et outils et outils d'aide à la décision dans le massif du Mont Blanc

Présentée par

Jacques Mourey



Ce travail de thèse en géographie a été réalisé avec le soutien des partenaires suivants :



Résumé

Dans le contexte actuel de changement climatique, ce travail de thèse traite de l'évolution des conditions de pratique de l'alpinisme, par une approche pluridisciplinaire structurée autour de trois axes de recherches principaux. Tout d'abord, nous avons étudié **l'évolution des itinéraires de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation**. Nos résultats montrent que les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne sont principalement affectés par la fonte des glaciers et tendent à devenir plus dangereux et techniquement plus difficiles, bien que des travaux d'adaptation soient réalisés. Le constat est similaire pour les voies d'alpinisme proprement dites. La comparaison de 95 voies entre les années 1970 et leur état actuel a montré que 26 itinéraires ont été fortement modifiés et sont rarement fréquentables en été. Face à une augmentation de leur technicité et de leur dangerosité, en lien avec une augmentation du nombre de phénomènes qui les affectent, les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme ont tendance à être plus aléatoires en été et se décalent au printemps et à l'automne.

Ce premier constat nous a conduit à questionner, dans un deuxième temps, **la manière dont les guides de haute montagne sont affectés par ces évolutions, et comment ils s'y adaptent**. Des entretiens semi-directifs et un questionnaire, envoyés aux guides du SNGM, montrent que 97 % sont contraints d'adapter leur pratique du métier. Cette adaptation est considérée comme difficile à mettre en place par la moitié des répondants dont l'activité est principalement centrée sur l'alpinisme. Cinq stratégies principales sont développées par les guides et les amènent à diversifier leur offre vers des activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne. Ce constat pose alors des questions d'identité et de redéfinition du métier de guide de haute montagne.

Enfin, dans un troisième temps, nous nous sommes attaché à **mieux évaluer la vulnérabilité des alpinistes et à acquérir et diffuser des connaissances pour favoriser des comportements adaptatifs**. Plusieurs rapports et fiches thématiques à l'attention de la communauté montagnarde ont été réalisés à partir des résultats de nos deux premiers axes de recherche et, nous avons aussi mené une étude spécifiquement sur la voie normale d'ascension du mont Blanc (4809 m), particulièrement affectée par le changement climatique. L'étude d'accidentologie a été mise à jours et un système de suivi pluridisciplinaire a été mis en place. Ce dernier permet de mieux comprendre l'origine géomorphologique des chutes de pierres et de mieux évaluer la vulnérabilité des alpinistes à travers des mesures de la fréquentation. Les premiers résultats ont permis l'identification de comportements non adaptés au risque local. Des stratégies d'adaptation et de prévention peuvent alors être proposées.

Mots clés : Alpinisme, itinéraires de haute montagne, adaptation, changement climatique, outils d'aide à la décision.

Abstract

In the present context of climate change, this PhD in geography concerns the evolution of mountaineering's conditions of practice. This work uses a multidisciplinary approach and is structured on three different axes of research.

First, we studied the evolution of mountaineering itineraries and their climbing parameters. Our results show that, even though adaptation works are realized, the accesses to high mountain huts are mainly affected by glacial shrinkage and are becoming more dangerous and technical. The assessment is similar for mountaineering routes. The comparison of 95 routes between the 1970s and their current condition showed that 26 itineraries are greatly modified and can hardly be climbed in Summer anymore. Because the itineraries have become more dangerous and technically more challenging – due to an increase in the number of processes affecting them - periods during which these itineraries can be climbed in good circumstances in Summer have tended to become less predictable and period of optimal circumstances have shifted toward Spring and Fall.

This first findings led us to study, in a second axe of research, the way Alpine guides are affected by the evolution of mountaineering routes and how they adapt. Semi-structured interviews and a questionnaire survey, send to Alpine guides of the SNGM, shows that 97% are forced to adapt the way they work. This adaption is considered difficult to implement by half of the respondents, whose activity is centered on mountaineering. Five main strategies are implemented and lead Alpine guides to diversify towards activities outside the high mountain environment. This observation implies a redefinition of their work they are not always comfortable with.

Finally, in a third axe of research, we focused on the assessment of mountaineers' vulnerability and the acquisition and distribution of knowledge to encourage adaptive behaviors. Several reports and flash cards, based on the results of our two first axes of research and addressed to the mountain community in general, have been made. We also conducted a study specifically on the normal route up to the mont Blanc (4809 m a.s.l.), which is particularly affected by climate change. The first version of an accidentology study for this area has been updated and a multidisciplinary monitoring system has been put in place. It leads to a better understanding of the rock falls activity and a better assessment of mountaineers' vulnerability. First results show that this monitoring system leads to a better vulnerability assessment and to the identification of behaviors not adapted to the local risk of rock falls. On this basis, adaptation and prevention strategies can be proposed.

Key words: mountaineering, high mountain itineraries, adaptation, climate change, decision support tools.

Remerciements

On dit souvent que les remerciements, seul paragraphe sensible d'un mémoire de thèse soumis à la froide rigueur scientifique, sont la partie la plus lue du manuscrit. Simple ragot de doctorant ou vérité établie, peu importe... Je vais surtout tenter de n'oublier personne (en remobilisant ladite rigueur...), tant vous avez été nombreux à m'aider, me soutenir et m'accompagner sur l'ensemble de ces trois années. Il me sera malheureusement impossible de remercier tout le monde à la hauteur de la qualité des échanges et de l'aide apportée, et je ne peux que vous assurer de la profonde sincérité de ces remerciements.

Je me dois de donner la première place à Ludo Ravanel. Tu es mon directeur depuis maintenant 5 ans, je t'adresse mes plus chaleureux et sincères remerciements pour la quantité incalculable d'opportunités que tu m'as donnée, tant sur le plan scientifique que professionnel. La confiance que tu m'as accordée suite à mon master 1 constitue la base qui m'aura permis de faire cette thèse !

Je tiens ensuite à remercier vivement Christophe Gauchon et Clémence Perrin-Malterre, directeur et co-directrice de ce travail. Votre suivi et votre encadrement m'ont été très chers, notamment dans la phase finale de rédaction au cours de laquelle vos relectures attentives et expertes m'ont grandement aidé et motivé. Christophe, je te remercie également pour nos sorties spéléo sous la Dent de Crolle, plus que bienvenues dans un quotidien centré sur l'alpinisme.

Mon rôle de chercheur au cours de ce travail doctoral aura essentiellement été de collecter et d'analyser, avec le soutien financier du projet ALCOTRA AdaPT Mont Blanc, des informations issues de la communauté montagnarde (guides, AMM, gardiens, élus, ENSA, Fondation Montagne Sure, La Chamoniarde, SNGM, SIM etc.). Je remercie vivement l'ensemble des personnes qui ont accepté de collaborer avec moi, de m'accorder des entretiens, de répondre à mes questionnaires, à mes mails, à mes appels, etc. Vos témoignages, vos connaissances et votre sensibilité à l'évolution des milieux de haute montagne sont l'origine et le ciment de mon travail. J'espère que mes résultats seront à la hauteur de vos attentes ; en tout cas cela aura été une de mes principales motivations.

Philippe Bourdeau et Mélanie Marcuzzi, vous avez été un horizon grenoblois, ouvert sur les Écrins, aussi officieux et amical qu'indispensable. Je tiens à vous remercier pour les échanges passionnants que nous avons eus. Vous avez été une source d'inspiration importante grâce à vos nombreuses idées mais surtout grâce à votre enthousiasme débordant et communicatif, qui a constitué une source de motivation régulière (*Refuge Sentinelles for ever*).

Olivier Moret, bien que notre première expérience commune au PGHM ait été un peu lugubre, merci pour ta confiance et pour les superbes opportunités que tu m'as offertes.

Le cadre de travail dans lequel j'ai eu la chance de faire cette thèse a été particulièrement agréable, bienveillant et stimulant à bien des égards. Je tiens donc à remercier l'ensemble des membres du laboratoire EDYTEM pour la bonne ambiance quotidienne et le cadre de travail agréable dans lequel j'ai pu évoluer ces trois dernières années. Manu et Yves, je vous remercierai plus particulièrement, pour votre bonne humeur et votre disponibilité... pour aller au Prieuré, faire du vélo entre midi-et-deux, etc.). Manu, merci pour ton aide et tes conseils à de nombreuses reprises, ils m'ont été indispensables, notamment pour mes missions de terrain (et on ne parlera pas de ma voiture, de mon vélo, etc.). Stéphane et Johan, je garderai toujours un très bon souvenir des Brico 4D et des stages 3D avec vous. Merci de m'avoir donné l'opportunité d'y participer ! Pascal Lacroix (et les collègues d'ISTerre), merci de nous avoir fait confiance (avec PA) et de t'être lancé à l'assaut du couloir du Goûter, au détour d'une salade sur le campus de Grenoble !

J'adresse des remerciements tout particuliers aux membres du bien nommé *Gang des petites cuillères* (Ménard, 2016) : PA et Kim. Notre capacité commune à utiliser un maximum de petites cuillères sans jamais les ramener dans la salle Thé n'est qu'un tout petit indicateur de la belle équipe que nous avons formée depuis nos années de master : sur le terrain, en stage 3D, au bar, en montagne, au PM, en vélo, sous terre... Merci pour les nombreux et beaux moments partagés, pour vos idées et pour votre motivation à toute épreuve qui m'ont souvent guidé dans cette thèse. Nous nous devons de remercier également Gilles Ménard qui a fait la collecte des tasses et des petites cuillères à de nombreuses reprises. L'usage d'un seau aura même été nécessaire lors des périodes les plus intenses de rédaction...

Le labo EDYTEM ne va pas sans la belle équipe de doctorants qui a permis de rendre cette expérience agréable et stimulante ! Aussi, je tiens à remercier profondément : Léna, en plus de ton amitié, ce fut très rassurant de pouvoir compter sur ton aide pour les aspects les plus socio et statistiques (*i.e.* obscurs) de ce travail ; Ana, bien que j'ai oublié qu'on avait fait notre master ensemble, tu auras été pour moi un personnage repère de ces 3 dernières années, merci pour tes innombrables invitations à manger des bons repas, à rouler et simplement pour ton amitié ; Guilhem merci pour les bons moments passés (en vélo) et tous ceux à venir, et pour ton aide indispensable sur le Goûter ; Marco M, merci également pour ton aide sur le Goûter et les bons moments passés, notamment à l'EUCOP 2018. Sans oublier Céline, William, Camille, Chiara, Xavi, Claire C., Claire B., Manu, Matthieu, Greg, Sophie-Anne, Yann, avec qui j'ai beaucoup apprécié passer du temps et travailler ces trois (voire plus) dernières années. Camille et William, peut-être qu'un jour on arrivera à faire du vélo ensemble, si vous voulez bien freiner un peu à la montée !

Alice, je te remercie le plus sincèrement qui soit pour avoir corrigé mes effets de style grammaticaux et mes expériences orthographiques, notamment au début de mon travail sur le retrait « glacière » dans le massif du Mont Blanc... En plus de m'avoir supporté comme voisin de bureau pendant 2 ans, ton aide à de très nombreuses reprises et ton amitié m'ont été très précieuses !

Les amis fidèles - Marie B., Marco, Marie P., Quentin, Mathilde, Nico Quentin P. -, au-delà de votre aide à de nombreuses reprises pour des relectures, sur le terrain, en m'hébergeant etc., je tiens à vous remercier pour votre amitié ! Elle a été un guide qui m'a souvent permis de garder la tête hors de l'eau, à travers les embruns de ce travail doctoral.

Je tiens aussi à remercier les nombreuses autres personnes qui m'ont aidé/accompagné d'une manière ou d'une autre ces trois dernières années : Julie, pour les nombreuses sorties en montagne ; Laetitia, pour tes nombreux coups de mains, et je n'ai pas fini de venir t'embêter au Nid d'Aigle ; Agnès, notamment pour nos quelques belles sorties en montagne dans le massif ces trois dernière années ; Maud, pour m'avoir supporté et aidé dans la partie la plus difficile de cette thèse et Charly pour ton aide sur le Goûter.

Juliette, un immense merci pour m'avoir soutenu, conseillé et encouragé sur la dernière moitié de cette thèse. C'est avec amour et enthousiasme que je me lance dans l'écriture de la nouvelle page qui s'ouvre à tes côtés.

Enfin, mes parents et mon frère. Au-delà de vous remercier pour vos relectures, vos conseils et votre soutien que je sais indéfectible, j'aimerais vous remercier de m'avoir toujours poussé à aller plus loin que je l'aurais initialement vu/voulu. Vous m'avez permis de me surpasser et de comprendre que rien n'est impossible à qui sait s'en donner les moyens. Ce manuscrit de thèse en est la preuve.

Sommaire

Résumé.....	5
Abstract.....	6
Remerciements.....	7
Sommaire.....	11
Sigles et abréviations.....	13
Introduction générale.....	15
Partie I. La pratique de l'alpinisme face aux évolutions des milieux de haute montagne.....	21
Chapitre 1. L'alpinisme : historique et définition de l'objet d'étude.....	23
Chapitre 2. Impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne.....	45
Chapitre 3. Tourisme de nature et alpinisme face au changement climatique.....	65
Conclusion de la Partie I.....	84
Partie II. Évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	85
Chapitre 4. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation.....	87
Chapitre 5. Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation..	131
Conclusion de la Partie II.....	156
Partie III. Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique sur les itinéraires.....	157
Chapitre 6. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique, perception et adaptation.....	159
Chapitre 7. Les effets du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne.....	193
Chapitre 8. Mesure de la fréquentation des itinéraires d'alpinisme : quantification des flux, comportements adaptatifs et accidentologie.....	211
Conclusion de la Partie III.....	264
Conclusion générale.....	265
Bibliographie.....	273
Bibliographie personnelle.....	286
Table des figures, tableaux et encadrés.....	289
Liste des Annexes.....	293
Table des matières.....	331

Sigles et abréviations

AMM : Accompagnateur en Moyenne Montagne

BE : Brevet d'Etat

CAF : Club Alpin Français

CAS : Club Alpin Suisse

CCVCMB : Communauté de Commune de la Vallée de Chamonix Mont-Blanc

CREA : Centre de Recherche sur les Ecosystèmes d'Altitude

DE : Diplôme d'Etat

DGPV : Déformations Gravitaires Profondes de Versant

EDYTEM : Environnements DYnamiques et TErritoires de Montagne ; Université Savoie Mont Blanc

ENSA : Ecole National de Ski et d'Alpinisme

FFCAM : Fédération Française des Clubs Alpin et de Montagne

Fms : *Fondation Montagne sûre*

GIEC/IPCC : Groupe d'expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat/*Intergovernmental Panel on Climate Change*.

ISerre : Institut des Sciences de la Terre ; Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc

LEG : Ligne d'Equilibre des Glaciers

LISTIC : Laboratoire d'Informatique. Systèmes. Traitements de l'Information et de la Connaissance ; Université Savoie Mont Blanc

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OPMA : Observatoire des Pratique de la Montagne et de l'Alpinisme

PACTE : Politique public, aCtion politique, Territoire ; Université Grenoble-Alpes

PAG : Petit Âge Glaciaire

PGHM : Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne

PNE : Parc National des Ecrins

RMSE : *Root Mean Square Error*

SIM : Syndicat Interprofessionnel de la Montagne

SNGM : Syndicat National des Guides de Montagne

SNOSM : Système National d'Observation de la Sécurité en Montagne

STD : Société des Touristes du Dauphiné

TLS : *Terrestrial Laser Scanning*

UIAA : Union Internationale des Associations d'Alpinisme.

UIAGM : Union Internationale des Guide de Montagne

WEA : *Water Equivalent Accumulated*

WGMS : *World Glacier Monitoring System*

Introduction générale

Depuis deux siècles et demi, des scientifiques, des touristes, des artistes, des sportifs, entre autres, fréquentent la haute montagne. Ils ont progressivement donné naissance à une pratique socio-sportive devenue emblématique des milieux de haute montagne : l'alpinisme. Sa pratique a beaucoup évolué depuis la fin du XIX^e siècle au gré de facteurs culturels, politiques, sociodémographiques et technologiques (Hoibian, 2000). Cependant, à partir des années 1990, le changement climatique (IPCC, 2014) a engendré une évolution très marquée et de plus en plus rapide des milieux de haute montagne qui constituent le support de la pratique de l'alpinisme dans les Alpes (Fig. I.1). En effet, le réchauffement des températures, d'ailleurs deux fois plus marqué dans les Alpes qu'à l'échelle globale (Beniston, 2005), entraîne une dégradation de la cryosphère (glaciers, permafrost et couvertures neigeuses). Cette dernière se traduit par de nombreux processus et phénomènes géomorphologiques et glaciologiques, notamment durant les périodes estivales, qui modifient les paysages et la stabilité des versants (Deline *et al.*, 2012). Les superficies englacées ont ainsi diminué de 50 % dans les Alpes Françaises entre la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG) et la période 2006-2009 (Gardent *et al.*, 2014) tandis que les écroulements/éboulements et les chutes de pierres sont plus fréquents en raison de la dégradation du permafrost (Huggel *et al.*, 2012). De nombreux autres phénomènes interviennent également, tels que la diminution du nombre de jours de gel (Pohl *et al.*, 2019), la diminution de l'enneigement (Klein *et al.*, 2016), la moindre stabilité des glaciers suspendus (Failletaz *et al.*, 2015) ou encore la fonte des couvertures glacio-nivales (Guillet, 2016).

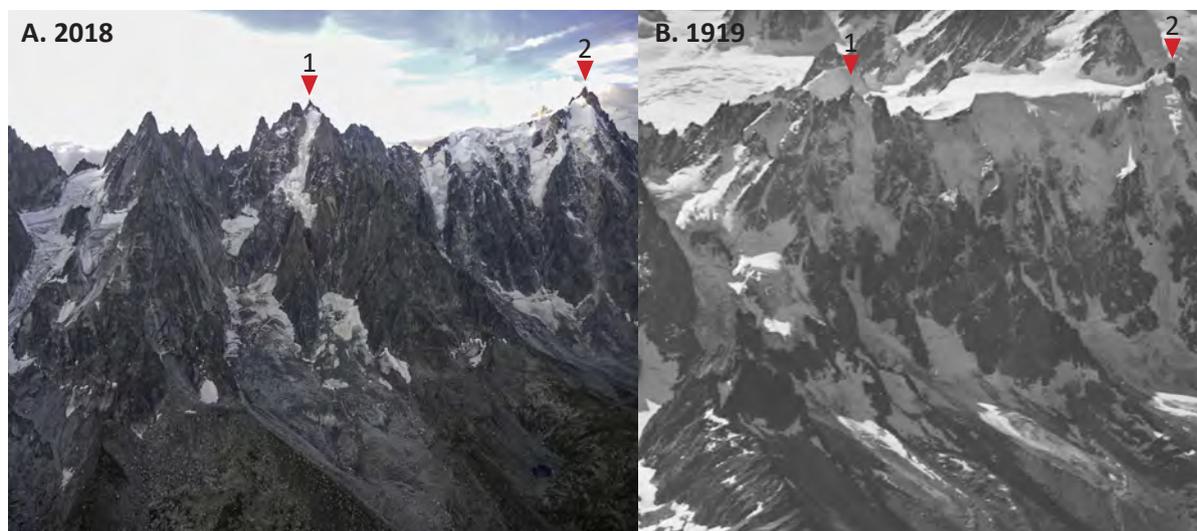


Figure I.1. Photo comparaison du versant nord des Aiguilles de Chamonix (massif du Mont Blanc) entre la fin de l'été 2018 (A) et l'été 1919 (B) (Mittelholzer W., ETH Zürich). 1. Aiguille du Plan (3673 m). 2. Aiguille du Midi (3842 m). On remarque l'importance de la fonte des glaciers suspendus et des couvertures glacio-nivales.

La pratique de l'alpinisme d'une part, et l'évolution des milieux de haute montagne dans les Alpes d'autre part, font l'objet de nombreux travaux de recherche dans des champs de recherche divers (Corneloup *et al.*, 2007). En revanche, l'étude de la relation entre les deux n'émerge que doucement

dans la littérature, autour d'études en nombre pour le moment assez limité. Pour ne citer qu'un exemple, l'ouvrage *La Montagne, terrain de jeu et d'enjeux. Débats pour l'avenir de l'alpinisme et des sports de nature*, publié en 2006 sous la direction de P. Bourdeau, n'abordait pas la question du changement climatique. Dans ce contexte, **l'objet principal de ce travail de recherche est de mieux documenter la relation entre évolution des milieux de haute montagne et pratique de l'alpinisme estival dans les Alpes occidentales.**

Contexte et objectifs de recherche

De nombreuses études scientifiques traitent de la pratique de l'alpinisme avec comme principales entrées disciplinaires l'histoire, la sociologie et la géographie (Bourdeau *et al.*, 2004). La présente recherche doctorale en géographie s'inscrit à l'interface entre les disciplines de la géographie physique, telles que la géomorphologie et l'étude des processus liés à la dégradation de la cryosphère, et celles de la géographie sociale et culturelle par l'étude de la pratique socio-sportive qu'est l'alpinisme, et du rapport que les individus entretiennent avec l'espace de pratique. En ce sens, ce travail contribue à répondre aux enjeux actuels de la recherche sur les sports de montagne, identifiés lors de la journée thématique de *l'Observatoire des Pratiques de la Montagne et de l'Alpinisme (OPMA)* du 12 novembre 2015 (Nicollet, 2015). On compte parmi ces enjeux le besoin d'approches interdisciplinaires entre sciences sociales et « sciences de la nature » et la conduite d'un travail de recherche en collaboration avec les instances institutionnelles et professionnelles des sports de montagne.

Corneloup *et al.* (2007), ont dressés un état des lieux de la recherche française en sciences sociales sur les pratiques de l'escalade et de l'alpinisme, et ont identifiés quatre « polarités » principales dans l'étude de l'alpinisme : (i) une lecture structurelle et critique de la pratique à travers l'étude de ses pratiquants, afin de dévoiler les mécanismes qui l'organisent ; (ii) des approches anthropologiques et géoculturelles pour étudier les principes et les facteurs qui participent à définir les représentations et les dimensions symboliques de la pratique ; (iii) une approche culturelle où l'on montre comment la pratique, considérée comme une culture, se façonne et évolue en fonction notamment des techniques et de l'aménagement de l'espace de pratique ; (iv) une lecture territoriale pour comprendre la manière dont s'est développée la pratique dans un espace géographique donné.

Notre travail de recherche ne s'inscrit pas directement dans l'une de ces « polarités », bien qu'il se rapproche de la lecture territoriale mise en évidence par Corneloup *et al.* (2007). Il s'agit plutôt de proposer une nouvelle grille de lecture dans laquelle l'espace de pratique et ses modifications géomorphologiques est le point de départ, et est considéré comme un facteur qui affecte la pratique et qui contribue à son évolution. Ce sont ces effets qui seront étudiés dans ce travail, autour de la problématique générale suivante :

Comment l'évolution des milieux de haute montagne liée au changement climatique affecte-t-elle la pratique de l'alpinisme estival dans les Alpes occidentales ?

Cette problématique sera abordée selon trois axes de recherches.

Dans un premier temps, la relation entre les milieux de haute montagne et la pratique de l'alpinisme est étudiée à l'échelle des itinéraires en faisant principalement appel à la géomorphologie, afin de **mesurer les impacts de l'évolution des milieux de haute montagne sur les itinéraires d'alpinisme et leurs conditions de fréquentations sur la période estivale.**

Le travail se concentre sur l'alpinisme en période estivale pour deux raisons principales : (i) les impacts du changement climatique sur la haute montagne sont plus nombreux, plus intenses et plus visibles en été et sont aussi beaucoup mieux documentés que les impacts sur la période hivernale ; (ii) dans les Alpes, la pratique de l'alpinisme est beaucoup plus importante l'été en nombre de pratiquants, ce qui rend son étude plus aisée et plus pertinente.

Dans un deuxième temps, les connaissances acquises au cours de la première approche amènent à questionner les impacts du changement climatique sur la pratique de l'alpinisme mais cette fois-ci avec une approche sociale, en étudiant **la perception du changement climatique par les alpinistes et leur adaptation face à l'évolution des itinéraires sur la période estivale.**

Dans un troisième temps, ce travail de thèse vise à **évaluer la vulnérabilité des alpinistes et à partager/diffuser des connaissances pour favoriser des actions d'adaptation et de résilience des acteurs concernés.** Ce troisième axe s'inscrit en réaction à la prise de conscience par la communauté montagnarde de l'évolution des conditions de pratique de l'alpinisme et au besoin concomitant de connaissances spécifiques pour dépasser un savoir empirique et permettre la résilience de la pratique et des acteurs concernés. Cette prise de conscience s'est notamment traduite par une succession de trois projets européens ALCOTRA (France-Italie) qui ont partiellement financé et/ou contribué à produire des données mobilisées dans ce travail. Le premier, le projet *Eco-Innovation en altitude* (2013-2014), avait pour objectif de développer une meilleure gestion environnementale des sites isolés d'altitude avec, entre autres, un volet d'étude concernant les impacts du changement climatique sur les accès aux refuges (Piccardi *et al.*, 2014 ; Vuilleumier, 2015). Ensuite, le projet *Prév-Risk Haute Montagne* « Résilience des communautés transfrontalières face aux risques naturels en haute montagne » (2016-2017), visait à sensibiliser les pratiquants aux spécificités de la haute montagne, en améliorant leurs connaissances des dangers afin qu'ils réduisent et adaptent leur prise de risques, ceux-ci étant notamment liés aux impacts du changement climatique (Ravanel *et al.*, 2018). Enfin, dans la continuité de ces deux premiers projets, le projet *AdaPT Mont Blanc* (2017-2020), qui contribue à financer ce travail en parallèle d'une Allocation Doctorale de Recherche, a pour objectif majeur « la définition d'une stratégie d'actions locales transfrontalières pour l'adaptation aux effets du changement climatique dans la région alpine, en œuvrant sur le renforcement de la résilience des territoires, par le biais des outils de la planification territoriale » (AdaPT Mont-Blanc, 2017).

Ce travail a donc une double ambition : (i) réaliser des travaux scientifiques permettant d'acquérir de la connaissance (ii) pour ensuite proposer des connaissances et des outils d'aide à la décision pour la communauté montagnarde. Les trois axes de recherche seront présentés en détail dans le chapitre 3, à la suite d'un état des connaissances détaillé sur la relation entre évolution des milieux de haute montagne et alpinisme.

Organisation du manuscrit

Ce mémoire de thèse est constitué de 8 chapitres répartis en 3 parties et se structure autour de 6 articles scientifiques, publiés ou sous presse, et d'un rapport d'étude qui forment le cœur de ce manuscrit. Le tout est principalement rédigé en français, mais trois articles sont en anglais. Chaque article/rapport est introduit par une fiche synoptique qui résume la problématique, les objectifs, la méthode, les principaux résultats de l'étude et le rôle de chacun des auteurs. Elles se terminent par un résumé en français si l'article est en anglais et inversement. Des prolongements et analyses complémentaires qui n'ont pas trouvés leurs places dans le corps des articles sont dans certains cas présentés à la suite.

La première partie vise à contextualiser et présenter le travail de thèse et ses objectifs. Une définition de l'alpinisme en tant qu'objet d'étude est proposée dans un premier chapitre. Le deuxième chapitre détaille le changement climatique et ses impacts sur les milieux de haute montagne. La première partie s'achève par un troisième chapitre qui dresse d'abord un état des connaissances sur la relation entre l'alpinisme et les impacts du changement climatique dans les Alpes avant de présenter les trois axes de recherche, les six articles et le rapport.

La deuxième partie présente les résultats issus du premier axe de recherche consacré aux impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme et sur leurs conditions de fréquentation. Le Chapitre 4, composé essentiellement des deux premiers articles de ce manuscrit, se concentre sur les accès aux refuges de haute montagne. Le premier article « Access routes to high mountain huts facing climate change. Environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps » a été publié dans la *revue Norwegian Journal of Geography* en 2019. Le deuxième article, « Un exemple d'adaptation aux effets du changement climatique en haute montagne alpine. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace » a été publié dans la *Revue de Géographie Alpine* en juin 2017. Le Chapitre 5 traite spécifiquement des voies d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc, autour des résultats présentés dans un troisième article « Effects of climate change on high mountain environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif over half a century », publié dans *Arctic, Antarctic and Alpine Research* en juin 2019. L'étude en cours sur la voie normale d'ascension du mont Blanc (4809 m) et les facteurs qui contrôlent l'occurrence des chutes de pierres est aussi présentées.

La troisième partie présente essentiellement les résultats du deuxième axe de recherche, consacré à la perception du changement climatique par les alpinistes et à leur adaptation face à l'évolution des itinéraires. Le Chapitre 6 traite spécifiquement des guides de haute montagne et de leur adaptation. Il se compose des articles 4 et 5 de ce manuscrit. L'article 4, « Adaptation strategies for the French Alpine guides facing climate change effects » a été publié en 2020 dans le *Journal of Outdoor recreation and tourism*. L'article 5, « Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et modalités d'adaptation au pied du mont Blanc ? » a été publié en juin 2019 dans la *Revue de Géographie Alpine*. Les Chapitres 7 et 8 se concentrent sur l'adaptation et la prise en compte du changement climatique par les alpinistes, à travers l'évolution de la fréquentation des milieux de haute montagne dans le massif du Mont Blanc. Deux types de données sont utilisées : le nombre de nuitées dans les refuges (Chapitre 7) et les flux d'alpinistes sur les principaux points d'accès à la haute montagne (Chapitre 8). L'approche méthodologique mise en place pour quantifier et qualifier les flux d'alpinistes est présentée dans le dernier article « Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques », publié dans la *Collection EDYTEM* en décembre 2017. Ce dernier chapitre est aussi complété par un rapport d'étude sur l'« Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017 ». En plus d'être un outil d'aide à la décision très important pour les acteurs en charge de la gestion de cet itinéraire, ce dernier permet de mettre en perspectives et d'évaluer la prise en compte et l'adaptation des alpinistes à l'évolution des itinéraires.

Les résultats du troisième axe de recherche, qui concerne l'évaluation de la vulnérabilité des alpinistes et l'acquisition de connaissances pour une meilleure résilience de la pratique sont présentés au fur et à mesure du manuscrit sous la forme de compléments de chapitres, de rapports et de fiches thématiques.

Partie I

La pratique de l'alpinisme face aux évolutions des milieux de haute montagne

La première partie de ce manuscrit a pour objet de contextualiser et de présenter cette recherche doctorale. Ainsi, le Chapitre 1 propose un historique et une définition de l'alpinisme et permet d'affiner la problématique de ce travail en précisant la nature du lien entre changement climatique et pratique de l'alpinisme. Cela nous conduit à présenter dans un deuxième chapitre les principales évolutions d'origine climatique des milieux de haute montagne dans les Alpes. Les processus géomorphologiques et glaciologiques qui en résultent et qui peuvent potentiellement affecter la pratique de l'alpinisme sont détaillés. Enfin, le Chapitre 3 se structure en deux sections distinctes : dans une première nous dressons un état des connaissances sur la relation entre changement climatique et tourisme de nature estival dans les Alpes. Un certain nombre de manques et de lacunes, concernant spécifiquement la pratique de l'alpinisme dans les Alpes occidentales, sont identifiées autant sur l'évolution des itinéraires que sur la perception et l'adaptation des acteurs de l'alpinisme. Ces lacunes nous mènent à présenter, dans la seconde section, les principaux axes de recherches, les échelles spatio-temporelles traitées et les articles qui structurent la suite de ce manuscrit.

Chapitre 1. L'alpinisme : historique et définition de l'objet d'étude

L'alpinisme est une pratique emblématique des milieux de haute montagne. Elle a connu de nombreuses évolutions sur les deux derniers siècles, ce qui rend indispensable mais difficile toute tentative de définition. Aussi, dans une première section de ce chapitre, un résumé de l'histoire de l'alpinisme dans les Alpes sera d'abord proposé. Pour chaque période considérée, les principaux sujets abordés seront les catégories socio-professionnelles des pratiquants de l'alpinisme (professionnels et amateurs), leurs motivations, les types de voies qu'ils fréquentent et les techniques qu'ils utilisent. Des éléments sur les refuges et leurs fréquentations comme un marqueur important de l'évolution de la pratique seront aussi présentés. Cet historique répond à deux objectifs. D'abord, il permet de présenter les caractéristiques de la pratique qu'il est indispensable de connaître pour une bonne compréhension de ce travail doctoral et des différents axes de recherches traités. Ensuite, par la mise en évidence des évolutions marquantes qu'a connu l'alpinisme, en tant que pratique socio-sportive, il sert de base pour proposer une définition de l'objet d'étude et donner une première justification à la problématique générale abordée.

1.1. Description chronologique d'une pratique en constante évolution

Dans la perspective du changement climatique actuel, la pratique de l'alpinisme, n'est considérée ici qu'à partir de la fin XVIII^e siècle, sans rentrer dans le débat visant à définir l'époque ou l'ascension qui marquerait la naissance de la pratique.

1.1.1. La conquête du mont Blanc et le développement d'un alpinisme scientifique

Suite à la « découverte » de la vallée de Chamonix et de ses « glaciers » en 1741 par les voyageurs anglais W. Windham et R. Pockocke, ces dernières vont piquer la curiosité d'un nombre grandissant d'aristocrates, de scientifiques et de naturalistes. L'un des plus connus, le naturaliste genevois, H.B. De Saussure, arrive à Chamonix pour la première fois en 1760. Il va ouvrir la voie vers la haute montagne et plus largement vers l'alpinisme en offrant une récompense à quiconque trouverait l'accès au sommet du mont Blanc (Spilmont, 2014). Ce dernier sera gravi pour la première fois en 1786 par P. Paccard et J. Balmat. Cette première ascension, combinée au courant de pensée issu des Lumières, contribue à démystifier la haute montagne et le nombre d'ascensions va se multiplier dès les années suivantes. Les alpinistes sont principalement des aristocrates européens, et notamment anglais, accompagnés de guides-paysans locaux. Leurs motivations sont principalement scientifiques : « la visite des montagnes était motivée par la littérature naturaliste et humaniste » (Debarbieux, 1990). H.B. de Saussure souhaitait notamment mesurer l'altitude du mont Blanc. Il réalise cette mesure lors de son ascension de 1787 et propose l'altitude de 4775 m. Ensuite, l'altitude du mont Rose (4634 m ; Valais, Suisse) sera mesurée pour la première fois en 1819 par J. Zumstein (Carrel, 1855 ; Laveleye, 1865). J.D. Forbes, scientifique-topographe écossais, s'intéresse quant à lui au fonctionnement des

glaciers (Fig. 1.1) et propose une première explication aux fameuses ogives glaciaires de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France) en 1842 (Forbes, 1843).



Figure 1.1. Carte de la Mer de Glace établie par J.D. Forbes présentant l'altitude des sommets (en pieds) et les coordonnées géodésiques du mont Blanc, du col du Géant et de Chamonix (VIATICALPES, 2019 ; source originale : Forbes, 1843).

1.1.2. L'Âge d'Or de l'alpinisme et la naissance d'une pratique sportive

Au cours de la première moitié du XIX^e siècle, la pratique de l'alpinisme va connaître sa première évolution notable. Le sport étant particulièrement important dans la culture anglo-saxonne, la motivation des alpinistes ne sera plus uniquement scientifique mais sportive (Hoibian, 2000).

La haute montagne devient fréquentée pour des raisons d'« hygiénisme alpinisme » (Ann. CAF Alpes Maritimes, 1908, dans Lejeune, 1988). La pratique aurait en effet d'innombrables valeurs dont l'éveil de la curiosité, l'élargissement de l'horizon intellectuel, la connaissance directe et complète de la nature, l'amélioration morale de l'individu (Lejeune, 1988) et le développement d'une sensibilité esthétique (Hoibian, 2000). La motivation des alpinistes les plus chevronnés était aussi l'exploration et la conquête de nouveaux sommets encore vierges. A.F. Mummery définira l'alpiniste comme « celui qui aime aller là où aucun homme n'est allé avant lui, qui jouit de tâter le rocher que nulle main

humaine n'a jamais touché... En d'autres termes, le véritable alpiniste est l'homme qui tente des ascensions nouvelles » (Poncelin, 1997).

En l'espace d'une dizaine d'années, entre 1854 et 1865, la plupart des sommets alpins de plus de 4000 m sont conquis. C'est ce qu'on appellera plus tard l'« Âge d'Or de l'Alpinisme » (Modica, 2015). 1865 en est l'année clé : 84 des principaux sommets des Alpes sont conquis, dont les Grandes Jorasses (4208 m), l'aiguille Verte (4122 m) et le Cervin (4478 m) par E. Whymper et ses guides. Ces ascensions sont à l'origine de nombreuses « voies normales » (*i.e.* voie la plus facile pour atteindre un sommet) et des grandes voies classiques souvent encore fréquentées aujourd'hui. La portée sportive de l'alpinisme, couplée au développement touristique des Alpes, impliquent une augmentation de la fréquentation de la haute montagne. Sur la période 1786-1860, 115 personnes réalisent l'ascension du mont Blanc – soit une moyenne d'une ou deux personnes par an. Entre 1860 et 1864, on compte 178 personnes – soit 38 personnes par an en moyenne (Debarbieux, 1990). Cependant, dans les Alpes occidentales, l'alpinisme de cette époque victorienne reste réservé à une élite à dominante britannique engageant les services de guides locaux. En France, il est intéressant de noter que les aristocrates se détournent progressivement de l'alpinisme au profit d'une bourgeoisie largement majoritaire à partir de 1875 (Lejeune, 1988 ; Hoibian, 2006).

C'est aussi au cours XIX^e siècle que la pratique commence à se structurer, notamment par la création des premières compagnies de guides. La Compagnie des Guides de Chamonix est la première à l'être, en 1821, à la suite de l'accident de la caravane Hamel au mont Blanc lors duquel trois guides perdent la vie. Elle joue dès lors un rôle important dans l'organisation de la pratique sur l'ensemble du massif du Mont Blanc. Avant la création des compagnies de Courmayeur en 1850, Saint Gervais en 1864, elle était la seule entité à fournir des guides pour se rendre en haute montagne dans le massif du Mont Blanc. Elle décidait des itinéraires à suivre (Hudson et Kennedy, 2000), de leur aménagement éventuel et devait donner son accord pour toute construction d'infrastructure en haute montagne (Mestre, 1996). En Suisse, les compagnies de Zermatt et de Grindelwald sont créées en 1849.

À l'échelle des nations, la pratique de l'alpinisme se structure également à travers la création des Clubs Alpains. L'Alpine Club (Royaume-Uni) est le premier à être créé en 1857 avec comme objectifs principaux la mise en commun d'expériences et de connaissances sur les milieux montagnards et l'organisation d'« excursions » (Tailland, 2000). Les clubs alpins autrichien, italien et allemand sont créés dans des logiques similaires, respectivement en 1862, 1863 et 1869. Le Club alpin français (CAF) est créé en 1874, en réaction à la défaite de la France face à la Prusse en 1870. L'alpinisme prend alors une portée patriotique, illustré par la devise adoptée par le CAF en 1903 : « Pour la patrie, par la montagne ». L'alpinisme sera alors perçu comme une pratique fédératrice, notamment pour les jeunes avec les « caravanes scolaires » (Lejeune, 1988). Un commentaire sur la création du CAF inscrit dans l'Annuaire de la Société des Alpinistes Dauphinois de 1892 illustre très bien cette vocation : « L'alpinisme est né de nos revers. Au lendemain des désastres de 1870-1871, [...] le meilleur moyen de ne pas craindre le danger était de le regarder en face, et que celui qui affronte presque journallement les escarpements rocheux ne devait pas trembler devant un ennemi... ce dernier fût-il allemand ! »

(Ann. Société des Alpinistes Dauphinois, 1892 dans Lejeune, 1988). Les clubs alpins contribuent aussi à définir des usages et des pratiques. Le CAF va concourir à la réglementation de la profession de guide de haute montagne en mettant en place un registre des guides et en délivrant un brevet certifiant les catégories de guides autorisées à accompagner des touristes : les muletiers, les porteurs et les guides de première ou deuxième classe (Bourdeau, 1991).

Les techniques de progression restent rudimentaires. L'époque voit peu d'améliorations techniques (Fig. 1.2.A). Les annuaires du CAF et de la Société des Touristes du Dauphiné (STD) présentent presque exclusivement des récits d'ascension ; les aspects techniques sont presque absents (Lejeune, 1988). L'alpinisme est pratiqué en utilisant des chaussures à clous (Fig. 1.2.B), particulièrement lourdes et peu adaptées à l'escalade rocheuse. Ce n'est qu'au début du XX^e siècle que, pour la première fois, seront utilisées des chaussures en semelle de corde destinées à l'escalade (Modica, 2014). Les outils emblématiques de l'alpinisme à cette époque sont la corde et le piolet dont l'usage est décrit dans le Guide Laveur, premier manuel d'alpinisme écrit par des Français en 1904 (Modica, 2014).



Figure 1.2. L'équipement d'alpinisme au début du XX^e siècle. A. Deux cordées sur le glacier de la Girose (massif des Écrins), septembre 1908. L'équipement est rudimentaire : échelle pour passer les crevasses et cordes simplement nouées autour de la taille (Maison de la Mémoire et du Patrimoine, Chamonix). B. Affiche publicitaire pour des chaussures à clous, ferrures Tricouni S.A., Genève (Suisse), 1930.

C'est aussi à cette époque que sont construits les premiers refuges. Ils étaient de petites tailles (20 à 30 m²), généralement en bois et pouvaient accueillir entre 10 et 20 personnes au maximum. Pour le massif du Mont Blanc, on peut citer le refuge de la Charpoua et le refuge du Couvercle (2841 m et 2679 m respectivement) (Fig. 1.3), tous deux construits en 1904. Dans les Écrins, le refuge du Glacier Blanc (2542 m) est construit en 1886 et le refuge de l'Aigle (3450 m) en 1910. Dans le Valais (Suisse), la cabane Bertole (3311 m) est inaugurée en 1898.



Figure 1.3. Le bloc emblématique du Couvercle, à l'abri duquel le premier refuge du même nom a été construit (date inconnue; Fond Gay – Couttet, *Maison de la Mémoire et du Patrimoine*, Chamonix).

1.1.3. L'entre-deux-guerres : croissance du niveau technique sur fond de nationalisme

La Première Guerre Mondiale implique une forte diminution démographique, y compris dans les zones de montagne (Bellefon, 2003) et un fort ralentissement dans la pratique de l'alpinisme, une grande partie des pratiquants ayant été mobilisés. En 1920, le CAF ne compte plus que 5000 membres, contre 7000 en 1914 (Lejeune 1988 ; Mestre, 1996). En revanche, l'activité va être redynamisée à partir de 1919 et la période de l'entre-deux guerres se caractérise par une croissance importante du niveau technique des alpinistes, une diversification de leur origine sociale et, une formalisation et un perfectionnement des techniques.

Pendant cette période, l'alpinisme commence à s'ouvrir à d'autres classes sociales que les élites. Un alpinisme sans guide se développe, notamment sous l'impulsion et le dynamisme d'alpinistes autrichiens, allemands et italiens qui dominent la scène sur l'ensemble de cette époque. Dans ces pays, l'alpinisme est aussi beaucoup plus populaire qu'en France. En 1914, le club alpin austro-allemand comptait presque 100 000 membres (Mestre, 1996). L'envie d'explorer, d'ouvrir de nouveaux itinéraires et d'atteindre des sommets vierges reste toujours une base importante de la motivation des alpinistes. La guerre apporte aussi une force, une motivation, un courage et une prise de risque nouvelle. « Elle [la montagne] nous fut un moyen de nous hausser au niveau de notre rêve, de nous

prouver notre valeur et, contre l'évènement qui nous avait privé de la guerre [Armistice de 1918], une permission de goûter aux plaisirs exaltants de la vie héroïque » (Daloz, 1978). La motivation des alpinistes est alors aussi de se mesurer à la Nature et de l'affronter (Hoibian, 2000). La prise de risque fait partie de la pratique, à travers une forme de jeu avec les dangers de la haute montagne.

En parallèle, le matériel d'alpinisme s'améliore. Au début du XX^e siècle sont mis au point, les premiers crampons à dix pointes et un piolet court. Les crampons avec des pointes vers l'avant seront commercialisés en 1929 (Modica, 2014). Un guide tyrolien fait fabriquer des pitons d'une seule pièce tandis qu'on expérimente les premiers mousquetons et qu'on commercialise les premières espadrilles à semelles de feutres, une vraie révolution pour l'escalade rocheuse (Modica, 2014). Les broches à glaces font aussi leur apparition. L'invention des pitons et des mousquetons qui permettent de ne plus se désencorder pour passer la corde dans un anneau seront le point de départ des techniques d'escalade artificielle (Encadré 1.1.). Pierre Allain, célèbre alpiniste français, va aussi largement contribuer au développement du matériel en mettant au point des chaussons d'escalade en gomme lisse et le descendeur (qui permet de descendre en rappel sans passer la corde entre les jambes et l'épaule), dont il fait la démonstration en 1943. L'usage de la corde et notamment les techniques d'assurage commencent à se perfectionner et certaines sont encore utilisées aujourd'hui.

Encadré 1.1. Les différents styles d'escalade

Il existe plusieurs styles d'escalade en fonction des techniques et du matériel utilisés pour faire l'ascension d'une voie :

- L'escalade artificielle consiste à progresser non pas en utilisant les prises naturelles qu'offre le rocher mais à l'aide d'ancrages que le grimpeur installe sur la paroi (pitons, etc.) et sur lesquels il se hisse au fur et à mesure de sa progression.
- L'escalade libre a pour objectif de progresser en utilisant uniquement les prises qu'offre la paroi pour les mains et les pieds, sans se hisser sur les ancres artificiels qui servent uniquement à l'assurage. Il est important de distinguer deux catégories dans l'escalade libre (Lourens, 2007) : (i) l'escalade traditionnelle (ou terrain d'aventure) où le grimpeur installe lui-même des ancres pour assurer sa sécurité ; ceux-ci sont ensuite retirés de la paroi par le second de cordée et, (ii) l'escalade sportive où les ancres de type chevilles à expansions sont déjà présents, forés sur la paroi. Le grimpeur n'a plus qu'à y passer un mousqueton et sa corde pour assurer sa sécurité.

De plus, les techniques de l'escalade, telles que les positions à utiliser en fonction du terrain et l'esthétisme de l'escalade commencent à être théorisées. L'alpinisme se trouve ainsi assimilé à une activité intellectuelle autant qu'à un exercice corporel (Hoibian, 2000). Les manuels de l'alpinisme notamment édités par le CAF, contribuent à formaliser la pratique. En lien avec le perfectionnement des techniques et la popularisation de l'alpinisme, la difficulté technique des voies réalisées augmente. Les alpinistes austro-allemands sont à l'origine de l'avènement du 6^e degré (Encadré 1.2). Entre 1925 et 1930, plusieurs voies en rocher cotées 6 ou ED (Encadré 1.2) sont ouvertes dans les Alpes orientales.

De leur côté, les alpinistes français font un sérieux pas en avant dans l'alpinisme neigeux et glaciaire. La face nord de l'aiguille du Plan (3673 m, massif du Mont Blanc) et le Nant Blanc à l'aiguille Verte (4122 m, *idem*) sont respectivement ouverts en 1924 et 1926 (Poncelin, 1997). De plus, c'est à cette période que les « trois derniers grands problèmes des Alpes » tombent : les faces nord du Cervin (4478 m, Valais, Suisse), de l'Eiger (3970 m, Alpes bernoises, Suisse) et des Grandes Jorasses (4208 m, massif du Mont Blanc, France) sont conquises (Fig. 1.4). Elles deviendront les « trois grandes faces nord des Alpes ». Après quelques tentatives par d'autres cordées, l'ascension de la face nord du Cervin est réalisée en 1931 par des allemands. Il est intéressant de noter qu'ils arrivèrent de Munich en vélo, ce qui illustre la diversification des classes sociales pratiquants l'alpinisme de haut niveau à cette époque. Ils recevront une médaille olympique pour cette ascension, en 1936, des mains de Hitler. La face nord des Grandes Jorasses est gravie par l'éperon Croz en 1935 après plus d'une trentaine de tentatives par diverses cordées. Elle est par la suite gravie par l'éperon Walker, plus prestigieux et plus difficile, en 1938 par une cordée italienne qui recevra la médaille Pro Valore pour cette ascension (Mestre, 1998). Enfin, la conquête de la face nord de l'Eiger fut la plus meurtrière, au point que les autorités bernoises en interdisent l'ascension (Mestre, 1998). Elle sera tout de même gravie par une cordée allemande en 1938, qui recevra les félicitations du Führer. La conquête de ces trois faces nord et la mobilisation politique qu'elle suscita montre que l'alpinisme n'est pas neutre à cette époque ; il est un outil au service du nationalisme.

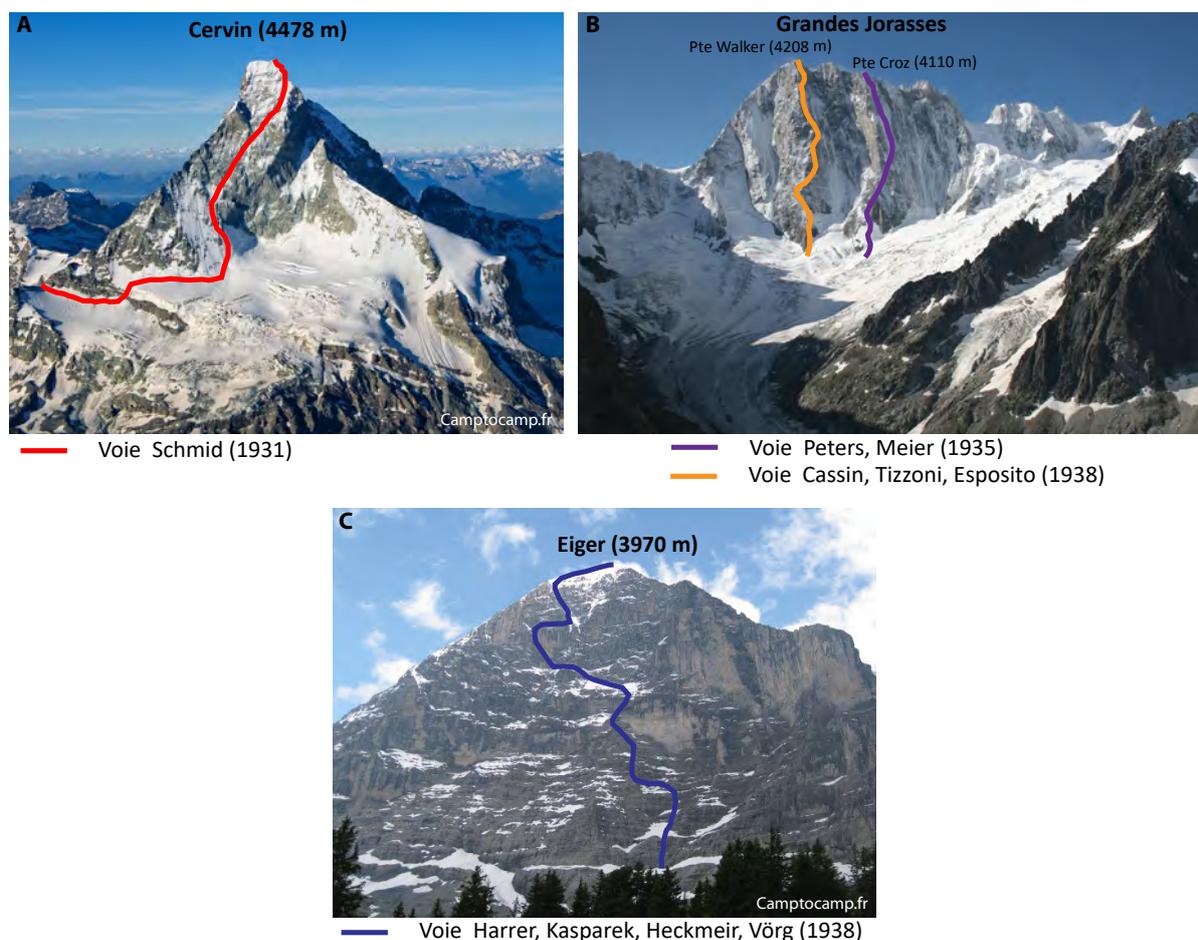


Figure 1.4. Les « trois derniers grands problèmes des Alpes » : (A) la face nord du Cervin, (B) la face nord des Grandes Jorasses, et (C) la face nord de l'Eiger avec leurs premières voies d'ascension.

Les refuges se multiplient et proposent un nombre de places plus important. Le refuge du Requin, premier refuge du massif du Mont Blanc en pierre, est construit en 1927 et propose 50 places. Un nouveau bâtiment est construit pour le refuge du Couvercle et inauguré en 1932. Dans les Écrins, le premier refuge de la Pilate est construit en 1925 et propose 30 places.

Encadré 1.2. Les échelles de cotation de la difficulté des voies d'alpinisme

La première échelle de cotation de la difficulté des voies d'alpinisme, comprenant 6 niveaux, est élaborée par W. Welzenbach en 1925. Elle devient une référence jusque dans les années 1970 et sa structure d'origine est encore aujourd'hui la base du système de cotation de l'Union International des Associations d'Alpinisme (UIAA). Ensuite, de nombreuses autres échelles de cotations ont été créées, au fur et à mesure de la diversification de l'alpinisme notamment vers la goulotte, la cascade de glace et le *dry tooling* (usage de crampons et de piolets de glace sur du rocher). On en compte au moins sept pour l'escalade libre, quatre pour l'alpinisme, quatre pour la cascade de glace et deux pour l'escalade artificielle.

En France, trois cotations sont classiquement utilisées aujourd'hui pour évaluer le niveau d'une voie d'alpinisme : l'échelle de la difficulté technique en escalade libre, l'échelle de la difficulté globale et l'échelle d'engagement. En fonction du type de voie, l'échelle de difficulté technique en escalade peut être remplacée par les échelles de difficultés techniques en cascade de glace, en *dry tooling* ou en escalade artificielle.

L'échelle française de la difficulté technique d'une voie en escalade libre est dite ouverte, elle commence au niveau 1 (le plus facile) et s'arrête aujourd'hui au niveau 9. Chaque niveau est ensuite subdivisé en 3 lettres (a, b et c) qui peuvent être complétés par un « + » ou un « - ». Jusqu'au niveau 5, le niveau technique est faible et accessible à une grande majorité de grimpeurs non entraînés. Entre 5 et 6a, le niveau technique reste abordable sans entraînement mais des techniques d'escalade spécifiques peuvent être nécessaires. Entre 6a et 7a, un entraînement régulier est nécessaire pour acquérir la force et la technique nécessaire à l'enchaînement des voies. Au-delà du 7, un entraînement spécifique à l'escalade est nécessaire. Les voies sont réservées à des grimpeurs bien entraînés voire même à des grimpeurs professionnels pour les niveaux les plus importants (8 et plus).

L'échelle de la difficulté globale est inspirée des éléments de cotation proposés en 1925. Elle tient compte de la longueur de la voie, des dangers objectifs, de l'engagement imposé, de l'altitude, des difficultés techniques notamment en escalade libre et de l'équipement en place. Elle est divisée en 6 catégories, de Facile (F) à Extrêmement Difficile (ED) (Tab. 1.1).

Niveau de difficulté	Description
Facile (F)	Passages en rocher et en neige où l'alpiniste se déplace facilement. L'itinéraire est évident. Crevasses possibles en glaciers. L'usage de la corde ne s'impose que pour la sécurité sur glacier.
Peu Difficile (PD)	Passages en rocher où il peut être nécessaire de grimper mais techniquement facile. Pente de neige et de glace entre 35 et 45° dont les passages les plus raides sont courts. Nécessite l'usage de crampons, de piolets et de techniques d'assurages.
Assez Difficile (AD)	Escalade de niveau moyen, en paroi verticale ou pente de neige crevassées et de glace jusqu'à 40 - 55°. Nécessite de progresser par longueurs de corde avec l'emploi d'une grande variété de techniques.
Difficile (D)	L'itinéraire est difficile à suivre avec des passages d'escalade soutenue, des zones très crevassées ou des rimayes difficiles à franchir. Les pentes de glace sont raides, entre 50 et 70°.
Très Difficile (TD)	L'escalade exige des compétences techniques sur tout type de terrain (rocher, glace, mixte) et nécessite de progresser en recourant à de nombreuses longueurs de corde. Les pentes de glaces présentent une inclinaison de 65 à 80°. Les risques objectifs peuvent être importants.
Extrêmement Difficile (ED)	La technicité de l'escalade est très importante sur tout type de terrain. Les difficultés sont longues et soutenues.

Tableau 1.1. Les 6 niveaux de l'échelle de difficulté globale.

L'échelle d'engagement est composée de 7 niveaux. Elle prend en compte de nombreuses variables : l'éloignement par rapport aux refuges, la difficulté de l'itinéraire, la difficulté de battre en retraite et la possibilité d'intervention des secours. Au niveau I, « l'itinéraire est court, peu éloigné, avec une descente facile. Comme il est proche de la vallée ou du refuge, les secours peuvent intervenir rapidement. Il est possible de faire demi-tour à tout moment » (Cox et Fulsaa, 2006). À l'inverse, le niveau VI correspond à un « Itinéraire sur une grande face pouvant être parcourue en une journée pour les meilleurs. Pratiquement que des longueurs dures et soutenues. Conditions rarement bonnes, cheminement compliqué, assurage problématique, retraite aléatoire. Descente longue et difficile. Itinéraire très exposé aux dangers objectifs. Les échappatoires sont des courses en soi. Une totale autonomie de la cordée est requise dans la difficulté » (Cox et Fulsaa, 2006). Le niveau VII : « idem mais en encore plus dur. Très rarement utilisé » (Cox et Fulsaa, 2006).

1.1.4. De l'après-guerre aux années 1990 : croissance de l'activité

A. Professionnalisation et croissance du niveau technique

Bien que les « trois derniers grands problèmes des Alpes » aient été conquis, le niveau technique et l'engagement des alpinistes de haut niveau ne cesse d'augmenter. De nouvelles voies sont ouvertes puis parcourues le plus rapidement possible, en enchaînement, en solo, en hiver ou en utilisant le moins de matériel possible.

W. Bonatti, R. Desmaison et H. Buhl sont les grandes figures de l'alpinisme de haut niveau des années 1960-70 et marquent les débuts de l'alpinisme professionnel. Bonatti est particulièrement connu pour son ascension en six jours et en solitaire de la face ouest des Drus par une nouvelle voie qui deviendra le « pilier Bonatti ». En 1963, 25 ans après la conquête de l'éperon Walker dans la face nord des Grandes Jorasses, il en réalise la première ascension hivernale. De son côté, Desmaison ouvre de nombreuses voies particulièrement difficiles pour l'époque telle que la face nord-ouest de l'Olan (3564 m, massif des Écrins) en 1956 et enchaîne les répétitions en hivernale. Il va contribuer au développement de l'alpinisme professionnel, non sans polémique, en faisant appel à des sponsors tel que l'équipementier Millet et en médiatisant ses ascensions pour subvenir à ses besoins financiers. Par exemple, son ascension du Linceul en hivernale dans la face nord des Grandes Jorasses en janvier 1968 est diffusée en direct sur RTL. La médiatisation de la pratique va aussi se traduire par l'apparition des revues d'alpinisme tel que *Montagnes Magazine*, *Grimper* ou *Vertical* dans les années 1970-80. Elles vont largement contribuer au développement de l'alpinisme auprès d'un large public. La professionnalisation de la pratique de l'alpinisme passe aussi par la mise en place de la formation et d'un diplôme de guide de haute montagne à l'Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme (ENSA) à Chamonix à partir de 1948 (Martinez, 2015).

L'évolution de la pratique de l'alpinisme dans les années 1960-70 et la diversification des modes de pratiques de cette époque sont fortement liées au perfectionnement du matériel, à l'initiative notamment des grimpeurs états-uniens. Bien que les pitons aient été inventés au début du XX^e siècle en Europe, leur usage est très limité dans les grandes parois de Californie. Ces dernières présentent principalement des fissures bouchées pour lesquelles les pitons européens, en acier mou, sont trop fragiles. C'est en 1946 que le forgeron et grimpeur californien J. Salathé forge les premiers pitons en acier dur, dans le même alliage que les essieux des Fords A, alors très bon marché (Modica, 2014). Ce changement de matériaux est à l'origine de nombreuses évolutions dans la pratique de l'alpinisme. Grâce à ces nouveaux pitons, l'escalade artificielle dans les parois du Yosemite va très largement se développer. Elle est aussi facilitée par l'apparition des chevilles à expansion qui vont permettre d'installer des points d'assurage en forant la paroi. En 1958, la première ascension du Nose d'El Capitan (2307 m, Sierra Nevada) est effectuée en 45 jours d'ascension discontinue, en utilisant 675 pitons (Poncelin, 1997). Cette pratique de l'escalade artificielle se développe aussi dans les Alpes et notamment dans les Dolomites (Italie).

En réaction à la pratique de l'escalade artificielle, où de nombreux outils sont utilisés pour atteindre le sommet de la voie, la pratique de l'escalade libre va se développer à partir des années 1970. Ce développement de l'escalade libre et notamment de l'escalade traditionnelle va entraîner l'apparition de nouveaux moyens d'ancrage. Les coinces, inventés dans les années 1920 en Europe – sous la forme de simples boulons passés dans une cordelette et à glisser dans des fissures – vont se perfectionner sous la forme de coinces câblés (Fig. 1.5) puis, dans les années 1970, les coinces mécaniques vont être inventés par les grimpeurs californiens (Fig. 1.5). Ils sont plus adaptés aux fissures rectilignes des parois du Yosemite. De plus, la commercialisation du nylon à partir de 1938 va entraîner l'apparition des premières cordes d'escalade en nylon en 1941 aux Etats-Unis. Associées aux premiers baudriers en 1963, elles présentent l'avantage d'être élastiques et de permettre des chutes beaucoup plus conséquentes que les anciennes cordes statiques en chanvre (Modica, 2014). Elles seront donc indispensables au développement de l'escalade libre où le risque de chute est plus important qu'en escalade artificielle.



Figure 1.5. Coinces mécaniques (à gauche) et coinces câblés (à droite).

Cette révolution de l'escalade et du matériel dans le Yosemite peut sembler éloignée de la pratique de l'alpinisme dans les Alpes mais ses retombées vont en réalité être importantes pour l'alpinisme alpin (Schmutz, 1994; Mestre, 1996). Tout d'abord, l'ensemble des techniques et du matériel est progressivement importé dans les Alpes et, combiné à l'entraînement en escalade sportive, ils vont permettre une explosion du niveau technique des alpinistes alpins. Entre 1982 et 1985, les voies d'escalade s'ouvrent vers le 8^e degré tandis que le 9^e degré est atteint en 1990. En haute montagne, de très nombreuses voies en escalade sportive dans les 5, 6 et 7^e degrés sont ouvertes dans les années 1980 (Fig. 1.6). Un des ouvriers les plus actifs de cette période est l'alpiniste suisse M. Piola. Il ouvrira plusieurs centaines de voies en escalade sportive dans le massif du Mont Blanc, notamment dans le secteur des Aiguilles de Chamonix, qui sont encore très fréquentées aujourd'hui.

Dans les Alpes, le matériel de progression sur glace va aussi se perfectionner avec l'invention en 1971 des premiers crampons dotés de quatre pointes tournées vers l'avant, permettant une meilleure stabilité. En parallèle, l'usage de deux piolets pour progresser dans des pentes de neige très raides va amener le développement des premiers piolets de traction (Modica, 2014). Le perfectionnement de ce matériel d'ascension sur glace va permettre de nouvelles pratiques telles que la goulotte (Fig. 1.7), la cascade de glace puis le *dry tooling*.



Figure 1.6. Escalade sportive : A. Petit au Grand Capucin (3838 m, massif du Mont Blanc, Vialletet, 2012) dans une longueur cotée 8a.



Figure 1.7. Ascension de la goulotte Pélissier, pointe Lachenal (3613 m, massif du Mont Banc), TD- (M. Jourdannay, 2018).

L'ensemble de cette période se caractérise donc par le perfectionnement du matériel de l'alpinisme qui permet le développement de nouvelles pratiques, l'ouverture de nouvelles voies dans de nouveaux types de terrain et une croissance très importante du niveau technique des alpinistes de haut niveau. En 1982, C. Profit réalise par exemple la première ascension en solo intégral (*i.e.* sans utiliser de matériel d'assurance) de la face ouest des Drus en 3h10. L'alpiniste suisse U. Steck réalisera aussi un certain nombre d'ascensions en un temps record telles que la face nord de l'Eiger en 2h 47min (2008) en hiver ou la face nord des Grandes Jorasses en 2h 21min (2008).

B. Démocratisation de l'alpinisme

À partir des années 1950, le nombre d'alpinistes amateurs augmente fortement et on ne peut plus résumer la pratique aux alpinistes de haut niveau. Les congés payés, l'augmentation du temps alloué aux loisirs et du pouvoir d'achat, la médiatisation progressive de la pratique et le perfectionnement du matériel contribuent à rendre l'alpinisme plus populaire. L'alpinisme de classe moyenne va succéder à l'alpinisme bourgeois (Hoibian 2006).

Un des indicateurs de cette démocratisation est la construction et l'évolution de la fréquentation des refuges de haute montagne. En effet, au cours des années 1950-60, de nombreux refuges de haute montagne sont construits, souvent en remplacement d'anciens bâtiments datant du début de siècle. Ainsi, dans le massif du Mont Blanc, le nouveau refuge Albert 1er est inauguré en 1959 et propose 130 places. En 1952, le refuge du Couvercle est restauré et agrandi pour atteindre 120 places. Dans les Écrins, le refuge du Promontoire est construit en 1966 et propose 30 places. En parallèle, la fréquentation des refuges de haute montagne à cette époque est très importante. Au cours de l'été 1976, le refuge du Glacier Blanc (massif des Écrins, 2542 m) enregistre 8165 nuitées, contre 5433 pour la moyenne des étés 2012-2013-2014 (données FFCAM). Toujours pour l'été 1976, le refuge d'Argentière (massif du Mont Blanc, 2771 m) enregistre 5235 contre 3299 pour la moyenne des étés 2013-2014-2015. Enfin, le refuge du Couvercle enregistre lui 5083 contre 4031 pour la moyenne des étés 1999-2000-2001 et 2855 pour la moyenne des étés 2013-2014-2015. Ainsi, la fréquentation des refuges de haute montagne dans les années 1970 était-elle forte et plus importante qu'aujourd'hui. En outre, le nombre de licenciés au CAF et la Fédération Française de la Montagne (FFM) passe de 70 000 à 100 000 entre 1965 et 1980 (Hoibian, 2006).

Sur l'ensemble de cette période, la motivation première de la majorité des alpinistes, professionnels ou amateurs, sera le jeu, la prise de plaisir et l'émancipation personnelle. « Les objectifs de l'alpinisme sont hors du domaine de l'intérêt matériel direct ou de la satisfaction individuelle des besoins de la vie. Il a son sens en lui-même. Par le mouvement, la diversité des situations, par la succession des moments de tension et de détente, dans l'imbrication des phases de difficulté et de solutions apportées, l'escalade peut être tout particulièrement comparée à un jeu » (Messner, 1973). La pratique de l'alpinisme s'inspire des caractères « funs », ludiques et hédonistes du mouvement californien (Corneloup, 1999) et l'escalade sportive amène aussi la recherche de la performance technique et physique. Cette démocratisation de l'alpinisme s'accompagne d'une augmentation du niveau moyen des alpinistes. Dans les années 1970-80, l'entraînement préalable en escalade sportive sur des falaises équipées est devenu monnaie courante et il va permettre à une majorité d'alpinistes amateurs d'améliorer leur compétences techniques et physiques avant d'aller en haute montagne (Mestre, 1996). Dans l'ensemble, les alpinistes amateurs montrent un engagement en temps et en intensité de plus en plus important dans la pratique (Martinez, 2015).

1.1.5. L'alpinisme depuis la fin des années 1990, déclin ou mutation ?

A. De la démocratisation à la consommation

Un tournant dans la pratique s'opère à partir des années 1990 où une part grandissante des alpinistes se concentre « sur des courses faciles permettant d'accéder aux sommets les plus connus, [...] l'accessibilité et la consommation d'activités rapides l'emportant sur l'engagement » (Bourdeau, 1991). Ce mouvement se poursuit jusque dans les années 2000. Les attentes sociales envers les pratiques sportives et de loisirs se tournent vers un mouvement plus ludique et récréatif qui, combiné à un refus de la prise de risque, s'oppose à la pratique de l'alpinisme. Les pratiquants sont d'avantage tournés vers la fluidité et le confort, comme l'illustre le matériel plus sophistiqué, plus fiable et le confort croissant dans les refuges (Bourdeau, 2009). Généralement, l'investissement dans la pratique est moindre, que ce soit en temps ou en entraînement. De cette évolution du profil des pratiquants émerge « une demande d'accès simplifié et dédramatisé de la nature » (Bourdeau, 2009). L'alpinisme voit alors son attractivité diminuer notamment face à la prise de risque qu'il représente et à son accidentologie dont les médias se font l'écho. Il en résulte une diminution du niveau technique des alpinistes par rapport aux années 1970-80. Aujourd'hui, deux populations se distinguent : un grand nombre de pratiquants d'un niveau très modeste et des alpinistes de haut niveau (Hoibian, 2008). Le nombre d'alpinistes d'un niveau moyen qui avait nettement augmenté dans les années 1970-80 a largement diminué.

L'un des extrêmes de cette évolution est la pratique d'un « alpinisme d'une seule fois », « un alpinisme de non alpinistes ». Les sommets les plus emblématiques des Alpes tels que le mont Blanc et le mont Rose et des courses faciles, rapidement accessibles et réalisables à la journée, sont fréquentés par de nombreuses personnes pour lesquelles cette ascension sera leur unique expérience d'alpinisme. En général, le matériel est loué et un guide est engagé à travers une agence de voyage ou une compagnie de guides (Fig. 1.8). On entre alors dans un schéma de consommation et l'alpinisme sera une des activités de nature consommées parmi d'autres tels que le *canyoning*, les sports d'eau vive, la *via ferrata*, l'accrobranche, le VTT, ou la randonnée.

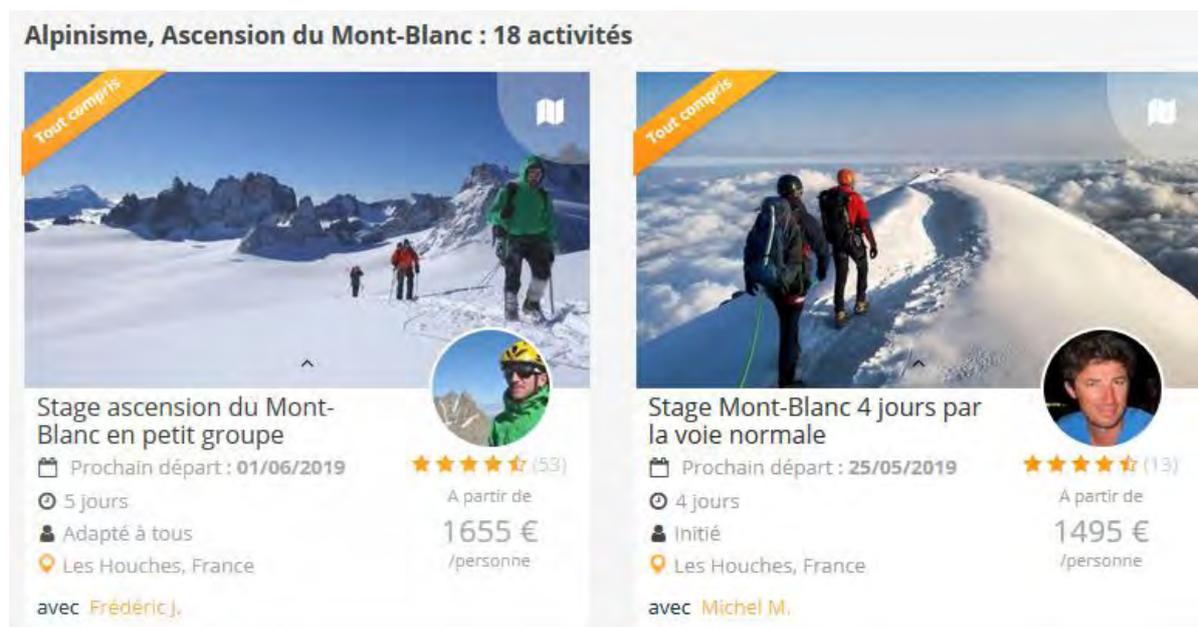


Figure 1.8. Vente de l'ascension du mont Blanc avec un guide de haute montagne sur le site de l'agence de voyage Kazaden (Kazaden.com, consulté le 28 jan. 2018).

L'évolution de la fréquentation des refuges de haute montagne est une nouvelle fois l'un des marqueurs de cette évolution de la pratique. En effet, elle est en diminution dès la fin des années 1990. Dans le massif des Écrins, le nombre de nuitées enregistré dans les refuges FFCAM diminue de 20 % entre 2000 et 2010 et les enquêtes de fréquentation du Parc National des Écrins (PNE) montrent une diminution du taux de pratique de l'alpinisme qui passe de 9,4 % en 1996 à 7,4 % en 2001 (Bourdeau, 2014). Le constat est similaire pour le massif du Mont Blanc où le nombre de nuitées enregistré dans les onze refuges de haute montagne (*i.e.* les refuges supports de la pratique de l'alpinisme) du CAF diminue de 15 % entre les périodes 2000-2002 et 2015-2017 (données FFCAM) pour une baisse moyenne annuelle de 1 % (Fig. 1.9).

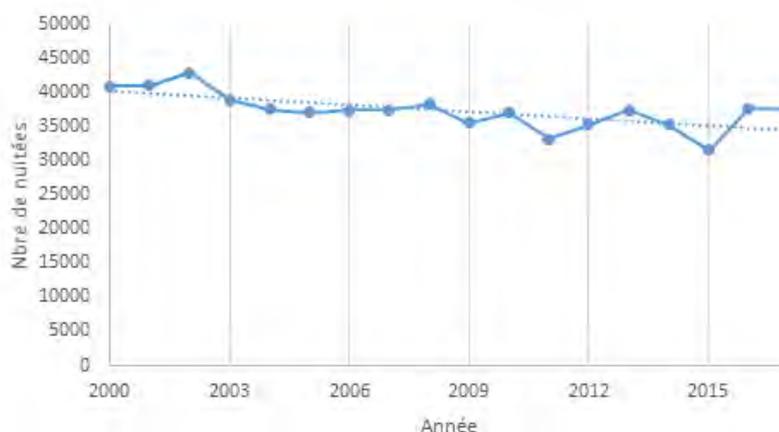


Figure 1.9. Évolution de la fréquentation des onze refuges de haute montagne du CAF dans le massif du Mont Blanc entre 2000 et 2017 (données FFCAM).

En revanche, les courses qui sont rapidement accessibles (*via* des remontées mécaniques, la route, le train, etc.) et relativement courtes, quel que soit leur niveau technique, sont de plus en plus fréquentées (Hoibian, 2008) à l'image des goulottes dans le Triangle du Tacul (massif du Mont Blanc) : elles sont rapidement accessibles et réalisables dans la journée et sont parmi les courses les plus fréquentées par les alpinistes qui empruntent le téléphérique de l'aiguille du Midi (*La Chamoniarde*, 2013).

B. L'alpinisme actuel : déclin ou mutation ?

L'évolution récente de l'alpinisme en France décrite ci-dessus et le développement parallèle de nombreuses pratiques sportives nouvelles (Bourdeau *et al.*, 2006) entraînent un questionnement de la part des alpinistes sur fond de crise identitaire : l'alpinisme est-il en déclin ? Deux événements récents sont de ce point de vue révélateurs.

Le premier est la tenue des Assises de l'Alpinisme à Grenoble et Chamonix en 2011, à l'initiative de l'Observatoire des Pratiques de la Montagne et de l'Alpinisme (OPMA). Une série de constats (§ 1.1.5.A) qui laissent penser que « la culture portée par l'alpinisme est menacée » (Amy, 2011) est à l'origine de ces assises : (i) l'augmentation de la fréquentation des territoires de montagne au niveau de sites aménagés, et la multiplication et diversification des activités de loisirs et de tourisme sportif « l'emportent et bouleversent progressivement la culture historique de l'alpinisme » (Amy, 2011), (ii) la codification, la réglementation, la sécurisation et l'expansion de la mise en forme compétitive de l'ensemble des activités de loisirs physiques, (iii) la réduction du soutien apporté par les pouvoirs publics aux activités de montagne et l'absence de représentation organisée des acteurs concernés, et (iv) la baisse de l'attractivité de l'alpinisme, notamment parmi les jeunes générations. En conséquences, les Assises de l'Alpinisme ont été organisées avec le double objectif de « créer une coordination active des instances concernées par les pratiques de moyenne et haute montagne » et de « formuler des propositions et d'impulser leur mise en œuvre pour redonner force et attrait à ces pratiques » (Corneloup, 2011).

Le second événement, très récent (2018), est la candidature portée par les communes de Chamonix (France) et de Courmayeur (Italie) pour l'inscription de l'alpinisme à la liste du patrimoine culturel immatériel de l'UNESCO. Comme le questionne J. Guibal, dans le numéro 69 de la revue *L'Alpe* (été 2015), « cette demande n'est-elle pas le reflet d'un déclin de l'alpinisme » ? D'après Debarbieux (2015) elle est plutôt une réaction à la « diversification des pratiques, des motivations et valeurs » qui caractérise les loisirs sportifs de nature à partir des années 1980 et qui vient concurrencer une vision traditionnelle de l'alpinisme, principalement basée sur l'esprit de cordée, l'autonomie, la prise de responsabilité et la maîtrise de savoir-faire et de techniques de progression spécifiques. L'objectif d'une telle inscription est alors d'obtenir « une reconnaissance d'un alpinisme classique, maintenir vivante une façon de pratiquer l'alpinisme et de cultiver une certaine éthique de la montagne » (Debarbieux, 2015).

D'après Hoibian (2008) cette crise identitaire résulte du fait que « l'alpinisme est aujourd'hui en phase de mutation », ce qui suscite des « sentiments de nostalgie, ou une sensation de déclin notamment chez les alpinistes les plus âgés qui voient la pratique évoluer dans un sens qui ne leur est pas familier. Cependant l'alpinisme a toujours connu des évolutions ». En effet, l'historique ci-avant a montré que sur deux siècles d'existence, l'alpinisme comme pratique socio-sportive a été en perpétuelle évolution. Cette évolution est principalement « soumise aux normes et aux valeurs d'une époque et d'une société donnée et elle obéit à des représentations collectives, objets de tensions et de conflits entre conceptions concurrentes » (Hoibian, 2000). Ce constat pose indirectement la question de la définition de l'alpinisme. Comment définir cette pratique tout en considérant sa profondeur historique ? Est-ce que proposer une définition ne revient pas à figer l'alpinisme dans une manière de la pratiquer à un instant « t » ?

Ce travail de thèse ne prétend pas répondre à ces questions et le débat reste ouvert. Nous proposerons toutefois une définition générale de la pratique de l'alpinisme, pour deux raisons principales : (i) définir l'objet d'étude de ce travail et en identifier ces principales caractéristiques, et (ii) introduire et présenter une première justification de la problématique générale de ce travail de thèse.

1.2. L'alpinisme dans les Alpes, une proposition de définition systémique

En raison notamment de sa profondeur historique, la pratique de l'alpinisme se caractérise par de nombreux éléments en interactions dynamiques les uns avec les autres, ce qui contribue à expliquer la difficulté à en proposer une définition qui fasse consensus. Aussi, l'analyse systémique (De Rosnay, 2000) ou l'alpinisme est considéré comme un système structuré en sous-système en interactions s'avère être une approche pertinente pour en proposer une définition générale. Cette dernière est notamment inspirée des Actes des Assises de l'Alpinisme (Durand et Martin, 2011). Ils présentent l'intérêt d'être le résultat de débats regroupant des alpinistes, des chercheurs et des acteurs de la pratique (guides, gardiens, fédérations, etc.) et ainsi, d'être le reflet de nombreuses opinions et conceptions différentes.

1.2.1. L'alpinisme : un système structuré autour de trois sous-systèmes

Bien que la pratique de l'alpinisme ait connu de nombreuses et profondes évolutions tout au long des deux derniers siècles, il est possible d'en identifier trois constantes structurantes (Fig. 1.10.A) ou trois sous-systèmes. (i) Des milieux de pratique spécifiques qui, dans les Alpes, sont les milieux de haute-montagne, en général caractérisés par leur verticalité, avec pas ou très peu d'équipements en place et où la neige, la glace et la roche sont les éléments dominants. C'est pour cette raison que les pratiques telles que la randonnée en moyenne montagne et que l'escalade rocheuse à basse et moyenne altitude ne seront pas considérées dans ce travail. Les milieux de haute montagne peuvent être considérés dans leur dimension paysagère, comme un décor, emblème de la pratique, et dans

une dimension pratique, comme supports et justifications des itinéraires, parcourus par les alpinistes. (ii) Un état d'esprit et une attitude propre à chaque alpiniste mais principalement structurés autour des notions d'autonomie, d'exploration, d'engagement et de liberté. Et, (iii) des connaissances et des savoir-faire indispensables à la progression dans les milieux considérés, qui se sont graduellement construits sur deux siècles. Ce savoir-faire s'articule principalement autour de la connaissance et de la maîtrise des techniques et outils de progression et d'assurage en milieux rocheux, neigeux et glaciaires. Il est d'ailleurs l'un des éléments mis en avant dans le dossier de candidature pour l'inscription de l'alpinisme sur la liste du patrimoine culturel immatériel de la France, l'Italie et la Suisse.

Il est important de préciser que la pratique de l'alpinisme ne se résume pas à un seul de ces trois sous-systèmes. Sur l'ensemble de son évolution, il en est la combinaison dans des proportions et spécificités variables. On peut faire de l'alpinisme dans différents milieux de haute montagne – où sont ouvertes des voies rocheuses, neigeuses et glaciaires – en mobilisant des techniques et un savoir-faire très variables – de l'escalade artificielle à l'escalade libre – avec un état d'esprit propre à chaque pratiquant. Ainsi, la conjugaison de ces trois éléments, définit et redéfinit l'alpinisme au fur et à mesure de son évolution (Fig. 1.10.B) et mène à la formation d'une « culture de l'alpinisme » qui désigne une histoire collective et un référentiel de traditions et de caractéristiques dans lequel s'inscrit la pratique (Durand et Martin, 2011).

À la croisée de ces principales composantes, d'autres facteurs plus subjectifs et individuels sont aussi à considérer. La conjugaison d'un milieu et d'un état d'esprit définit un imaginaire et des représentations de la haute montagne variables d'un individu à un autre et d'une époque à une autre. La conjugaison de techniques et d'un état d'esprit vont définir le rapport au risque, une éthique et un rapport à l'autre, notamment à travers l'esprit de cordée. Enfin, la conjugaison des savoir-faire de l'alpinisme et des milieux de haute montagne définit leur accessibilité et les différentes manières de pratiquer l'alpinisme.

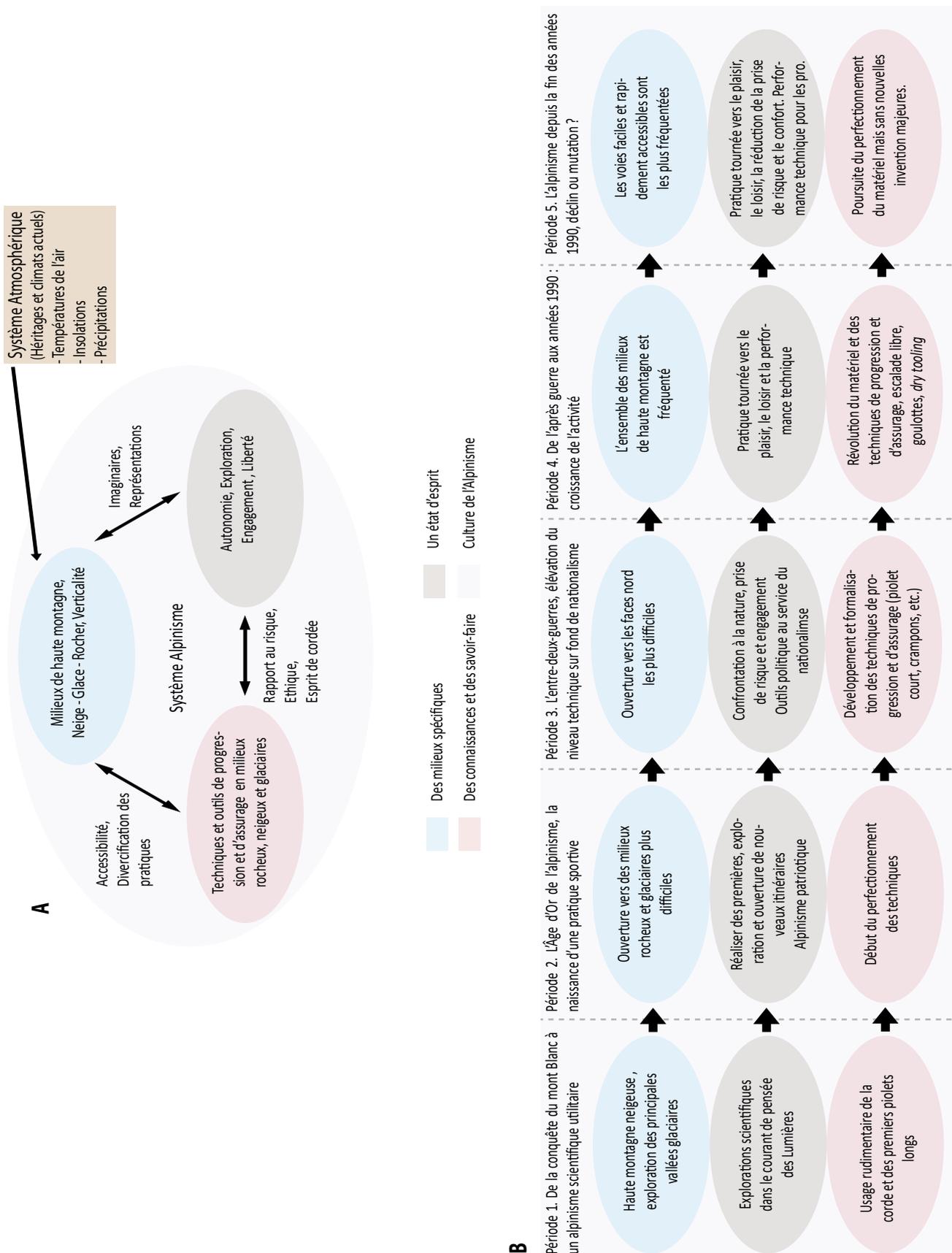


Figure 1.10. Définition de l'alpinisme dans les Alpes (A) selon trois constantes structurantes : des milieux de pratiques, un état d'esprit et des savoir-faire, dont l'évolution, (B) en 4 périodes principales, construit aujourd'hui une culture de l'alpinisme.

1.2.2. Une évolution uniquement conditionnée par des facteurs socio-culturels ?

Sur les deux derniers siècles, l'histoire de l'alpinisme a été décrite et expliquée par l'évolution de deux de ces sous-systèmes : des techniques et des outils de progression et l'évolution de l'état d'esprit des alpinistes, eux-mêmes conditionnés par des facteurs socio-culturels et économiques propres à chaque époque. Le troisième pilier de l'alpinisme - les milieux de haute montagne – n'a cependant fait l'objet d'aucune considération. La seule évolution marquante le concernant est la multiplication des itinéraires ouvert jusque dans les lieux les plus difficiles d'accès.

Cette perspective socio-centrée est remise en question à partir des années 1990. Bien que le changement climatique soit en cours depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG), les milieux de haute montagne ont fait l'objet de modifications relativement peu marquée, qui n'ont pas été considérées dans l'histoire de l'alpinisme. Par exemple, dans son livre intitulé « Les nouveaux Alpinistes », C. Gardien (2008) propose un historique de l'alpinisme depuis 1953 dans lequel le changement climatique n'est évoqué qu'une seule fois. On peut estimer que les impacts du changement climatique ne sont par conséquent pas suffisamment important pour affecter les alpinistes.

Toutefois, à partir des années 1990, l'accélération du changement climatique (IPCC, 2014) entraîne une évolution intense et rapide des milieux de haute montagne. Les alpinistes, bousculés par ces modifications, prennent alors progressivement conscience des implications possible du changement climatique pour la pratique (Fig. 1.11). Ce constat amène la problématique générale de ce travail de thèse : **comment l'évolution des milieux de haute montagne lié au changement climatique affecte-t-elle la pratique de l'alpinisme estival dans les Alpes occidentales ?** Autrement dit, quels sont les impacts de l'évolution du système atmosphérique (Fig. 1.10.A) sur le sous-système Milieux de haute montagne et par conséquent sur l'ensemble du système Alpinisme ?



Figure 1.11. Panneaux d'information sur le sentiers d'accès à la Mer de Glace.

Conclusion du Chapitre 1

Dans le résumé de l'histoire de l'alpinisme présenté dans ce chapitre, nous avons principalement montré l'évolution des catégories socio-professionnelles des pratiquants, de leurs motivations, des types de voies qu'ils fréquentent et des techniques qu'ils utilisent sur 5 périodes distinctes depuis la fin du XVIII^e siècle. Cet historique nous a ensuite permis de proposer une définition du système Alpinisme, lui-même composé de trois sous-système (Fig. 1.10.A) : (i) des milieux de pratique spécifiques, (ii) un état d'esprit et (iii) des connaissances et des savoirs faire. Ces deux derniers sous-systèmes ont montré des évolutions notables sur les 200 dernières années alors que le premier, les milieux de haute montagne, n'a fait l'objet d'aucune évolution marquante (Fig. 1.10.B). Toutefois, à partir des années 1990 il entre en mutations suite à l'accélération du changement climatique, ce qui remet en question le fonctionnement de l'ensemble du système Alpinisme. Dans ce travail doctoral nous aborderons principalement les impacts du changement climatique sur le sous-système Milieux de haute montagne et plus précisément sur les itinéraires d'alpinisme, avant d'étudier les répercussions que cela engendre sur les deux autres sous-systèmes.

Chapitre 2. Impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne

Avant de s'intéresser aux impacts de l'évolution des milieux de haute montagne sur la pratique de l'alpinisme, il est nécessaire de détailler quels sont les impacts effectifs du changement climatique sur ces milieux (impacts du système Atmosphérique sur le sous-système Milieux de haute montagne). La première section de ce chapitre présentera l'évolution du climat dans les Alpes occidentales depuis la fin du PAG avant que la seconde ne détaille l'évolution physique des milieux de haute montagne qui en résulte. S'agissant pour l'essentiel de processus glaciaires ou liés au permafrost, notre objectif ne sera toutefois pas de présenter en détails les caractéristiques de la cryosphère alpine mais son évolution dans le contexte actuel de réchauffement climatique en détaillant les processus géomorphologiques qui en résultent et qui peuvent affecter la pratique de l'alpinisme.

2.1. Le changement climatique dans les Alpes depuis la fin du PAG

À l'échelle mondiale, le changement climatique observé à partir du XIX^e siècle est sans précédent et particulièrement rapide avec une hausse de la température moyenne mondiale de 0,85°C entre 1880 et 2012 (IPCC, 2014). 16 des 17 dernières années ont été les plus chaudes jamais enregistrées à l'échelle du globe depuis le début des relevés en 1880 (IPCC, 2018). Cependant, le réchauffement des températures ne se produit pas de manière homogène sur l'ensemble de la planète et les régions de hautes latitudes et de hautes altitudes de l'hémisphère nord se réchauffent plus rapidement (Beniston, 2005).

2.1.1. Évolution du climat dans les Alpes depuis la fin du PAG.

Dans les Alpes, le changement climatique se traduit notamment par une hausse des températures moyennes annuelles de 2°C entre la fin du XIX^e siècle et le début du XXI^e siècle (Auer *et al.*, 2007 ; Einhorn *et al.*, 2010), avec une nette accélération du réchauffement à partir des années 1990 (Fig. 2.1). À Chamonix, les températures moyennes annuelles ont augmentées de 2,1°C entre 1934 et 2017 . Le réchauffement est cependant beaucoup plus marqué en hiver, avec une hausse de 2,8°C des températures moyennes contre 1,5°C pour les températures moyennes estivales (données Météo France). De plus, les températures moyennes annuelles ont augmenté quatre fois plus vite sur la période 1970 – 2009 que sur la période 1934-1970.

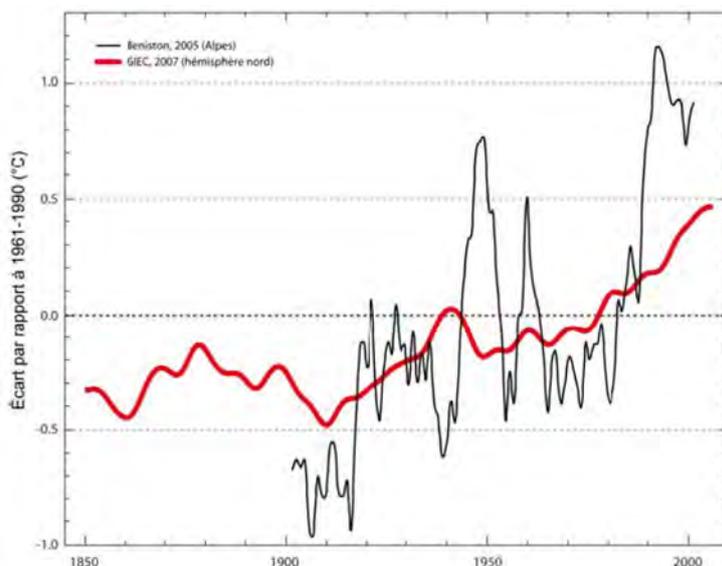


Figure 2.1. Evolution de l'écart des températures moyennes annuelles dans l'hémisphère nord et dans les Alpes par rapport à la température moyenne de la période 1961-1990.

Ce réchauffement, sur le long terme, se traduit par des modifications de fréquences et d'intensités de certains phénomènes météorologiques et notamment les canicules et les températures maximum journalières. Le nombre de canicules a triplé entre 1880 et 2005 en Europe occidentale ; on passe ainsi d'une canicule en moyenne par décennie à trois (Della-Marta *et al.*, 2007). Dans la vallée d'Aoste, à 600 m d'altitude, au sud du massif du Mont Blanc, le nombre de jours dit « tropicaux » ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$) a augmenté de 7,3 jours par décennie entre 1974 et 2017. À l'inverse, le nombre de jours de gel a diminué de 6,5 jours par décennie sur la même période (données du *Centro Funzionale Regione Autonoma Valle D'Aosta*). Cette imbrications d'échelles temporelles et ce lien entre changement climatique et évolution de la fréquence et de l'intensité de phénomènes météorologiques est particulièrement important dans ce travail car déterminant pour les conditions de fréquentation des itinéraires d'alpinisme. Il est important de préciser que ce réchauffement concerne aussi les secteurs de très haute altitude. Dans les Alpes, l'altitude moyenne de l'isotherme 0°C s'est ainsi élevée de plus de 400 m depuis le début des années 1980 (Bhöm *et al.*, 2010). Dans le massif du Mont Blanc, l'altitude de l'isotherme 0°C au mois de juillet passerait de 3380 m actuellement à 4080 m en 2100 (Donnée *CREA Mont Blanc*). Au-dessus de 4000 m, la température moyenne annuelle a augmenté de $0,14^{\circ}\text{C}$ par décennie entre 1990 et 2004 (Gilbert et Vincent, 2013).

Enfin, le régime des précipitations moyennes ne présente pas d'évolution marquée dans les Alpes occidentales. En revanche, entre 2000 et 2700 m, il y a une nette diminution du nombre de jours neigeux par rapport au nombre total de jours avec des précipitations (Serquet *et al.*, 2011) et les périodes de fonte du manteau neigeux sont plus fréquente et plus intense (Klein *et al.*, 2016). La période enneigée entre 1139 m et 2540 m d'altitude a diminué de 8,9 jours par décennie entre 1970 et 2015 avec un enneigement qui commence 12 jours plus tard et qui se termine 26 jours plus tôt en 2015 qu'en 1970 (Klein *et al.*, 2016). Les Alpes sont donc particulièrement affectées par le changement climatique. Il en résulte des évolutions majeures de la cryosphère de haute montagne.

2.2. Les effets du changement climatique sur la haute montagne alpine – Un état des connaissances

2.2.1. Retrait des glaciers et des couvertures glacio-nivales et processus géomorphologiques associés à la déglaciation

2.2.1.1. Fonte généralisée des glaciers alpins depuis la fin du PAG

L'évolution sans doute la plus marquante et la plus facile à identifier dans le paysage est le retrait glaciaire. Celui-ci est principalement conditionné par le réchauffement des températures de l'air (Beniston *et al.*, 2018). Depuis la fin du PAG, la quasi-totalité des glaciers du monde est en décreue (Gardent *et al.*, 2014). Dans les Alpes, ce retrait est généralisé sur l'ensemble de la période post-PAG, exception faite de trois courtes périodes d'avancée : les années 1880, 1920 et 1970-80 (Gardent, 2014). D'autre part, la fonte des glaciers a connu une nette accélération à partir des années 1990 (Zemp *et al.*, 2015) à travers 4 phénomènes principaux :

- (i) Le retrait des langues glaciaires. La figure 2.2. illustre cette dynamique de retrait pour cinq glaciers des Alpes occidentales. Entre 1880 et 2015, le recul de leur front est compris entre 1100 m (glacier d'Argentière, France ; Fig. 2.2.A) et 2200 m (glacier d'Aletsch, Suisse) (WGMS, 2015 ; Beniston *et al.*, 2018). L'accélération du réchauffement a entraîné un recul de 400 m du front de la Mer de Glace entre 2003 et 2014 (Vincent *et al.*, 2014).

- (ii) La perte de masse et de volume des glaciers. D'après les mesures effectuées sur 10 glaciers alpins de référence, le bilan de masse spécifique annuel moyen – rapport entre accumulation et ablation – entre 1980 et 2009 est de -825 mm équivalent en eau. Cette perte est trois fois plus importante au cours de la décennie 2000 que pendant les années 1980 (Fig. 2.2.B) (Zemp *et al.*, 2015). En conséquence, les glaciers des Alpes ont perdu 49 % de leur volume entre 1900 et 2011 (Huss, 2012).

- (iii) Consubstantiel au phénomène précédent, la perte d'épaisseur des glaciers (Fig. 2.3). Elle est bien entendu plus significative dans les zones d'ablation des glaciers qu'à plus haute altitude dans les zones d'accumulation. Dans le massif du Mont Blanc, à 1900 m d'altitude, la Mer de Glace a perdu 166 m d'épaisseur entre 1890 et 2013 et le glacier d'Argentière, 80 m, entre 1994 et 2013. À plus haute altitude, une perte d'épaisseur est également en cours, bien que plus limitée. La surface du glacier de Talèfre (massif du Mont-Blanc, France) s'est par exemple abaissée de 5 à 10 m entre 3000 et 3500 m d'altitude sur la période 1979-2003 (Berthier, 2005). À 3613 m d'altitude, le glacier du Géant (massif du Mont Blanc, France) a perdu plus de 20 m d'épaisseur entre 1992 et 2012 (Ravelin *et al.*, 2013). Dans le massif des Écrins (France), à 3150 m d'altitude, le glacier Blanc a perdu 26 m d'épaisseur entre 1904 et 2014. À 2450 m d'altitude, ce même glacier a perdu 140 m d'épaisseur depuis 1904, entraînant le désenglacement complet du profil correspondant au début des années 2000 (données IRSTEA et Parc National des Écrins). En moyenne sur la période 2003-2009, les glaciers des Alpes françaises ont perdu 1,10 m d'épaisseur par an (Gardent, 2014).

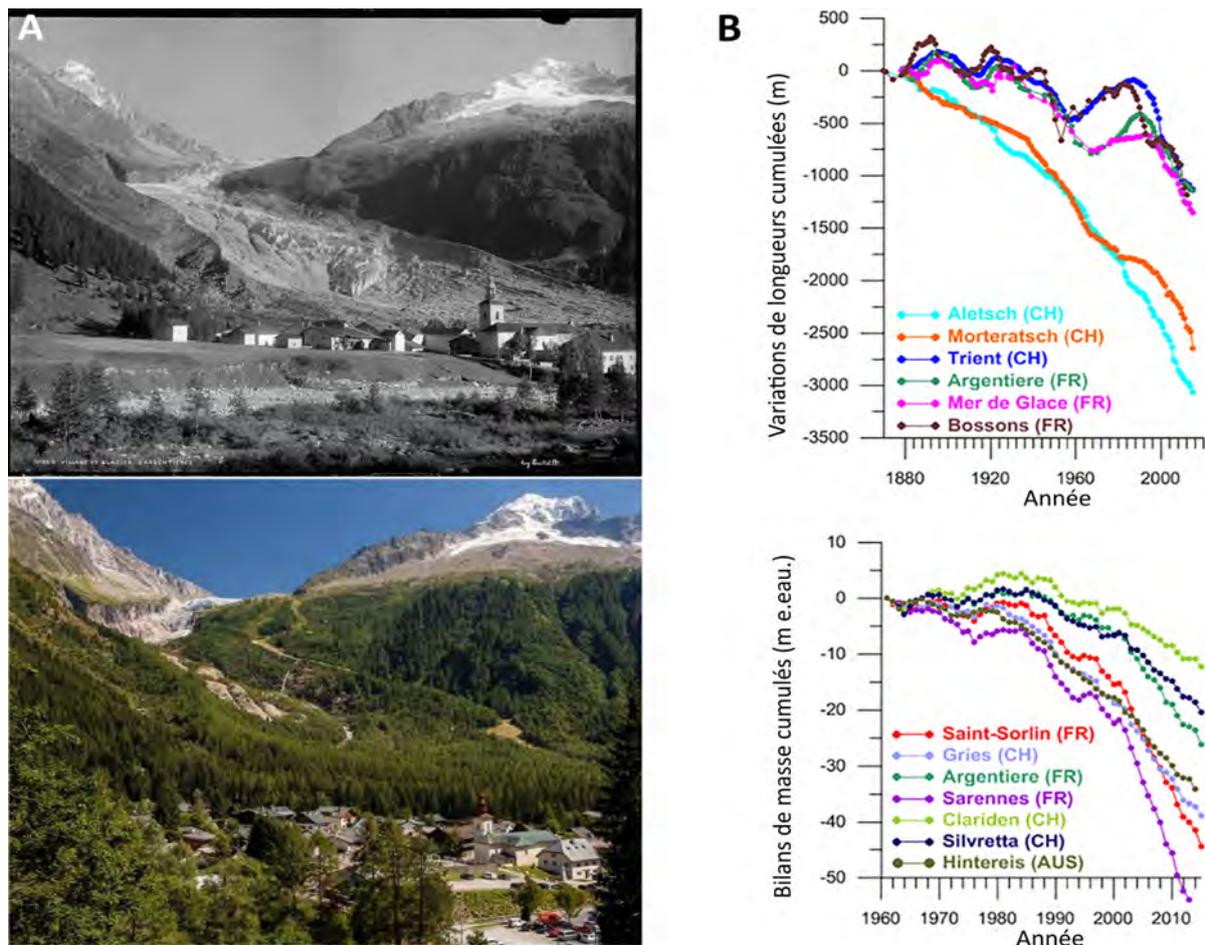


Figure 2.2. A. Photo-comparaison du glacier d'Argentière entre le début du XX^e siècle (Fond Gay-Couttet, Maison de la Mémoire et du Patrimoine de Chamonix) et 2015 (CREA Mont-Blanc). B. Variations de la longueur et du bilan de masse de plusieurs glaciers alpins (Beniston et al., 2018).

- (iv) La remontée de la Ligne d'Equilibre Glaciaire (LEG), limite entre les zones d'accumulation et d'ablation. Elle se traduit dans le paysage par la limite inférieure du névé sur les glaciers en fin d'année hydrologique. Dans les Alpes occidentales, elle se situe à une altitude moyenne de $3035 \text{ m} \pm 120 \text{ m}$, avec une tendance à la remontée en altitude. Entre 1984 et 2010, elle est ainsi remontée de 170 m (Rabatel et al., 2013a). Combinée à une diminution de l'enneigement, la remontée de la LEG implique une diminution en surface et en épaisseur du manteau neigeux à la surface des glaciers. En conséquence, les crevasses apparaissent plus tôt au printemps, les secteurs en glace vive augmentent en été et les ponts de neige sont aussi moins bien formés et plus fragiles.

Plus globalement, il résulte de ces phénomènes une diminution des surfaces englacées de 30 à 40 % sur l'ensemble des Alpes occidentales depuis 1850. En Suisse, elles ont diminué de 28 % entre 1973 et 2010 (Fischer et al., 2014). Dans les Alpes françaises, les glaciers ont perdu la moitié de leur surface, passant de 544 km^2 à la fin du PAG, à 369 km^2 sur la période 1967-1971 puis 275 km^2 sur la période 2006-2009. Cette perte est plus importante dans les Alpes du Sud que dans les Alpes du Nord. Entre la fin du PAG et la période 2006-2009, les surfaces englacées ont ainsi diminué de 60 % dans le massif des Écrins contre 23,6 % dans le massif du Mont Blanc (Gardent, 2014). De plus, cette diminution des

surfaces englacées concerne aussi les hautes altitudes. Sur le versant français du massif du Mont Blanc entre 1960 et 2008, les surfaces englacées ont ainsi diminué de 16 % entre 2200 et 2600 m d'altitude, de 11 % entre 2600 et 3000 m, de 6 % entre 3000 et 3500 m et de 3 % entre 3500 et 4000 m (Deline *et al.*, 2012).

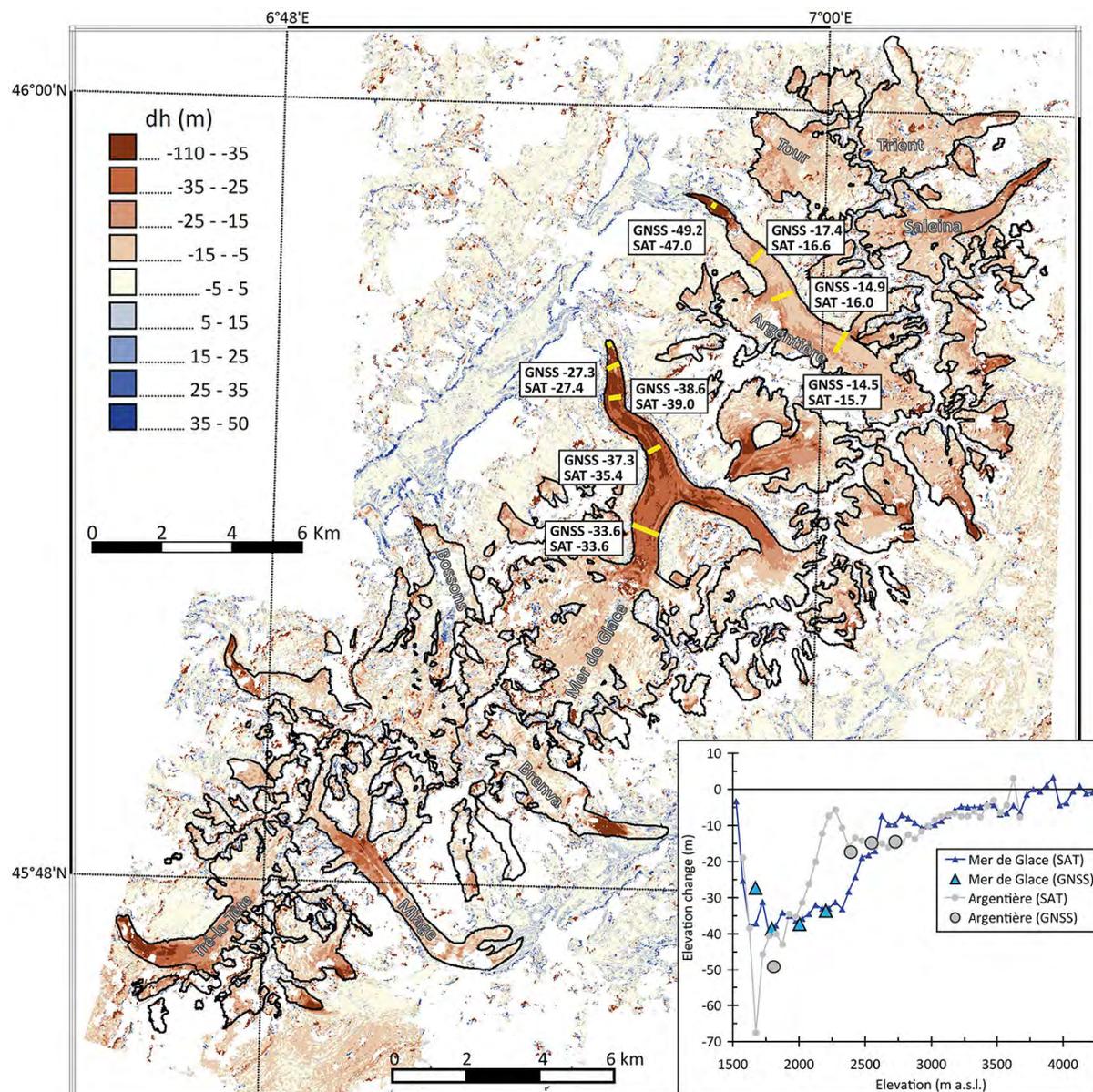


Figure 2.3. Différence d'altitude de la surface des glaciers entre août 2003 et août 2012 sur l'ensemble du massif du Mont Blanc (Berthier *et al.*, 2014). Les profils jaunes représentent les sites où l'altitude est mesurée tous les ans par GPS différentiel. Le graphique présente les différences de niveau entre les mesures de terrain (GNSS) et les mesures satellites (SAT).

2.2.1.2. Une crise paraglaciale associées à la déglaciation

La fonte des glaciers entraîne le désenglacement d'importantes portions de versants qui se décompressent et qui sont soumis à différents facteurs d'érosion. Il résulte de ces phénomènes un certain nombre de processus dits « paraglaciaires », particulièrement actifs au niveau des moraines latérales récemment apparues suite à la fonte des langues glaciaires.

A. Le concept de « paraglaciale »

Le terme de « paraglaciale » est proposé dans un premier temps pour remplacer, mais sans succès, le terme « périglaciaire » et il est finalement défini comme un concept par Church et Ryder (1972). Il désigne les processus non glaciaires mais directement conditionnés par la glaciation (Mercier, 2010). Au cours des années 1980-90, le concept est de plus en plus utilisé dans la littérature internationale mais la définition la plus couramment retenue aujourd'hui reste celle proposée par Ballantyne (2002a) : « les processus non glaciaires à la surface de la terre, les accumulations sédimentaires, formes, systèmes et paysages qui sont directement conditionnés par les glaciations et les déglaciations ».

Le concept de paraglaciale conduit à l'identification de périodes d'activité géomorphologique paraglaciale, désignée sous l'expression de « séquence paraglaciale » (Fig. 2.4) qui débute en réaction directe à la déglaciation et s'achève lorsque l'ensemble des sédiments glaciaires hérités sont épuisés ou stabilisés (Ballantyne, 2002b, 2003b). La durée d'une séquence est donc limitée dans le temps. Au cours d'une séquence, l'environnement se réajuste au passage d'un état d'englacement à un autre état (Mercier, 2010). On identifie des crises géomorphologiques paraglaciaires lorsque qu'il y a une intensification ou une rupture dans la morphogénèse (Mercier, 2001). Ballantyne (2002a) propose des modèles de libération des stocks sédimentaires permettant de calculer la durée de vie d'une séquence en prenant notamment en compte les volumes sédimentaires déposés, les taux de dénudation et la datation du début de la séquence.

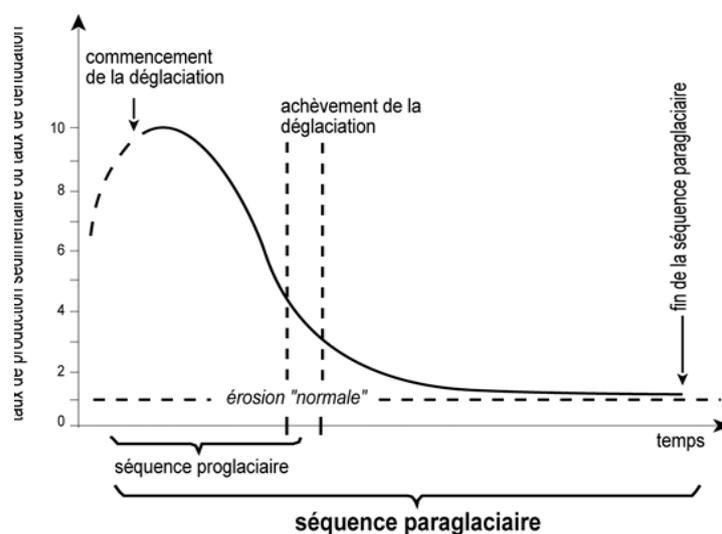


Figure 2.4. Durée de vie d'une séquence paraglaciale (d'après Church et Ryder, 1972 ; Mercier, 2010).

B. Le géosystème paraglaciale

Ballantyne (2002a, 2003a) propose une approche systémique de la géomorphologie paraglaciale afin de considérer au mieux la complexité du système qui se structure autour de nombreux paramètres en interaction (Frontier *et al.*, 2004). Le géosystème paraglaciale est alors structuré autour de 7 sous-systèmes : gravitaire, éolien, fluvial, lacustre, littoral, marin et socio-spatial (Mercier, 2008). Dans ce travail, nous nous concentrerons spécifiquement sur le sous-système gravitaire via l'analyse des processus géomorphologiques qui se produisent sur un versant et sur leurs spécificités dans la haute montagne alpine.

C. Le sous-système gravitaire au cours d'une séquence paraglaciale dans la haute montagne alpine

Sur la base de la définition de Ballantyne (2002a), on peut considérer qu'à partir de la fin du PAG, une nouvelle séquence paraglaciale a débuté dans les Alpes. Il en découle un déséquilibre géomorphologique des versants qui se traduit par différents processus gravitaires principalement liés à la décompression des versants et à la remobilisation de sédiments glaciaires non consolidés. De plus, l'accélération de la fonte à partir de 1990 (§ 2.2.1) entraîne une crise morphogénique qui se traduit par l'intensification de ces processus.

- Décompression des versants. Les versants rocheux qui encadrent un glacier sont comprimés lorsque les glaciers sont présents puis subissent une décompression lors de leur retrait ce qui entraîne une variation de la tension interne de la roche. Le relâchement des contraintes dans les versants rocheux peut provoquer une détente qui se traduit par l'ouverture ou la croissance de fractures subparallèles à la surface topographique (Ballantyne, 2002b ; Oppikofer *et al.*, 2008 ; McColl, 2012) et mener à des écroulements ($V > 100 \text{ m}^3$). Ce processus paraglaciale peut être observé sur une période de temps très variable, d'une année à plusieurs dizaines de milliers d'années, à la suite d'une déglaciation (Cossart, 2005 ; Mercier, 2005). Le retrait glaciaire peut également déclencher certaines formes de Déformations Gravitaires Profondes de Versant (DGPV). C'est par exemple le cas du versant situé en rive gauche du glacier d'Aletsch (Alpes bernoise, Suisse). Il est affecté par un glissement de terrain depuis les années 1970 sur une superficie de l'ordre d' 1 km^2 (Strozzi *et al.*, 2010). Le cas du refuge de la Pilatte (massif des Ecrins, France) peut également être cité : il a été endommagé par un déplacement pluri-centimétrique (glissement) d'un compartiment rocheux de $400\,000 \text{ m}^3$ en réaction au retrait du glacier de la Pilatte. Le mouvement a été initié dans les années 1980, avec une nette accélération à partir du début des années 2000 (Duvillard *et al.*, 2018 ; Fig. 2.5).

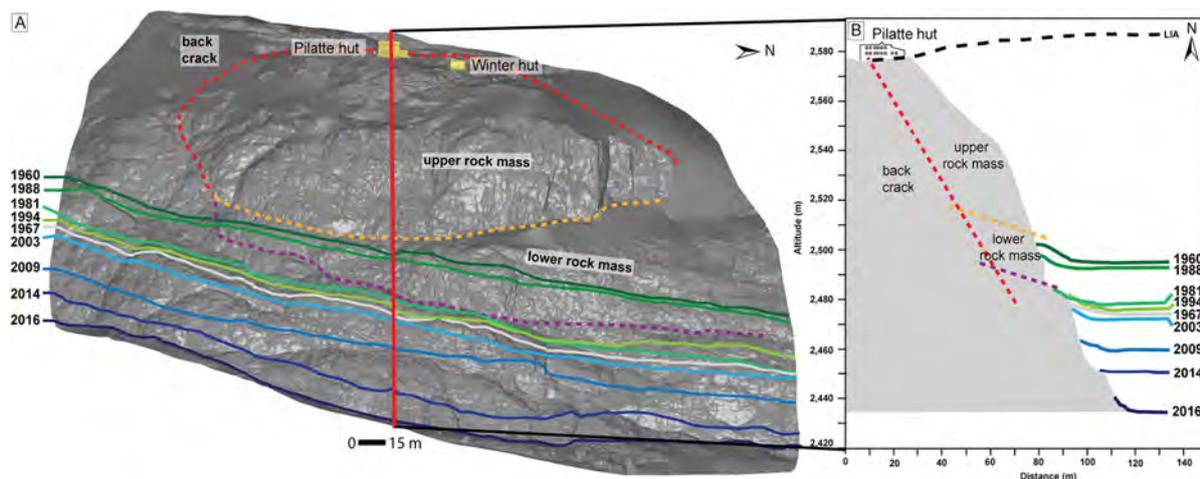


Figure 2.5. Évolution du niveau de la surface du glacier de la Pilatte en aval du refuge du même nom (massif des Ecrins, France ; Duvillard et al., 2018) A. Modèle 3D du secteur. B. Coupe transversale du versant.

-Mobilisation de sédiments glaciaires non consolidés. Le retrait des glaciers, et plus particulièrement leur perte d'épaisseur, entraîne une privation d'effet de butée ainsi qu'une décompression des moraines (Ravel et Lambiel, 2013 ; Ravel et al., 2018a ; Luckas et al., 2012) et plus largement des tills (sédiments d'origine glaciaire) qui ne sont alors plus maintenus contre les versants mais exposés à la gravité et à différents agents d'érosion. Les moraines, notamment latérales, vont alors se dégrader progressivement ou brutalement. Le matériel issu du versant interne de la moraine est alors érodé et déposé à sa base (talus) jusqu'à ce que le profil de la moraine atteigne un profil d'équilibre. Eichel et al. (2018) proposent un modèle d'évolution des moraines latérales dans les Alpes en 3 étapes (Fig. 2.6) : (i) ravinement (*gullying*), (ii) solifluction et (iii) stabilisation.

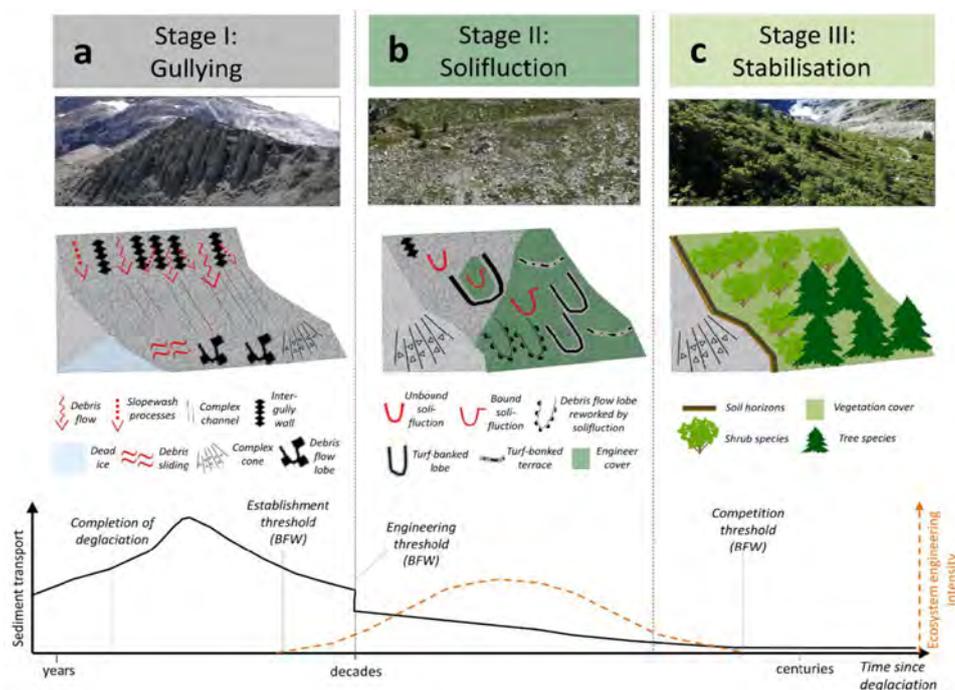


Figure 2.6. Modèle conceptuel d'évolution d'une moraine latérale alpine, depuis un état géomorphologique actif à stable (Eichel et al., 2018).

Cette évolution des moraines, notamment dans leur stade 1 (de ravinement), se traduit par différents processus :

- Des processus gravitaires. Ce sont, comme dans les parois rocheuses (Ravel, 2010), des chutes de pierres/blocs (éboulisation), des éboulements ($V < 100 \text{ m}^3$), voire des écroulements ($V > 100 \text{ m}^3$). Un volume d'environ $25\,000 \text{ m}^3$ s'est par exemple déstabilisé en rive droite de la Mer de Glace, à l'aval des échelles de la Charpoua, le 29 août 2014. Il s'agit dans tous les cas de détachements brutaux de tills. Les moraines peuvent également être affectées par des glissements (Ravel et Lambiel, 2013) ou des coulées de débris, souvent en présence d'eau liquide.

- Le ruissellement. Il est le résultat d'importantes précipitations liquides, de la fonte nivale, et/ou de la fusion de la glace morte présente dans les moraines. Il en résulte la formation de nombreuses ravines sur le flanc interne des moraines et des cônes de débris à leurs pieds (talus ; Fig. 2.6 et 2.7). L'incision peut aussi être liée à des torrents latéraux. De plus, en cas de forte disponibilité en eau et en raison des moraines qui constituent d'importants stocks de sédiments mobilisables, des laves torrentielles peuvent se former au niveau de ces torrents pour venir s'étaler au pied des moraines. D'autre part, les précipitations peuvent être à l'origine d'une augmentation des pressions interstitielles dans les tills, favorisant les processus gravitaires précités.

- La gélifraction. Les alternances gel/dégel de l'eau dans les tills favorisent le déchaussement de blocs et leur chute, comme en témoignent les dépôts diffus qui s'observent sur la neige au pied des moraines en fin d'hiver / début de printemps.

- La déflation éolienne. Il s'agit du transport par le vent des éléments les plus fins du till (Deline, 2008).

- Les avalanches. Elles contribuent à éroder les moraines latérales, en particulier au niveau des principaux couloirs.



Figure 2.7. Moraine latérale droite de la Mer de Glace en cours de phase 1 (ravinement). Le matériel constituant la moraine est érodé (pente d'environ $70/80^\circ$) et forme des ravines de profondeur plurimétrique. Ce matériel est redéposé à la base de la moraine et forme un talus continu.

2.2.1.3. Évolution des petits appareils glaciaires suspendus et des couvertures glacio-nivales

Bien que situés à relativement haute altitude, les glaciers suspendus et les couvertures glacio-nivales sont affectés par la hausse des températures dans les Alpes : leur retrait s'accélère depuis les années 1990.

A. Retrait des couvertures glacio-nivales

Les couvertures glacio-nivales sont de petits appareils constitués de glace froide parfois recouverte de neige. Elles sont présentes dans certaines parois raides, à plus de 3300 m en face nord et 3800 m en faces sud. Elles sont ou non connectées à des glaciers. Leur glace s'est formée principalement à partir de l'accumulation de neige et par regel éventuel des eaux de fonte.

Une étude en cours dans le massif du Mont Blanc doit permettre de préciser leur évolution récente face au changement climatique (Guillet, 2016). L'étude des couvertures du Linceul (face nord des Grandes Jorasses, 4208 m), de la face nord de la Tour Ronde (3792 m) et du Triangle du Tacul (face nord du mont Blanc du Tacul, 4248 m) (Fig. 2.8) montre qu'elles perdent de leur surface depuis plusieurs décennies avec une nette accélération depuis les années 2000. Ainsi, la couverture du Linceul a perdu 77 m²/an entre 2004 et 2010 et 330 m²/an entre 2013 et 2015. Le retrait de la couverture de la face nord de la Tour Ronde est plus rapide encore avec une fonte de 515 m²/an entre 2000 et 2015 (Guillet, 2016). Concernant le Triangle du Tacul, des mesures de bilan de masse via l'utilisation de balises d'ablation ont permis de montrer une perte moyenne de 45 cm d'épaisseur de glace au cours de l'été 2017 (Fig. 2.8). Sont associés à cette dynamique une augmentation de leur angle de pente et une diminution, voir une disparition pendant l'été, du manteau neigeux qui les recouvrent. Ainsi, comme dans le cas du Triangle du Tacul, les couvertures ne se régénèrent plus suffisamment à partir des précipitations.

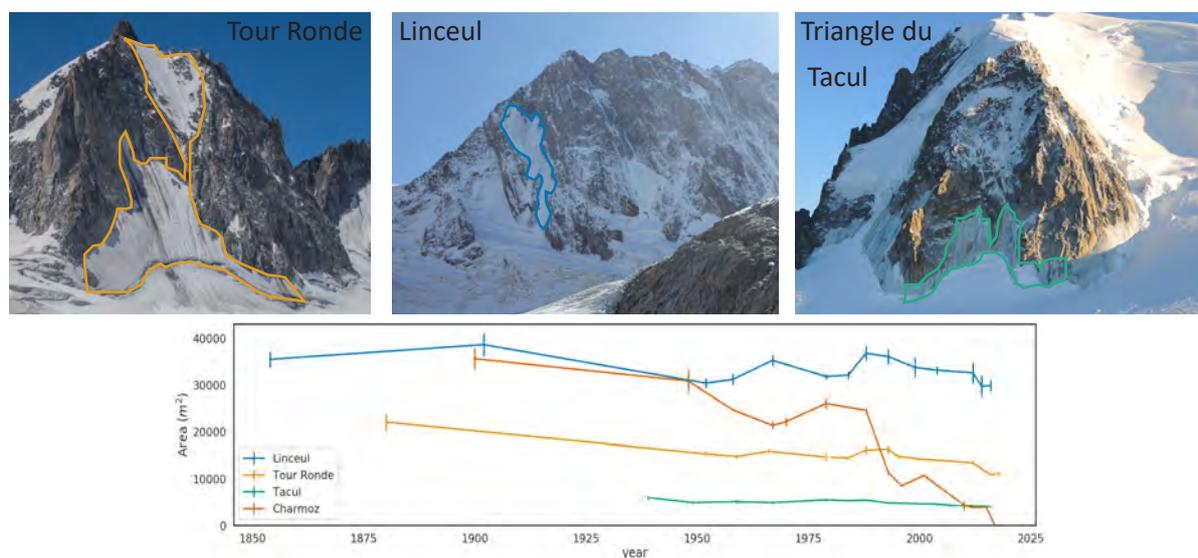


Figure 2.8. Les couvertures glacio-nivales de la Tour Ronde, du Linceul et du Triangle du Tacul (massif du Mont Blanc) et leur dynamique de retrait (Guillet, 2016).

B. Évolution des glaciers suspendus

Les glaciers suspendus, situés à haute altitude, voient eux aussi leurs dynamiques affectées par le changement climatique. Ces glaciers sont constitués de glace froide qui adhère au substratum ; ils ne répondent donc pas aux mêmes processus d'écoulement que les glaciers tempérés évoqués dans la section 2.2.1. En effet, pour les glaciers suspendus, la glace va s'accumuler jusqu'à ce que le glacier ait atteint un seuil géométrique au-delà duquel le front peut libérer une partie de sa masse, occasionnant des chutes de glace. Cependant, avec le réchauffement du climat, les glaciers suspendus se réchauffent et la glace se rapprochant d'un état tempéré (à 0°C), les forces de friction à l'intérieur et à la base du glacier, c'est-à-dire là où la glace adhère au substratum rocheux, peuvent ne plus être suffisantes pour maintenir le glacier en place, ce qui favorise la déstabilisation d'une part plus ou moins importante du glacier. Ainsi, les glaciers du col du Plan et du Midi (face nord de l'aiguille du Midi, massif du Mont Blanc) présentent de fréquentes ruptures sur la période 1945-1955 et au cours de l'été 2003 qui correspondent à des périodes particulièrement chaudes (Deline *et al.*, 2012 ; Guillet, 2016). Ce type de rupture peut conduire à des avalanches de glace d'ampleur importante comme les effondrements du glacier des Jorasses (massif du Mont Blanc, Italie) en 1998 et 2004 ou un volume de 150 000 m³ a été mobilisé (Fig. 2.9) (Failletaz *et al.*, 2015; Deline *et al.*, 2012). De plus, l'infiltration d'eau de fonte jusqu'à la base du glacier, à l'interface roche/glace, favorise le réchauffement de la glace basale et l'effondrement plus ou moins généralisé du glacier (Failletaz *et al.*, 2015).

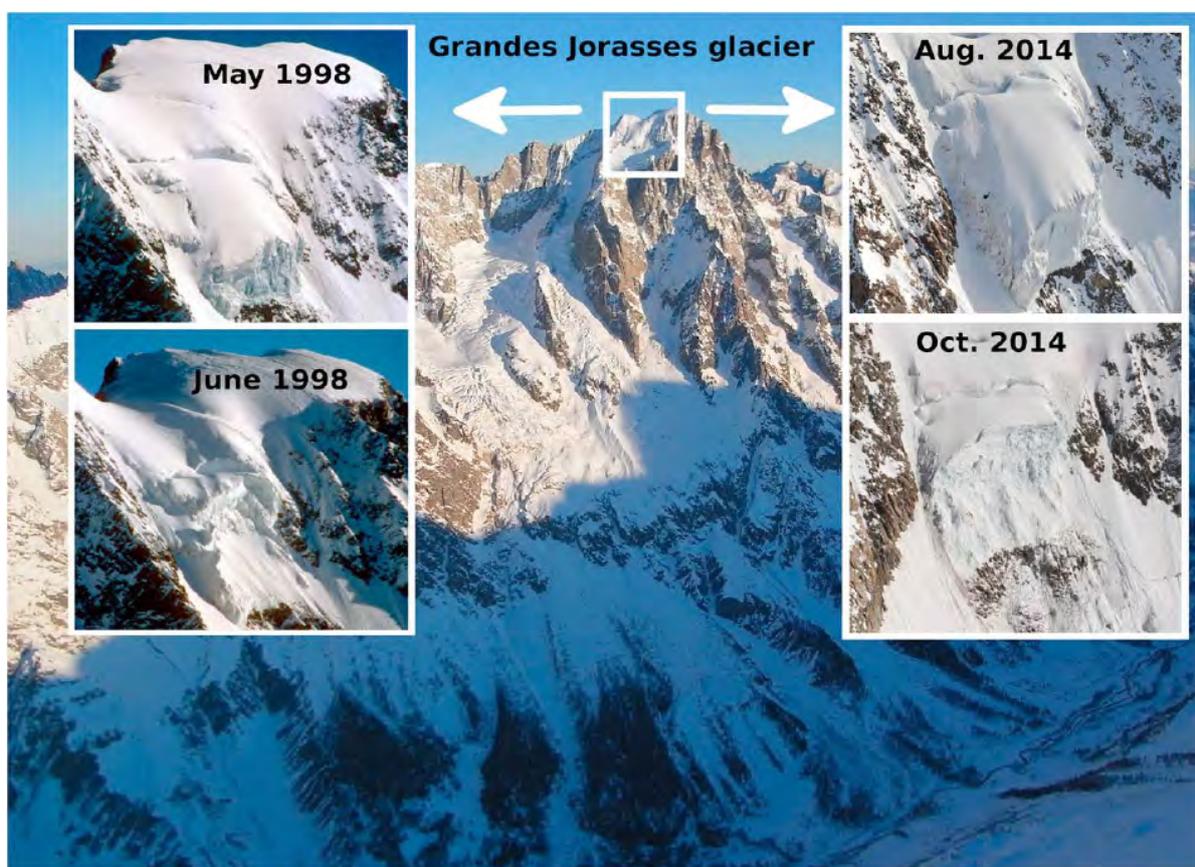


Figure 2.9. Face sud des Grandes Jorasses. Effondrement du front du glacier suspendu en 1998 et 2014 (Failletaz *et al.*, 2015).

2.2.2. Le permafrost alpin : définition et évolution actuelle

Une des principales conséquences des longues périodes climatiques froides est la formation d'une couche à la surface de la lithosphère qui ne dégèle pas intégralement pendant les périodes chaudes. Cette couche appelée « permafrost » caractérise 17 à 19 % des terres émergées (Gruber, 2012). On distingue le permafrost arctique, qui représente 76 % des secteurs à permafrost (Brown *et al.*, 1997) et le permafrost de montagne. Ce dernier, dont 70 % de la surface est située sur le plateau tibétain (Bockheim et Munroe, 2014) est présent dans tous les principaux massifs de haute montagne du monde, dont les Alpes européennes. Cependant, le changement climatique entraîne son réchauffement à l'échelle du globe (Fig. 2.10).

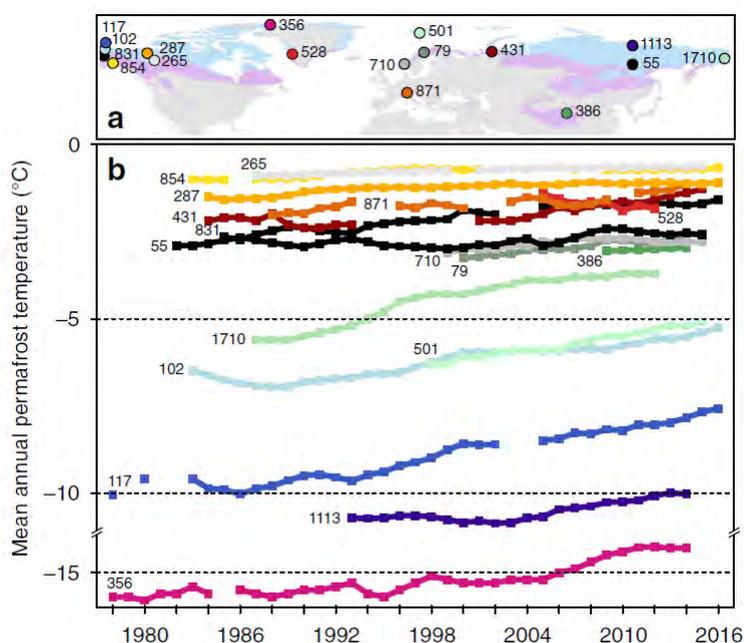


Figure 2.10. Mesure de la température du permafrost dans différents sites à travers le monde depuis les années 1970 (Biskaborn *et al.*, 2019). A. Localisation des forages de mesures. Les zones en bleu représentent les secteurs de permafrost continu (> 90 %). Les zones en violet représentent les secteurs de permafrost discontinu (< 90 %). B. Evolution des températures du sol moyennes annuelles. La couleur des courbes indique leur position dans A.

Dans cette section, nous présenterons les spécificités du permafrost alpin dont l'étude a débuté dans les années 1970, notamment dans les Alpes suisses, en insistant sur sa dégradation récente face au changement climatique. Il s'agit d'un mécanisme important pour comprendre la déstabilisation des parois rocheuses de haute altitude (Gruber et Haeberli, 2007).

2.2.2.1. Définition du permafrost et principales caractéristiques

Le permafrost se définit comme tout matériel lithosphérique dont la température reste inférieure ou égale à 0°C pendant au moins deux années consécutives (NRCC, 1988) pour des raisons climatiques (Brown et Pévé, 1973). Il se met en place lors de périodes froides relativement longues au cours desquelles la profondeur de la pénétration du gel hivernal excède la profondeur de pénétration du dégel estival. Le permafrost va alors s'épaissir jusqu'à un niveau de base où le flux géothermique s'équilibre avec le front de gel (Fig. 2.11). Dans les Alpes, la profondeur du permafrost reste inconnue mais est certainement très variable en fonction des conditions topographiques locales et du type de terrain. Dans les régions polaires, sa profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres (Brown, 1960).

Chaque année, à l'interface entre l'atmosphère et la lithosphère, un horizon de subsurface dégèle pendant la période estivale : c'est la « couche active » (Fig. 2.11). Sa profondeur varie notamment en fonction de l'intensité et de la durée du dégel et de l'enneigement (Apaloo *et al.*, 2012 ; Scherler *et al.*, 2013). Dans les Alpes, elle varie le plus souvent entre 0,5 et 8 m. La limite entre la couche active et la couche gelée en permanence est appelée « toit du permafrost » (Fig. 2.11). L'amplitude annuelle des températures du permafrost est indiquée par l'espace situé entre la courbe bleue (températures minimales) et la courbe rouge (températures maximales) de la figure 2.11. Cette amplitude diminue avec la profondeur jusqu'à un point au-delà duquel les modifications saisonnières ne sont plus perceptibles (< 0,1°C) : c'est la profondeur d'amplitude nulle. Le permafrost peut aussi être caractérisé par sa température et la présence/absence d'eau. Ainsi, il est considéré comme « froid » lorsque sa température est inférieure à -2°C, sinon il est dit « tempéré » (Delaloye, 2005).

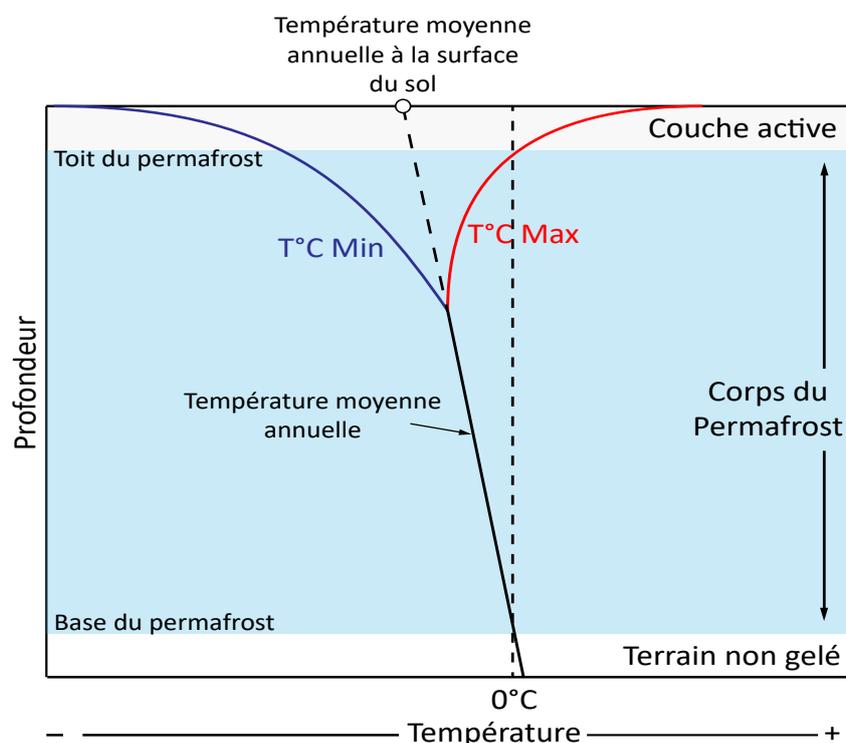


Figure 2.11. Profil thermique des terrains à permafrost.

2.2.2.2. Distribution spatiale du permafrost dans les Alpes

En fonction de leur taux de couverture spatiale, trois types de permafrost sont distingués (Haeberli, 1985 ; Tab. 2.1) : continu (lorsqu'il occupe plus de 80 % d'une surface donnée), discontinu (entre 30 et 80 %) et sporadique (inférieur à 30 %). Dans les Alpes, le permafrost est généralement continu au-dessus de 3300 m en face nord (altitude moyenne de l'isotherme $-8,5^{\circ}\text{C}$) et 3600 m dans les faces sud (Magnin *et al.*, 2015). La limite du permafrost discontinu se situe entre 2300 et 2700 m en fonction de l'orientation (Magnin *et al.*, 2015), ce qui correspond à une température moyenne annuelle de l'air comprise entre -1 et -2°C . Ces valeurs sont supérieures de 1°C dans les Alpes du Sud (Marcer, 2018).

Permafrost	Continu	Discontinu	Sporadique
Taux de couverture	> 80 %	30 à 80 %	< 30 %
Altitude inférieure	3300 – 3600 m	2300 – 2700 m	> 2300 m
Température moyenne annuelle de l'air	> $-8,5^{\circ}\text{C}$	$-8,5^{\circ}\text{C} < T^{\circ}\text{C} < -1^{\circ}\text{C}$	Valeurs positives possibles

Tableau 2.1. Distribution du permafrost alpin en fonction de l'altitude et de la température moyenne annuelle de l'air (Haeberli, 1985 ; modifié).

Afin d'estimer avec plus de précision la distribution spatiale du permafrost, plusieurs modèles ont été développés (Etzelmüller *et al.*, 2001 ; Lambiel et Reynard, 2001 ; Hoelzle *et al.*, 2005). Récemment, Marcer *et al.* (2018) ont proposé une carte de la distribution du permafrost à l'échelle des Alpes françaises. Les auteurs estiment alors que le permafrost couvre 770 km^2 (Fig. 2.12). À plus grande échelle, Magnin *et al.* (2015) proposent une modélisation statistique spécifiquement adaptée aux parois (pentes supérieures à 40°) du massif du Mont Blanc. D'après cette modélisation, le permafrost occuperait 45 à 79 % de la surface des parois.

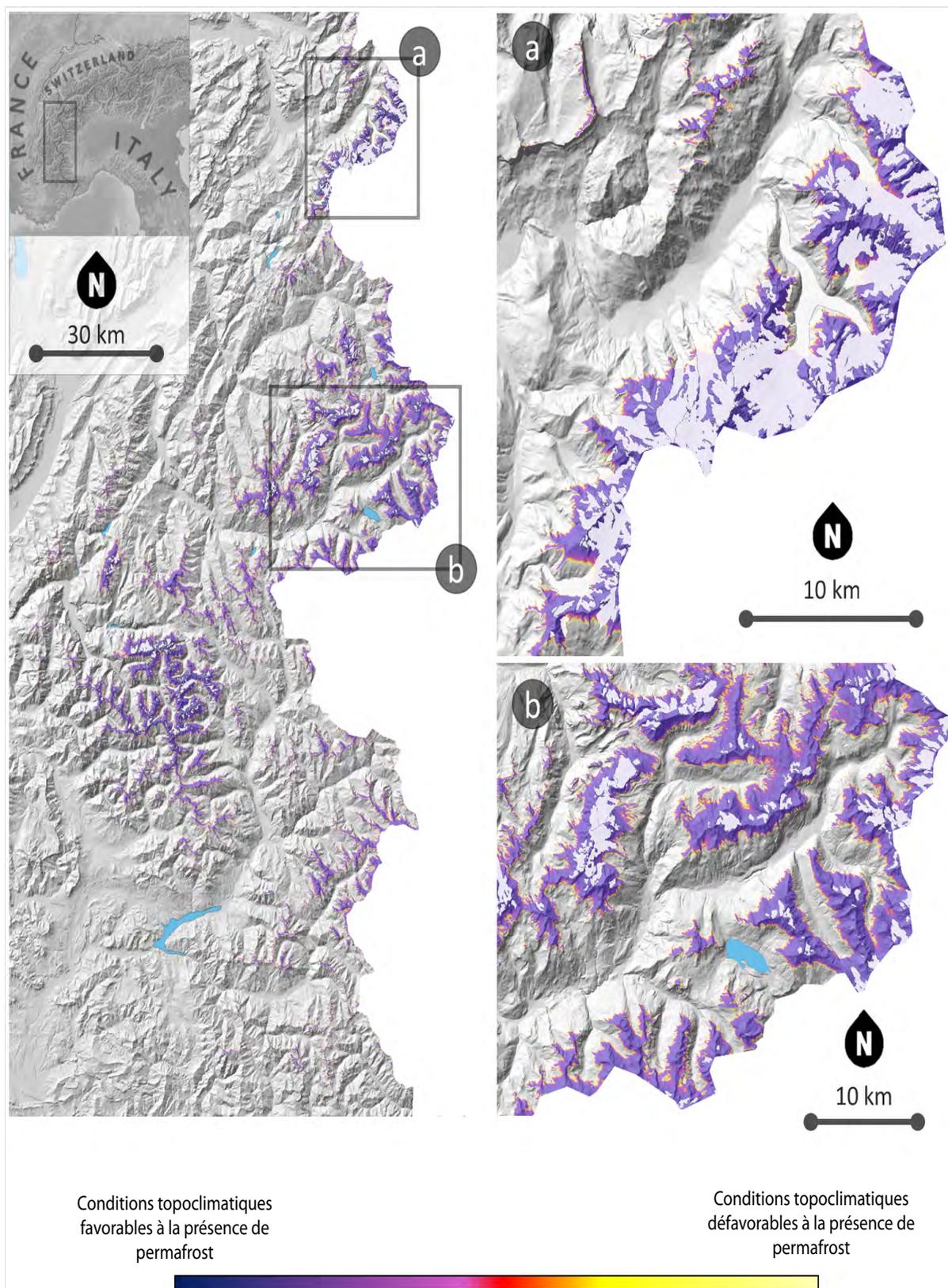


Figure 2.12. Carte de l'Index de Favorabilité du Permafrost (PFI) dans les Alpes françaises (Marcer, 2018). A : massif du Mont Blanc ; B : massif de la Vanoise.

2.2.2.3. Dégradation du permafrost alpin en parois (pente > 40°) dans le contexte actuel de réchauffement climatique

Bien que le permafrost dans les Alpes concerne des étendues relativement importantes, dans les deux sections suivantes nous nous concentrerons sur le permafrost de parois, sa dégradation et les processus géomorphologiques liés étant les principaux qui puissent avoir une incidence sur l'alpinisme.

Le permafrost est soumis à deux principaux flux thermiques : (i) le flux géothermique, relativement faible mais constant dans le temps et dans l'espace et (ii) le flux composé des différentes radiations solaires et des flux de chaleur sensible et latente . Le réchauffement des températures moyennes annuelles qui caractérise la période actuelle entraîne l'intensification des échanges thermiques issus de ce dernier flux et engendre une dégradation (réchauffement) du permafrost (Harris *et al.*, 2003) selon trois modalités principales (Marchenko *et al.*, 2007) successives ou concomitantes (Bodin, 2007), avec un temps de réponse dépendant principalement de la conductivité thermique du terrain, de son contenu en glace et de son épaisseur : i) réchauffement de la subsurface et approfondissement de la couche active, ii) réchauffement du corps du permafrost et iii) réchauffement de la base du permafrost et, par suite, remontée en altitude de sa limite inférieure.

La modélisation de l'état thermique du permafrost au niveau de trois sommets du massif du Mont Blanc entre la fin du PAG et la fin du XXI^e siècle (Magnin *et al.*, 2017, Fig. 2.13) a montré que la dégradation du permafrost se traduit par un épaissement progressif de la couche active en parallèle du réchauffement du corps du permafrost. Il en résulte que sur les deux dernières décennies, le permafrost continu a disparu des faces sud au moins jusqu'à 3300 m d'altitude alors que le permafrost tempéré (*i.e.* > -2°C) est remonté jusqu'à 3300 m en face nord et 3600 m en face sud. Au cours du XXI^e siècle, il est probable que le permafrost tempéré continu de remonter jusqu'à près de 3900 m en face nord et 4300 m en face sud (Magnin *et al.*, 2017 ; Fig. 2.13).

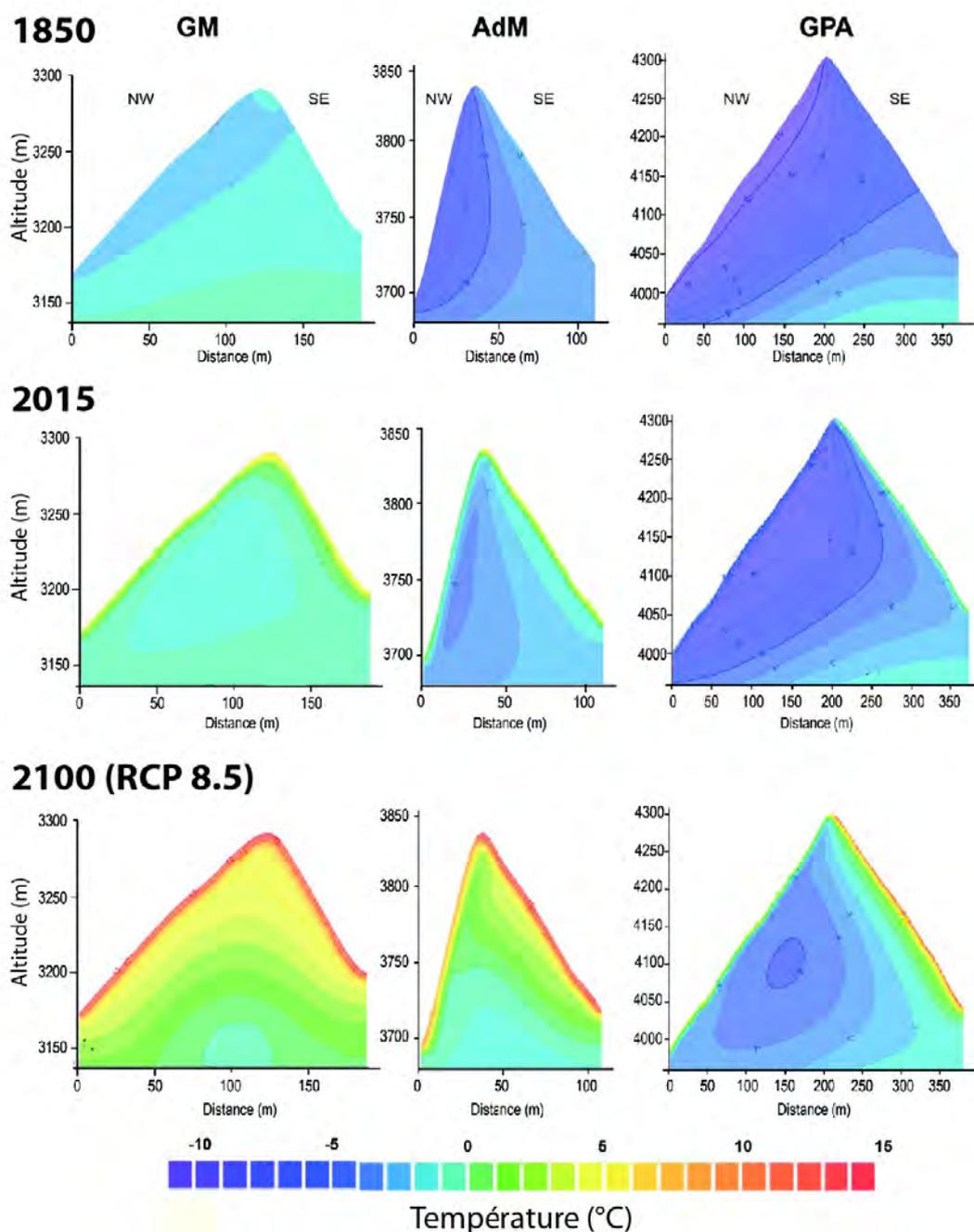


Figure 2.13. Modélisation de l'état thermique du permafrost dans le massif du Mont Blanc à la fin du PAG, aujourd'hui, et à la fin du XXI^e siècle selon le scénario climatique RCP 8.5 (Magnin et al., 2017) pour le sommet des Grands Montets (GM, 3296 m), de l'aiguille du Midi (AdM, 3842 m) et du Grands Pilier d'Angle (GPM, 4243 m).

2.2.2.4. Processus géomorphologiques associés à la dégradation du permafrost en parois

La dégradation du permafrost peut fortement compromettre les propriétés géotechniques des terrains et induire différents processus gravitaires en fonction de la pente et de la nature du terrain (Tab. 2.2). En effet, la résistance de la glace située dans les anfractuosités du terrain étant principalement dépendante de sa température (Davies *et al.*, 2001), le réchauffement du permafrost est très vraisemblablement responsable du déclenchement d'instabilités de versant pouvant mobiliser des volumes jusqu'à plusieurs millions de m³ (Harris *et al.*, 2001a, 2001b ; Krautblatter *et al.*, 2013). L'infiltration d'eau joue aussi un rôle important dans ce processus de dégradation par transfert de chaleur par convection en profondeur dans les parois (Gruber, 2007).

Pente (°)	Substratum rocheux			Formations superficielles	
	Roches non compétentes (schistes, argiles)	Roches compétentes fracturées	Roches compétentes massives	Sédiments fins (silts, argiles, certains tills)	Sédiments grossiers (éboulis, graviers, sables)
> 75	Eroulement	Eroulement	Eroulement occasionnel	-	-
30 - 74	Coulée de débris, glissement de terrain	Eroulement, coulée de débris	-	Coulée de débris	Coulée de débris
15 - 29	Glissement de terrain, subsidence	Glissement rocheux	-	Glissement de terrain, coulée boueuse	Fluage accéléré (glaciers rocheux)
< 15	Affaissement	-	-	Subsidence, solifluxion, coulée boueuse	Fluage accéléré
0	Affaissement	-	-	Affaissement	-

Tableau 2.2. Processus géomorphologiques liés à la dégradation du permafrost (Harris *et al.*, 2001a, modifié).

En haute montagne, le lien entre l'augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces processus géomorphologiques en lien avec des périodes chaudes a été mis en évidence sur différentes échelles de temps (Ravanel et Deline, 2010 ; Huggel *et al.*, 2010 ; Huggel *et al.*, 2012 ; Ravanel *et al.*, 2017 ; Gallach *et al.*, 2018 ;). Par exemple, le nombre d'éroulements dans les parois en contexte de permafrost dans le massif du Mont Blanc a été très élevé lors des étés caniculaires de 2003 et de 2015, certainement

en raison de l'épaississement accru de la couche active (Ravel et al., 2017). À plus petite échelle, la face ouest des Drus (3754 m) a été le théâtre de 8 écroulements entre 1905 et 2005 ; la fréquence et les volumes de ceux-ci ont augmenté au cours de cette période, notamment à partir des années 1990 (Fig. 2.14). En 2005, c'est l'ensemble du pilier Bonatti qui s'est effondré sur une hauteur de 700 m pour un volume de 292 683 m³ ($\pm 5,6\%$) (Ravel et Deline, 2008 ; Guerin et al., 2017 ; Fig. 2.14). Sur l'ensemble du massif du Mont Blanc, plus de 850 écroulements se sont produits entre 2007 et 2018 (cf. : Ravel et Deline, 2015).

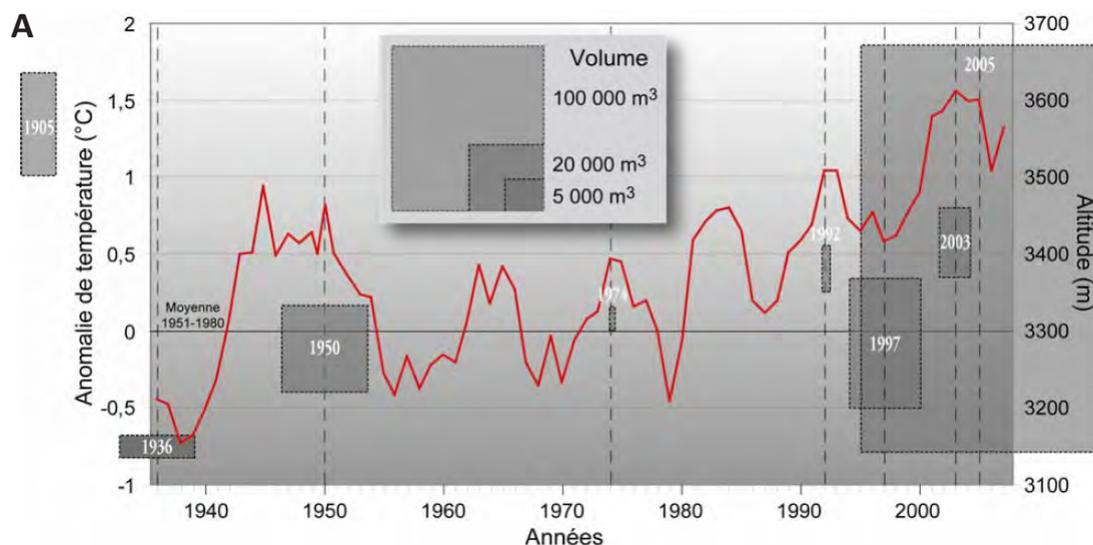


Figure 2.14. A. Évolution sur près d'un siècle du volume et de l'altitude des écroulements rocheux relevés dans la face ouest des Drus et de la température moyenne estivale à Chamonix (données Météo France). Les quadrilatères représentent les différents écroulements (Ravel et Deline, 2008). B. Ecoulement dans la face ouest des Drus le 8/08/2003 (J.F. Hagenmuller).

Conclusion du Chapitre 2

Le changement climatique, deux fois plus rapide que la moyenne mondiale dans les régions de hautes latitudes et de hautes altitudes comme les Alpes, est en nette accélération depuis les années 1990. Il en résulte une évolution très marquée des milieux de haute montagne. Principalement illustrée par le retrait des glaciers et des couvertures glacio-nivales ainsi que par la dégradation du permafrost. Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à montrer que cette évolution entraînait de nombreux processus géomorphologiques, potentiellement dangereux pour les alpinistes, dont la fréquence et l'intensité sont en augmentation. Ce constat nous conduit à questionner dans le chapitre suivant les possibles impacts de cette évolution géomorphologique et glaciologique des milieux de haute montagne sur le tourisme de nature dans les Alpes et plus spécifiquement la pratique de l'alpinisme.

Chapitre 3. Tourisme de nature et alpinisme face au changement climatique

Dans les Alpes, le tourisme de nature représente la majorité de l'activité touristique, notamment à travers l'industrie du ski. Cependant, le changement climatique modifie les milieux naturels des Alpes et leurs paysages et met ainsi ce tourisme en question. Ce chapitre présente dans une première section un état de l'art des impacts du changement climatique sur le tourisme de nature dans les Alpes en dissociant la période hivernale de la période estivale. Dans une deuxième section nous dresserons l'état actuel des connaissances spécifiques à la pratique de l'alpinisme estival et ses liens avec le changement climatique. Nous identifierons les limites et les principales lacunes de ces connaissances à partir d'une analyse de la littérature scientifique. Cela nous mènera dans une troisième section à présenter les trois principaux axes de recherche de notre étude, les principales méthodes utilisées et les différentes échelles spatiales et temporelles considérées.

3.1. Le tourisme de nature dans les Alpes face au changement climatique

Les impacts du changement climatique sont abordés et présentés – notamment par les médias – avec une vision souvent négative. Il est vrai que pour de nombreuses activités fondées sur des ressources environnementales, le changement climatique induit un lot de difficultés parfois très importantes, telle que la réduction de la période d'enneigement (*cf.* : Chapitre 2.). Nous montrerons cependant ci-dessous que pour les activités touristiques de montagne dans les Alpes, le constat s'inverse entre la période hivernale, principalement tournée vers la pratique du ski et la période estivale, qui voit une diversification des activités touristiques de nature.

3.1.1. L'industrie du ski face à une réduction de l'enneigement

De nombreuses études se sont intéressées aux impacts du changement climatique sur le tourisme de nature hivernal et notamment sur la vulnérabilité particulièrement importante de l'industrie du ski face à une diminution de l'enneigement (Arent *et al.*, 2015 ; Spandre *et al.*, 2019). Pas moins d'une trentaine d'études dans douze pays différents ont traité de ce sujet (Scott *et al.*, 2012). Par exemple, d'après Koenig et Abegg (2010), l'enneigement actuel est suffisant pour 85 % des stations de ski suisses. Ce chiffre est susceptible de tomber à 63 % si le réchauffement climatique atteint 2°C. En raison de cette vulnérabilité, l'industrie du ski s'est largement préparée et adaptée, notamment à travers le développement de la production de neige de culture (Steiger *et al.*, 2017) et du stockage de neige (Grünewald *et al.*, 2018). L'applicabilité de ces stratégies sur le long terme fait cependant face à des limites économiques (investissements), climatiques, à la disponibilité en eau et en énergie pour produire la neige (Dawson et Scott, 2013 ; Hopkins et Maclean, 2014), et à des oppositions socio-culturelles (Scott et Mc Boyle, 2007).

Au niveau individuel, les skieurs adaptent leurs comportements, notamment en fonction de leur niveau d'engagement dans la pratique. Les principales modalités d'adaptation identifiées sont le changement de saison et de lieu de pratique afin de maintenir l'activité (König, 1998 ; Behringer *et al.*, 2000 ; Pickering *et al.*, 2010 ; Dawson *et al.*, 2013 ; Ruddy *et al.*, 2015). Le pourcentage de skieurs prêts à arrêter de skier face à la diminution de l'enneigement reste très faible dans la majorité des cas. D'ailleurs, dans les Alpes, la pratique du ski de randonnée est en plein essor depuis les années 2000. En raison des difficultés méthodologiques liées à l'étude d'une pratique de loisirs caractérisée par une quasi absence de contraintes spatiales (Beeco et Brown, 2013 ; Bielanski *et al.*, 2018), aucune étude ne propose aujourd'hui de chiffres quant à cette expansion. Toutefois, de nombreux observateurs (CAF, Syndicats, stations de ski, etc.) s'accordent à dire que le nombre de pratiquants est en très nette augmentation, notamment au printemps, quand les conditions nivologiques sont les plus stables et les plus propices à une pratique en sécurité. L'ampleur de ce phénomène entraîne même les stations de ski alpin à mettre en place des itinéraires de ski de randonnée balisés et sécurisés comme à Chamonix-Mont-Blanc, Saint Gervais, Val d'Isère, etc. Il est alors intéressant de noter qu'un des facteurs avancés pour expliquer cette popularisation du ski de randonnée est justement les impacts du changement climatique sur la haute montagne estivale. L'assèchement généralisé des milieux de haute montagne en été entrainerait en effet un « report d'activité des ascensions neigeuses sur le ski de randonnée » (Bourdeau, 2014).

3.1.2. Le tourisme de nature estival dans les Alpes face au changement climatique

Si le changement climatique a des impacts négatifs principalement sur le tourisme hivernal lié au ski, la majorité des études traitant du tourisme de nature estival aborde ces impacts avec une vision beaucoup plus positive.

Au Canada, de nombreuses études ont été réalisées sur les impacts du changement climatique sur le tourisme de nature estival en se basant généralement sur des données quantitatives. L'évolution de la fréquentation est modélisée à partir de facteurs considérés comme déterminants tels que le nombre de jours de beau temps ou l'augmentation des températures maximales. Ainsi, Jones et Scott (2006) ont montré que le changement climatique va permettre une augmentation de 10 à 40 % de la fréquentation des parcs nationaux canadiens d'ici à la fin du XXI^e siècle grâce à une augmentation des températures maximales. Wall *et al.* (1986) estiment quant à eux que la saison de camping dans huit parcs provinciaux de l'Ontario va s'allonger de 40 jours à l'horizon 2050. Enfin, Scott *et al.* (2012) prévoient que les effets du changement climatique impliqueront une augmentation de 6 à 10 % de la fréquentation du Waterton Lakes National Park (Alberta, Canada) dans les années 2020 et de 10 à 36 % dans les années 2050.

Le nombre d'études traitant de cette question dans les Alpes est beaucoup plus réduit. Bien qu'elles l'abordent généralement avec une même approche positive, les résultats sont plus nuancés. L'étude menée par Probstl-Haider *et al.* (2015) en Autriche remet par exemple en perspective les résultats de nombreuses études identifiant les impacts positifs du changement climatique dans les Alpes.

Dans un premier temps, elle rappelle les deux principales raisons à l'origine de cette vision positive : (i) l'augmentation du nombre de jours de beau temps, qui devrait rendre les Alpes plus attractives pour de nombreuses activités de plein air, et (ii) le réchauffement des températures estivales qui est supposé rester dans un intervalle acceptable, notamment en moyenne montagne (l'intervalle de température n'est cependant pas précisé). Il en résulterait notamment une croissance du tourisme lacustre et de la randonnée de moyenne montagne et l'arrivée d'une nouvelle clientèle, habituée aux côtes méditerranéennes (Probstl-Haider *et al.*, 2015, Fig. 3.1).

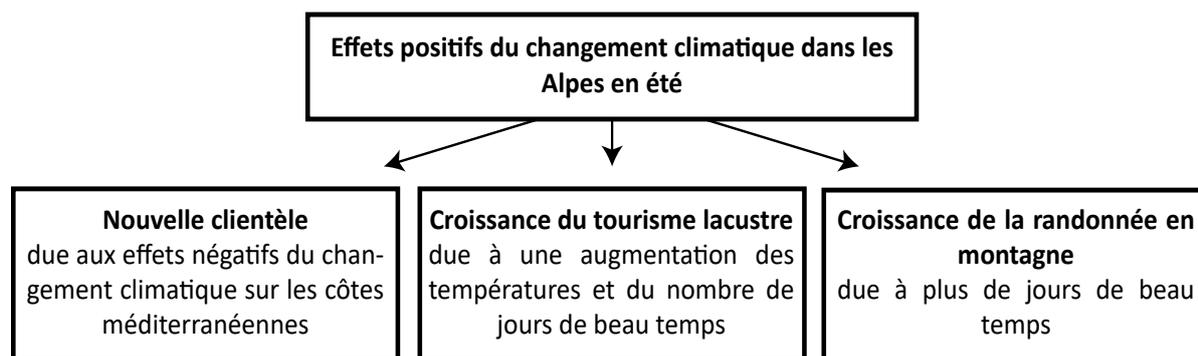


Figure 3.1. Effets positifs possibles du changement climatique sur le tourisme d'été dans les Alpes autrichienne (traduit de Probstl-Haider *et al.*, 2015).

Cependant, cette étude apporte aussi un certain nombre de précisions qui remettent en question l'importance des effets positifs du changement climatique sur le tourisme de nature estival dans les Alpes. D'un point de vue méthodologique, elle remet en question l'utilisation d'un seul facteur comme le nombre de jours de beau temps ou les températures moyennes journalières pour évaluer les impacts du changement climatique sur le tourisme. Elle précise que, si l'augmentation du nombre de jours de beau temps devrait effectivement avoir un impact positif, ce phénomène ne sera significatif que lorsque cette augmentation aura atteint 15 jours par saison estivale, ce qui ne devrait pas se produire avant un siècle dans les Alpes orientales (Formayer, 2011). L'étude réfute par ailleurs l'arrivée d'une nouvelle clientèle présente jusqu'alors sur la côte méditerranéenne, les conditions de séjours (hébergements, prix, activités pratiquées, paysages) touristiques dans les Alpes étant complètement différentes. Enfin, elle précise que d'autres impacts du changement climatique tels que l'augmentation du nombre d'orages et de laves torrentielles, dont les médias se font largement l'écho, sont des facteurs ayant une influence négative sur le choix des destinations (Probstl *et al.*, 2011).

En général, la littérature scientifique francophone ne traite pas la question des impacts du changement climatique sur le tourisme estival dans les Alpes avec la même approche quantitative et prospective, qu'au Canada ou aux États-Unis notamment. Les impacts du changement climatique sont souvent analysés à travers l'évolution d'un système touristique et par des approches socio-économiques et géo-historiques. D'après Bourdeau (2009), le tourisme estival en France était principalement tourné vers la mer dans les années 1960, alors que la montagne s'affirmait comme une destination hivernale, structurée sur l'industrie du ski, à l'inverse de la fin du XVIII^e et du XIX^e siècle (Fig. 3.2). Cependant,

ce modèle touristique s'épuise progressivement (Knafou, 1991) face à une série de facteurs de crises comme la concurrence grandissante d'autres destinations, le développement de nouvelles pratiques récréatives (Perrin-Malterre, 2016), le vieillissement de la population touristique, des exigences environnementales accrues et les impacts du changement climatique sur l'enneigement (cf. : Chapitre 2). Ce modèle touristique fait face aujourd'hui à une profonde recomposition, dont le changement climatique est un facteur. Bourdeau (2009) propose alors le scénario d'un « retour aux sources » du tourisme dans les Alpes. Ce dernier reviendrait en partie à sa structuration spatiale du XIX^e s. avec des flux estivaux tournés vers la montagne, perçue comme zone naturellement plus fraîche, et des flux hivernaux tournés vers les littoraux qui offrent une grande diversité d'activités balnéaires (Fig. 3.2 ; Bourdeau, 2009). Dans ce scénario le changement climatique est considéré comme un facteur qui contribue positivement au tourisme de nature estival dans les Alpes.

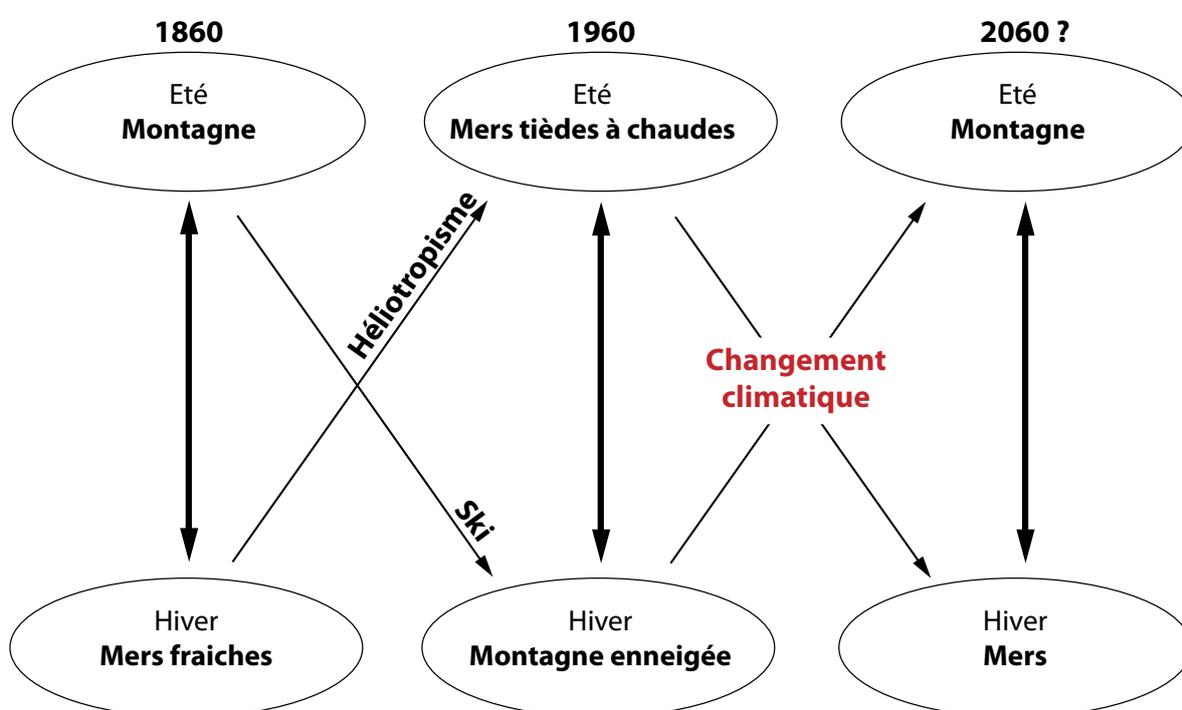


Figure 3.2. Vers un nouveau retournement des polarités touristiques saisonnières (traduit de Bourdeau, 2009 ; modifié).

En revanche, d'après un nombre grandissant d'études, la pratique particulière de l'alpinisme estival ne semble pas profiter de ces effets positifs dans la mesure où l'évolution particulièrement rapide et intense des milieux de haute montagne implique une dangerosité croissante et un raccourcissement de la saison propice à l'alpinisme estival.

3.2. L'alpinisme dans le contexte actuel de changement climatique : état des connaissances et axes de recherches

3.2.1. Les impacts du changement climatique sur l'alpinisme : état actuel des connaissances

Bien que leur nombre reste encore assez limité, de plus en plus de recherches s'intéressent aux impacts du changement climatique sur l'alpinisme. Huit articles et rapports de recherche, représentant la majorité des études menées en particulier dans les Alpes, seront mobilisés pour établir l'état des connaissances (Tab. 3.1). Plusieurs mémoires de master ont par ailleurs été réalisés dans les universités de Grenoble (France), de Savoie Mont Blanc (France), d'Aix-Marseille (France) et de Lausanne (Suisse) mais ils ne seront pas directement considérés ici, la majorité des résultats présentés étant mentionnés dans les articles intégrés à ce manuscrit. Des études ont également été menées en Himalaya (*e.g.* Nyaupane et Chhetri, 2009), mais l'organisation de la pratique et les milieux physiques sont assez différents des Alpes notamment du fait d'altitudes beaucoup plus élevées. Aussi, celles-ci n'ont pas été intégrées ici.

Référence	Site d'étude	Titre de la publication
Behm <i>et al.</i> (2006)	Parc National des Hohe Tauern (Autriche)	Conséquences du réchauffement climatique et de la transformation des glaciers sur l'alpinisme (traduit de l'Allemand)
Probstl et Damm (2008)	Alpes de Zillertal (Autriche)	Perceptions et évaluations des risques naturels résultant de la fonte des glaciers et de la dégradation du permafrost dans les destinations touristiques. Exemple de la vallée de Tuxer (Alpes de Zillertal, Autriche).
Ritter <i>et al.</i> (2011)	Alpes autrichiennes	Impacts of global warming on mountaineering: a classification of phenomena affecting the alpine trail network
Bourdeau (2014)	Parc national des Écrins	Effets du changement climatique sur l'alpinisme et nouvelles interactions avec la gestion des espaces protégés en haute montagne. Le cas du parc national des Ecrins
Temme (2015)	Alpes bernoises (Suisse)	Using climber's guidebooks to assess changes in high mountain rock fall over large spatial and centennial temporal scales
Purdie <i>et al.</i> (2015)	Fox glacier (Nouvelle-Zélande)	Glacier recession and the changing rockfall hazard: implications for glacier tourism
Probstl-Haider <i>et al.</i> (2016)	Alpes autrichiennes	Risk perception and preferences of mountain tourists in light of glacial retreat and permafrost degradation in the Austrian Alps
Purdie et Kerr (2018)	Southern Alps (Nouvelle-Zélande)	Aoraki Mont Cook: environmental change on an iconic mountaineering route

Tableau 3.1. Liste des études utilisées pour la production de l'état actuel des connaissances.

Les premières études réalisées datent du milieu des années 2000 et ont été principalement menées dans les Alpes orientales. Les études traitant des Alpes occidentales sont moins nombreuses et souvent plus récentes (années 2010).

3.2.1.1. Impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme, entre accroissement de la difficulté technique et augmentation de la dangerosité

Le premier impact identifié du changement climatique sur l'alpinisme est l'accroissement de la difficulté technique et de la dangerosité des itinéraires, causé par des processus géomorphologiques plus nombreux, plus intenses et plus fréquents. Ainsi, Behm *et al.* (2006) et Probstl et Damm (2008) font le constat que la dégradation du permafrost et le retrait glaciaire impliquent des processus gravitaires (*e.g.* chutes de pierres, écroulements rocheux) et nivologiques (*e.g.* ponts de neige plus fragiles au-dessus des crevasses) représentant un danger pour les alpinistes et augmentant la difficulté technique des itinéraires (Fig. 3.3).

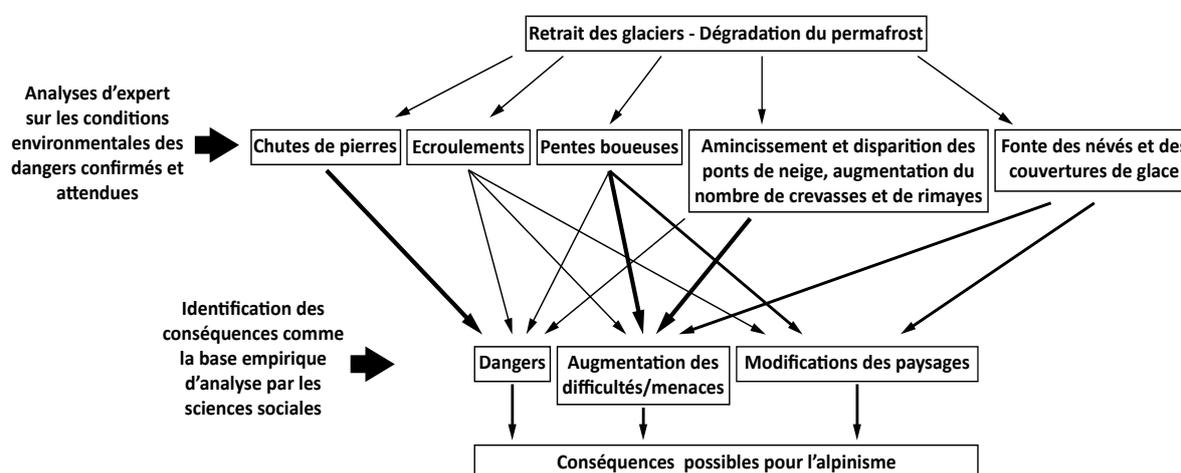


Figure 3.3. Influence du retrait glaciaire et de la dégradation du permafrost sur l'alpinisme. L'épaisseur des flèches exprime quel aléa est le plus susceptible d'affecter l'alpinisme (traduit de Probstl et Damm, 2008).

Pendant, ce constat reste très général et il ne questionne pas spécifiquement comment et avec quelle intensité sont affectés les itinéraires et leurs conditions de fréquentation. Ritter *et al.* (2011) sont les premiers à proposer une classification de 22 processus liés au changement climatique et affectant les itinéraires d'alpinisme et les sentiers de haute altitude. Il identifie pour chacun de ces processus leurs impacts sur les itinéraires, leur difficulté et leur dangerosité. Cette classification est basée sur des entretiens, la cartographie des itinéraires et de différentes variables géomorphologiques et glaciologiques telles que l'englacement et la géologie, l'analyse de topo-guide, de sites web et de forums spécialisés. Il propose d'autre part une structure théorique afin de développer des mesures de gestion et d'adaptation des itinéraires.

Plus spécifiquement, Temme (2015) met en évidence que la fréquence des chutes de pierres a augmenté à partir des années 2000 dans les Alpes bernoises, et plus particulièrement en exposition

est et ouest. Il fonde son analyse sur la comparaison de topoguides d'alpinisme et des descriptions que ceux-ci proposent des itinéraires. Cette source de données est particulièrement intéressante pour l'étude des impacts du changement climatique sur la pratique de l'alpinisme. Elle permet en effet une analyse adaptée et précise des processus géomorphologiques qui affectent les alpinistes, sans se limiter à des constats généraux.

Dans les Alpes occidentales, Bourdeau (2014) étudie dans le Parc National des Écrins (France) la prise de conscience à partir de la fin des années 1990 des effets du changement climatique par les pratiquants de l'alpinisme. Contrairement aux autres études réalisées jusqu'alors, l'auteur utilise principalement une approche qualitative à travers une série de 17 entretiens semi-directifs menés avec des guides de haute montagne, des gardiens de refuges et des agents du parc. Dans un premier temps, cette étude confirme le constat selon lequel l'évolution des milieux de haute montagne et les processus géomorphologiques associés rendent les itinéraires d'alpinisme plus difficiles techniquement et plus dangereux. Bien qu'il ne dresse pas une liste des processus en jeu, il identifie le retrait glaciaire, la fonte des névés et l'apparition concomitante de rochers plus ou moins compacts comme les principaux phénomènes qui affectent les itinéraires. De plus, ces processus impliquent dans certains cas une perte de la logique et de l'esthétique des itinéraires, notamment si un passage récemment désenglacé devient plus difficile techniquement que le reste de la voie. Il en résulte l'abandon de certaines voies par perte d'intérêt sportif et/ou esthétique. De plus, pour la première fois, un décalage vers le printemps de 3 à 4 semaines de la saison de pratique de l'alpinisme estival est identifié par rapport aux années 1960-70. Il en résulte une adaptation de la part des guides, des gardiens de refuges et des alpinistes amateurs afin de profiter des périodes de bonnes conditions de début de saison.

La pratique de l'alpinisme semble faire face à des problématiques similaires dans les Alpes néozélandaises. Purdie *et al.* (2015) mettent ainsi en évidence une augmentation du risque au niveau de la surface des glaciers en zone d'ablation. En effet, la croissance de la couverture détritique du glacier Fox entraîne une augmentation du risque de voir des blocs glisser à la surface du glacier. Purdie et Kerr (2018) ont aussi montré que la voie normale d'ascension du Mont Cook (3724 m) évolue principalement dans sa partie basse en raison notamment de la perte d'épaisseur du glacier Tasman. Sa partie haute est surtout affectée par la variabilité interannuelle des conditions de neige et la fonte du glacier suspendu Linda qui devient consécutivement de plus en plus raide (Fig. 3.4). Ainsi, la période de bonnes conditions pour en faire l'ascension, qui s'étalait de novembre à mars dans les années 1980, est réduite de moitié certaines années, en particulier depuis 2012. L'approche utilisée dans ce travail, qui consiste à retracer l'évolution d'un itinéraire afin d'identifier les processus géomorphologiques liés au changement climatique qui l'affecte, nous semble particulièrement pertinente pour l'étude des conditions de pratique de l'alpinisme. Cette approche ne se limite pas à un constat général quant à l'évolution des milieux de haute montagne face au changement climatique mais l'analyse et l'étudie à l'échelle d'un itinéraire majeur d'alpinisme et en fonction de sa possibilité d'être fréquenté. Une approche similaire sera adoptée dans ce travail doctoral.

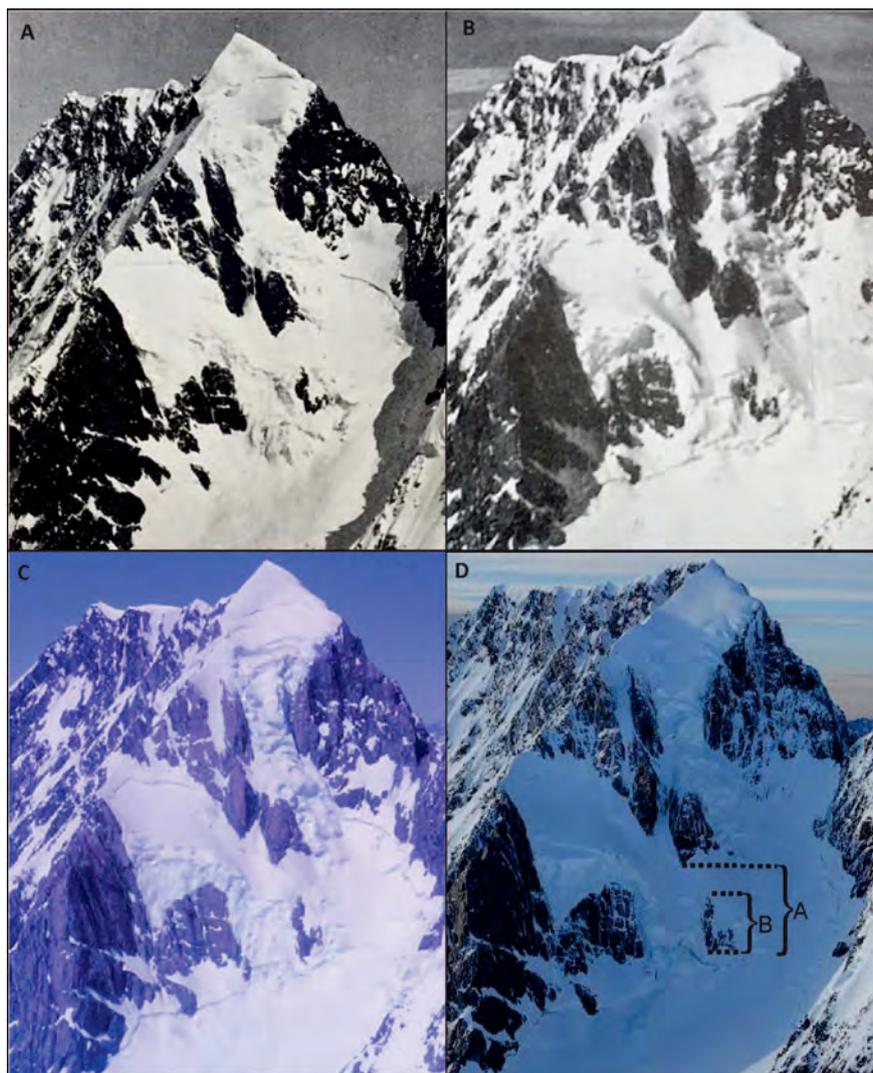


Figure 3.4. Partie haute du glacier Linda vue depuis le Mont Tasman par (A) F. Du Faur en mars 1912 (Ross 1930a), (B) H.K. Douglas en décembre 1935 (Bryant, 1938), (C) B. Keir en décembre 1961 et (D) R. Measures en novembre 2015. L'index de fonte du glacier Linda a été calculé en comparant les distance A et B (Purdie et Kerr, 2018).

3.2.1.2. Perception et adaptation des alpinistes aux effets du changement climatique

L'étude menée par Behm *et al.* (2006) est relativement complète et novatrice. À travers une enquête par questionnaire, il étudie la perception des professionnels de la montagne et les stratégies d'adaptation qu'ils développent dans le Parc National des Hohe Tauern en Autriche. Le questionnaire a été envoyé à des gardiens de refuges, des guides de haute montagne, des organisateurs de randonnées et des moniteurs de ski. Les résultats montrent que 61 % des répondants considèrent qu'il y a eu des modifications importantes des itinéraires et 59 % estiment que le degré de difficulté des sports de montagne a augmenté à la suite des changements liés au climat. En outre, 54 % considèrent qu'il y a une augmentation des risques en été à cause du changement climatique. Les courses de rochers sont identifiées comme étant moins affectées que les courses de neige et de glace. Par suite, 93 % des professionnels adaptent leur manière de pratiquer leur métier. Les principales modalités

d'adaptation identifiées sont l'abandon de certains itinéraires (75 % des répondants), la modification de l'offre (56 %) et une mobilité accrue vers d'autres massifs (pourcentage de répondants non connu). Au moment où elle a été réalisée, cette étude publiée en 2006 a conclu que les conséquences du changement climatique n'étaient alors pas considérées comme graves par les professionnels de la montagne interrogés.

L'étude menée par Probstl-Haider *et al.* (2016) analyse la manière dont les alpinistes et plus largement les touristes en montagne perçoivent et adaptent leur comportement face aux risques inhérents aux effets du changement climatique. Une enquête par questionnaires envoyées à plusieurs clubs alpins autrichiens et allemands a ainsi montré que les pratiquants occasionnels sont plus sensibles à l'augmentation des risques que les pratiquants expérimentés. Ces derniers toléreraient en effet un accroissement plus important du risque – notamment de chute de pierres – pour maintenir leur activité. Complémentaires à ceux du travail de Behm *et al.* (2006), ces résultats montrent que la perception des impacts du changement climatique, et notamment l'augmentation des risques font l'objet de perceptions variables et impliquent par conséquent des modalités d'adaptation différentes.

Bourdeau (2014) identifie plusieurs impacts du changement climatique sur les conditions de pratique de l'alpinisme dans le massif des Écrins :

- une désynchronisation entre la saison propice à l'alpinisme et les flux touristiques majoritaires de plus en plus concentrés sur la période du 20 juillet - 15 août ;
- un impératif de réactivité très fort, en fonction de la forte variabilité des conditions en montagne ;
- une exigence accentuée de mobilité géographique, motivée par la recherche de conditions de pratique optimales ;
- la prégnance des compétences techniques et sécuritaires liées à la maîtrise de conditions printanières (froid, avalanches, etc.) ;
- une quasi-disparition des pratiques de transition entre randonnée et alpinisme (*i.e.* randonnée alpine, randonnée glaciaire, « hautes routes », école d'escalade).

La pratique elle-même est concernée par deux évolutions principales :

- l'alpinisme, hors grandes courses classiques telles que le mont Blanc, le Grands Paradis ou le mont Rose, se recentre progressivement sur les pratiquants les plus assidus et les plus proches des massifs, ce qui accentue un effet de niche « géoculturelle » ;
- un report de l'activité sur le ski de randonnée et le ski-alpinisme en hiver et sur les courses de rochers en été.

En cela, P. Bourdeau identifie un certain nombre de comportements réactifs et adaptatifs chez les guides de haute montagne et suspecte le développement d'une « intelligence climatique » dont l'objectif principal est de limiter la prise de risque tout en essayant de maintenir une activité professionnelle :

- tendance à la diminution du nombre de clients par cordées, par précaution face à la complexification des conditions de progression et d'assurance ;
- très forte réactivité dans l'organisation et l'ajustement des plannings à l'évolution des conditions

au cours de la saison estivale, d'autant plus que la saison propice à la pratique de l'alpinisme a tendance à être en décalage avec la disponibilité des clients l'été ;

- mobilité accentuée pour aller dans des secteurs où les conditions sont bonnes.

Il note par ailleurs les difficultés suivantes ressenties par les guides :

- fatigue physique accentuée, notamment en raison de la disparition des névés qui permettaient un déplacement rapide et facile ;

- culpabilité par rapport à la qualité de l'expérience et des émotions esthétiques vécues par les clients ;

- discussion et négociations parfois plus difficiles avec les clients, notamment pour trouver des objectifs compatibles avec leurs envies et les conditions du moment ;

- report d'activité sur la saison hivernale ou diversification vers d'autres pratiques estivales (escalade, *via ferrata*, *canyoning*), qui deviennent des alternatives à l'alpinisme.

Enfin, P. Bourdeau interroge l'effet potentiel du changement climatique quant à l'augmentation du risque d'accidents. Les itinéraires étant plus difficiles techniquement et plus dangereux, on peut logiquement s'attendre à ce que le nombre et la gravité des accidents augmentent. Cependant, la complexité des variables en jeu dans le processus d'occurrence d'un accident en alpinisme rend difficile l'identification d'un tel phénomène. De plus, d'après le PGHM de Briançon (France) et à l'heure actuelle, il semblerait que l'accidentologie en alpinisme dans le massif des Écrins ne soit pas affectée par les effets du changement climatique (comm. orale P. Bourdeau, 2017).

3.2.1.3. Quelles lacunes dans la connaissance au regard de la bibliographie ?

Ces premières études permettent d'identifier les principales spécificités de la relation entre changement climatique et pratique de l'alpinisme. Cependant, elles proposent des approches et des résultats qui restent pour le moment très généraux. Les limites de ces études peuvent être abordées à travers deux questionnements principaux présentés dans cette section et qui nous pousseront ensuite à introduire les axes de recherches qui structurent le travail doctoral.

A. Quels sont les processus géomorphologiques et glaciologiques qui affectent les itinéraires d'alpinisme ? Quelles sont les voies les plus affectées ?

L'identification des processus qui affectent les itinéraires d'alpinisme et en modifient les conditions de fréquentation reste incomplète. Pour les Alpes orientales, la liste proposée par Ritter *et al.* (2011) ne précise par exemple pas les processus qui affectent le plus les itinéraires et qui sont les plus déterminants pour la pratique de l'alpinisme. De plus, la liste proposée est pertinente pour les Alpes orientales, mais elle n'est peut-être pas adaptée à tous les massifs, en fonction notamment de leur niveau d'englacement (Ritter *et al.*, 2011). De plus, Ritter *et al.* (2011) et Pröbstl-Haider *et al.* (2016) considèrent indifféremment les sentiers de randonnées d'altitude et les voies d'alpinisme

alors que ces deux types d'itinéraires impliquent des pratiques différentes. Par exemple, les situations sur lesquelles les répondants sont interrogés dans le questionnaire de Pröbstl-Haider *et al.* (2016) relèvent pour certaines beaucoup plus de la randonnée que de l'alpinisme : « suivre un sentier sans garde-corps ou autre protection pour empêcher les chutes d'un côté du sentier était le plus susceptible d'être énoncé par les répondants ». De plus, le lien avec le changement climatique n'est pas toujours évident : « la plupart des répondants perçoivent les conditions suivantes comme particulièrement risquées : traverser une section de glace en pente, traverser un secteur avec des traces significatives de chutes de pierres ou un passage raide de neige dure ».

Pour les Alpes occidentales, Bourdeau (2014) identifie les processus qui affectent le plus les itinéraires d'après les guides de haute montagne dans le Parc National des Écrins mais sans étudier leurs caractéristiques telles que l'altitude d'occurrence, la fréquence, les types de voies d'alpinisme les plus affectés, etc.

On fait donc le constat que, jusqu'ici, la littérature scientifique manque de précision dans l'étude des relations entre évolution des milieux de haute montagne face au changement climatique et les itinéraires d'alpinisme. Des études de cas détaillées, à l'échelle d'itinéraires d'alpinismes, semblent donc nécessaires, notamment sur le modèle de Purdie et Kerr (2018). De plus, bien que le massif du Mont Blanc soit un berceau de l'alpinisme et qu'il reste aujourd'hui encore un site majeur pour la pratique, il n'a fait l'objet d'aucune étude scientifique sur ce thème. Ainsi, de nombreuses questions restent en suspens. Quels sont les processus qui affectent les itinéraires d'alpinisme dans les Alpes occidentales ? Sont-ils les mêmes que dans les Alpes orientales ? Lesquels sont les plus déterminants pour la pratique de l'alpinisme ? Quels sont les voies d'alpinisme les plus affectées selon leur nature (rocher, neige, glace ou mixte), leur orientation, ou encore leur difficulté ? À quel point ces processus modifient-ils les conditions de pratique de l'alpinisme estivale ?

B. Comment sont affectés les alpinistes et comment s'adaptent-ils ?

Une des principales limites dans les études existantes tient au fait qu'elles traitent dans un même ensemble plusieurs types de professionnels et de pratiquants de la montagne. Ainsi, l'étude de Behm *et al.* (2006) a été réalisée auprès de professionnels qui ne pratiquent pas les mêmes activités, et qui ne sont pas distingués dans les résultats, ce qui peut gommer des différences pourtant notables en matière de perception et d'adaptation au changement climatique. En effet, les moniteurs de ski ne travaillent de ce métier que l'hiver, les organisateurs de randonnées ne travaillent pas à haute altitude et les guides de haute montagne, seuls professionnels autorisés à travailler en haute montagne, ont cependant des prérogatives très ouvertes qui leur permettent de pratiquer de nombreuses activités différentes. Ces résultats donnent donc une vision très générale et parcellaire des impacts du changement climatique sur l'activité des professionnels de la montagne et dont l'interprétation reste inévitablement limitée et peut-être non représentative de la seule pratique de l'alpinisme. De plus, l'étude se limite à un traitement simple des données (tri à plat) et ne catégorise pas précisément les perceptions et les adaptations en fonction des professionnels (typologies) et des activités qu'ils pratiquent.

L'approche qualitative de Bourdeau (2014) permet d'obtenir des résultats très intéressants, notamment en ce qui concerne les impacts du changement climatique sur la pratique de l'alpinisme en général et plus particulièrement sur les guides de haute montagne et leurs modalités d'adaptation. Elle sert de base à un certain nombre de questionnements dans ce travail de thèse, concernant en particulier les guides de haute montagne. Quelles sont les modalités d'adaptation les plus couramment mises en place ? L'adaptation est-elle facile ou au contraire plutôt difficile ? Tous les guides s'adaptent-ils de la même manière ? Certaines modalités d'adaptation sont-elles spécifiques à des massifs particuliers ? Comment les jeunes guides perçoivent-ils les impacts futurs du changement climatique ?

D'autre part, la perception et l'adaptation des alpinistes amateurs et des gardiens de refuges n'ont pas encore été étudiées spécifiquement. Bourdeau (2014) note que les alpinistes amateurs s'adaptent eux aussi, notamment par une stratégie de dé-saisonnalisation de la pratique, avec une fréquentation qui s'étale sur l'ensemble de l'année afin de profiter des périodes de bonnes conditions dont l'occurrence est devenue plus aléatoires. Cependant, est-elle la seule modalité mise en place ? Tous les alpinistes amateurs sont-ils affectés de la même manière en fonction de leur mode de pratique ? La fréquentation de la haute montagne par les alpinistes a-t-elle tendance à diminuer à cause du changement climatique ? La fréquentation des refuges de haute montagne varie-t-elle et comment les gardiens sont-ils affectés et s'adaptent-ils ?

Enfin, face à la rapidité et à l'intensité des impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne (cf. : Chapitre 2) et à une prise de conscience relativement récente de cette problématique, il est tout à fait plausible que les résultats des études menées dans les années 2000 ne soient plus valides aujourd'hui.

Pour terminer cet état des connaissances, il est important de noter que l'évolution de la pratique de l'alpinisme, telle que décrite dans le Chapitre 1, est un phénomène qui peut aussi altérer notre analyse des impacts du changement climatique sur la pratique de l'alpinisme. Par exemple, la diminution du niveau technique et d'engagement d'une majorité d'alpinistes à partir des années 1990 ne les rend-t-elle pas d'autant plus sensibles à l'augmentation de la dangerosité et de la technicité des itinéraires ? Ainsi, d'autres variables, telle que l'évolution de la quantité et du niveau des alpinistes, l'évolution des moyens à dispositions pour se tenir au courant des conditions et de la météorologie en haute montagne – qui entraînent une meilleure possibilité de réactivité aux conditions -, l'évolution des attentes de la clientèle notamment des guides (cf. : Chapitre 6), la judiciarisation des métiers de montagne etc. sont d'autres variables qui vont affecter la perception et la sensibilité des alpinistes aux changement climatique. Dans notre travail, un des objectifs mais aussi une des difficultés sera justement d'isoler la variable climatique du système complexe que représente l'alpinisme (cf. : Chapitre 1) et d'identifier dans quelle mesure elle affecte la pratique. Les autres variables notamment socio-culturelles et économiques ne seront pas directement abordées, bien que considérées à certains moments afin de relativiser et mettre en perspectives les impacts identifiés du changement climatique.

3.3. Structuration du travail doctoral, méthodes et échelles d'investigation

Face au défaut de connaissances identifié, ce travail de thèse, inscrit dans le cadre du projet EU ALCOTRA *AdaPT Mont Blanc*, se structure en trois principaux axes de recherche (Fig. 3.5) :

- 1. L'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation sur la période estivale.
- 2. La perception du changement climatique par les alpinistes et leur adaptation face à l'évolution des itinéraires.
- 3. La vulnérabilité des alpinistes et le partage/diffusion de connaissances pour favoriser des actions d'adaptation et de résilience des acteurs concernés.

Le manuscrit de thèse est principalement articulé autour de six articles publiés ou soumis et d'un rapport d'étude. Aussi, la section suivante présente la manière dont sont développés les différents axes de recherches et les différents articles qui les structurent. Les questionnements auxquels ces derniers répondent, leurs méthodologies ainsi que les échelles spatiales et temporelles qu'ils traitent seront aussi détaillés.

3.3.1. Axes de recherche, méthodes et échelles d'investigation

Axe 1. L'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation sur la période estivale face aux effets du changement climatique

Le premier objectif de ce travail de thèse est d'étudier l'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leur condition de fréquentation sur la période estivale face aux impacts du changement climatique. Les accès aux refuges de haute montagne seront étudiés dans un premier temps et les voies d'alpinisme proprement dites dans un second. Cet axe est structuré autour de trois articles (Fig. 3.5) :

- **Article 1.** «Access routes to high mountain huts facing climate change. Environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps». *Norwegian Journal of Geography*, 2019.

Cet article considère 30 itinéraires d'accès à des refuges de haute montagne, localisés dans les massifs des Écrins (France), du Mont Blanc (France, Italie, Suisse) et des Alpes valaisannes (Italie, Suisse). Le premier objectif est d'identifier les processus géomorphologiques liés au changement climatique qui les affectent et en modifient les conditions de fréquentation depuis les années 1990. Ensuite, les stratégies d'adaptation mises en place pour les itinéraires ainsi que leurs limites seront présentées et discutées. Cet article se fonde sur une méthodologie en deux temps. Des études détaillées ont d'abord été réalisées pour 16 refuges afin de retracer précisément l'évolution de leurs itinéraires d'accès. Cette première étape repose sur des entretiens semi-directifs menés principalement avec les gardiens de refuges concernés et les employés des services d'aménagement des sentiers. Les entretiens ont été complétés par l'analyse et la comparaison diachronique de photographies, de cartes topographiques,

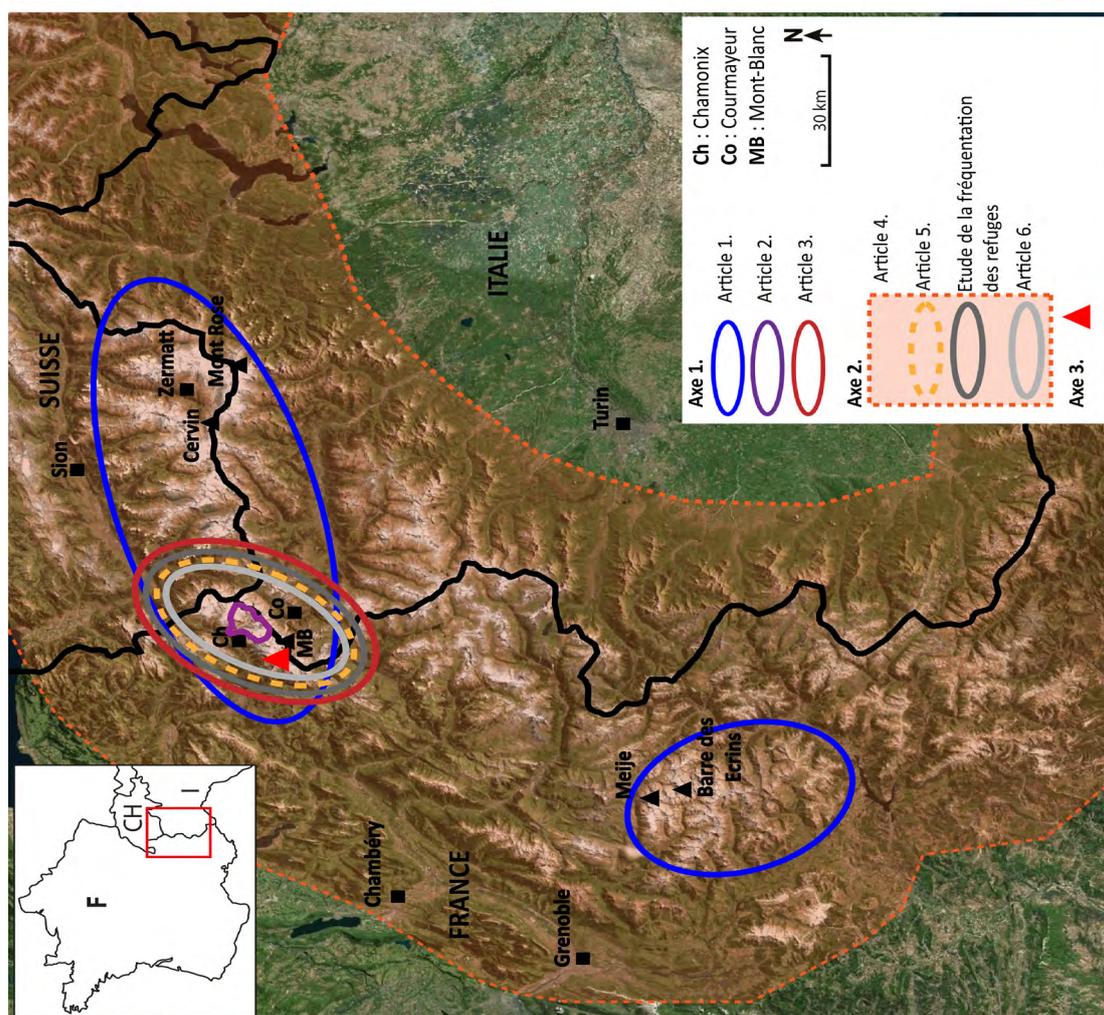


Figure 3.5. Structuration du travail doctoral et échelles spatiales d'investigation.

de topo-guides et de récits issus de la presse spécialisée. Ensuite, les résultats d'une enquête par questionnaires réalisée en 2014 par la *Fondation Montagne sûre* (Fms) auprès des gardiens de refuges ont été utilisés. Ils ont permis de compléter le travail en incluant un plus grand nombre de refuges.

• **Article 2.** «Un exemple d'adaptation aux effets du changement climatique en haute montagne alpine. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace». *Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research*, 2017.

Ce deuxième article constitue une étude de cas traitant spécifiquement des accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace. Il répond en ce sens, mais à une autre échelle spatiale (celle d'un bassin glaciaire) à un objectif similaire à celui de l'article précédent : retracer l'évolution des itinéraires d'accès aux refuges afin d'identifier les processus géomorphologiques liés au changement climatique qui les affectent et étudier les stratégies d'adaptation mises en œuvre pour en maintenir l'accessibilité. L'étude menée ici retrace une évolution depuis le début du XX^e siècle. La méthodologie mise en œuvre se développe aussi en deux temps. Tout d'abord, des entretiens semi-directifs avec les gardiens de refuges concernés, les employés des services d'aménagement des sentiers et des guides de haute montagne ont été réalisés. Ensuite, une analyse géo-historique de photographies, de cartes topographiques, de topo-guides et de récits issus de la presse spécialisée a été menée. Des modélisations topographiques 3D à haute résolution par balayage laser terrestre (TLS) ont aussi été produites pour l'étude détaillée de l'évolution géomorphologique de certains secteurs. À la suite de cet article, nous proposerons une mise à jour de l'étude ainsi que des éléments complémentaires, concernant notamment l'utilisation de ces résultats comme outils d'aide à la décision auprès de la Communauté de Commune de la Vallée de Chamonix Mont Blanc (CCVCMB).

• **Article 3.** «Effects of climate change on high mountain environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif over half a century». *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2019.

Ce troisième et dernier article de l'axe I traite des voies d'alpinisme à proprement parler. L'objectif est de retracer l'évolution des voies décrites dans le topo-guide emblématique de G. Rébuffat, *Le massif du Mont Blanc, les 100 plus belles courses*, édité en 1973, afin d'identifier les processus géomorphologiques qui les affectent et en modifient les conditions de fréquentation. La méthodologie mise en œuvre pour cette étude consiste presque exclusivement en des entretiens semi-directifs réalisés avec des guides de haute montagne, dont des professeurs à l'ENSA, ainsi que des gardiens de refuges. Dans certains cas, des comparaisons de topo-guides ont été réalisées pour confirmer et préciser certains témoignages. Suite à cet article, une étude en cours spécifiquement sur les impacts du changement climatique sur la voie normale d'ascension du mont Blanc sera détaillée. Elle traite particulièrement des facteurs géomorphologiques et météorologiques qui conditionnent l'occurrence des chutes de pierres dans le secteur du Grand couloir du Goûter. Des fiches synthétiques mises à la disposition des alpinistes *via La Chamoniarde*, comme outils d'aide à la décision, seront aussi présentées.

L'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation mise en évidence à l'occasion de ce premier axe de recherche nous conduit dans un deuxième axe à questionner les alpinistes sur leurs perceptions et leurs modalités d'adaptation face aux impacts du changement climatique.

Axe 2. La perception du changement climatique et l'adaptation des alpinistes face à l'évolution physique des itinéraires

Le deuxième objectif de ce travail doctoral est d'étudier comment les guides et les alpinistes sont affectés par l'évolution des itinéraires mise en évidence à travers les travaux de l'axe I et comment ils s'adaptent. Trois approches différentes ont été utilisées pour répondre à cet objectif (Fig. 3.5).

La première, dont les résultats sont présentés dans les Articles 4 et 5, repose sur les guides de haute montagne et étudie leur perception et leurs adaptations aux effets du changement climatique.

- **Article 4.** «Adaptation strategies for the French Alpine guides facing climate change effects» *Journal of Outdoor recreation and tourism*, 2020.

Cet article est basé sur des entretiens semi-directifs et une enquête par questionnaire effectuée auprès des guides du SNGM afin d'identifier leurs stratégies d'adaptation en réaction à l'évolution des itinéraires sur la période estivale. Une typologie des guides en fonction des difficultés qu'ils rencontrent et de leurs modalités d'adaptation est proposée.

- **Article 5.** «Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et modalités d'adaptation au pied du mont Blanc ?». *Revue de géographie Alpine/Journal of Alpine Research*, 2019.

Cet article, rédigé par E. Salim à la suite de son master 2 Recherche, présente une étude comparative entre l'enquête par questionnaire réalisée auprès des guides du SNGM et une autre enquête effectuée auprès des guides du val d'Aoste (Italie). Son objectif est de vérifier si tous les guides dont le massif du Mont Blanc est le massif le plus fréquenté professionnellement s'adaptent de la même manière et avec quel niveau de difficulté.

La deuxième approche suivie pour cet axe de recherche vise à évaluer si l'évolution des itinéraires d'accès aux refuges ainsi que des voies d'alpinisme entraîne ou non une adaptation de la part des alpinistes, qui implique une diminution de la fréquentation des refuges de haute montagne. Cette approche est fondée sur l'analyse du nombre de nuitées dans les refuges de haute montagne, en particulier dans le massif du Mont Blanc, et sur des entretiens semi-directifs réalisés auprès des gardiens de refuges concernés.

Dans une troisième approche, nous étudierons la prise en compte des conditions de la haute montagne par l'ensemble des alpinistes. Nous faisons l'hypothèse que, sur une saison estivale, la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes varie au fur et à mesure de l'évolution des conditions. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons installé des capteurs de fréquentation pyroélectriques sur trois des principaux accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc : l'accès à la Mer de Glace, l'arête est de l'aiguille du Midi et la voie normale d'ascension du mont Blanc. L'approche méthodologique est présentée dans l'Article 6. La quantification des flux d'alpinistes a aussi pour but de mieux estimer la fréquentation générale de la haute montagne et la vulnérabilité qui en découle à cause du changement climatique. Cependant, les limites d'application de cette méthode telles que décrites dans cet article nous mènent aujourd'hui à développer de nouvelles méthodes de comptage automatique par caméra.

- **Article 6.** «Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques». *Collection EDYTEM*, 2017.

Ce chapitre est complété par un rapport d'étude sur l'« Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017 ». Ce rapport est principalement un outils d'aide à la décision pour les acteurs locaux en charge de la gestion de cet itinéraire, et plus largement de la communauté montagnarde. La comparaison entre la fréquentation mesurée et l'accidentologie permet aussi de discuter et d'évaluer la prise en compte et l'adaptation des alpinistes à l'évolution des conditions sur cet itinéraire particulièrement fréquenté.

Axe 3. La vulnérabilité des alpinistes et la diffusion de connaissances pour favoriser des actions d'adaptation et de résilience des acteurs concernés

Face à la nécessité de répondre aux exigences du projet *AdaPT Mont Blanc* et de sensibiliser les pratiquants aux évolutions des itinéraires d'alpinisme, l'objectif de ce travail doctoral est aussi de mettre les connaissances acquises à la disposition des acteurs locaux, et plus largement de la communauté montagnarde, en tant qu'outils d'aide à la décision afin de les accompagner dans leur prise en compte et dans leur adaptation à l'évolution des milieux de haute montagne. Aussi, la portée opérationnelle de nos résultats et différentes formes d'outils (dont le rapports d'étude sur l'accidentologie et des fiches synthétiques) seront présentés au fur et à mesure de ce manuscrit.

3.3.2. Echelles spatiales et temporelles d'investigation

Dans notre étude, différentes échelles sont traitées tant au niveau spatial que temporel (Fig. 3.6). Spatialement, c'est le massif du Mont Blanc qui constitue le secteur principalement étudié, notamment parce que le projet financeur de ce travail est développé à l'échelle de l'*Espace Mont Blanc*. Du point de vue temporel, seul l'Article 2 sur les accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace couvre l'ensemble du XX^e siècle. La majorité de notre travail se concentre en effet sur la période 1970-2017 pour des raisons d'abord méthodologiques ; les entretiens et les questionnaires ne permettent pas de remonter plus loin dans le temps. D'autre part, l'évolution des milieux de haute montagne présente une nette accélération à partir des années 1980 et les alpinistes n'en ont pris conscience qu'à partir des années 1980-90. Cette prise de conscience impose dès lors la limite temporelle de l'axe 2 de ce travail, sur la perception et l'adaptation des alpinistes au changement climatique.

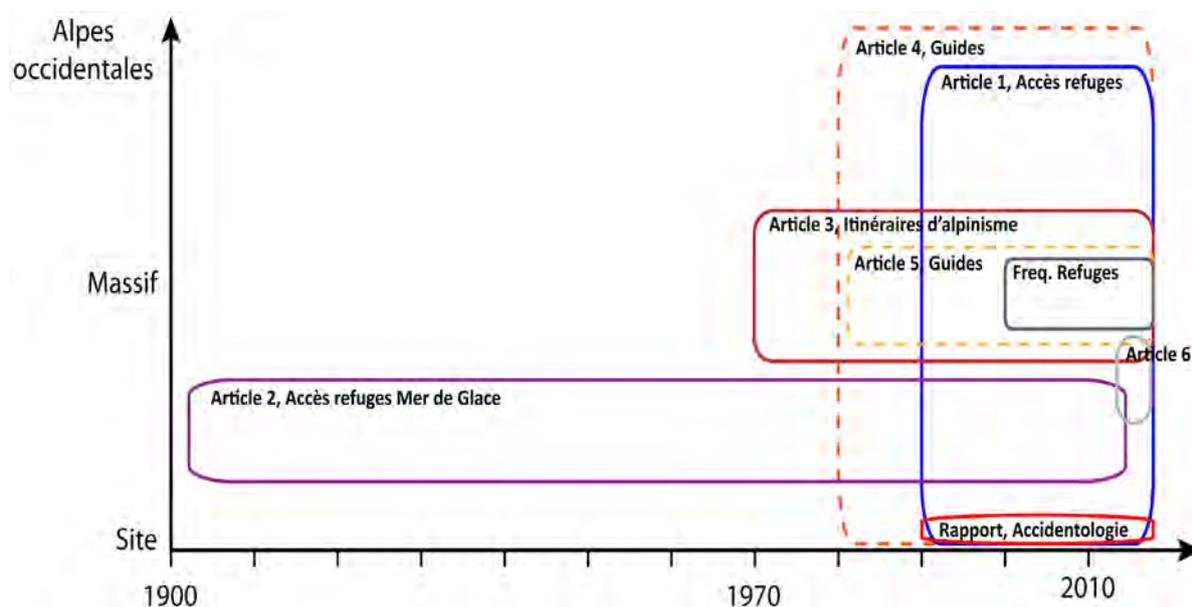


Figure 3.6. Échelles de temps et d'espace traitées dans ce travail doctoral.

Conclusion du Chapitre 3

Bien que le changement climatique soit régulièrement étudié comme un facteur positif pour le tourisme de nature estival, l'alpinisme en été est, à l'inverse, affecté par une augmentation de la technicité et de la dangerosité des itinéraires et par un raccourcissement de la saison propice à la pratique. Il en résulte une série de comportements adaptatifs de la part des pratiquants et des professionnels de la montagne tels que les guides de haute montagne, notamment en vue de réduire leur prise de risque face à des processus géomorphologiques et glaciaires plus fréquents et intenses. Cependant, l'état actuel des connaissances pour les Alpes restent très généraliste et une série de lacunes ont été identifiées autant sur la question de l'évolution des itinéraires et de leurs conditions de fréquentation que sur la perception et l'adaptation des alpinistes.

Ces lacunes sont une des bases et justifications des trois axes de recherches qui structurent ce travail doctoral. Le premier axe vise à améliorer les connaissances sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation notamment par l'identification des processus géomorphologique qui les affectent. Le second interroge la perception du changement climatique et l'adaptation des alpinistes à l'évolution physique des itinéraires, avec un focus sur les guide de haute montagne. Enfin, le troisième axe à pour objectif de mieux évaluer la vulnérabilité des alpinistes face à l'évolution des itinéraires et de diffuser des connaissances pour favoriser des comportements adaptatif et plus largement, la résilience de la pratique.

Conclusion de la Partie I

La pratique de l'alpinisme, principal objet d'étude de ce travail de thèse, est difficile à définir en raison notamment de sa profondeur historique et des nombreuses évolutions qu'elle a connue sur les 200 dernières années. Toutefois, dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons proposé une définition de l'alpinisme dans les Alpes selon une approche systémique où trois sous-systèmes sont en interaction : (i) des milieux de pratiques (les milieux de haute montagne), (ii) un état d'esprit et une attitude principalement structurés autour des notions d'autonomie, d'exploration, d'engagement et de liberté, et (iii) des connaissances et des savoir-faire indispensables à la maîtrise des techniques et des outils de progression et d'assurage en milieux rocheux, neigeux et glaciaires. L'histoire et l'évolution de la pratique de l'alpinisme a été jusqu'à maintenant exclusivement expliquée par l'évolution de deux sous-systèmes : des connaissances et des savoir-faire et l'évolution socio-culturelle des alpinistes. Cependant, à partir des années 1990, les impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne (détaillés dans le deuxième chapitre) sont particulièrement intenses et viennent bousculer les alpinistes dans leur pratique. Ce constat mène à poser la problématique générale de ce travail de thèse : comment l'évolution des milieux de haute montagne lié au changement climatique affecte-t-elle la pratique de l'alpinisme estival dans les Alpes occidentales ?

L'état des connaissances qui a été dressé au début du troisième chapitre sur cette question, nous a permis d'identifier un certain nombre de manques et de lacunes dans la littérature scientifique tant au niveau de l'identification des processus qui affectent les itinéraires qu'au niveau de la perception et de l'adaptation des alpinistes. Ainsi plusieurs questions, ici résumées, sont encore sans réponses : (i) quels sont les processus qui affectent les itinéraires d'alpinisme dans les Alpes occidentales et à quel point ces processus modifient-ils les conditions de pratique de l'alpinisme estival ? et (ii) quelles sont les modalités d'adaptation des alpinistes, professionnels et amateurs ; impliquent-elles une diminution de la fréquentation de la haute montagne et des refuges et comment les gardiens sont-ils affectés et s'adaptent-ils ?

Afin de contribuer à répondre à ce manque de connaissances, la suite de notre travail de thèse s'organise en trois axes de recherches principaux :

- 1. L'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation sur la période estivale.
- 2. La perception du changement climatique par les alpinistes et leur adaptation face à l'évolution des itinéraires.
- 3. La vulnérabilité des alpinistes et l'acquisition/diffusion de connaissances pour une meilleure résilience de la pratique.

Partie II

Évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation

La deuxième partie de ce manuscrit (Chapitres 4 et 5) présente les résultats de nos recherches sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation en période estivale. Il s'agit du premier axe de recherche identifié dans le Chapitre 3. Le Chapitre 4 se concentre spécifiquement sur les accès aux refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales. Ces derniers se différencient des itinéraires d'alpinisme dans le sens où ils prennent en général la forme d'un sentier, relativement aisé à suivre, souvent balisé et équipé dans les passages les plus techniques (main courantes, câbles etc.). Toutefois, ils sont aussi le support et conditionnent la pratique de l'alpinisme dans les Alpes en donnant accès aux refuges. Ce Chapitre 4 est structuré autour des deux premiers articles de ce manuscrit qui traitent des accès aux refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales (Article 1) et dans le bassin de la Mer de Glace (Article 2). Ensuite, le Chapitre 5 présente nos résultats sur les itinéraires d'alpinisme à proprement dit. A l'inverse des accès aux refuges, les itinéraires d'alpinisme se caractérisent par une absence de balisage et c'est à l'alpiniste de trouver l'itinéraire à suivre qui est plus ou moins bien indiqué en fonction du matériel en place (relais, pitons etc.). Ce Chapitre 5 est principalement structuré autour de l'Article 3 de ce manuscrit. Il traite de l'évolution de 95 itinéraires d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc depuis les années 1970.

Chapitre 4. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation

Ce quatrième chapitre présente, à travers les deux premiers articles de ce manuscrit, les résultats des travaux menés sur l'évolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne. Notre étude portant sur l'alpinisme, nous avons considéré comme « refuges de haute montagne », tout refuge support de la pratique, sans prendre en considération son altitude ou le type d'environnement dans lequel il est situé. Les deux articles répondent aux mêmes questionnements : quels sont les processus géomorphologiques liés au changement climatique qui affectent les accès et en modifient les conditions de fréquentation et quelles sont les stratégies d'adaptation mises en place pour maintenir l'accessibilité des refuges ?

Le premier article (en révision, *Norwegian Journal of Geography*) s'intéresse aux Alpes occidentales. Il est basé sur 16 études détaillées (cf. : Chapitre 3) et une enquête par questionnaire effectuée auprès de 23 gardiens de refuge par la *Fondation Montagne sûre* (FMs), dans le cadre du projet ALCOTRA *Éco-Innovation en Altitude*. Il développe d'abord trois études de cas dont les problèmes posés par le changement climatique et les solutions développées pour y répondre. Il présente ensuite les résultats du questionnaire pour les 30 refuges différents considérés.

Le second article (*Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research*, 2017), basé uniquement sur des études détaillées, présente l'évolution des accès aux cinq refuges du bassin de la Mer de Glace dans le massif du Mont Blanc. Elle est retracée depuis le début du XX^e siècle et a permis d'identifier les processus liés au changement climatique qui les affectent sur l'ensemble de la période. À la suite de cet article, nous présenterons une mise à jour des données du deuxième article pour les étés 2017 et 2018. L'utilisation de l'ensemble de ces résultats en tant qu'outil d'aide à la décision pour la Communauté de Commune de la Vallée de Chamonix Mont Blanc (CCVCMB) sera ensuite expliquée.

4.1. Article 1 - Fiche synoptique

Access routes to high mountain huts facing climate induced environmental changes and adaptive strategies in the western Alps since the 1990s

Les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne face au changement climatique.

Changement environnementaux et stratégies d'adaptation dans les Alpes occidentales depuis les années 1990.

Mourey J.¹, Ravanel L.¹, Lambiel C.², Strecker J.², Piccardi M.³
2019, *Norwegian Journal of Geography*

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

² Institute of Earth Surface Dynamics, University of Lausanne, Switzerland

³ *Fondazione Montagna sicura, Courmayeur, Italy*

Objectifs de l'article

- Caractériser et expliquer l'évolution des accès aux refuges de haute montagne des Alpes occidentales et sa relation avec les effets du changement climatique.
- Identifier les stratégies d'adaptation mises en place pour maintenir l'accessibilité des refuges, les entités qui les mettent en places, et leurs limites d'application.

Problématique

- Comment les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne des Alpes occidentales et leurs conditions de fréquentation sont-ils affectés par les effets du changement climatique ? Quels sont les processus géomorphologiques en jeu ? Quelles sont les stratégies d'adaptation développées ?

Méthodologie

- Études détaillées :
 - comparaison diachronique de cartes, de topo-guides et de photographies ;
 - conduite d'entretiens semi-directifs.
- Enquête par questionnaires soumis à des gardiens de refuges.

Principaux résultats

- La perte d'épaisseur et le retrait du front des langues glaciaires sont les deux principaux processus qui affectent les accès aux refuges de haute montagne.
- L'ensemble des accès a tendance à devenir plus dangereux et techniquement plus difficile en

raison de ces processus.

- L'installation de petits équipements (pédales, échelles, main courantes, etc.), le déplacement d'une partie ou de la totalité de l'itinéraire, et l'installation d'infrastructures de grande ampleur (passerelles himalayenne notamment) sont les trois stratégies les plus couramment mises en place (respectivement 67, 63 et 22 % des accès considérés).
- Bien que les situations soient différentes entre la France, la Suisse et l'Italie, les acteurs publics (mairies, Communautés de Communes, etc.) sont les principales entités finançant ces aménagements.

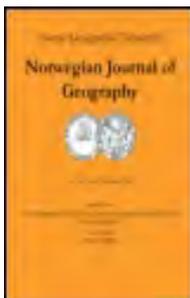
Rôle des auteurs

- J. Mourey : conception et réalisation de l'étude dont le recueil (hors enquête menée par la FM) et l'analyse des données, rédaction de l'article.
- L. Ravanel (co-encadrant de thèse) : participation à la conception de l'étude, à l'acquisition des données et à la discussion des résultats, contribution à la rédaction.
- C. Lambiel et J. Strecker : réalisation des études détaillées relatives aux refuges des Alpes valaisannes (Suisse).
- M. Piccardi : construction et administration pour la FM du questionnaire auprès des gardiens.

Résumé

En haute montagne alpine, le retrait glaciaire et la dégradation du permafrost lié au changement climatique ont des conséquences notables sur les itinéraires d'accès aux refuges support de la pratique de l'alpinisme. Dans cet article, nous étudions l'évolution des itinéraires d'accès à 30 refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales depuis les années 1990. Plus spécifiquement, des données issues de deux méthodes différentes – des études détaillées et un questionnaire – sont utilisées pour identifier les processus liés au changement climatique qui affectent les itinéraires et les stratégies mises en place pour maintenir les accès dans des conditions de technicité et de danger acceptables. Trois études de cas sont d'abord détaillées puis les résultats du questionnaire permettent d'identifier la perte d'épaisseur et le retrait du front des glaciers comme les deux processus qui affectent le plus les itinéraires. En conséquence, ces derniers ont tendance à devenir plus dangereux et des mesures d'adaptation sont nécessaires pour restaurer des conditions de sécurité acceptables. L'installation de petits équipements (pédales, échelles, mains courantes, etc.), le déplacement d'une partie ou de la totalité de l'itinéraire, et l'installation d'infrastructures de grande ampleur (passerelles himalayennes notamment) sont les trois stratégies les plus couramment mises en place. Bien que dans la plupart des cas ces mesures sont efficaces, leurs mises en place est limitée par des facteurs financiers, éthiques et législatifs.

Mots clés : haute montagne, accessibilité des refuges, changement climatique, alpinisme, Alpes occidentales.



Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography



ISSN: 0029-1951 (Print) 1502-5292 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/sgeo20>

Access routes to high mountain huts facing climate-induced environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps since the 1990s

Jacques Mourey, Ludovic Ravel, Christophe Lambiel, Joël Strecker & Mattia Piccardi

To cite this article: Jacques Mourey, Ludovic Ravel, Christophe Lambiel, Joël Strecker & Mattia Piccardi (2019): Access routes to high mountain huts facing climate-induced environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps since the 1990s, Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography, DOI: [10.1080/00291951.2019.1689163](https://doi.org/10.1080/00291951.2019.1689163)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/00291951.2019.1689163>



Published online: 15 Nov 2019.



[Submit your article to this journal](#)



[View related articles](#)



[View Crossmark data](#)



Access routes to high mountain huts facing climate-induced environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps since the 1990s

Jacques Mourey , Ludovic Ravel, Christophe Lambiel, Joël Strecker & Mattia Piccardi

Jacques Mourey and Ludovic Ravel, Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire EDYTEM - UMR5204, Bâtiment « Pôle Montagne », 5 bd de la mer Caspienne, FR-73376 Le Bourget du Lac, France; Christophe Lambiel and Joël Strecker, Faculty of Geosciences and Environment, University of Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland; Mattia Piccardi, Fondazione Montagna Sicura – Montagne Sûre, Villa Cameron, Località Villard de la Palud, IT-111013 Courmayeur (Valle d'Aosta), Italy

ABSTRACT

In the European Alps, high mountain environments are subject to major impacts resulting from climate change, which strongly affect human activities such as mountaineering. The purpose of the study was to examine changes in access routes to 30 high mountain huts in the Western Alps since the 1990s. Data were derived from the use of two different methods, geo-historical studies and a questionnaire, and were used to identify both the climate-related processes affecting the climbing routes and the strategies implemented by public entities, Alpine clubs, guide companies, and hut keepers to maintain acceptable safety and technical conditions. The case studies revealed issues affecting three access routes and the results from the questionnaire showed that the main processes affecting access routes were loss of ice thickness and retreat from the front of the glaciated areas. Commonly, in situ equipment was installed to facilitate access for mountaineers and/or a part of a route was relocated to a safer area. The authors conclude that in most cases, the measures were effective but they were limited by financial, ethical and legal issues, especially in protected or classified areas that could jeopardise their durability and effectiveness.



ARTICLE HISTORY

Received 24 August 2018
Accepted 1 November 2019

EDITORS

Ivar Svare Holand, Kerstin Potthoff, Catriona Turner

KEYWORDS

climate change, high mountain environments, mountain hut accessibility, mountaineers, Western Alps

Mourey, J., Ravel, L., Lambiel, C., Strecker, J. & Piccardi, M. 2019. Access routes to high mountain huts facing climate-induced environmental changes and adaptive strategies in the Western Alps since the 1990s *Norsk Geografisk Tidsskrift–Norwegian Journal of Geography* Vol. 00, 00–00. ISSN 0029-1951.

Introduction

High mountain areas such as the European Alps are particularly sensitive to climate change (Beniston 2005). The average temperature in the European Alps increased by 2 °C between the end of the 19th century and the early 21st century (Beniston 2005; Auer et al. 2007), and there has been a strong acceleration in the rate of warming since the 1990s (IPCC 2019). In this context, high mountain environments have been subject to major changes due to the widespread occurrence of glaciers and permafrost, which has rendered them highly sensitive to climate change.

Many scholars have discussed the possible consequences of climate warming on winter mountain tourism and outdoor recreation, especially on skiing activities, in the European Alps (Scott & McBoyle 2007; Koenig & Abegg 2010; Rixen et al. 2011; Scott et al. 2012).

However, relatively few scholars have documented and discussed the effects of climate change on summer mountain tourism and outdoor recreation (Serquet & Rebetez 2011; Pröbstl-Haider et al. 2015; Welling et al. 2015), especially activities conditioned by high mountain environments, such as mountaineering. Mountaineering is a significant socio-economic activity and part of the cultural heritage in the European Alps (Modica 2015). The activity was originally developed in the Western Alps, especially in the Mont Blanc massif (between France and Italy) at the end of the 18th century (Hoibian 2008), and evolved as technical issues (Duez 2009) and cultural and ideological issues were addressed (Hoibian & Defrance 2002; Bourdeau 2007). Today, mountaineering remains an 'iconic' activity in the highest altitudes of the European Alps. This is reflected in the fact that in 2018 both Chamonix (France) and

Courmayeur (Italy) were candidates for mountaineering to be included in UNESCO's list of Intangible World Heritage.

Mountaineering in the European Alps is highly structured according to the network of mountain huts, which are essential for mountaineers whose objective is to access high altitudes from the valley floor or from the top of a cable car or cog railway. However, warmer climates are leading to major changes in the European Alps and access to high mountain environments may be jeopardised by the consequent changes to the geomorphic settings. Few studies have investigated this issue in the Eastern Alps (Behm et al. 2006). Ritter et al. (2012) have compiled a relatively exhaustive inventory of all the geomorphological processes resulting from climate change that can affect a high mountain trail in the Austrian Alps.

Our research focused on three massifs in the Western Alps: Écrins, Mont Blanc and the Valais Alps (Fig. 1). First, we wanted to address the question of how access

routes to high mountain huts and their conditions of frequentation had been affected by the climate since the 1990s. Second, we explored how the mountaineering routes had been adapted in order to maintain good safety and technical conditions. We used two different methods to gather qualitative and quantitative data: (1) geo-historical studies (for detailed information, see Mourey & Ravanel 2017), and (2) a questionnaire. Data obtained by both methods were used to address the following questions:

- What climate-related changes are affecting the access route?
- Are changes associated with global warming responsible for the deterioration of the safety conditions?
- What measures have been taken to restore acceptable safety conditions?
- Who financed the measures and who pays for the maintenance work?

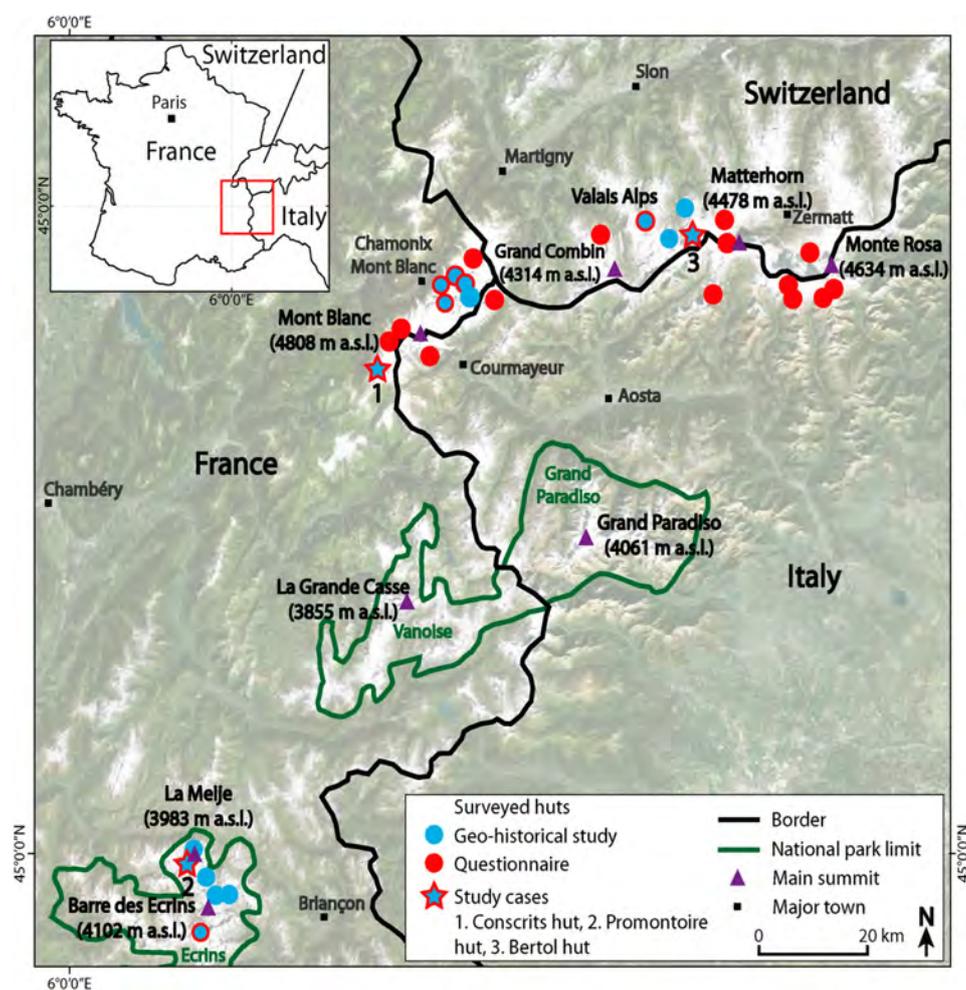


Fig. 1. Location of the 30 huts included in the study conducted in the Écrins massif, Mont-Blanc massif and Valais Alps (main map accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) in 2017)

Effects of climate change on high mountain environments in the Western Alps

Given that large parts of their surfaces are covered in ice or affected by permafrost, the European Alps are highly vulnerable to changing environmental conditions (e.g. warmer air temperatures and decreases in solid precipitation). In the European Alps, the surface areas of glaciers were reduced by half between 1900 and 2012, from 3350 km² to 1900 km² (Huss 2012). The mean glacier mass balance was -0.31 ± 0.04 m water equivalent annual (w.e.a.)⁻¹ in the period 1900–2011 and -1 m w.e.a.⁻¹ in the years 2001–2011 (Huss 2012), which illustrates the acceleration in melting due to warmer temperatures. Additionally, the loss of ice thickness has been significant. The Argentière Glacier (Mont Blanc massif, France), lost on average 80 m of ice at 1900m a.s.l. between 1994 and 2013.¹ The rate of ice thinning on the Mer de Glace (Mont Blanc massif, France) increased from 1 metres annual (m.a.)⁻¹ in the period 1979–1994 to more than 4 m.a.⁻¹ in the period 2000–2008 (Berthier & Vincent 2012). At the front of the Mer de Glace (1500 m a.s.l.), the loss in ice thickness was up to 60 m during the period 1979–2003 (Berthier et al. 2005). In the Écrins massif, 12.8 m of ice was lost on average from the surfaces of the Glacier Blanc (the largest glacier in the Southern Alps) between 2000 and 2017.²

Glacier fronts in the European Alps retreated significantly since c.1900: 366 m between 1994 and 2007 in the case of the Mer de Glace, 370 m between 2002 and 2015 in the case of the Glacier Blanc, and up to 2400 m between 1890 and 2000 in the case of Aletsch Glacier in the Valais Alps (Vincent 2010). In some cases, glacier retreat has led to more frequent ice avalanches from hanging fronts of warm-based and cold-based glaciers (Fischer et al. 2006; 2011). In the Mont Blanc massif, ice avalanching mainly occurs in the warmest periods of the year, and after the 1940s the avalanching occurred during or at the end of the warmest periods (Deline et al. 2012).

Thus, paraglacial processes are intensifying. Ballantyne (2002, 4) defines paraglacial processes as 'the non-glacial processes at the surface of the Earth ... which are directly conditioned by the glaciations and the deglaciations'. A paraglacial period starts as a direct reaction to deglaciation and ends when all consequent glacial sediments have been eroded or otherwise stabilised (Church & Ryder 1972; Ballantyne 2002). In high mountain environments, paraglacial processes refer mainly to the erosion of moraines through rockfalls and landslides (McCull 2012; Deline et al. 2015; Draebing & Eichel 2018; Eichel et al. 2018), illustrated by the gully of

the inner flank of lateral moraines due to very steep slopes of up to 80 degrees (Lukas et al. 2012). As an example, on the Gentiane moraine located on the west side of the Tortin Glacier (Valais Alps, Switzerland), 3650 ± 175 m³ of glacial materials (tills) destabilised between 2007 and 2014 (Ravel et al. 2018).

Periglacial environments and processes (French 2007) in alpine environments are mainly characterised by frost action and permafrost (i.e. lithosphere materials that remain at or below 0 °C for at least two consecutive years). When the climate is warming, frost action is reduced and permafrost is degraded (Haeberli & Gruber 2009). This, in turn, increases both the frequency and volume of rockfalls (Harris et al. 2001; 2009; Geertsema et al. 2006; Ravel & Deline 2011; Ravel et al. 2013; 2017). On the Mont Blanc massif, more than 550 rockfalls ($V > 100$ m³) due to permafrost degradation occurred between 2007 and 2015 (Ravel & Deline 2015).

Methods

We used the following three parameters when selecting mountain huts for our study: (1) huts that were open also during the summer season, (2) huts that supported the mountaineering activities and (3) huts for which the access route had been modified due to the effects of climate warming. All huts were located in the Western Alps, on the Mont Blanc massif (extending into France, Italy and Switzerland), the Écrins massif (France), and the Valais Alps (Switzerland) massif (Fig. 1), at 3020 m a.s.l. on average. However, the list of selected huts that matched the three parameters for the three massifs considered in this article was not exhaustive. Although 43 huts in the Western Alps matched the three parameters, we excluded 13 of them due to lack of data: 5 huts on the Mont Blanc massif and 8 in the Valais Alps. Thus, we considered the large majority (70%, 30 huts) of the original sample.

Initially, we conducted geo-historical studies of 16 huts (Fig. 1). The huts were chosen primarily because of the marked changes to the access routes to the huts that we had observed and that were due to the effects of climate change. The geo-historical studies were carried out using a 3-step method (for details of the method, see Mourey & Ravel 2017):

1. a diachronic comparison of maps and photographs to enable the main evolutionary phases of the access routes to be dated
2. the analysis and comparison of guide books and articles on climbing published by publishers that specialise in mountaineering-related literature

3. interviews with hut keepers, high mountain guides and trail maintenance workers.

The method enabled us to determine the geomorphological processes at work, their effects on safety, and the solution designed to adapt the routes. Three of the case studies are presented to highlight how global warming affected the access routes to the high mountain huts, and to analyse the main solutions applied.

Due to time constraints, it was not possible to conduct geo-historical studies of all of the high mountain huts in the Western Alps. Therefore, in order to collect data for as large a number of access routes as possible and to study the largest number of huts located on the three study massifs, a questionnaire was drafted, based on information acquired during the geo-historical studies. The questionnaire was structured in three sections: (1) eight questions on the main features of the hut, (2) five questions about the access route and the geomorphological processes that affect it, and (3) eight questions about adaptive solutions applied (nature of the work, cost and contractors) and the maintenance work (entities in charge and annual cost). In 2015, the questionnaire was distributed in person to 23 keepers of high mountain huts that matched the above-mentioned three parameters (Fig. 1). In most cases, a researcher was present to answer potential questions while the hut keeper completed the questionnaire. In total, 9 of the 16 huts had previously been studied in detail by three of the co-authors of this article, which had allowed us to validate the questionnaire and its efficiency, and to check whether the questionnaire answers corresponded to the data gathered in the detailed studies, especially concerning the geomorphological processes affecting the access route. The data collected using the questionnaire were analysed using SphinxIQ software. Thereafter, in order to make the questionnaire easier and quicker to complete, most of the questions were either closed or multiple choice.

Some of the hut keepers in the Alps regularly moved from one hut to another and thus were able to assess the changes in the access route over a relatively short period. Nevertheless, together with the long-term hut keepers, they were interesting resource persons for our study. Part of the keeper's work is to be aware of and warn mountaineers about any dangers that may affect their access route to the hut, and they gather much information from the previous hut keeper, the local guides company or Alpine Club that owns the hut, and mountaineers who have experience of using the access route, sometimes over many years. The inclusion of different sources of information provided a sound basis for establishing knowledge about the evolution of the access

routes and the related geomorphological changes, particularly since the 1990s.

To eliminate the possibility of misinterpreting the exact origin and/or type of geomorphological processes, particularly those identified by the few hut keepers who did not fill out the questionnaire in the presence of one of the authors, the latter hut keepers were contacted again to verify the information they had provided. Naturally occurring erosion processes such as rockfalls or serac falls (Pralong & Funk 2006; Allen et al. 2011) may be misinterpreted as the result of permafrost degradation or glacial shrinkage.

Results

In the following, we describe in detail the issues affecting mountaineers' access routes to three different huts, based on data obtained from the geo-historical studies and the completed questionnaires. The three case studies respectively represent three classic types of adaptation work carried out on access routes and their variability according to specific local conditions: (1) route modification and major infrastructure installation (Conscrits hut case), (2) provision of equipment to facilitate access (Promontoire hut case), (3) route modification and provision of equipment to facilitate access (Bertol hut case).

Case 1: Conscrits hut (2602 m a.s.l., Mont Blanc massif)

New access needed due to glacier shrinkage and paraglacial processes

The access to the Conscrits hut (90 beds, 4000 overnight visits per summer season in the period 2000–2018) on the south-western part of the Mont Blanc massif has dramatically changed since the 1990s (Fig. 2). The former access route was along the Trè-la-Tête Glacier, for c.1.5 km between the Mauvais Pas and the Trè-la-Grande seracs, leading to rock slopes on the north bank of the glacier and then to the hut (Fig. 2A and 2B). However, this route has been almost entirely transformed by the recent shrinkage of the Trè-la-Tête Glacier.

In the late 1980s, the loss of ice thickness on the Mauvais Pas (Fig. 2C) caused more frequent rockfalls due to the erosion of the morainic veneer. This in turn led to several accidents. Then, all ice disappeared from the descent route between 2005 and 2008.³ The subsequent paraglacial torrent sometimes proved difficult to cross, depending on its flow rate and location.

At the Trè-la-Grande seracs, it was once possible to reach the rock slope from the glacier before following a ramp to reach the Conscrits hut. However, in the early

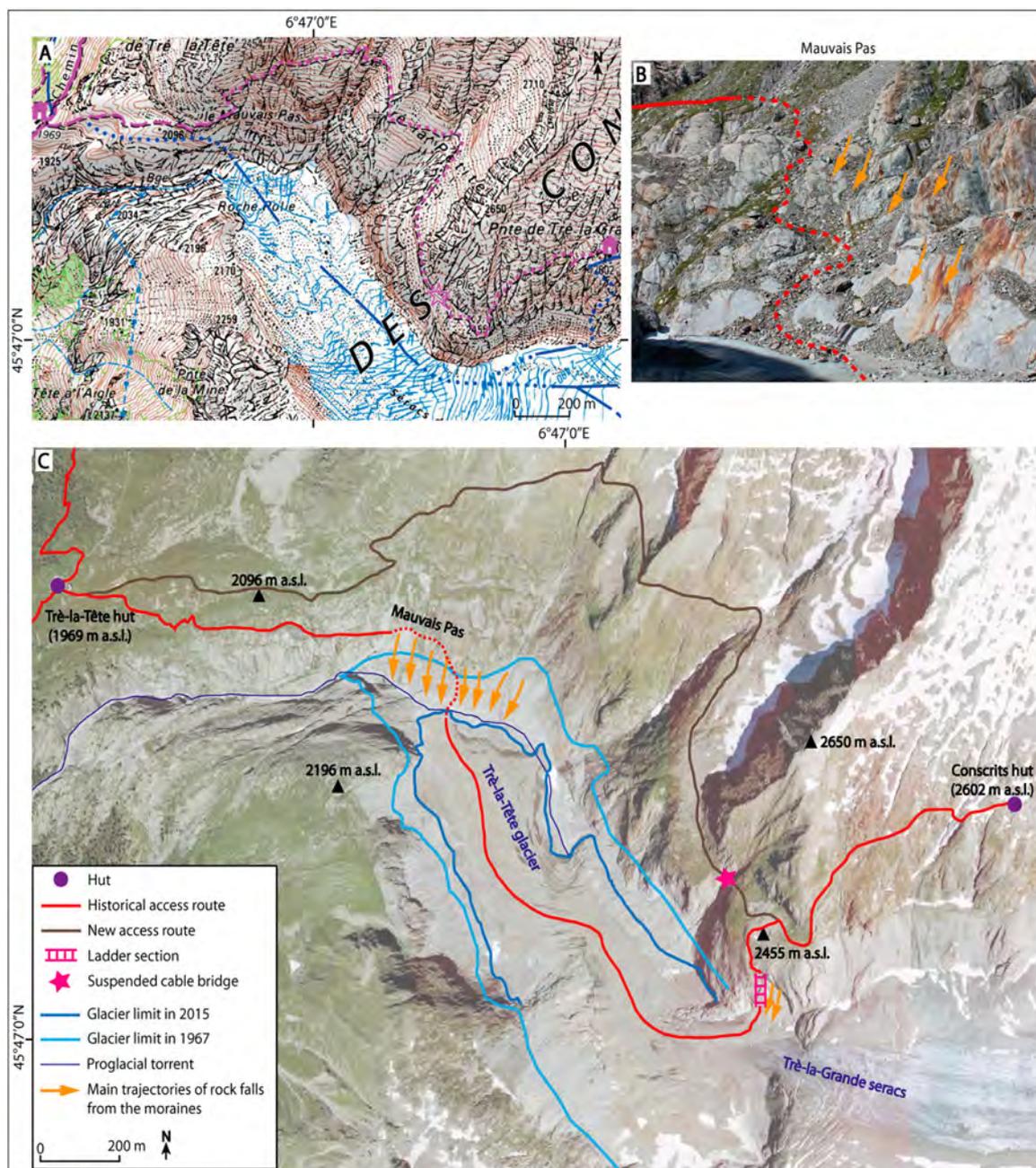


Fig. 2. Change in the access route to the Conscrits hut since the 1990s: A. Conscrits hut sector (map accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) in 2017); B. the Mauvais Pas in 2015 (Photo: Jacques Mourey, 2015); C. Location of the old and new access routes to the Conscrits hut (map accessed from IGN in 2017)

21st century, a ladder had to be installed to maintain the access due to the loss of ice thickness: c.80 m was lost in that area between 1990 and 2015 (see note 3). The rate of ice loss is accelerating, which means that new sections with ladders have had to be added at regular intervals. In 2015, a total length of 70 m on the route was accessed by ladders (O. Beguin, high mountain guide responsible for the maintenance of the route, personal communication 2015). In addition, the moraine slope formed at the

bottom of the ladders grew steeper and longer as the loss of ice thickness continued, which increased the risk of rockfalls and landslides.

Conscrits hut – adaptations in response to change

Starting in the 1990s, two sections of the access route became more difficult and dangerous. Based on an assumption that the glacier would continue to retreat in both length and thickness, local mountain guides

and the hut keeper suggested a new route. The new route is longer and involves more ascents, adding 45 minutes to the time required to reach the hut, and it has been necessary to build a 60 m footbridge across a gorge. However, the new route avoids the difficult and dangerous sections on the glacier. It was opened in September 2012, following an investment of EUR 130,000, which was mainly provided by the EU-funded ALCOTRA project Eco Innovation en Altitude. The route now requires regular and costly maintenance (EUR 4000 per year), which is carried out by the local mountain guides and Les Contamines Montjoie Municipality. As the route avoids the glacier and ladder sections, not only mountaineers but also hikers can reach the hut, and the footbridge serves as a visitor attraction that boosts trips to the hut to eat lunch served by the hut keeper.

Case 2: Promontoire hut (3082 m a.s.l., Écrins massif)

Difficult and dangerous access due to retreating ice and snow covert

The Promontoire hut (30 beds, 1980 overnight visits per summer season in the period 2000–2018) is accessible from two different valleys. One access route crosses a narrow col, the Brèche de la Meije (Fig. 3). The approach ascends the north side of the mountain before descending down to the hut on south-facing slopes below the col. Historically, this passage was snow-covered all year long and therefore the route was relatively easy to cross both ways. However, since 1999, the ice and snow cover has been melting earlier in the summer before disappearing completely each year. The southern slope beneath the col is often completely free of snow from mid-July onwards, in which case mountaineers have to climb down 40-degree slabs on a loose rock over a distance of 70 m (Fig. 3). This section of the route is therefore much more difficult and dangerous than in the past, especially since rockfalls are now frequent across the whole area.

Promontoire hut – adaptations in response to change

In order to reduce the danger to mountaineers from rockfalls, four bolts were installed on the southern side of the col in 2004. These function as anchors from which mountaineers can belay down to a path and if a mountaineer were hit by a rockfall, his or her fall should be stopped. However, such equipment cannot prevent accidents in which mountaineers are hit by rockfalls triggered by other mountaineers above them. In 2011, local mountain guides and rescue workers installed additional equipment on the south side of the col: two abseil

stations, 25 m apart, were installed to facilitate the descent (Fig. 3) and the whole area was cleared of loose rocks to reduce the risk of rockfalls. Despite the further work, the same section of the approach route remains exposed to rockfalls and is much more dangerous than it used to be.

Case 3: Bertol hut (3311 m a.s.l., Valais Alps)

Glacier shrinkage and increased rockfall activity on the access route

The Bertol hut is located near Sion (Valais Alps), on the popular high-altitude route linking Chamonix and Zermatt (Fig. 1, Fig. 4, and Fig. 4A). It was built on a rock ridge between 1896 and 1898 (Fig. 4B). Since the end of the 19th century, the access route has been affected by glacier shrinkage, which has led to an increase in rockfalls, especially at the upper end of the route. The trail starts at Arolla, a small village 6 km north of the Bertol hut, and thereafter passes over moraine deposits dating from the Little Ice Age before crossing the small Bertol Glacier (Fig. 4A). The Bertol Glacier has shrunk dramatically: our diachronic comparison of maps showed that the glacier front retreated 400 m between 1909 and 2010. Near the Bertol Pass, the loss in ice thickness has made the slope much steeper (Fig. 4B). After the snow disappears in summer, it is dangerous to walk across this crevassed sector of the glacier. The last section of the route climbs a steep rock wall immediately below the hut. Cables and ladders have been installed to allow mountaineers to ascend this 50 m section.

The main hazards are due to increased rockfalls from the Clocher de Bertol, which poses a threat to the route across the glacier (Fig. 4C). Major rockfalls ($V > 100 \text{ m}^3$) occurred in 2006 ($V = c.150 \text{ m}^3$) and 2009. Rockfall activity has increased directly below the hut, and destroyed a bridge in 2009. It is probable that the permafrost warming in the rock face is responsible for the increase in rockfall frequency, although no supporting data are available.

Bertol hut – adaptations in response to change

To avoid the hazardous route below the Clocher de Bertol, in 2008 a via ferrata was installed on an outcrop that had emerged from the glacier since the 1980s (Fig. 4D). However, the solution is not optimal because several sections are loose and therefore rockfalls can be triggered by mountaineers themselves. In the final section of the route, the destruction of the bridge in 2009 prompted the owner of the Bertol hut to move the route from the south-east face of the Clocher de Bertol to the south-west face, which is more stable (Fig. 4B).

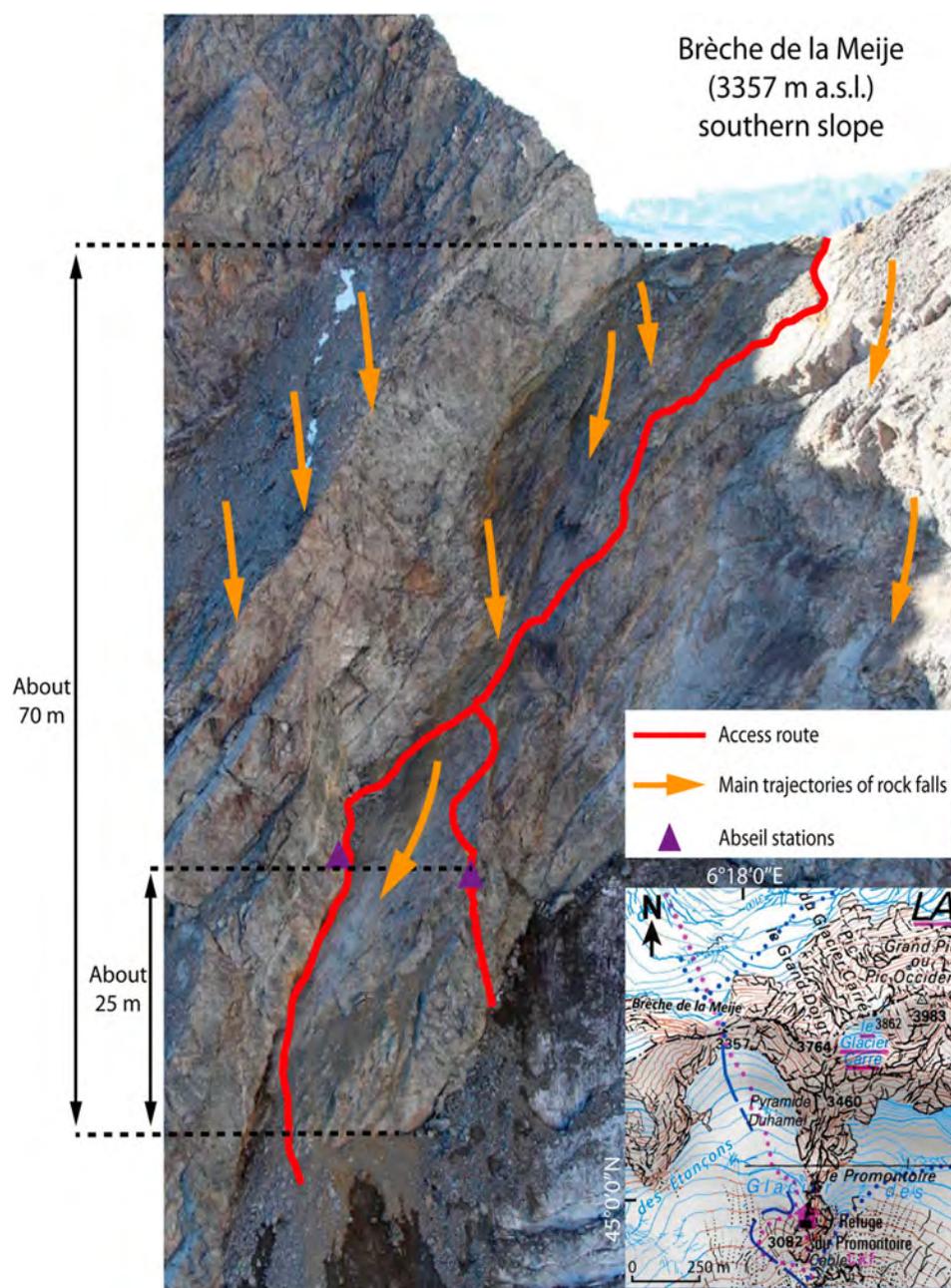


Fig. 3. The southern side of the Brèche de la Meije (3357 m a.s.l.) (photo: Parc national des écrins, 2012; location of the Brèche de la Meije shown in the inset map (accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestier) in 2018)

Effects of warming on high mountain huts – questionnaire survey results

Numerous access routes to high mountain huts are affected by the effects of climate change. The questionnaire survey enabled us to complete the geo-historical studies and conduct our further work on a regional scale. We also identified the processes that affected most of the access routes, as well as the most frequent solutions applied to restore safety and technical conditions (Fig. 5).

Most of the studied access routes affected by glacier shrinkage

According to the keepers of the 30 studied huts, the geomorphological processes – some of them interdependent (Fig. 5A) – that affected the access routes included the following: glacier shrinkage (loss of ice thickness and retreat of the glacier front) in 80% (24) of cases; permafrost degradation (40%) (12); paraglacial processes (32%) (10); ice avalanche due to glacial retreat (6%) (2); decrease in ice and/or snow cover due to melting (6%) (2); and



Fig. 4. Change in the access route to the Bertol hut since the 1990s: A. The Bertol hut sector (source: Swisstopo (Swiss Federal Office of Topography), 2017) – a = location of photo in 4C; b = location of photo in 4D; B. View of the hut, with the new location of the ladders and the recently deglaciated pass (Photo: Joël Strecker, 2014); C. The route towards the hut, threatened by rockfall from the Clocher de Bertol (Photo: Joël Strecker, 2014); D. The via ferrata established on the recently emerged outcrop (Photo: CAS Neuchatel, 2008)

torrential floods (6%) (2). It is interesting to note that there is a link – although not statistically tested – between the average altitude of the huts and the processes that affected their access route. The access routes affected by glacier shrinkage and the associated paraglacial processes, which occur on the rock slopes on both sides of the glaciers in the ablation zone (i.e. below 3250 m a.s.l.) (Rabatel et al. 2013), led to the huts located at the lowest altitudes (24 huts, located at 2820 m a.s.l. on average). The access routes mainly affected by processes due to permafrost degradation (Ravel et al. 2017) led to the huts located at higher altitudes (12 huts, located at 3110 m a.s.l. on average).

The 30 huts in the study were located at 3020 m a.s.l. on average. Hence, their access routes were mainly

situated in the glacier ablation zone, where ice shrinkage was most intense and affected the largest areas, especially compared with processes more related to local permafrost degradation.

Three main solutions implemented to restore safety conditions

All 30 hut keepers reported that the access routes were becoming more dangerous due to geomorphological evolutions. Therefore, in order to restore acceptable safety and technical conditions, three different solutions were applied (Fig. 5B): (1) provision of equipment (e.g. ladders, handrails and steps), (2) relocation of all or part of the route, and (3) installation of major infrastructure. Equipment was installed in 67% (20) of the access

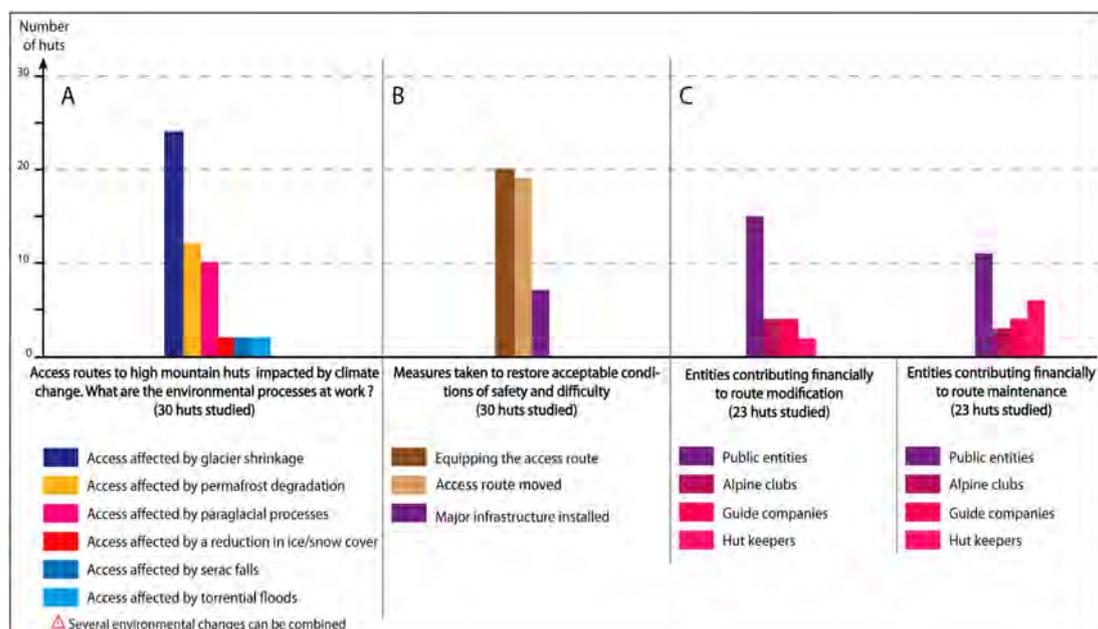


Fig. 5. Access routes to high mountain huts affected by climate change between the 1990s and 2018: A. Processes due to climate change affecting the access routes; B. Modifications carried out to restore acceptable levels of safety and difficulty; C. Organisations that have funded modification and maintenance work for access routes to mountain huts

routes, the routes were partially moved in 63% (19) of the cases, and major infrastructure such as footbridges were installed in 22% (7) of the cases. According to the hut keepers and the Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne (PGHM) in charge of rescue missions in the French high mountain areas, the adaptations had made the access routes safer and helped to reduce the number of accidents. However, several hut keepers also reported that the new equipment required a higher level of monitoring, which implied higher maintenance costs.

In the case of the Goûter hut (Mont Blanc massif), which is on the most common route to the very popular Mont Blanc (4808 m a.s.l.), the keeper reported that the equipment has improved safety, but paradoxically increased the number of accidents (for an explanation of the increase, see Mourey et al. 2018). As the route was made safer, more people attempted the route and/or they were less careful, which led to more accidents.

Adaptation work financed by several entities

Concerning the financial implications of the adaptation work on the access routes to the huts (i.e. provision of equipment, route modifications, and installation of major infrastructure), 65% (15) of the projects were financed by public entities, 17% (4) by local mountain guides companies, 17% (4) by national alpine clubs, and 9% (2) by the hut keepers (Fig. 5C). In 12% (3) of

the cases, projects were financed by several entities. The situation differed between France, Italy and Switzerland. In France and Italy, public funding was used in most cases (respectively 67% (7) and 82% (6) of the projects); in Switzerland, the Swiss Alpine Club was involved in 60% (3) of cases.

The above entities were involved in the general maintenance of the access routes (usually annual small-scale work as refastening or replacing ropes and ladders), but the numbers differed (Fig. 5C). Public funding was used to maintain access routes in only 47% (11) of the study cases and the hut keepers were involved in 26% (6) of the cases. In the remaining cases, maintenance was carried out either by mountain guide companies or by local sections of national alpine clubs. Furthermore, the general maintenance situation differed from one country to another: in Italy, hut keepers generally took care of the maintenance work on the access route to the hut they managed (67%) (5 of the cases); in France, the work was primarily done by the public entities (73%) (7); and in Switzerland, the work was done by the national alpine club (60%) (3).

Modification of access routes is often very expensive. The average cost of the adaptive solutions is not known but, as an example, work carried out to equip the access route to the Pannossière hut (2641 m a.s.l., Valais Alps) in 2014 cost EUR 350,000 and the equipping of a new access route to the Charpoua hut (2841 m a.s.l.,

Mont Blanc massif) in 2015 cost EUR 150,000. The average cost of the maintenance work per hut in the summer season was in the range of EUR 1000–10,000 (E. Henry Amar, Communauté de Communes de la Vallée de Chamoni-Mont-Blanc (CCVCMB) trail maintenance service, personal communication 2015).

Discussion

The results of our research confirm and complement the research done by Ritter et al. (2012). While many types of geomorphological process (22 according to Ritter et al. 2012) can affect access routes to high mountain huts, the loss of ice thickness from glaciers and the retreat of the glacier fronts are the two main disruptive processes (80% (24) of the cases). Both gravitational processes associated with permafrost degradation and paraglacial processes arising from slope deglaciation affected less than one-third of the access routes included in the study: permafrost degradation affected 40% (12) cases; paraglacial processes affected 32% (10) cases.

Compared with other processes identified (Fig. 5A), the above-mentioned gravitational processes and paraglacial processes were more localised in time and space, and it was difficult to detect them and measure their effects on the access routes with precision. Moreover, the link between geomorphological processes and safety could not be fully established from our data set. Nevertheless, we can hypothesise that glacial shrinkage affected most of the access routes, which would thus signal a need for them to be adapted. The gravitational processes associated with permafrost degradation suggest that the safety levels of the routes deteriorated. While only a limited number of route modifications were made in response to the processes, the role such processes play in the deterioration of access routes' safety must not be underestimated.

In the future, climate change will continue to accelerate (Christidis et al. 2015), especially in mountain areas (IPCC 2019). Therefore, glacial shrinkage (Vincent et al. 2017) and associated paraglacial processes will continue (Zemp et al. 2006) along with permafrost degradation (Harris et al. 2001; Haeberli & Gruber 2009). It has been estimated that by 2040, 54–60% of the glaciated surfaces will no longer have ice (Huss 2012). We can postulate that the evolution of access routes in the Western Alps will continue and even intensify in the coming decades. Projects to modify the routes in order to maintain acceptable levels of safety and difficulty will have to be more frequent and extensive. However, the extent to which the routes can be modified will have to be addressed in the future.

Differences in funding and maintenance possibilities between massifs and between countries

The fact that adaptation and maintenance work on access routes in high mountain areas are not financed by the same entities from one country to another means there are different contexts of management and therefore different adaptation possibilities. Equipping and maintaining access routes to mountain huts in the present context of climate change is expensive. The costs are mainly due to the difficulty of reaching the affected areas; often helicopters are needed to transport equipment and workers. In addition, the ladders, cables, and other equipment used on the routes are expensive. It is therefore increasingly harder for small organisations to fund projects for the installation of equipment. The CCVCMB's annual maintenance budget for the access routes to its seven high mountain huts is approximately EUR 50,000. The costs are associated with hiring qualified workers (EUR 10,000–20,000), necessary equipment (e.g. ladders, nets, and handrails) (EUR 12,000), helicopter transportation (EUR 17,000), and technical equipment (e.g. harnesses, ropes and drills) (EUR 2000) (E. Henry Amar, CCVCMB trail maintenance service, personal communication 2015). It is important to note that although the CCVCMB can afford the investments, not all mountain municipalities have the same financial resources available for maintaining access routes to high mountain huts. The latter point is illustrated by the Conscrits hut case, for which European funds were necessary to finance the new access route.

Furthermore, in some areas of the Western Alps, environmental regulations limit the amount of work that can be done on access routes to high mountain huts. For example, the Mont Blanc massif is a protected site (*site classé*) where any infrastructure that could modify the state and/or appearance of the site is subject to legal authorisation. However, no specific authorisation is required if the activity and the equipment will only slightly modify the state and/or appearance of the site (Choay & Merlin 2005). Therefore, the equipment on access routes to mountain huts does not require legal authorisation unless the associated infrastructure required is particularly intrusive (e.g. a bridge). The current policy of the CCVCMB is to maintain and equip the access routes to huts in order to maintain acceptable safety conditions for mountaineers, without the use of major new infrastructure such as footbridges (E. Henry Amar, CCVCMB trail maintenance service, personal communication 2015).

Since 1991, all new infrastructure in Écrins National Park is subject to approval by the steering committee

of the Convention Alpinisme et Escalade (mountaineering and climbing convention) (Écrins National Park 2012). The objective of the convention is to limit infrastructure to certain popular areas. However, the convention has led to fierce debates between park managers, mountain guides, and hut keepers who have equipped routes without authorisation.⁴ Some parties do not agree on what is an acceptable level of infrastructure, and have divergent economic interests and different opinions on heritage and ethics, which have fuelled their debates (see note 3). The following questions have been raised in the debates: Should the use of fixed equipment be encouraged to maintain a strong economic activity, with the risk of damaging the environment? Does modifying the environment go against the principles of mountaineering? Are the access routes to mountain huts part of the mountain heritage that should be preserved? Thus, the extent of the adaptation solutions is called into question and as the rate of global warming accelerates, the question of up to what point will funding be made available to maintain the access routes will need to be addressed. We will address all of these issues in future studies.

The effectiveness and sustainability of adaptive strategies

In some cases, due to financial, ethical and legal constraints, adaptive strategies or high mountain access routes are organised differently and therefore present different levels of effectiveness and sustainability. Annual maintenance work is often essential to maintain access to a mountain hut with acceptable levels of safety and difficulty. However, it is expensive and not always a viable long-term solution when the effects of climate change on high mountain environments are taken into consideration (e.g. glacier retreat). As an example, the access route to the Mer de Glace Glacier (Mont Blanc massif) from the Montanvers railway station (located 4 km east of Chamonix) and hence to the five huts in this area of the Mont Blanc massif has been moved twice since 2000 and several metres of new ladders have been needed every year to compensate for the ice loss (Mourey & Ravel 2017). At the end of summer in 2018, there were 95 m of ladders in place compared with only 30 m in 2001.

As temperatures continue to rise, the front of the Mer de Glace Glacier is expected to retreat by c.1200 m by 2040 (Vincent et al. 2014). This would imply a reduction in thickness of 160 m compared with the 2010 level, which was 1649 m a.s.l: the section would require ladders c.250 m high and the surrounding area would be very dangerous for mountaineers (e.g. due to large

gravitational processes from the moraines). Therefore, even if access were maintained by annual work, the route would become more dangerous and more difficult, thus decreasing the effectiveness of the strategy. New major infrastructure, such as footbridges, might provide a long-term solution but would be limited by several factors: in the case of bridges, the local topography does not always allow for their installation, they are expensive, and they are difficult to justify in protected areas for ethical reasons. The CCVCMB has already considered the possibility of stopping all maintenance of access routes and dismantling existing infrastructure if it becomes too difficult to guarantee acceptable levels of safety and technical conditions (E. Henry Amar, CCVCMB, trail maintenance service, personal communication 2015). If that were to happen, it would be very hard to access the Mer de Glace and five huts would have to close.

The above-described example of the Mer de Glace Glacier suggests that current strategies are based on a reactive stance (Amelung & Nicholls 2014). Furthermore, they are possibly an inadequate response to climate change in a long-term perspective, since many local elements have to be taken into account in order to develop sustainable and effective strategies.

Vulnerability of high mountain based tourism compared with nature-based tourism

Many scholars have examined the specificities of mountain tourism (Nepal & Chipeniuk 2005) and the impacts of climate change on mountain outdoor recreation and tourism (for a review, see Hewer & Gough 2017). Our findings are consistent with those of previous international studies that focused on high altitude and high latitude activities, and from which the authors conclude that the effects of climate change lead to an increase in dangerous conditions to mountaineers, due to more intense and frequent climate-related processes (Purdie et al. 2015; Temme 2015; Pröbstl-Haider et al. 2016). As a result, the mountaineering season in the Western Alps is shortening and shifting toward spring by more than three or four weeks compared to in the 1980s (see note 3).

However, we note that in general the impacts of climate change on nature-based tourism (Peter 1992) do not correspond to mountaineering activity. Several studies have shown that global warming will have a positive effect on some types of nature-based tourism. For example, Jones & Scott (2006) predict an increase of more than 10–40% in visits to national parks in Canada by the end of the 21st century, due to increases in daily maximum temperatures. Additionally, Wall et al. (1986) predict that the length of the camping season in

eight of the Ontario's provincial parks will increase by 40 days by 2050. Similar positive effects are also expected in the European Alps, due to an increase in the number days with sunshine (Pröbstl-Haider et al. 2015). However, such findings are not relevant for high mountain activities, for which the season is shortening and periods of warm temperatures are leading to increasingly dangerous conditions for mountaineers. Therefore, it seems that high mountain activities are not subject to the same dynamics as nature-based tourism in general.

Conclusions

In broad terms, the results of our research add to the literature on the effects of climate change on mountain tourism and contribute to fill in the knowledge gap identified by several studies (Scott et al. 2012; Welling et al. 2015; Hewer & Gough 2017). This is mainly a consequence of our cross-area analysis of adaptation strategies applied to access routes to high mountains huts in the Western Alps. Our results should lead to a better understanding of how the effects of global warming may jeopardise accessibility to high mountain environments and more generally may jeopardise mountaineering activities. They should also contribute to shape transformation towards a more sustainable situation by increasing the awareness and the understanding of the issues reported in this article.

Of all of the effects of climate change on high mountain environments, the main processes affecting the access routes to high mountain huts in the Western Alps are the loss of ice thickness and the retreat of glacier fronts. Consequently, access routes are becoming more dangerous for mountaineers and therefore measures to restore acceptable safety conditions are needed. In general, the standard practice has been to install equipment and/or to relocate routes. It has been less common to install major infrastructure. In most cases, the modifications have been effective: they have allowed access to be maintained, improved safety, and made the routes less difficult to use to access the high mountain huts (e.g. the Bertol, Promontoire and Conscruts huts).

However, the development of adaptive strategies, usually based on a reactive stance, is variable and can be limited by the ethical, legal and especially financial issues that have to be taken into account by stakeholders. The strategies are costly and imply expensive maintenance works that are difficult for the entities in charge to afford (guide companies, alpine clubs and hut keepers), which usually have limited resources.

Moreover, climate change will continue to accelerate and degrade the high mountain environment.

Our conclusions and perspectives lead us to ask what the future might be for huts at high elevations and high altitudes, and more generally for the practice of mountaineering. Will the degradation of access routes cause a decrease in the number of hut visits and jeopardise the economic viability of those huts?

Notes

1. GLACIOCLIM programme, unpublished data, 2019
2. M. Bonnefoy-Demongeot and E. Thibert, unpublished data, 2019
3. Research report by L. Moreau, titled 'Glacier de Très la Tête (Massif du Mont-Blanc), Bilan de masse année 2015', prepared for ASTERS & Glaciolab.
4. Research report by P. Bourdeau, titled 'Effets du changement climatique sur l'alpinisme et nouvelles interactions avec la gestion des espaces protégés en haute montagne: Le cas du Parc National des Ecrins', prepared at the University of Grenoble for Ecrins National Park.

ORCID

Jacques Mourey  <http://orcid.org/0000-0002-3717-8553>

References

- Allen, S., Cox, S. & Owens, I. 2011. Rock avalanches and other landslides in the central Southern Alps of New Zealand: A regional study considering possible climate change impacts. *Landslides* 48, 8–33.
- Amelung, B. & Nicholls, S. 2014. Implications of climate change for tourism in Australia. *Tourism Management* 41, 228–244.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W. et al. 2007. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27, 17–46.
- Ballantyne, C.K. 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews* 21, 1935–2017.
- Behm, M., Raffener, G. & Schöner, W. 2006. *Auswirkungen der Klima- und Gletscheränderung auf den Alpinismus*. Vienna: Umweltdachverband.
- Beniston, M. 2005. Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics* 162, 1587–1606.
- Berthier, E. & Vincent, C. 2012. Relative contribution of surface mass-balanced and ice-flux changes to the accelerated thinning of Mer de Glace, French Alps, over 1979–2008. *Journal of Glaciology* 58, 501–512.
- Berthier, E., Vadon, H., Baratoux, D., Arnaud, Y., Vincent, C., Feigl, K.L., Remy, F. & Legrésy, B. 2005. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. *Remote Sensing of Environment* 95, 14–28.

- Bourdeau, P. 2007. *Territoires du hors-quotidien: une géographie culturelle du rapport à l'ailleurs dans les sociétés urbaines contemporaines; le cas du tourisme sportif de montagne et de nature*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00181668/document> (accessed October 2019).
- Choay, F. & Merlin, P. 2005. *Dictionnaire de l'aménagement et de l'urbanisme*. Paris: Presses Universitaires de France (PUF).
- Christidis, N., Jones, G.S. & Stott, P.A. 2015. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nature Climate Change* 5, 46–50.
- Church, M. & Ryder, J.M. 1972. Paraglacial sedimentation: A consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin* 83, 3059–3072.
- Deline, P., Gardent, M., Magnin, F. & Ravel, L. 2012. The morphodynamics of the Mont Blanc massif in a changing cryosphere: A comprehensive review. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94, 265–283.
- Deline, P., Gruber, S., Delaloye, R., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A. et al. 2015. Ice loss and slope stability in high-mountain regions. Haeberli, W. & Whiteman, C. (eds.) *Snow and Ice-related Hazards, Risks, and Disasters*, 522–563. Amsterdam: Elsevier.
- Draebing, D. & Eichel, J. 2018. Divergence, convergence, and path dependency of paraglacial adjustment of alpine lateral moraines slopes. *Land Degradation & Development* 29, 1979–1990.
- Duez, J.-B. 2009. The climber's tool. *Techniques et culture* 52–53. <https://journals.openedition.org/tc/4870> (accessed October 2019).
- Écrins National Park. 2012. *Convention relative à la pratique de l'alpinisme, de l'escalade et du canyionisme dans le Parc National des Ecrins. Convention 227/2012*. [Convention relative aux travaux d'équipement des falaises et des parois pour la pratique de l'escalade sportive et de l'escalade]. <http://www.ecrins-parcnational.fr/thematique/sports-de-nature> (accessed October 2019).
- Eichel, J., Draebing, D. & Meyer, N. 2018. From active to stable: Paraglacial transition of Alpine lateral moraine slopes. *Land Degradation & Development* 29, 4158–4172.
- Fischer, L., Käab, A., Huggel, C. & Noetzi, J. 2006. Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in high mountain rock wall: The Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 761–772.
- Fischer, L., Eisenbeiss, H., Käab, A., Huggel, C. & Haeberli, W. 2011. Monitoring topographic changes in a periglacial high-mountain face using high-resolution DTMs, Monte Rosa east face, Italian Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 22, 140–152.
- French, H.M. 2007. *Periglacial Environment*. 3rd ed. Chichester: John Wiley.
- Geertsema, M., Clague, J.J., Schwab, J.W. & Evans, S.G. 2006. An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology* 83, 120–143.
- Haeberli, W. & Gruber, S. 2009. Global warming and mountain permafrost. Margesin, R. (ed.) *Permafrost Soils*, 205–218. Berlin, Heidelberg.
- Harris, C., Davies, M.C. & Eitzelmüller, B. 2001. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes* 12, 145–156.
- Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Eitzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W. et al. 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92, 117–171.
- Hewer, M. & Gough, W. 2017. Thirty years of assessing the impacts of climate change on outdoor recreation and tourism in Canada. *Tourism Management Perspectives* 26, 179–192.
- Hoibian, O. 2008. *L'invention de l'alpinisme: la montagne et l'affirmation de la bourgeoisie cultivée, 1786–1914*. Paris: Belin.
- Hoibian, O. & Defrance, J. 2002. *Deux siècles d'alpinisme européens: Origines et mutations des activités de grimpe*. Paris: L'Harmattan.
- Huss, M. 2012. Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: The European Alps 1900–2100. *The Cryosphere* 6, 1117–1156.
- IPCC. 2019. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate: Summary for Policymakers*. https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_SPM_Approved.pdf (accessed October 2019).
- Jones, B. & Scott, D. 2006. Climate change, seasonality and visitation to Canada's national parks. *Journal of Park and Recreation Administration* 24, 42–62.
- Koenig, U. & Abegg, B. 2010. Impacts of climate change on winter tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism* 5, 46–58.
- Lukas, S., Graf, A., Coray, S. & Schlüchter, C. 2012. Genesis, stability and preservation potential of large lateral moraines of Alpine valley glaciers – toward a unifying based on Findelengletscher, Switzerland. *Quaternary Science Reviews* 38, 27–48.
- McCull, S.T. 2012. Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology* 16, 153–154.
- Modica, G. 2015. 1865 *L'âge d'or de l'alpinisme*. Chamonix: Guérin.
- Mourey, J. & Ravel, L. 2017. Evolution of access routes to high mountain refuges of the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif, France): An example of adapting to climate change effects in the Alpine high mountains. *Journal of Alpine Research* 105. doi:10.4000/rga.3790
- Mourey, J., Moret, O., Descamps, P. & Bozon, S. 2018. Accidentology on the normal route up to Mont Blanc between 1990 and 2017. [Accidentology studies download.] <https://www.petzl.com/fondation/projets/accidents-couloir-gouter?language=en> (accessed October 2019).
- Nepal, G. & Chipeniuk, N. 2005. Mountain tourism: Toward a conceptual framework. *Tourism Geographies* 7, 313–333.
- Peter, V. 1992. Review: Nature-based tourism. Better, W. & Michael, H. (eds.) *Special Interest Tourism*, 105–127. London: Belhaven Press.
- Pralong, A. & Funk M. 2006. On the instability of avalanching glaciers. *Journal of Glaciology* 52, 31–48.

- Pröbstl-Haider, U., Haider, W., Wirth, V. & Beardmore, B. 2015. Will climate change increase the attractiveness of summer destinations in the European Alps? A survey of German tourists. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 11, 44–57.
- Pröbstl-Haider, U., Dabrowska, K. & Haider, W. 2016. Risk perception and preferences of mountain tourists in light of glacial retreat and permafrost degradation in the Austrian Alps. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism* 13, 66–78.
- Purdie, H., Gomez, C. & Espiner, S. 2015. Glacier recession and the changing rockfall hazard: Implications for glacier tourism. *New Zealand Geographer* 71, 367–386.
- Rabatel, A., Letréguilly, A., Dedieu, J.P. & 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.
- Ravel, L. & Deline, P. 2011. Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc Massif) since the end of the 'Little Ice Age'. *The Holocene* 21, 357–365.
- Ravel, L. & Deline, P. 2015. Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by current atmospheric warming. *Engineering Geology for Society and Territory* 1, 425–428.
- Ravel, L., Deline, P., Lambiel, C. & Vincent C. 2013. Instability of a high alpine rock ridge: The lower Arête des Cosmiques, Mont Blanc Massif, France. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 95, 51–66.
- Ravel, L., Magnin, F. & Deline, P. 2017. Impacts of the 2003 and 2015 summer heat waves on permafrost-affected rockwalls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment* 609, 132–143.
- Ravel, L., Duvillard, P.A., Jaboyedoff, M. & Lambiel, C. 2018. Recents evolution of an ice-cored moraine at the Gentianes Pass, Valais Alps, Switzerland. *Land Degradation & Development* 29, 3693–3708.
- Ritter, F., Fiebig, M. & Muhar, A. 2012. Impacts of global warming on mountaineering: A classification of phenomena affecting the Alpine trail network. *Mountain Research and Development* 32, 4–15.
- 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.
- Scott, D. & McBoyle, G. 2007. Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change* 12, 1411–1431.
- Scott, D., Gössling, S. & Hall, C.M. 2012. International tourism and climate change. *Climate Change* 3, 213–232.
- Serquet, G. & Rebetz, M. 2011. Relationship between demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change* 108, 291–300.
- Temme, A.J.A.M. 2015. Using climber's guidebooks to assess rock fall patterns over large spatial and decadal temporal scales: An example from the Swiss Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 97, 793–807.
- Vincent, C. 2010. *L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins*. PhD thesis. Grenoble: Université Joseph-Fourier.
- Vincent, C., Harter, M., Gilbert, A., Berthier, E. & Six, D. 2014. Future fluctuations of Mer de Glace, French Alps, assessed using a parameterized model calibrated with past thickness changes. *Annals of Glaciology* 55, 15–24.
- Vincent, C., Fischer, A., Mayer, C., Bauder, A., Galos, S.P., Funk, M., Thibert, E., Six, D., Braun, L. & Huss, M. 2017. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years. *Geophysical Research Letters* 44, 1376–1383.
- Zemp, M., Haeberli, W., Hoelzle, M. & Paul, F. 2006. Alpine glaciers to disappear within decades? *Geophysical Research Letters* 33 (13). doi:10.1029/2006GL026319
- Wall, G., Harrison, R., Kinnaird, V., Mc Boyle, G. & Quinlan, C. 1986. The implications of climate change for camping in Ontario. *Journal Recreation Research Review* 13, 50–60.
- Welling, J., Arnason, P. & Olafsdottir, R. 2015. Glacier tourism: A scoping review. *Tourism Geographies* 17, 635–662.

4.2. Article 2 – Fiche synoptique

Evolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France).

Un exemple d'adaptation aux effets du changement climatique en haute montagne alpine

Evolution of access routes to high mountain refuges of the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif, France).

An example of adapting to climate change effects in alpine high mountains

Mourey J.¹ et Ravanel L.¹, 2017. *Revue de géographie alpine/Journal of Alpine Research*

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

Objectifs de la recherche

- Reconstituer et expliquer l'évolution des accès aux cinq refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc) et sa relation avec les effets du changement climatique.
- Identifier les stratégies d'adaptation mises en place pour maintenir l'accessibilité des refuges.

Problématique

- Quels sont les processus géomorphologiques liés au changement climatique qui affectent les itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace et leurs conditions de fréquentation depuis le début du XX^e siècle ?
- Comment les itinéraires sont-ils adaptés pour maintenir l'accessibilité des refuges ?

Méthodologie

- Étude détaillée des différents itinéraires par :
 - comparaison diachronique de cartes, de topo-guides et de photographies ;
 - conduite d'entretiens semi-directifs ;
 - analyse de modèles numériques de terrains à haute résolution acquis par balayage laser terrestre.

Principaux résultats

- Mise en évidence d'une évolution de plus en plus rapide des itinéraires d'accès aux refuges en lien avec l'accélération de la perte d'épaisseur de la Mer de Glace.
- Les itinéraires ont tendances à devenir plus difficiles techniquement et plus dangereux, notamment en raison des processus liés à l'érosion des moraines latérales (chutes de pierres, glissements de terrain).

- Entre 2001 et 2016, 411 m de dénivellation d'échelles ont été ajoutés ; la plus faible dénivellation d'échelles pour atteindre un refuge s'élève à 160 m en 2016.
- Bien que les itinéraires soient adaptés presque chaque année pour maintenir l'accès aux refuges, leur fréquentation par des randonneurs diminue et les sorties collectives encadrées par des guides de haute montagne ne sont plus réalisées, les accès étant devenus trop difficiles et trop longs à parcourir.

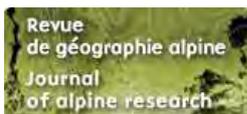
Rôle des auteurs

- J. Mourey : conception et réalisation de l'étude dans son ensemble, analyse et discussion des données, rédaction de l'article.
- L. Ravanel (co-encadrant de thèse) : participation à la conception de l'étude et aux mesures de terrain, mise en contact avec les acteurs de la vallée de Chamonix, aide à la discussion des résultats et à la rédaction de l'article.

Abstract (full article available in english on JAR website)

Glacial shrinkage and the gravitational processes associated with it, which are characteristic of global warming effects in high mountain environments, are affecting mountaineering routes more and more, including access routes to high altitude refuges. These changes have almost never been studied. Also, this research seeks to identify and explain the evolution of access trails to five refuges, located in the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif), over more than a century. This glacier is the largest in France (L = 11.5 km, S = 30 km²) is a major Alpine tourist attraction since 1741 and is the birthplace of mountaineering. This work is based on a three-step methodology: 1) collection and analysis of maps, climbing guidebooks and photographs, 2) semi-structured interviews and 3) analysis of high-resolution digital terrain models obtained through terrestrial laser scanning. While there was no significant evolution during most of the 20th century, glacier thickness loss and the associated erosion of lateral moraines have resulted in numerous modifications made to the access trails since the 1990s. Despite these adaptations, the danger they pose continues to rise, and the necessity to equip them is ever more important (633 m of ladders at present), which raises doubts about the future accessibility of such high mountain refuges.

Keywords: mountaineering, glacial shrinkage, paraglacial processes, high mountains, Mont Blanc massif



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine

105-4 | 2017
Varia 2017

Un exemple d'adaptation aux effets du changement climatique en haute montagne alpine

Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France)

Jacques Mourey et Ludovic Ravanel



Éditeur

Association pour la diffusion de la recherche alpine

Édition électronique

URL : <http://rga.revues.org/3780>
ISSN : 1760-7426

Référence électronique

Jacques Mourey et Ludovic Ravanel, « Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France) », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 105-4 | 2017, mis en ligne le 28 juin 2017, consulté le 09 juillet 2017. URL : <http://rga.revues.org/3780>

Ce document a été généré automatiquement le 9 juillet 2017.



La *Revue de Géographie Alpine* est mise à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Un exemple d'adaptation aux effets du changement climatique en haute montagne alpine

Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France)

Jacques Mourey et Ludovic Ravel

Les auteurs remercient la Compagnie du Mont-Blanc et Chamonix Mont Blanc Hélicoptères pour avoir facilité l'accès au site d'étude. Cet article constitue une contribution aux projets européens ALCOTRA PrévRisk Haute Montagne et AdaPT Mont Blanc.

Introduction

- 1 Le réchauffement climatique affecte l'essentiel du Globe avec une hausse de la température moyenne mondiale de 0,85°C entre 1880 et 2012 (IPCC, 2014), mais les régions de haute altitude et de haute latitude de l'hémisphère nord se réchauffent plus rapidement encore (Beniston et Haeberli, 2001 ; Beniston, 2005). Sur l'ensemble de l'arc alpin, les séries de températures homogénéisées attestent ainsi d'un réchauffement de 2°C entre la fin du XIX^e et le début du XXI^e siècle (Auer *et al.*, 2007), avec une accélération sur les dernières décennies. L'altitude moyenne de l'isotherme 0°C s'est ainsi élevée de près de 400 m depuis le début des années 1980 (Böhm *et al.*, 2010). Dans les Alpes françaises, le réchauffement est compris entre 1,5°C et 2,1°C depuis 1950 (Einhorn *et al.*, 2015). Au-dessus de 4 000 m d'altitude, les températures moyennes annuelles auraient augmenté de 1,4°C entre 1900 et 2004 (Gilbert et Vincent, 2013).
- 2 Dans ce contexte, la haute montagne alpine est l'objet de profondes modifications dont le très visible retrait glaciaire et la dégradation du permafrost (réchauffement des terrains gelés en permanence ; Deline *et al.*, 2015). Les surfaces englacées des Alpes ont diminué de moitié entre 1900 et 2012 avec une forte accélération de la fonte depuis les années 1980

(Huss, 2012) tandis que l'on observe une recrudescence d'écroulements dans les parois rocheuses (Geertsema *et al.*, 2006 ; Ravel et Deline, 2011 ; Ravel *et al.*, 2013). Dans le massif du Mont-Blanc, plus de 550 écroulements ($V > 100 \text{ m}^3$) se sont ainsi produits entre 2007 et 2015 (Ravel et Deline, 2013).

- 3 Ces modifications affectent les sociétés humaines au contact de ces milieux. Cependant, bien que de nombreuses études aient été réalisées sur les effets du changement climatique sur les sociétés (IPCC, 2014, Frei *et al.*, 2007) et leurs stratégies d'adaptation (Adger *et al.*, 2003 ; Füssel, 2007 ; Tabeaud, 2010), très peu de travaux se sont intéressés à la question spécifique des effets du changement climatique sur l'alpinisme en dehors de Behm *et al.* (2006), de Ritter *et al.* (2011) ou de Temme (2015) par exemple, alors même que cette pratique constitue un patrimoine emblématique des régions de haute montagne et une activité économique non négligeable. Le projet EU Alcotra « Éco-innovation en altitude » a par exemple montré que 81 % des gardiens de refuge de la région du Mont Blanc signalent un changement des conditions de sécurité de leur itinéraire d'accès sur la dernière décennie et, dans 96 % des cas, une modification du cheminement a été nécessaire (Piccardi *et al.*, 2014 ; Vuilleumier, 2014).
- 4 De nombreuses questions restent ainsi en suspens. Comment et à quel point les itinéraires sont-ils affectés par le changement climatique ? Quels sont les processus géomorphologiques à l'œuvre ? Quels sont les effets de ces évolutions sur la pratique de l'alpinisme ? Quelles sont les modalités d'adaptation en cours ? La mise en place d'un pont himalayen d'une longueur de 240 m pour maintenir l'accès au refuge de la Panossière (Valais, Suisse) suite à la perte d'épaisseur du glacier de la Corbassière pour un coût de 400 000 CHF et l'installation d'une passerelle de 60 m pour maintenir l'accès au refuge des Conscrits dans le massif du Mont Blanc (Piccardi *et al.*, 2014) pour un coût de 130 000 € constituent des exemples symboliques d'adaptation.
- 5 Pour comprendre comment les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne peuvent être affectés par l'évolution des milieux, notre recherche a reconstitué l'évolution des itinéraires donnant accès aux cinq refuges du bassin de la Mer de Glace depuis le début du XX^e siècle à partir d'un travail géo-historique, d'entretiens semi-directifs et de levés LiDAR (*Light Detection and Ranging*) à haute résolution (Jaboyedoff *et al.*, 2010), permettant de discuter les modalités d'évolution géomorphologique et d'adaptation des itinéraires. Le concept de crise paraglaciale au sens de Church et Ryder (1972) et les pratiques de haute montagne comme activités sportives faisant l'objet d'une gestion spécifique seront par ailleurs discutés.

Le bassin de la Mer de Glace, haut lieu de l'alpinisme

- 6 La Mer de Glace (Fig. 1) est le plus grand glacier des Alpes françaises ($L = 11,5 \text{ km}$, $S = 30,4 \text{ km}^2$) et l'un des plus étudiés. Les premières mesures ont été réalisées par J. Vallot dès les années 1890.
- 7 Après la dernière récurrence du Petit Âge Glaciaire (1852), le glacier accuse un retrait très marqué : son front a reculé de plus de 2,7 km. Cependant, ce retrait n'est pas linéaire et a été interrompu par trois petites crues : 1890-1896, 1923-1931 et 1970-1995 (Reynaud et Vincent, 2000, Nussbaumer *et al.*, 2007). Depuis 1995, le retrait s'accélère nettement avec des valeurs de retrait de -40 m/an environ (Vincent, 2010). Dans le même temps, la perte d'épaisseur est également conséquente : entre 1890 et 2013, vers 1 800 m d'altitude, en

aval du site touristique du Montanvers, la perte d'épaisseur de glace atteint 166 m (données GLACIOCLIM ; lgge.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/), pour une perte moyenne annuelle de 4.0 ± 0.2 m entre 2000 et 2008 (Berthier et Vincent, 2012). Cette évolution est susceptible d'entraîner toute une série de processus géomorphologiques dangereux : les moraines latérales ne sont plus maintenues contre les versants et se dégradent progressivement par éboulisation, éboulements, écroulements et glissements (Deline, 2008).

- 8 Le bassin de la Mer de Glace constitue un berceau et un haut lieu de l'alpinisme. On y trouve un ensemble de sommets et de parois mythiques tels que la face nord des Grandes Jorasses (4208 m) – une des trois « grandes faces nord des Alpes » –, l'Aiguille Verte (4122 m) – dont la première ascension en 1865 par Edward Whymper et ses deux guides est une des « grandes premières » commémorées en 2015 à l'occasion des *150 ans de l'Âge d'or de l'Alpinisme* – et la face ouest des Drus (3754 m) – face *quasi* verticale d'une hauteur de 1000 m. Autour de la Mer de Glace. La fréquence croissante des ascensions s'est traduite par la construction entre 1904 et 1957 de cinq refuges (Fig. 1) : la Charpoua (2841 m, 1904), le Couvercle (2687 m, 1904), Leschaux (2431 m, 1929), le Requin (2523 m, 1927) et l'Envers des Aiguilles (2523 m, 1957). Ils bénéficient d'une accessibilité facilitée par le train du Montanvers, qui atteint 1913 m d'altitude. Leur fréquentation est importante avec un total de plus de 6000 nuitées en 2015 (donnée FFCAM/ADSM). Entre 1992 et 2003, un sentier aménagé reliant les cinq refuges a été tracé (les *Balcons de la Mer de Glace*), ouvrant le secteur aux randonneurs expérimentés qui représentent actuellement une part significative de la fréquentation.
- 9 Cette importante fréquentation du bassin de la Mer de Glace représente un enjeu sportif, touristique et économique de taille, menacé par les effets du réchauffement climatique.

Figure 1. Carte de localisation des cinq refuges du bassin de la Mer de Glace



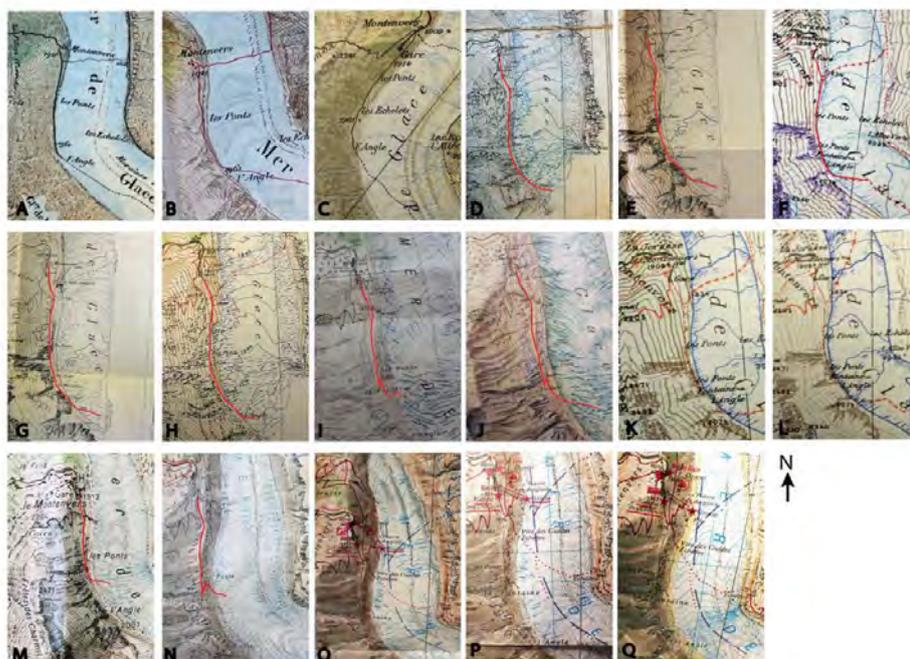
A : Glacier d'Envers du Plan ; B : Glacier du Requin ; C : Glacier d'Envers de Blaitière.

Réalisation : Mourey, 2017. Fond : IGN.

Méthodologie géo-historique

- 10 Une méthodologie en trois étapes, fondée sur une documentation multi-sources, a été mise en place pour quantifier l'évolution des accès aux refuges.
- 11 Dans un premier temps, de nombreux documents (cartes topographiques, topo-guides et photographies) ont été collectés pour la période 1850-2014 auprès du Musée Alpin de Chamonix (cartes et topo-guides), de l'École Nationale de Ski et d'Alpinisme (cartes et topo-guides) et des archives municipales de Chamonix (photographies). Les cartes ont fait l'objet d'une première analyse diachronique permettant de dater les principales évolutions (Fig. 2).

Figure 2. Cartes du secteur du Montanvers avec l'itinéraire de descente sur la Mer de Glace en direction des refuges de haute montagne



A) Mieulet 1865, 1 :40 000 ; B) Viollet le Duc 1876, 1 :40 000 ; C) Barbey 1906, 1 :50 000 ; D) Vallot 1907, 1 :50 000 ; E) Vallot 1931, 1 :20 000 ; F) Vallot 1943, 1 :50 000 ; G) Vallot 1945, 1 :20 000 ; H) Vallot 1946, 1 :20 000 ; I) IGN 1949, 1 :20 000 ; J) IGN 1950, 1 :10 000 ; K) Vallot 1956, 1 :50 000 ; L) Vallot 1960, 1 :50 000 ; M) IGN 1960, 1 :50 000 ; N) IGN 1975, 1 :20 000 ; O) IGN 1995, 1 :25 000 ; P) IGN 2001, 1 :25 000 ; Q) IGN 2011, 1 :25 000.

MONTAGE : MOUREY, 2017.

- 12 Afin de confronter les représentations cartographiques des itinéraires à une source de données permettant de mieux préciser leur évolution dans le temps et dans l'espace, les itinéraires cartographiés ont été comparés à ceux décrits dans les publications successives du *Guide Vallot : La chaîne du Mont-Blanc* (1925, 1947, 1949, 1951, 1966, 1975, 1977) et du *Guide de la chaîne du Mont-Blanc*, (Kurtz 1892, 1935). Enfin, un corpus de 1 573 photographies a permis d'apporter des précisions et de lever les éventuelles incertitudes.
- 13 Dans un deuxième temps, une série d'entretiens semi-directifs a été réalisée auprès de 14 guides de haute montagne, gardiens de refuges, employés du Service des Pistes et Sentiers de Chamonix et élus de la commune de Chamonix Mont-Blanc. Ils ont souvent permis d'obtenir davantage de détails (dates, informations de terrain) depuis les années 1950. Ces entretiens ont aussi permis de développer la question de la fréquentation de ces refuges et de son évolution en lien avec les modifications successives des itinéraires.
- 14 Dans un dernier temps, les transitions glacier-versant ont fait l'objet de levés topographiques par balayage laser terrestre en 2016. La construction de modèles numériques de terrain à haute résolution (Ravel et Lambiel, 2013) a permis la mesure précise des équipements en place.

Résultats : des bouleversements généralement récents

- 15 Trois périodes distinctes se dessinent dans l'évolution des itinéraires entre la fin du XIX^e siècle et la période actuelle. Afin d'illustrer et de faciliter l'analyse des résultats et la discussion, deux exemples seront développés en particulier : les accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers et au refuge du Requin.
- 16 De la fin du XIX^e siècle aux années 1960, les itinéraires évoluent peu et très progressivement (Fig. 3A) : l'activité géomorphologique est réduite et n'affecte que marginalement les itinéraires qui évitent le plus possible le glacier qui, en cette période, est très crevassé. Les sentiers sont tracés sur les versants et les moraines latérales du glacier ; les conditions géomorphologiques y sont relativement stables et permettent d'évoluer en sécurité. Plusieurs itinéraires pouvaient être utilisés pour une même destination en fonction des conditions, de la saison et de la pratique.
- 17 L'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers n'a ainsi que très peu évolué entre 1900 et les années 1960. Le sentier était tracé sur ou à proximité de la crête de la moraine latérale gauche du glacier sur 1,5 km avant de descendre vers le glacier au lieu-dit « l'Angle » (Fig. bA). Ce premier passage sera abandonné dans les années 1940, la descente de la moraine devenant plus difficile et dangereuse, au profit du passage « des Ponts » aménagé en 1945 (Fig. 3A).
- 18 Sur cette première période, le refuge du Requin était accessible par trois itinéraires distincts tracés sur le sommet des moraines latérales du glacier du Tacul. Ils donnaient accès au refuge par le sud ou par le nord (Fig. 3A).
- 19 La seconde période commence avec les années 1960 (Fig. 3A). La perte d'épaisseur des glaciers (Reynaud et Vincent, 2000 ; Gardent *et al.*, 2014) et le déséquilibre corrélatif des moraines latérales commencent à affecter fortement les itinéraires : des dalles rocheuses raides affleurent en aval de chaque refuge tandis que la fragilisation des moraines se traduit par une fréquence élevée de déstabilisations rocheuses. Les itinéraires, et plus particulièrement les transitions glacier-versant, deviennent plus dangereux et difficiles techniquement.
- 20 Afin de maintenir l'accès aux refuges dans des conditions de technicité et de dangerosité acceptables, ces transitions sont régulièrement déplacées là où le substratum rocheux affleure (Fig. 3A). Cette manœuvre permet d'éviter les dangers liés à l'érosion des moraines mais nécessite d'installer des échelles pour franchir les dalles rocheuses. Dès lors, l'objectif est de prendre pied le plus rapidement possible sur le glacier, qui par ailleurs est de moins en moins crevassé (réduction des épaisseurs et des vitesses du glacier), afin d'éviter les marges glaciaires.
- 21 Sur cette période, l'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers a nécessité des travaux d'entretien et d'aménagement réguliers (1960, 1971 et 1972 ; Fig. 3A) qui font suite à la perte d'épaisseur du glacier de 32 m entre 1940 et 1980 (données GLACIOCLIM) et à l'érosion de la moraine. Ainsi, en 1960 et 1971, plusieurs mètres d'échelles sont installés et le sentier dans la moraine doit être refait. En 1972, des blocs instables sont minés, 39 m de rampes et 25 pitons sont mis en place, des marches sont taillées dans le substratum rocheux et le sentier dans la moraine est réaménagé. Ce passage par les Ponts sera moins fréquenté à partir des années 1970, au profit du passage par la Vire de Guides qui était

déjà en partie utilisé dès les années 1950 (Fig. 3A). L'abandon définitif du passage des Ponts fait suite à un écroulement de la moraine sur le sentier dans le secteur de la Fontaine en 1988.

- 22 Face à la perte d'épaisseur du glacier du Tacul et à l'érosion de ses moraines latérales, les 3 itinéraires historiques d'accès au refuge du Requin ne sont plus parcourus dès les années 1970. Il faut désormais remonter le glacier du Tacul en son centre pour éviter les moraines devenues instables puis remonter le glacier d'Envers de Blaitière en rive droite pour atteindre le refuge par le nord. Cet accès est relativement dangereux : la crue glaciaire des années 1970-80 provoque des chutes de blocs de glace depuis le front des glaciers de l'Envers du Plan et du Requin. La perte d'épaisseur du glacier du Tacul et le retrait du front du glacier d'Envers de Blaitière sur trois décennies entraînent une intense érosion des moraines.
- 23 La troisième période débute au milieu des années 1990 (Fig. 3A). L'accélération de la perte d'épaisseur des glaciers (Berthier et Vincent, 2012 ; Berthier *et al.*, 2014) provoque des affleurements rocheux toujours plus conséquents et raides et libèrent de plus en plus de plaquages morainiques suspendus et instables (Requin, Envers des Aiguilles, Montenvers ; Fig. 4). Dans le même temps, les moraines latérales sont devenues plus hautes et plus raides. Les tronçons d'échelles ont alors régulièrement été déplacés et/ou rallongés (Fig. 3A ; Tab. 1).
- 24 Au début du xx^e siècle, aucune échelle n'était nécessaire pour accéder aux refuges. En 2016, les six secteurs de transition glacier-versant sont équipés d'échelles sur une dénivellation totale de 633 m, dont un ajout de 411 m entre 2001 et 2016 (Tab. 1). Le tronçon le plus haut est celui du refuge du Requin avec des échelles sur une dénivellation de 154 m.

Tableau 1. Hauteur cumulée (en m) d'échelles pour chaque refuge en 2001, 2014, 2015 et 2016, ajouts entre chaque date et ajouts moyens (en m/an) entre 2001 et 2016

	2001	2014	2015	2016		2001-14	2014-15	2015-16		2001-16
Montenvers	30	74,3	81,3	94,8		+44,3	+7	+13,5		+4
Charpoua	0	19	100	100		+19	+81	+0		+6,2
Egralets	44	64,5	64,5	64,5		+20,5	+0	+0		+1,3
Leschaux	20	65	70	100		+45	+5	+30		+5
Requin	75	149,5	151,5	154,3		+74,5	+2	+2,8		+5
Envers des Aiguilles	53	113	116	119		+60	+3	+3		+4
Totaux	222	485,3	583,3	632,6		+263,3	+98	+49,3		+25,7

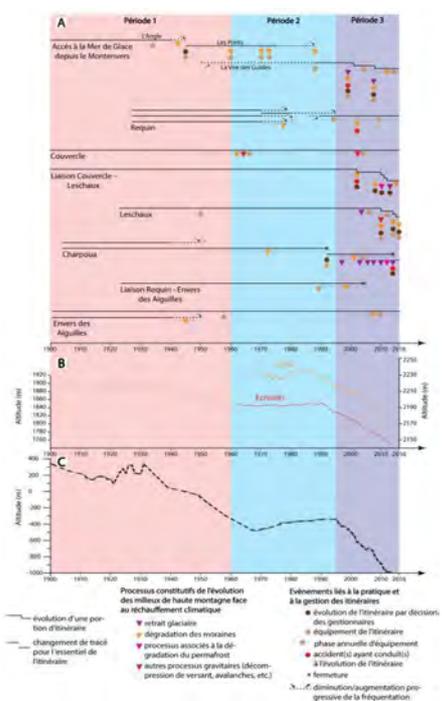
Réalisation : Mourey, 2017.

- 25 Sur cette dernière période, l'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers s'effectue toujours par la Vire des Guide (Fig. 3A). Cependant, le glacier ayant perdu 98 m d'épaisseur entre 1988 et 2013 (données GLACIOCLIM), le cheminement est par deux fois déplacé et des ajouts annuels d'échelles ont été nécessaires. En effet, s'il n'y avait aucune échelle en 1988, une dénivellation de 30 m d'échelles devait être franchie en 2001 pour atteindre le sommet d'une moraine qu'il fallait ensuite désescalader pour atteindre la surface du glacier. Ce cheminement a été modifié une première fois en 2001. L'érosion de la moraine ayant entraîné un accident mortel suite à une chute de pierres, le sentier a été déplacé de quelques mètres vers des dalles rocheuses qui permettaient de prendre pied

directement sur le glacier tout en évitant la partie morainique, devenue particulièrement dangereuse. Mais, progressivement, la perte d'épaisseur du glacier et la dégradation des moraines qui en résulte ont conduit à une multiplication des échelles (sur une hauteur de 50 m en 2008) jusqu'à un secteur à pente forte. L'itinéraire a de nouveau été déplacé en 2008. À partir de la Vire de Guide, il chemine sur 150 m vers le sud pour atteindre un secteur où assez peu d'échelles sont nécessaires pour rejoindre la moraine qui, en cet endroit, permet un accès facile au glacier. Ce passage est encore utilisé aujourd'hui. Équipé d'échelles sur une dénivellation de 30 m en 2008, il y en a 65 m en 2016 (Fig. 4). Du côté du glacier, la moraine tend à devenir de plus en plus raide et exposée à différents processus gravitaires. Plusieurs glissements de terrain se sont produits directement sur de la glace enfouie (en juin 2016 par exemple) et des ravines de profondeur métrique à pluri-métrique se sont creusées. Les alpinistes sont fortement exposés à des risques liés à ces processus, augmentant considérablement l'engagement et la dangerosité du passage.

- 26 Pour le Requin, l'accès par le nord, utilisé pendant les années 1970-80, a progressivement été abandonné à la fin des années 1980 – début des années 1990, les chutes de blocs issus du front des glaciers et l'érosion des moraines latérales des glaciers du Tacul et de l'Envers de Blaitière se poursuivant (Fig. 3A). Progressivement, c'est à nouveau l'itinéraire par le sud qui est utilisé et rééquipé. En 1999, un premier tronçon d'échelles d'une dénivellation de 75 m et 40 m de corde fixe permettaient d'accéder au refuge depuis le glacier. En 2002, un important glissement de la moraine latérale gauche du glacier du Tacul a fait plusieurs blessés et a contraint à l'équipement d'un deuxième tronçon (Fig. 4). Il sera rééquipé presque tous les ans pour compenser la perte d'épaisseur du glacier du Tacul. En 2016, ce deuxième tronçon est haut de 79 m (Fig. 4).

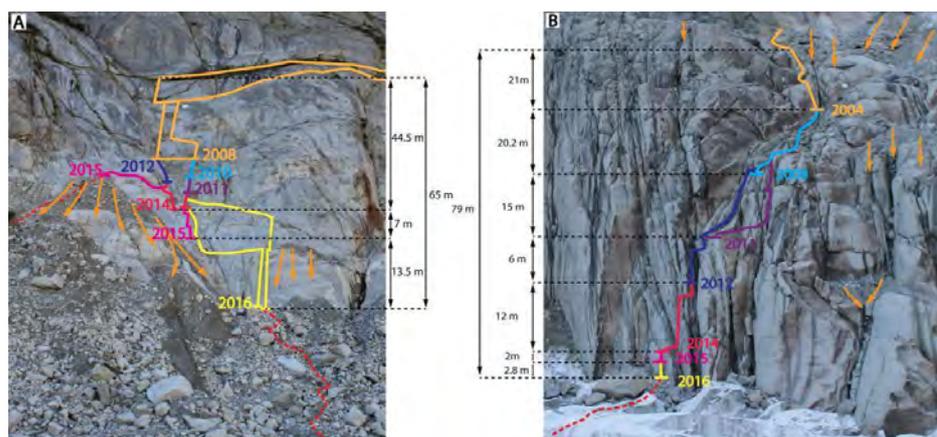
Figure 3. Historique des itinéraires



A : Évolution des itinéraires d'accès aux refuges ; B : Variations d'épaisseur de glace au niveau du profil des Échelets et de celui du Tacul (données GLACIOCLIM) ; C : Evolution du front de la Mer de Glace (données GLACIOCLIM).

Réalisation : Mourey, 2017.

Figure 4. Ajouts successifs d'échelles pour les transitions glacier-versant du Montenvers et du Requin (2^e tronçon)



Dates : position du pied des échelles pour les années en question. Flèches : trajectoires principales des chutes de pierres issues des moraines et placages morainiques.

Réalisation : Mourey, 2017.

- 27 Sur les 8 itinéraires étudiés, tous ont été affectés par la perte d'épaisseur des glaciers et l'érosion associée des moraines latérales. Cependant, d'autres processus ont pu conduire des itinéraires à évoluer, comme des écroulements, liés ou non à la dégradation du

permafrost (Magnin *et al.*, 2015). Les cas de la liaison entre le refuge du Couvercle et celui de Leschaux et l'accès au refuge de la Charpoua (Fig. 3) peuvent être cités.

- 28 Enfin, il importe de noter un cas de fermeture définitive d'itinéraire en 2004 pour la liaison entre les refuges du Requin et de l'Envers des Aiguilles qui fait suite à la perte d'épaisseur du glacier du Tacul, à l'érosion de sa moraine latérale gauche et à la difficulté de trouver un nouveau passage dans ce secteur.

Des aménagements rendus nécessaires par le retrait glaciaire et la crise paraglaciale associée

- 29 En l'absence de permafrost stabilisateur à ces altitudes relativement basses (Magnin *et al.*, 2015), le retrait de la masse de glace entraîne à lui seul une perte d'effet de butée ainsi qu'une décompression des moraines latérales du glacier (Lukas *et al.*, 2012 ; Ravelin et Lambiel, 2013). Les matériaux de la partie supérieure du versant interne de la moraine vont alors être mobilisés et généralement redéposés à son pied pour former un talus morainique plus ou moins instable dans le temps jusqu'à ce que le profil de la moraine atteigne un stade d'équilibre (Lukas *et al.*, 2012) en l'absence définitive de glace. L'érosion des moraines latérales laisse régulièrement apparaître des dalles rocheuses raides tandis que des plaquages morainiques suspendus peuvent persister.
- 30 Les principaux processus géomorphologiques à l'origine de l'évolution des itinéraires s'inscrivent ainsi dans la double dynamique de retrait glaciaire et de crise « paraglaciale » associée (Church et Ryder, 1972 ; Mercier, 2011). Le concept de paraglaciale, tel que défini par C. K. Ballantyne (2002), désigne « les processus non glaciaires à la surface de la terre (...) qui sont directement conditionnés par les glaciations et les déglaciations » (Ballantyne, 2002). Aussi, une séquence paraglaciale débute en réaction directe à la déglaciation et s'achève lorsque l'ensemble des sédiments glaciaires hérités sont épuisés ou stabilisés (Ballantyne, 2002).
- 31 Entre 1900 et 1940, la fonte du glacier est relativement réduite et l'évolution des itinéraires limitée, en lien avec une activité géomorphologique réduite (Fig. 3) et une fréquentation plus faible qu'aujourd'hui.
- 32 En revanche, entre 1931 et les années 1960, le glacier enregistre un retrait important : son front se retire sur près de 600 m pour une perte d'épaisseur de 70 m au niveau du Montenvers (profil des Échelets ; Fig. 3B, 3C). Cette fonte explique la seconde période d'évolution des itinéraires où des équipements et des modifications de tracés sont plus fréquents tandis que la dangerosité des itinéraires augmente en réaction à la perte d'épaisseur du glacier, à l'érosion de ses moraines latérales et, par suite, l'affleurement de dalles rocheuses. Le décalage temporel entre la fonte du glacier et les effets sur les itinéraires correspond à un temps de réponse géomorphologique et de prise en compte de ces changements par les gestionnaires des sentiers (*cf.* : *infra*).
- 33 Ensuite, la crue du glacier entre 1970 et 1995 n'ayant pas permis d'effacer les déséquilibres des versants engendrés par son retrait au cours des trois décennies précédentes, l'évolution des itinéraires s'intensifie avec la troisième période. Les modifications des itinéraires se font plus fréquentes et importantes en lien avec une dynamique de retrait qui se poursuit et s'accélère (Fig. 3B, 3C) et dont les effets sur les marges glaciaires s'accumulent depuis les années 1930. Entre 1995 et 2013, le glacier a subi un retrait de 700 m pour une perte d'épaisseur de 65 m au niveau du Montenvers, ce

qui explique l'importance et la fréquence des installations d'échelles permettant de maintenir les accès.

- 34 Les ajouts d'échelles sont toutefois moins importants pour les transitions les plus hautes en altitude : entre 2014 et 2016, 20,5 m d'échelles ont été ajoutés sous le Montenvers (1791 m) contre 6 m pour l'Envers des Aiguilles (1920 m), 0 m pour les Égralets (2167 m), et 4,8 m pour le Requin (2240 m). La topographie locale et la présence/absence d'une moraine latérale sont d'autres facteurs qui contribuent à expliquer ces différences.
- 35 Finalement, la déglaciation est puissamment en cours depuis les années 1990 (Fig. 3) et laisse chaque année apparaître de nouveaux stocks sédimentaires (tills), ce qui suggère que la séquence « paraglaciale » va se poursuivre pendant au moins plusieurs décennies encore. Cela implique que l'ensemble des processus qui affectent les itinéraires, notamment l'érosion des moraines, vont se poursuivre, voire s'intensifier d'autant que le retrait glaciaire s'accélère : le front de la Mer de Glace devrait se retirer sur près de 1 200 m d'ici 2040 (Vincent *et al.*, 2014), ce qui correspond à la fonte totale du glacier au niveau des échelles du Montenvers, soit une perte d'épaisseur supplémentaire d'environ 160 m par rapport à 2010. Le tronçon en question atteindrait alors une dénivellation d'environ 250 m et de très hautes et dangereuses moraines latérales pourraient continuer à se développer et à se déstabiliser, compliquant encore la gestion des itinéraires.

Gestion des équipements et politiques d'aménagement des itinéraires

- 36 Des années 1990 à aujourd'hui (Période 3), l'évolution de plus en plus marquée et rapide des itinéraires est aussi le résultat du développement d'une offre touristique spécifique.
- 37 En effet, à la fin des années 1980, la mairie de Chamonix a lancé le projet des *Balcons de la Mer de Glace* dont l'objectif était de créer un itinéraire accessible aux randonneurs reliant l'ensemble des refuges du bassin de la Mer de Glace afin de dynamiser leur fréquentation (comm. pers. Communauté de Commune de la Vallée de Chamonix Mont Blanc, CCVCMB, mars 2015). Il en résulte que des itinéraires peuvent être modifiés sans lien direct avec l'évolution des conditions géomorphologiques afin de rendre le cheminement plus aisé. La modification de 1992 de l'accès au refuge de la Charpoua (Fig. 3) correspond par exemple à l'ouverture d'un tronçon permettant de rallier le refuge de la Charpoua depuis le Montenvers, puis le refuge du Couvercle, alors que rien n'avait été fait pour l'ancien accès alors qu'il était considéré comme dangereux depuis le milieu des années 1960. C'est pour cette même raison de développement touristique que les liaisons Requin-Envers des Aiguilles et Couvercle-Leschaux ont été aménagées et équipées, respectivement en 1990 et 2003.
- 38 Par ailleurs, la création en 2000 du Service des Pistes et Sentiers de la Ville de Chamonix n'est pas étrangère à l'évolution rapide des itinéraires sur la période récente puisqu'il est chargé de la gestion et de l'entretien des sentiers d'altitude. Sa responsabilité peut dès lors être engagée en cas d'accident. Cela explique (i) que l'entretien et l'aménagement des sentiers soient assurés plus régulièrement qu'auparavant et (ii) qu'un seul itinéraire d'accès soit retenu et entretenu pour chacun des refuges.
- 39 Depuis la création du service, la CCVCMB garde la même politique quant à l'adaptation des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne : ils sont entretenus et équipés pour maintenir leur accès dans des conditions de sécurité acceptables pour les alpinistes

sans recourir à des aménagements trop importants de type passerelles et filets (comm. pers. CCVCMB, mars 2015). Ce choix est dicté par des arguments éthiques (préservation du caractère sauvage du site) et juridiques (Site Classé où tout aménagement lourd modifiant l'état ou l'aspect des lieux est soumis à autorisation ministérielle ou préfectorale ; Choay et Merlin, 2005). Cependant, notre étude a montré que l'érosion des moraines et la perte d'épaisseur des glaciers rendaient les itinéraires de plus en plus dangereux et exposés, ce qui nécessite en retour des équipements toujours plus importants. La CCVCMB s'est interrogée sur l'éventualité de bloquer toute activité d'équipement et sur celle de démonter les équipements en place, si les conditions de maintien de la sécurité devenaient trop contraignantes. Cette éventualité remettrait en cause une très large part de la fréquentation du bassin de la Mer de Glace, pour les alpinistes et plus encore pour les randonneurs.

- 40 La question d'équiper les tronçons d'échelles en *via-ferrata* (avec ligne de vie) s'est également posée pour améliorer la sécurité et les rendre plus attractifs mais les exigences de sécurité seraient difficilement atteignables dans un contexte de haute montagne, en sus de questions éthiques et de représentations différentes en fonction des acteurs de la haute montagne (guides, gardiens, alpinistes, décideurs et associations de protection de l'environnement). Ces conflits d'acteurs renvoient à des questions de représentations sociales de la montagne et de la pratique de l'alpinisme (Piccardi *et al.*, 2014). Faut-il favoriser au maximum les équipements pour maintenir une activité économique forte, au risque de dénaturer l'environnement de pratique ? Cependant, n'est-ce pas l'un des fondements de l'alpinisme que de s'adapter au terrain ? Par ailleurs, ces itinéraires n'ont-ils pas également une valeur patrimoniale qui justifierait leur entretien ?

Quelle fréquentation des refuges ?

- 41 En lien avec l'évolution géomorphologique du bassin de la Mer de Glace et les difficultés d'adaptation et de gestion des itinéraires au niveau des transitions glacier-versant, se pose la question de l'évolution de la fréquentation des refuges, d'un point de vue à la fois quantitatif et qualitatif. La source la plus exhaustive de données correspond aux bilans de fréquentation des refuges (nombre de nuitées par saison estivale) mais outre le fait que les données sont extrêmement parcellaires, une baisse du nombre de nuitées ne peut pas être directement imputée à l'évolution de l'itinéraire d'accès ; de nombreuses autres raisons (météorologie, évolution socio-culturelle, etc.) pouvant être proposées. De plus, le nombre de nuitées ne donne aucune information qualitative. Aussi, le choix a été fait de baser cette analyse uniquement sur les résultats qualitatifs des entretiens semi-directifs menés avec les gardiens de refuges des années 1990-2000 et les employés du service Pistes et Sentiers de la CCVCMB.
- 42 D'après les personnes interrogées, l'ouverture des *Balcons de la Mer de Glace* a permis d'ouvrir les refuges aux randonneurs et de redynamiser une fréquentation qui tendait à diminuer. Les gardiens actuels confirment que la fréquentation par les randonneurs est aujourd'hui relativement importante, avec un pic entre le 15 juillet et le 15 août qui permet de compenser la réduction d'activité observée lorsque les conditions sont moins propices à la pratique de l'alpinisme, souvent en raison d'étés de plus en plus chauds (Seneviratne *et al.*, 2014).
- 43 Cependant, l'évolution récente des transitions glacier-versant rend la fréquentation plus délicate pour les randonneurs et l'utilisation de techniques d'alpinisme tend à devenir

nécessaire. Ainsi peut-on émettre l'hypothèse que les randonneurs vont progressivement abandonner le bassin au fur et à mesure de son évolution future. La fréquentation globale du secteur pourrait alors diminuer significativement, avec un impact économique fort pour les gardiens de refuges, les guides et la FFCAM. D'après les gardiens, les alpinistes sont moins affectés, leurs notions de prise de risque et d'engagement ainsi que leurs compétences techniques étant différentes.

Conclusions

- 44 L'évolution des milieux de haute montagne en lien avec le réchauffement climatique affecte de plus en plus durement les itinéraires d'accès au glacier et aux cinq refuges du bassin de la Mer de Glace. Ce travail, axé sur l'évolution de la haute montagne face au changement climatique mais intégrant une forte composante historique et sociale, montre que l'évolution des itinéraires est directement conditionnée par la dynamique de retrait du glacier (évolution paraglaciale). Ainsi, à partir des années 1960, et plus encore à partir des années 1990, la perte d'épaisseur du glacier et la dégradation corrélative de ses moraines latérales implique des modifications de tracé et la mise en place d'équipements de plus en plus régulières. Entre 2001 et 2016, des échelles sur une dénivellation de 411 m ont été ajoutées pour un total de 633 m à la fin de l'été 2016. De plus, les transitions glacier-versant tendent à être de plus en plus engagées, techniquement difficiles et dangereuses.
- 45 Ce travail intègre par ailleurs une forte composante patrimoniale dans le sens où tout un pan de l'histoire de l'alpinisme dans le secteur du Mont Blanc, berceau et haut lieu de l'alpinisme, a été reconstitué.
- 46 Enfin, les perspectives d'évolution géomorphologique du bassin étudié révèlent les limites de ces adaptations et posent la question de la gestion future des itinéraires et donc de la fréquentation à venir des refuges. Jusqu'à quel point sera-t-il possible de les équiper tout en maintenant des conditions de sécurité et de technicité acceptables ? C'est donc une partie de la pratique de la haute montagne et de son économie dans le bassin de la Mer de Glace qui pourrait être mise en péril. L'évolution des milieux de haute montagne ne risque-t-elle pas d'accélérer un déclin de l'alpinisme « classique » déjà – semble-t-il – enclenché (Weiss, 2011) ?

BIBLIOGRAPHIE

- Adger W.N., Huq S., Brown K., Conway D., Hulme M., 2003.- « Adaptation to climate change in the developing world », in *Progress in development studies*, 3-3, p. 179-195.
- 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 », in *International Journal of Climatology*, 27-1, p. 17-46.

- Ballantyne C.K., 2002.- « Paraglacial geomorphology », in *Quaternary Science Reviews*, 21-18, p. 1 935-2 017.
- Behm M., Raffeiner G., Schöner W., 2006.- *Auswirkungen der Klima-und Gletscheränderung auf den Alpinismus*, Umweltdachverband, Vienne, p. 99.
- Beniston M., 2005.- « Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps », in *Pure and Applied Geophysics*, 162, p. 1587-1606.
- Beniston M., Haeberli W., 2001.- « Sensitivity of mountain regions to climatic change », in *Climate of the 21st century: changes and risks*, GEO Publications, Hambourg, p. 237-244.
- Berthier E., Vincent C., Magnússon E., Gunnlaugsson Á., Pitte P., Le Meur E., Masiokas M., Ruiz L., Pálsson F., Belart J.M.C. et Wagnon P., 2014.- « Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images », in *The Cryosphere*, 8-6, p. 2275-2291.
- Berthier E., Vincent C., 2012.- « Relative contribution of surface mass-balance and ice-flux changes to the accelerated thinning of Mer de Glace, French Alps, over 1979-2008 », in *Journal of Glaciology*, 58-209, p. 501-512.
- Böhm R., Jones P.D., Hiebl J., Frank D., Brunetti M., Maugeri M., 2010.- « The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760-2007 », in *Climatic Change*, 101, 1-2, p. 41-67.
- Choay F., Merlin P., 2005.- « Dictionnaire de l'aménagement et de l'urbanisme », PUF, p. 964.
- Church M., Ryder J.M., 1972.- « Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation », in *Geological Society of America Bulletin*, 83-10, p. 3059-3072.
- Deline P., 2008.- « Les changements climatiques et la dynamique paraglaciale dans le massif du Mont-Blanc », in *Bulletin de l'Association de géographes français*, 85-2, p. 153-160.
- Deline P., Gruber S., Delaloye R., Fischer L., Geertsema M., Giardino M., Hasler A., Kirkbride M., Krautblatter M., Magnin F. et al., 2015.- « Ice loss and slope stability in high-mountain regions », in Haeberli W., Whiteman C. et Shroder J.F. (eds.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, Elsevier Science, Saint-Louis, p. 521-561.
- Einhorn B., Eckert N., Chaix C., Ravanel L., Deline P., Gardent M., Boudières V., Richard D., Vengeon J.-M., Giraud G., Schoeneich P., 2015.- « Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes. Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques », in *Journal of Alpine Research/Revue de géographie alpine*, 103-2, consulté le 22 octobre 2016, <https://rga.revues.org/2829>.
- Frei C., Calanca P., Schär C., Wanner H., Schädler B., Häberli W., Appenzeller C., Neu U., Thalmann E., Ritz C., others, 2007.- « Les changements climatiques et la Suisse en 2050 : Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie », Organe consultatif sur les changements climatiques, Forum for Climate and Global Change, p. 172.
- Füssel H.-M., 2007.- « Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons », in *Sustainability Science*, 2-2, p. 265-275.
- 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 », in *Global and Planetary Change*, 120, p. 24-37.
- Geertsema M., Clague J.J., Schwab J.W., Evans S.G., 2006.- « An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada », in *Engineering Geology*, 83-1, p. 120-143.

- Gilbert A., Vincent C., 2013.- « Atmospheric temperature changes over the 20th century at very high elevations in the European Alps from englacial temperatures », in *Geophysical Research Letters*, 40-10, p. 2 102-2 108.
- Huss M., 2012.- « Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: the European Alps 1900-2100 », in *The Cryosphere*, 6, p. 1 117-1 156.
- IPCC [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., et al.], 2014.- *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge-New York.
- Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abellan A., Derron M.-H., Loye A., Metzger R., Pedrazzini A., 2010.- « Use of LIDAR in landslide investigations: a review », in *Natural hazards*, 61, p. 5-28.
- Lukas S., Graf A., Coray S., Schlüchter C., 2012.- « Genesis, stability and preservation potential of large lateral moraines of Alpine valley glaciers: towards a unifying theory based on Findelengletscher, Switzerland », in *Quaternary Science Reviews*, 38, p. 27-48.
- Magnin F., Brenning A., Bodin X., Deline P., Ravanel L., 2015.- « Statistical modelling of rock wall permafrost distribution: application to the Mont Blanc massif », in *Géomorphologie*, 21(2), p. 145-162.
- Mercier D., 2011.- « La géomorphologie paraglaciale : Changements climatiques, fonte des glaciers et crises érosives associées », Editions universitaires européennes, p. 264.
- Nussbaumer S.U., Zumbühl H.J., Steiner D., 2007.- « Fluctuations of the « Mer de Glace » (Mont Blanc area, France) AD 1500-2050: an interdisciplinary approach using new historical data and neural network simulations », in *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 40, p. 177.
- Piccardi M., Tonetti R., Théodule A., Curtaz M., Spitz C., Huguet N., Louvier D., 2014.- « Fiches techniques opérationnelles », in *Projet Eco-Innovation en Altitude*, Espace Mont-Blanc, p. 87.
- Ravanel L., Deline P., 2011.- « Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the “Little Ice Age” », in *The Holocene*, 21-2, p. 357-365.
- Ravanel L., Deline P., 2013.- « A network of observers in the Mont Blanc massif to study rockfalls in high alpine rockwalls », in *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 36, p. 151.
- Ravanel L., Deline P., Lambiel C., Vincent C., 2013.- « Instability of a high alpine rock ridge: The lower Arête des Cosmiques, Mont Blanc Massif, France », in *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95-1, p. 51-66.
- Ravanel L., Lambiel C., 2013.- « Évolution récente de la moraine des Gentianes (2 894 m, Valais, Suisse) : un cas de réajustement paraglaciale ? », in *Environnements périglaciaires*, 18-19, p. 8.
- Reynaud L., Vincent C., 2000.- « Relevés de fluctuations sur quelques glaciers des Alpes françaises », in *La Houille Blanche*, 5, p. 79-86.
- Ritter F., Fiebig M., Muhar A., 2011.- « Impacts of global warming on mountaineering: A classification of phenomena affecting the alpine trail network », in *Mountain Research and Development*, 32, p. 4-15.
- Seneviratne S., Donat M., Mueller B., Alexander L., 2014.- « No pause in the increase of hot temperatures extremes », in *Nature Climate Change*, 4-3, p. 161-163.

Tabeaud M., 2010.- « Les adaptations au changement climatique ou la re-découverte des acteurs et des territoires », in *Quaderni. Communication, technologies, pouvoir*, 71, p. 7-25.

Temme A.J.A.M., 2015.- « Using Climber's Guidebooks to Assess Rock Fall Patterns Over Large Spatial and Decadal Temporal Scales: An Example from the Swiss Alps », in *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97-4, p. 793-807.

Vincent C., Harter M., Gilbert A., Berthier E., Six D., 2014.- « Future fluctuations of Mer de Glace, French Alps, assessed using a parameterized model calibrated with past thickness changes », in *Annals of Glaciology*, 55-66, p. 15-24.

Vincent C., 2010.- « L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins », Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier Grenoble-1, p. 212.

Vuilleumier R., 2014.- « Guide de bonnes pratiques pour une gestion durable des cabanes et refuges d'altitude », in *Projet Eco-Innovation en Altitude*, Espace Mont-Blanc, p. 28.

Weiss J., 2011.- « Le réchauffement climatique implique-t-il une évolution des pratiques alpines ? », in *Les Actes des Assises de l'alpinisme et des activités de montagne*, Observatoire des pratiques de la montagne et de l'alpinisme, p. 140.

RÉSUMÉS

Le retrait glaciaire et les processus gravitaires associés, caractéristiques de l'évolution des milieux de haute montagne induite par le réchauffement climatique, affectent de plus en plus fortement les itinéraires d'alpinisme dont les sentiers d'accès aux refuges de haute altitude. Alors que ces changements n'ont quasiment fait l'objet d'aucune étude, cette recherche tente de caractériser et d'expliquer l'évolution sur un peu plus d'un siècle des accès aux cinq refuges situés autour de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc), le plus grand glacier français (L = 11,5 km, S = 30 km²), haut lieu du tourisme alpin depuis 1741 et berceau de l'alpinisme. Ce travail repose sur une méthodologie en 3 étapes : 1) récolte et analyse de cartes, de topo-guides et de photographies, 2) conduite d'entretiens semi-directifs et 3) analyse de modèles numériques de terrain à haute résolution acquis par balayage laser terrestre. Si l'essentiel du ^{xx}e siècle ne présente pas d'évolution marquée, la perte d'épaisseur du glacier et la dégradation associée des moraines latérales ont donné lieu à de nombreuses modifications des itinéraires à partir des années 1990. Malgré ces adaptations, leur dangerosité s'accroît et la nécessité de les équiper est sans cesse plus importante (633 m d'échelles actuellement), remettant en question l'accessibilité future des refuges.

Glacial shrinkage and the gravitational processes associated with it, which are characteristic of global warming effects in high mountain environments, are affecting mountaineering routes more and more, including access routes to high altitude refuges. These changes have almost never been studied. Also, this research seeks to identify and explain the evolution of access trails to five refuges, located in the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif), over more than a century. This glacier is the largest in France (L = 11.5 km, SA = 30 km²) is a major Alpine tourist attraction since 1741 and is the birthplace of mountaineering. This work is based on a three-step methodology: 1) collection and analysis of maps, climbing guidebooks and photographs, 2) semi-structured interviews and 3) analysis of high-resolution digital terrain models obtained through terrestrial laser scanning.

While there was not a significant evolution during most of the 20th century, glacier thickness loss and the associated erosion of lateral moraines have resulted in numerous modifications made to the access trails since the 1990s. Despite these adaptations, the danger they pose continues to

rise, and the necessity to equip them is ever more important (633 m. of ladders at present), which raises doubts about the future accessibility of such high mountain refuges.

INDEX

Mots-clés : alpinisme, retrait glaciaire, processus paraglaciales, haute montagne, massif du Mont Blanc

Keywords : mountaineering, glacial shrinkage, paraglacial processes, high mountains, Mont Blanc massif

AUTEURS

JACQUES MOUREY

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie Mont Blanc - CNRS, Chambéry, France.
jacques.mourey@univ-smb.fr

LUDOVIC RAVANEL

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie Mont Blanc - CNRS, Chambéry, France.

4.2.1. Mise à jour des résultats présentés dans l'Article 2 et outils d'aide à la décision pour la CCVCMB

Cette section propose une mise à jour des résultats de l'Article 2 pour les étés 2017 et 2018, avec la même méthodologie que celle publiée. Ensuite, nous présenterons l'utilisation possible de ces résultats comme outil d'aide à la décision pour le gestionnaire des accès (CCVCMB).

Encadré 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles et du calcul des dénivellations à franchir pour atteindre un refuge

À la fin du PAG, le niveau des langues glaciaires, et notamment de la Mer de Glace était beaucoup plus élevé qu'aujourd'hui. Ainsi, aucune échelle n'était nécessaire pour atteindre les refuges (Fig. 4.1.A). Au fur et à mesure de la fonte des glaciers et donc de l'abaissement de leur surface, de nombreuses échelles ont été ajoutées pour maintenir l'accessibilité des refuges (Fig. 4.1.B). Dans ce travail, nous avons considéré les hauteurs d'échelles ajoutées sur chaque transition versant-glaciers pour chacun des itinéraires.

A. Fin du PAG

Montenvers
(1913 m)

Refuge

Mer de Glace

B. Années 2000

Montenvers
(1913 m)

Refuge

Mer de Glace

Figure 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles sur les itinéraires d'accès aux refuges dans le bassin de la Mer de Glace

Pour connaître la dénivellation totale des échelles à franchir pour atteindre un refuge, il faut additionner (i) la dénivellation h pour l'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers et (ii) la dénivellation h' de la deuxième transition permettant de passer de la surface du glacier au versant pour rejoindre l'un des refuges (Fig. 4.1.B). Par exemple, pour atteindre le refuge de la Charpoua, il faut descendre 95 m (h) d'échelles pour atteindre le glacier depuis le Montenvers puis en escalader 104 m (h') pour remonter le versant avant de rejoindre le refuge (Tab. 4.1).

4.2.1.1. Mise à jour des résultats pour les étés 2017 et 2018

Au cours des étés 2017 et 2018, l'évolution des itinéraires s'est poursuivie sur une dynamique similaire à la troisième période mise en évidence et décrite dans l'article. La fonte de la Mer de Glace s'est poursuivie au cours des étés 2017 et 2018 : elle a perdu respectivement 4 et 0,5 m d'épaisseur au niveau du Montenvers (données GlacioClim). Il en résulte que les hauteurs d'échelles ont continué d'augmenter avec un ajout de 15,7 m en 2017 puis 6 m en 2018 pour l'ensemble du bassin de la Mer de Glace (Tab. 4.1).

	Dénivellation cumulées (en m) d'échelles par secteur						Dénivellation ajoutée par secteur					Ajout moyen par année
	2001	2014	2015	2016	2017	2018	2001-14	2014-15	2015-16	2016-17	2017-18	2001-18
Montenvers	30	74,3	81,3	94,8	95	95	+44,3	+7	+13,5	+0,2	+0	+4
Charpoua	0	19	100	100	102	104	+19	+81	+0	+1,5	+2,1	+6
Egralets	44	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	+20,5	+0	+0	+0	+0	+1,3
Leschaux	20	65	70	100	103	104	+45	+5	+30	+3	+1	+5
Requin	75	149,5	152	154	155	158	+74,5	+2	+2,8	+1	+2,9	+5
Envers des Aiguilles	53	113	116	119	129	60	+60	+3	+3	+10	+0	+4
Totaux	222	485,3	583	633	648,3	585,3	+263,3	+98	+49,3	+15,7	+6	+25

Tableau 4.1. Dénivellations cumulées (en m) d'échelles par secteur, ajout moyen annuel par secteur entre 2001 et 2018 et ajout moyen par année entre 2001 et 2018.

Les quantités d'échelles installées sont moins importantes sur les deux dernières années (Tab. 4.1). C'est principalement lié au fait qu'en 2015, un nouvel itinéraire avait été équipé pour l'accès au refuge de la Charpoua avec un ajout de 81 m de dénivellation d'échelles par rapport à l'itinéraire précédant et, en 2016, un nouvel itinéraire avait été équipé pour l'accès au refuge de Leschaux avec un ajout de 30 m d'échelle par rapport à l'itinéraire précédent. À l'inverse, en 2017, il n'y a pas eu d'équipement de nouvel itinéraire. En 2018, il y a par contre eu l'aménagement d'un nouvel itinéraire pour accéder au refuge de l'Envers (Fig. 4.3) qui a permis de réduire la hauteur d'échelles par rapport à l'itinéraire précédant. En 2017 et 2018, la nécessité d'équiper les itinéraires au fur et à mesure de la fonte du glacier s'est toutefois poursuivie (Fig. 4.3). En 2017, l'ajout principal de 10 m a été effectué sur l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles suite à un important glissement de terrain qui s'est produit au niveau de la moraine latérale de la Mer de Glace (Fig. 4.2), au pied des échelles. Le secteur était alors particulièrement exposé aux chutes de pierres et de blocs. Cet itinéraire a été abandonné à la fin de l'été 2018 et une nouvelle transition glacier-versant a été équipée en juillet 2018. La hauteur d'échelle y est moins importante (60 m) et le talus morainique au pied des échelles y est peu raide (25°).

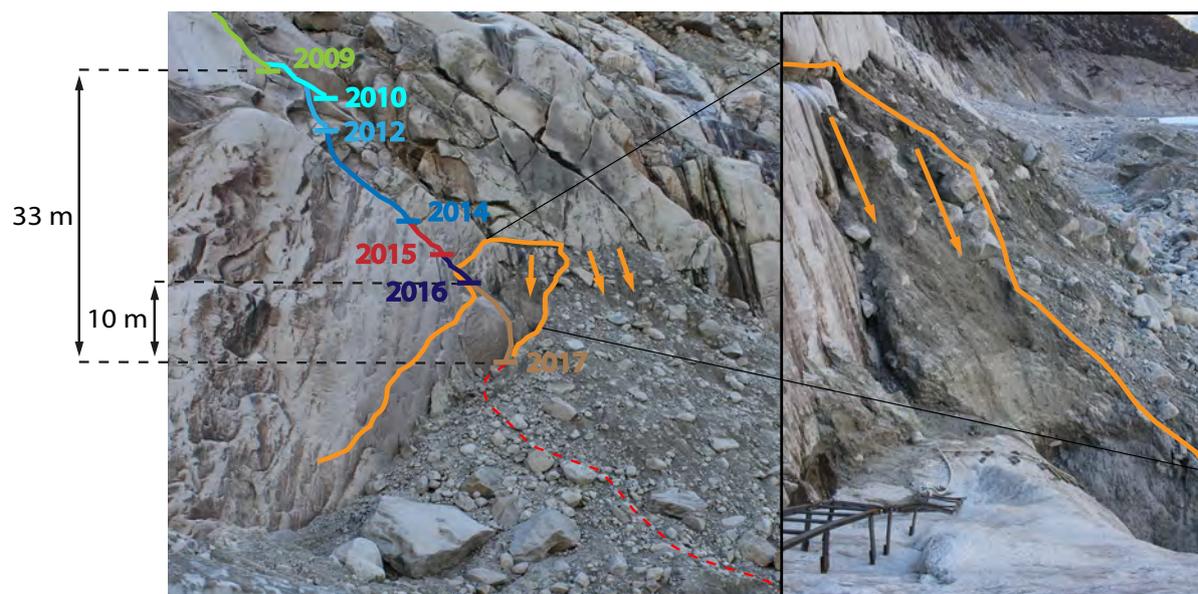


Figure 4.2. Évolution de la transition glacier-versant pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles. Le secteur glissé/affaissé apparaît en orange. Dates : position du pied des échelles pour les années en question. Flèches : trajectoires principales des chutes de pierres issues de la moraine.

Seul l'accès au refuge du Couvercle *via* les Égralets n'a pas nécessité de nouvel équipement. Cependant, la moraine au pied des échelles est de plus en plus raide au fur et à mesure de la fonte du glacier de Leschaux. À la fin de l'été 2018, la pente était de 38°, ce qui implique un risque important de glissements de terrain et de chutes de blocs, désormais considéré comme trop élevé. À partir de l'été 2019, l'accès officiel au refuge du Couvercle se fera en utilisant une portion du nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua (*cf.* : Fig. 1 de l'Article 2). Les échelles des Égralets seront maintenues si une évolution favorable de la moraine est observée, ou retirées (comm. orale E. Henry-Aymar, Service des Pistes et Sentiers de la CCVCMB, 26/02/2019).

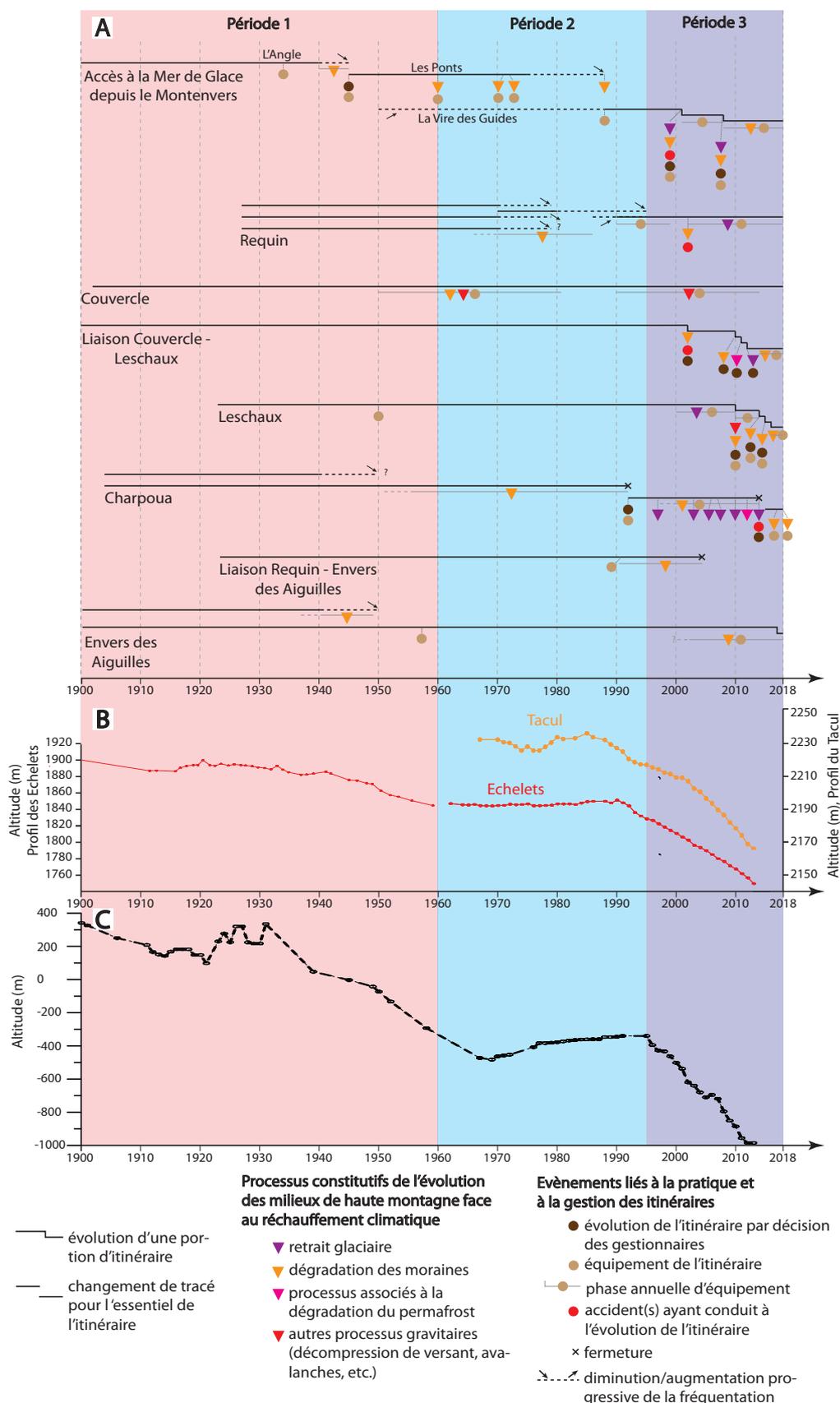


Figure 4.3. Historique des itinéraires entre le début du XX^e siècle et la fin de l'été 2018. A : Évolution des itinéraires d'accès aux refuges ; B : variations de l'altitude de la surface du glacier au niveau du profil des Échelets et du Tacul (données GLACIOCLIM) ; C : évolution du front de la Mer de Glace (données GLACIOCLIM).

À la fin de l'été 2018, il y avait 585 m de dénivellation d'échelles pour un ajout de 22 m entre le début de l'été 2017 et la fin de l'été 2018. Pour atteindre n'importe lequel des refuges, il est nécessaire de franchir au minimum 155 m de dénivellation d'échelles (descente sur le glacier depuis le Montenvers - 95 m - et montée au refuge de l'Envers des Aiguilles - 60 m). Le tronçon le plus important reste celui du Requin avec 158 m de dénivellation d'échelles. Au regard des différentes évolutions, l'accroissement de la technicité et de la dangerosité des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace est donc toujours en cours.

4.2.1.2. Aide à la décision pour la CCVCMB

L'ensemble des résultats présentés ci-dessus et dans l'Article 2 a été utilisé pour accompagner le Service des Pistes et Sentiers de la CCVCMB dans l'aménagement et l'entretien des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace. En 2014 tout d'abord, suite aux nombreuses chutes de séracs issues du front du glacier de la Charpoua, la CCVCMB sollicite une première fois L. Ravel afin de les aider à trouver un nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua. La principale difficulté fut de trouver un secteur où la transition glacier-versant soit propice à l'aménagement d'un itinéraire et qui reste le plus longtemps possible dans des conditions de technicité et de dangerosité acceptable (Annexe 4.1). Ensuite, au début de l'été 2018, il a été décidé de déplacer l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles afin d'éviter un cheminement sous des blocs manifestement rendus instables en raison de l'abaissement de la surface du glacier. Enfin, à l'automne 2018, l'ensemble du travail réalisé dans le bassin de la Mer de Glace a fait l'objet d'une synthèse à destination de la CCVCMB, gestionnaires des accès, avec un avis sur l'évolution de chaque accès à court et moyen terme. Sur la base de cette expertise, une partie de l'itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua deviendra dès l'été 2019 l'accès officiel au refuge du Couvercle en raison de l'évolution de la moraine dans le secteur des Égralets. Aussi, les connaissances acquises grâce à nos travaux permettent à la CCVCMB de mieux appréhender les enjeux notamment de sécurité liés aux refuges du bassin de la Mer de Glace et de prendre les mesures nécessaires pour les maintenir dans des conditions de danger acceptables.

Conclusion du Chapitre 4

Les résultats développés dans les deux articles sont tout à fait concordants et se complètent, sur des échelles spatiales et temporelles différentes. Bien que les effets du changement climatique soient en cours depuis la fin du PAG, ils n'ont des impacts significatifs sur les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne qu'à partir des années 1990. Dans les Alpes occidentales, les principaux processus géomorphologiques et glaciologiques qui les affectent sont la fonte des glaciers (retrait de leurs fronts et perte d'épaisseur de glace – 80 % des cas étudiés), les processus liés à la dégradation du permafrost (écroulements, éboulements et chutes de pierres – 40 % des cas) et les processus paraglaciers dont l'érosion des moraines latérales principalement (32 %). Une différence d'altitude dans les processus qui affectent les accès est importante à préciser : les accès aux refuges situés les plus bas (autour de 2800 m) sont principalement affectés par le retrait glaciaire et les processus paraglaciers concomitants alors que les accès aux refuges les plus élevés en altitude (autour de

3110 m) sont principalement affectés par les processus liés à la dégradation du permafrost. Il en résulte que l'ensemble de ces accès doit être adapté de plus en plus fréquemment. Ces adaptations se traduisent par des équipements, des déplacements de tout ou partie des itinéraires ou l'installation d'infrastructures d'ampleur comme des passerelles (Fig. 4.4).



Figure 4.4. Passerelle de Corbassière (longueur : 290 m ; hauteur : 70 m) pour l'accès au refuge de Panossière (Valais, Suisse). Coût : 400 000 CHF. (ph. coll@Hoffmann, 2014).

Selon les deux articles constitutifs de ce chapitre, les stratégies d'adaptation remplissent jusqu'à présent leur rôle principal en maintenant les refuges accessibles dans des conditions de technicité et de sécurité acceptables. Cependant, ces stratégies peuvent être limitées dans leur mise en place en fonction notamment des réglementations en vigueur d'un pays et d'un massif à un autre et elles n'ont pas toujours la même efficacité. En effet, bien que les accès soient adaptés, la fréquentation de certains refuges diminue, l'accès devenant tout de même trop long ou trop difficile techniquement pour une part de la clientèle. Le recours à des chercheurs pour identifier des solutions d'adaptation et les demandes de financements externes sont des indicateurs des difficultés auxquelles font face les acteurs en charge de l'aménagement des accès aux refuges de haute montagne. Par exemple, la CCVCMB s'est déjà questionnée sur la possibilité de ne plus aménager les accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace, rattrapée par des questions financières et juridiques.

L'analyse des modalités d'adaptations des accès identifiées dans ce travail et plus largement à travers l'ensemble du projet ALCOTRA *Éco-Innovation en Altitude*, contribue au développement d'un savoir et d'une expertise spécifique sur le sujet qui ont été formalisés par la FMs sous la forme de « fiches techniques opérationnelles » (Annexe 4.2). Elles sont disponibles librement sur le site de l'*Espace Mont Blanc* (<http://www.espace-mont-blanc.com/refuges-et-cabanes>) et ont été utilisées à l'occasion de formations dispensées aux gardiens de refuges sur les risques liés au changement climatique, dans le cadre du projet ALCOTRA *PrévRisk Haute Montagne*.

Chapitre 5. Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation

Dans ce cinquième chapitre, nous traiterons de l'évolution des itinéraires d'alpinisme proprement dits avec des objectifs assez proches de ceux du Chapitre 4 : identifier les processus géomorphologiques et glaciologiques qui affectent les itinéraires pour ensuite évaluer les impacts de ces processus sur leurs conditions de fréquentation. Nous nous intéresserons au massif du Mont Blanc qui, bien que très fréquenté par les alpinistes, n'avait fait l'objet d'aucune étude à ce sujet. Nous retracerons l'évolution des itinéraires décrits dans le topo-guide emblématique de Gaston Rébuffat, *Le massif du Mont-Blanc, les 100 plus belles courses*, édité en 1973. Les résultats de cette étude sont présentés dans l'Article 3 : « Effects of climate change on high Alpine mountain environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century », accepté en mars 2019 pour la revue *Arctic, Antarctic and Alpine Research*.

Dans une deuxième section de chapitre, une étude en cours sur la voie normale d'ascension du mont Blanc sera présentée. Son objectif est de mieux identifier les facteurs géomorphologiques et météorologiques qui contrôlent l'occurrence des chutes de pierres, très intenses sur cet itinéraire particulièrement fréquenté.

5.1. Article 3 – Fiche synoptique

Effects of climate change on high Alpine mountain environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century.

Effets du changement climatique en haute montagne alpine : évolution des voies d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc (Alpes Occidentales) sur un demi-siècle

Mourey J.¹, Marcuzzi M.², Ravanel L.¹, Pallandre F.³, 2019. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*

¹ Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

² Univ. Grenoble Alpes, Institut de Géographie Alpine, CNRS, PACTE, 38041 Grenoble, France

³ École Nationale des Sports de Montagne / École Nationale de Ski et d'Alpinisme, F-74400 Chamonix

Objectifs de la recherche

- Identifier les phénomènes géomorphologiques et cryosphériques qui affectent les itinéraires d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc.
- Evaluer à quels points et selon quelles modalités ces phénomènes modifient les itinéraires et leurs conditions de fréquentation.

Problématique

- Quels sont les phénomènes liés au changement climatique qui affectent les itinéraires d'alpinisme et modifient leurs conditions de fréquentation depuis les années 1970 dans le massif du Mont Blanc ?

Méthodologie

- Entretiens semi-directifs et comparaison de topo-guides.

Principaux résultats

- 25 phénomènes géomorphologique et cryosphériques affectent les itinéraires d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc ; le désenglacement du substratum rocheux (85 itinéraires affectés), des rimayes et des crevasses plus ouvertes (78) et l'augmentation de l'angle de pente des glaciers (73) sont les trois principaux phénomènes qui affectent les itinéraires.
- Ces phénomènes entraînent une augmentation de la dangerosité et de la difficulté technique des itinéraires d'alpinisme.
- En moyenne, chacun des 95 itinéraires étudiés est affecté par 9 de ces phénomènes. La figure 5.1 illustre et complète les études de cas présentées dans l'article.

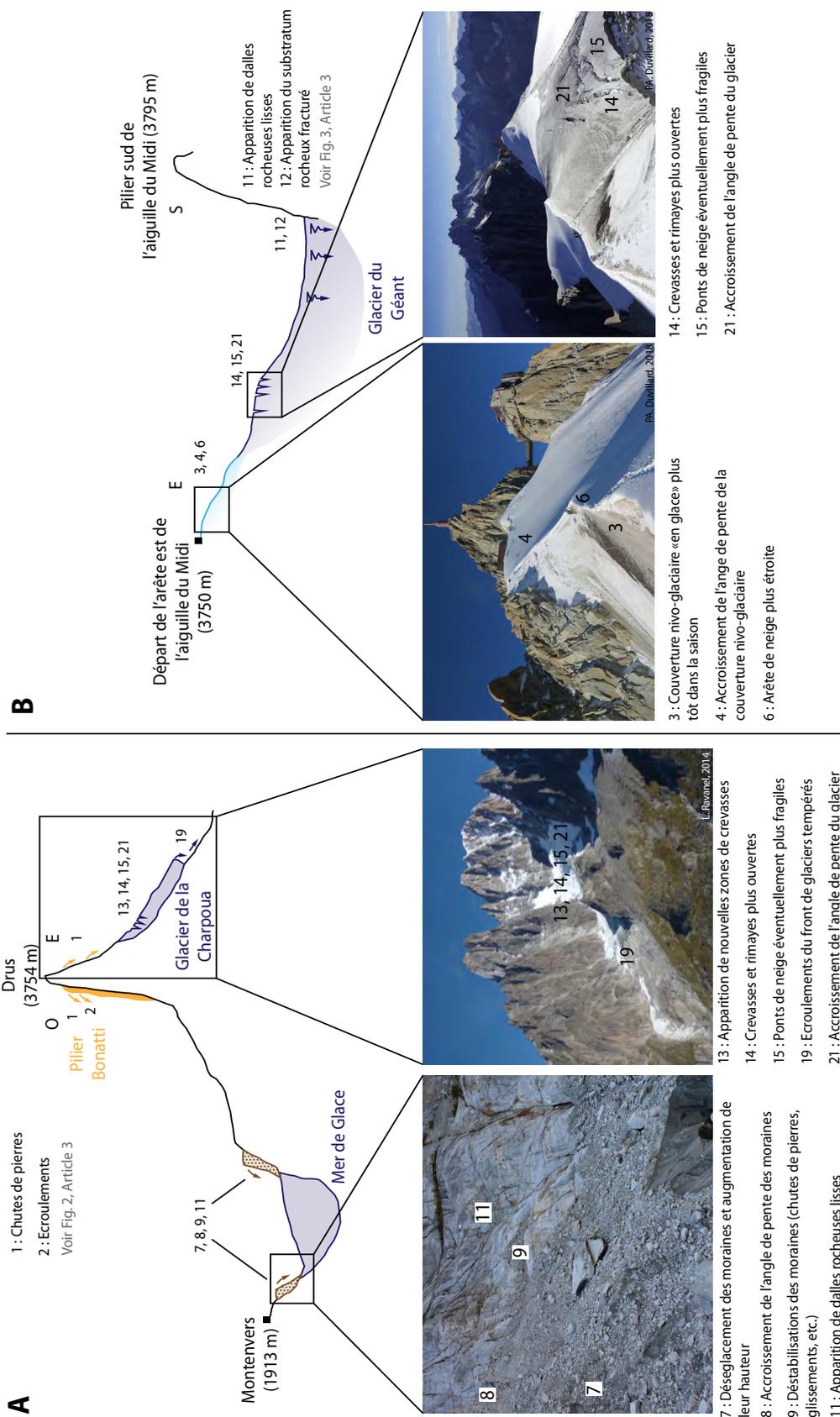


Figure 5.1. Représentation des itinéraires avec les phénomènes qui les affectent (voir Tab. 1 de l'Article 3). (A) La voie Bonatti dans la face ouest des Drus (itinéraire 92) et (B) la voie Rébuffat-Bacquet dans la face sud de l'aiguille du Midi (itinéraire 55).

- Les conditions de pratiques de ces 95 itinéraires, n'ont pas évolué pour 2 cas, elles ont peu évolué pour 30 cas, elles ont moyennement évolué pour 34 cas, elles ont fortement évolué pour 26 cas et trois itinéraires ont disparu. Le niveau de modification pour chacun des itinéraires est présenté dans l'Annexe 5.1.

- Les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme estival tendent à être plus aléatoires. Elles ont tendance à se décaler vers le printemps, l'automne, et même l'hiver pour certains itinéraires et surtout pour les voies en neige, glace ou mixte qui sont davantage affectées par le changement climatique.

Rôle des auteurs

- J. Mourey : mise à jour et approfondissement d'une étude antérieure, conception de l'étude dans sa forme actuelle, analyse et discussion des données, rédaction de l'article.

- M. Marcuzzi : auteur d'une première version de l'étude à l'occasion d'un stage de Master dirigé par L. Ravanel, aide à la mise à jour de l'étude.

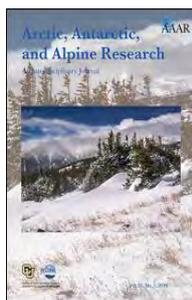
- L. Ravanel : participation à la conception de l'étude, à l'analyse et à la discussion des données, aide à la rédaction de l'article.

- F. Pallandre : contribution importante à la formalisation de la base de données et à la validation des résultats.

Résumé

En haute montagne alpine, le retrait glaciaire et la dégradation du permafrost liés au changement climatique ont des conséquences notables sur les itinéraires d'alpinisme. Alors que peu d'études se sont intéressées aux relations entre alpinisme et changement climatique, ce travail tente de caractériser et d'expliquer l'évolution, sur les quarante dernières années, des itinéraires d'alpinisme décrits dans le topoguide emblématique de Gaston Rébuffat publié en 1973 : *Le massif du Mont Blanc, Les 100 plus belles courses*. Les principaux éléments étudiés sont les processus et phénomènes géomorphologiques à l'œuvre et leurs impacts sur leurs conditions de fréquentation des itinéraires. 31 entretiens semi-directifs et la comparaison avec d'autres topoguide ont d'abord permis d'identifier 25 phénomènes géomorphologiques et glaciologiques liés au changement climatique qui affectent les itinéraires d'alpinisme. En moyenne, un itinéraire est affecté par 9 phénomènes. Sur les 95 itinéraires étudiés, 93 ont été modifiés par les effets du changement climatique, dont 26 fortement, tandis que trois ont complètement disparu. Les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme en été ont par ailleurs tendance à devenir plus aléatoires et à se décaler vers le printemps et l'automne, en lien avec une augmentation de la dangerosité et de la technicité des voies.

Mots clés : alpinisme, itinéraires d'alpinisme, effets du changement climatique, massif du Mont Blanc



Arctic, Antarctic, and Alpine Research
An Interdisciplinary Journal



ISSN: 1523-0430 (Print) 1938-4246 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/uaar20>

Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century

Jacques Mourey, Mélanie Marcuzzi, Ludovic Ravanel & François Pallandre

To cite this article: Jacques Mourey, Mélanie Marcuzzi, Ludovic Ravanel & François Pallandre (2019) Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51:1, 176-189, DOI: [10.1080/15230430.2019.1612216](https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>



© 2019 The Author(s). Published with license by Taylor & Francis Group, LLC.



Published online: 08 Jun 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 15



View Crossmark data [↗](#)



Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century

Jacques Mourey ^a, Mélanie Marcuzzi^{a,b,c}, Ludovic Ravel^a, and François Pallandre^c

^aCNRS, EDYTEM, Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, Chambéry, France; ^bInstitut de Géographie Alpine, CNRS, PACTE, University Grenoble Alpes, Grenoble, France; ^cÉcole Nationale des Sports de Montagne/École Nationale de Ski et d'Alpinisme, Chamonix, France

ABSTRACT

In high alpine environments, glacial shrinkage and permafrost warming due to climate change have significant consequences on mountaineering routes. Few research projects have studied the relationship between climate change and mountaineering; this study attempts to characterize and explain the evolution over the past 40 years of the routes described in *The Mont Blanc Massif: The 100 Finest Routes*, Gaston Rébuffat's emblematic guidebook, published in 1973. The main elements studied were the geomorphic and cryospheric changes at work and their impacts on the itinerary's climbing parameters, determining the manner and possibility for an itinerary to be climbed. Thirty-one interviews, and comparison with other guidebooks, led to the identification of 25 geomorphic and cryospheric changes related to climate change that are affecting mountaineering itineraries. On average, an itinerary has been affected by nine changes. Among the 95 itineraries studied, 93 have been affected by the effects of climate change – 26 of them have been greatly affected; and three no longer exist. Moreover, periods during which these itineraries can be climbed in good conditions in summer have tended to become less predictable and periods of optimal conditions have shifted toward spring and fall, because the itineraries have become more dangerous and technically more challenging.

ARTICLE HISTORY

Received 6 September 2018
Revised 12 April 2019
Accepted 24 April 2019

KEYWORDS

Mountaineering; high mountain itineraries; climate change effects; Mont Blanc massif

Introduction

Climate change led to a temperature increase of 2°C in the Alps between the end of the nineteenth century and the beginning of the twenty-first (Auer et al. 2007), with a strong acceleration in warming since the 1990s (IPCC, 2014). In this context, and due to being very sensitive to climate variations, high alpine environments have undergone major change. The total surface area of alpine glaciers decreased by half between 1900 and 2012 (Huss 2012; Vincent et al. 2017), while rock faces experienced an increase in the frequency and volume of rockfall (Geertsema et al. 2006; Ravel and Deline 2011; Ravel et al. 2013, 2017). These changes raise the question of what the effects might be on recreational mountain activities, and especially on mountaineering. Mountaineers climbing during the summer months are undeniably noticing important changes to the environment to which they must adapt by modifying their techniques. Although awareness of this issue dates back to the 2000s, only a few studies have been conducted to

confirm it—such as Behm, Raffener, and Schöner (2006), Ritter, Fiebig, and Muhar (2012), Bourdeau (2014), Temme (2015), and Mourey and Ravel (2017). As such, the evolution of mountaineering itineraries due to climate change remains poorly documented. This article aims to describe and explain the evolution—over nearly half a century—of mountaineering itineraries in the Mont Blanc massif (MBM), the birthplace of mountaineering and still a major mountaineering destination (Modica 2015).

However, it is impossible to document all mountaineering itineraries as several thousand have been climbed in the MBM. The 1975 Vallot guidebook—*The Mont Blanc Massif, Aiguille Verte–Triolet–Dolent–Argentière–Trient* (Devies and Menry 1975)—which lists the routes in each glacial basin with a detailed description, includes 747 itineraries. Hence, our study focuses on the itineraries in Gaston Rébuffat's famous guidebook, *The Mont Blanc Massif: The 100 Finest Routes*. Using recent guidebooks and interviews, the itineraries described by

CONTACT Jacques Mourey  jacques.mourey@univ-smb.fr  CNRS, EDYTEM, University Grenoble Alpes, University Savoie Mont Blanc, Chambéry 73000, France.

© 2019 The Author(s). Published with license by Taylor & Francis Group, LLC.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Rébuffat in 1973 were compared with their current state. First, the geomorphic and cryospheric changes that have affected the area were identified; then, for each itinerary, the specific changes that have affected it were established and also the degree to which these changes have changed the climbing technical level and danger. The evolution of the manner in which mountaineers tackle these routes due to the effects of climate change will then be discussed, along with the consequences for the popularity of mountaineering.

Study site

The MBM the birthplace of mountaineering, which is being strongly affected by climate change

Mountaineering originally developed in the western Alps, and especially in the MBM, at the end of the eighteenth century (Hoibian 2008). Since then, it has evolved considerably through technical (Duez 2009), cultural and ideological changes (Hoibian and Defrance 2002; Bourdeau 2003). The “Golden Age” of mountaineering, whose 150th anniversary was celebrated in 2015, is considered to start in 1854 and end in 1865 with the first ascent of the Matterhorn (Switzerland). It was marked by a series of important first ascents, most notably those made by Edward Whymper and his guides in the MBM. In 2018 Chamonix (France) and Courmayeur (Italy) applied for mountaineering to be included on UNESCO’s Intangible Cultural Heritage Lists. Over the past 200 years, the evolution of mountaineering has been mainly due to socio-cultural reasons (Hoibian and Defrance 2002; Bourdeau 2003). However, the current changes to the high mountain environment due to climate change is challenging accepted mountaineering practices.

The MBM (Figure 1) is located in the north-western Alps between Switzerland, Italy and France, and covers 550 km². About 30% of its surface is covered with ice (Gardent et al. 2014), with some 100 glaciers – including the Mer de Glace, the largest glacier in the French Alps, with an area of 30 km². A dozen peaks exceed the altitude of 4,000 m a.s.l., including Mont Blanc, the highest summit of the Alps at 4,809 m a.s.l.

The MBM presents a cross-range asymmetry. Six of the largest glaciers of the massif are located on its north-western aspect, where slopes are gentler than on its very steep south-eastern aspect, which is characterized by small glaciers bounded by high subvertical rock walls. This asymmetry implies different climatic contexts. In Chamonix (1,044 m a.s.l.), the mean annual air temperature (MAAT) is +7.2°C, while in Courmayeur (1,223 m a.s.l.), it is 10.4°C. At the Aiguille du Midi (3,842 m a.s.l.), the MAAT is –8.2°C (reference period:

2008–2010, Météo-France data). In Chamonix, MAAT increased by 1.7°C between 1934 and 2009. It is important to note that this warming mainly affects winter temperatures (Durand et al. 2009); these increased by 2.8°C compared to summer temperature, which increased by 1.5°C (Météo-France data). Moreover, MAAT increased four times faster over the period 1970–2009 than during the period 1934–1970. The MAAT also increased at high elevations: above 4,000 m a.s.l., it increased by 1.4°C between 1990 and 2014 (Gilbert and Vincent 2013). Since 1990, the MBM has experienced seven summer heat waves (in 1994, 2003, 2006, 2009, 2015, 2017 and 2018). In France, summer 2018 was the second hottest summer since 1900 (2003 was hotter). In Chamonix, the average annual precipitation is 1,288 mm. In Courmayeur, it is 854 mm. At 3,500 m a.s.l., precipitation is three times higher than in the town of Chamonix (Vincent 2002). Since the end of the Little Ice Age (LIA), precipitation levels have experienced little change; however, there has been a clear decrease in snowfall days relative to total precipitation days (Serquet et al. 2011) and there is more frequent and intense melting (Klein et al. 2016). Consequently, in the Swiss Alps between 1,139 and 2,540 m a.s.l., snow cover duration shortened by 8.9 days/decades⁻¹ during the period 1970–2015, with a snow season starting 12 days later and ending 26 days earlier than in 1970 (Klein et al. 2016). While these changes in snow cover are elevation dependent, and less pronounced at higher altitudes (Durand et al. 2009), snow quantity at high altitude is also decreasing.

With higher and faster warming at high altitudes than the global average (Beniston 2005; Auer et al. 2007), climate change is causing substantial change to high mountain environments. In the MBM, the glacial surface area decreased by 24% between the end the LIA and 2008 (Gardent et al. 2014), with a considerable increase in the acceleration of melting since the 1990s (Huss 2012; Vincent et al. 2017). Mean glacier mass balance in the European Alps was -0.31 ± 0.04 m w.e.a⁻¹ during the period 1900–2011 and -1 m w.e.a⁻¹ during the first decade of the 2000s (Huss 2012), which illustrates the acceleration of glacial shrinkage. In the MBM, the region-wide mean mass balance was -1.04 ± 0.23 m w.e.a⁻¹ between 2003 and 2012; the Argentière glacier mean mass balance over the same period was -1.46 ± 0.4 m w.e.a⁻¹ (Berthier et al. 2014). The loss of ice thickness is also significant. At 1,900 m a.s.l., between 1994 and 2013, the Argentière glacier (MBM, France) has lost 80 m of ice depth. On the Mer de Glace (MBM, France), the rate of glacial thickness loss increased from 1 m.a⁻¹ (1979–1994) to more than 4 m.a⁻¹ (2000–2008; Berthier and Vincent 2012). The Mer de Glace loss in thickness was up to 60 m at the front

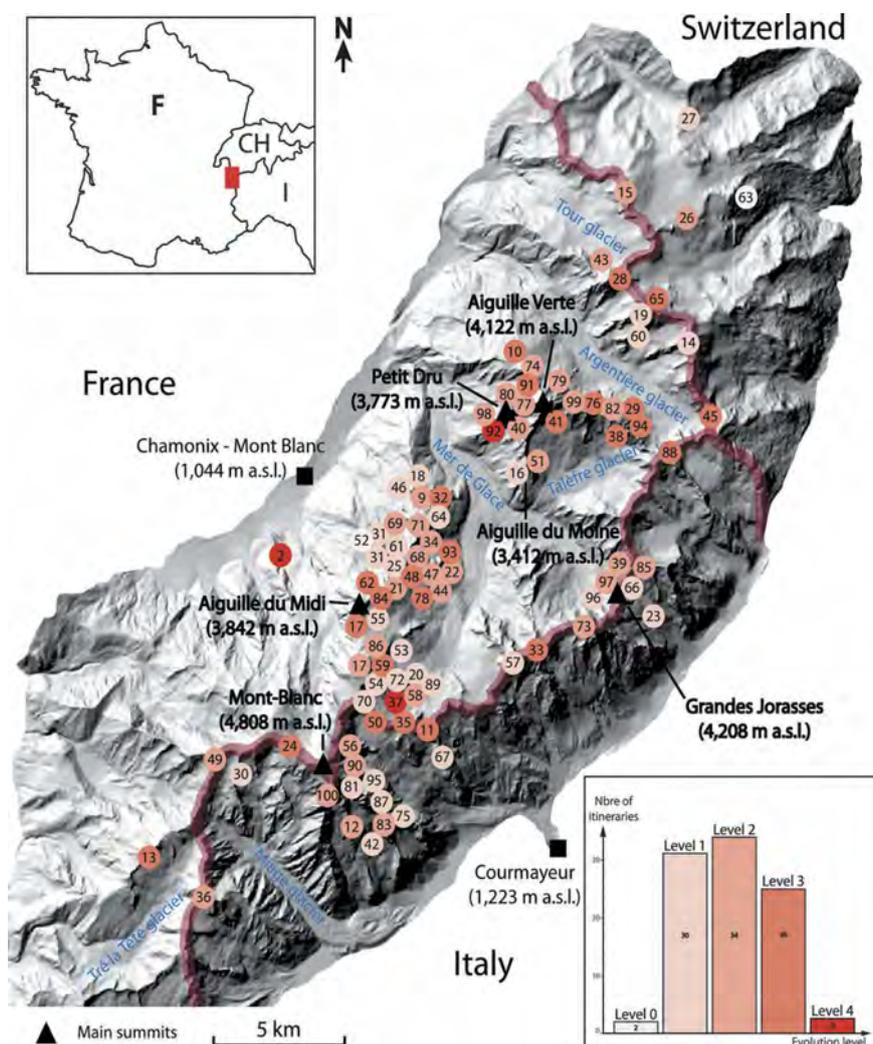


Figure 1. Location of the Mont Blanc massif, the itineraries studied and their level of evolution.

(1,500 m a.s.l.) during the period 1979–2003 (Berthier 2005). At the same time, glacier fronts retreated dramatically: 366 m between 1994 and 2007 for the Mer de Glace, with a particularly rapid period of shrinkage of 40 m/y between 1998 and 2005 (Vincent 2010). Glacial shrinkage affects high elevations (i.e., above the glacier equilibrium line altitude—ELA—separating the accumulation and ablation zones). Between the 1960s and 2008, the glacier surface areas on the French side of the MBM decreased by 16% at 2,200–2,600 m, 11% at 2,600–3,000 m, 6% at 3,000–3,500 m, and 3% at 3,500–4,000 m a.s.l. (Deline et al. 2012). For example, the surface of the Talèfre glacier lowered by 5–10 m between 3,000 and 3,500 m a.s.l. over the period 1979–2003 (Berthier 2005). At 3,613 m a.s.l., the Géant glacier surface lowered by 20 m between 1992 and 2012 (Ravanel et al. 2013).

Glacial shrinkage coincides with a rise of the ELA of 170 m between 1984 and 2010 in the western Alps

(Rabatel et al. 2013). Also, combined with a decrease in winter snow accumulation, the snow cover on the glacier surfaces tends to decrease both in area and thickness. As a result, crevasses appear earlier in spring and areas of bare ice increase in summer. The decrease in snow cover on glaciers also results in an increase in the number of open crevasses, while snow bridges may be getting more fragile. The fragility of snow bridges is probably increasing as the average altitude of the 0°C isotherm has risen by 400 m since 1980 (Böhm et al. 2010) and the frost frequency has decreased (Pohl et al. 2019). The snow pack does not refreeze and consolidate, especially during the night. As such, snow bridges are probably weakening earlier in spring and during heat waves.

In some cases, glacier retreat leads to more frequent serac fall from the hanging fronts of warm and cold-based glaciers (Fischer et al. 2006). In the MBM, serac

fall mainly occurs during the warmest periods of the year and, on a secular scale, during or at the end of the warmest periods (Deline et al. 2012).

Due to glacial shrinkage, paraglacial processes—defined by Ballantyne (2002) as “the nonglacial earth-surface processes, sediment accumulations, landforms, landsystems and landscapes that are directly conditioned by glaciation and deglaciation”—are intensifying. A paraglacial period starts as a direct reaction to deglaciation and ends when all glacial sediments have been removed or stabilized (Church and Ryder 1972; Ballantyne 2002). In this study, paraglacial processes refer mainly to the erosion of moraines through rockfall and landslides (McCull 2012; Deline et al. 2015; Draebing and Eichel 2018; Eichel, Draebing, and Meyer 2018; Ravel et al. 2018), illustrated by the gullying of the inner flank of lateral moraines due to very steep slopes, up to 80° (Lukas et al. 2012).

At the same time, permafrost—ground that remains permanently at or below 0°C for at least two consecutive years (Dobinski 2011)—tends to warm and degrade (Haeberli and Gruber 2009). Even if all rockfalls cannot be attributed to permafrost warming, as it is a natural erosion process in high mountain environments (Allen, Cox, and Owens 2011; Collins and Stock 2016; D’Amato et al. 2016), its degradation results in more frequent and voluminous slope instabilities (rockfalls, rock slides) (Harris, Davies, and Etzelmüller 2001; Harris et al. 2009; Ravel et al. 2011; Ravel et al. 2013; Ravel, Magnin, and Deline 2017). In the MBM, more than 850 rockfalls ($V > 100 \text{ m}^3$) occurred between 2007 and 2018 (Ravel et al. 2015). Permafrost is continuously present above 3,000 m a.s.l., on average, on north faces and above 3,600 m a.s.l. on south faces (Magnin et al. 2015).

The change in the high mountain environment raises the question of how mountaineering itineraries have been affected and what effect this has had on their popularity.

The MBM: The 100 Finest Routes by G. Rébuffat (1973), as reference sample

G. Rébuffat’s guidebook—*The Mont Blanc Massif: The 100 Finest Routes*—has for several decades been a major source of information for mountaineers. It was the first guidebook to offer a selection of routes based on their quality, unlike guidebooks of the same period – such as the Vallot series – that usually drew up the most exhaustive list of all the routes of a region. This is why it quickly became popular for any mountaineer visiting the MBM. In addition, it arranges routes by increasing difficulty (from *facile* [easy] to *extrêmement difficile* [extremely difficult]) and/or commitment (the

potential seriousness of a fall), and so can be used as a reference for progression. All types of routes are covered—rock, snow, ice and mixed (snow/ice and rock)—and they have been chosen from throughout the massif (Figure 1), making it a relevant and representative selection of all mountaineering itineraries in the MBM. For each itinerary, an introductory text describes the itinerary, the first ascent, the elevation gains, the level of technical difficulty, the time required, the necessary equipment, the starting point and the route to follow.

Not all the itineraries presented by G. Rébuffat were taken into consideration in this study: itineraries 1 and 3–8 were ruled out because they are located outside the MBM (in the Aiguilles Rouges massif, Valais Alps and Aosta Valley). On the other hand, several itineraries are presented together in the guidebook, as they can be climbed the same day or on the same trip into the mountains; but these have been treated separately in this study. Itinerary 17 is an example: Rébuffat recommends combining the normal route on Mont Blanc du Tacul (4,248 m a.s.l.) with the Cosmiques ridge on the Aiguille du Midi (3,842 m a.s.l.) in a single day. Altogether, 95 itineraries were analyzed. In some cases, several descents are possible; only the most classic were chosen.

Methodology

Our study is structured according to two main data collection methodologies. First, semi-structured interviews were carried out with alpine guides, including instructors at the National School of Skiing and Mountaineering (ENSA), hut keepers, employees in charge of the management of the trails, first ascensionists and guidebook editors. In total, 31 people were interviewed. These people all have a good knowledge of mountaineering itineraries and 19 of them have been active in the MBM since the 1980s, but only four senior alpine guides who have frequented the range since the 1970s were interviewed. The two main questions were: (1) What are the ongoing long-term changes on the itineraries (since the 1970s)? and (2) How have these itineraries changed with regards to technical difficulty, objective dangers, and optimal periods for making an ascent? The interviewees were only asked to report long-term changes of the itineraries. Attribution of the climate-related changes was carried out by two researchers, both very familiar with the MBM, and their results were compared afterwards. In some cases, to confirm the information collected during the interviews, the descriptions of itineraries from Rébuffat’s guidebook were compared with those from recent guidebooks (Damilano

2005, 2006; Piola 2006; Laroche and Lelong 2010; Batoux 2012; Pusch, Dumler, and Burkhardt 2014).

Two sets of interviews were conducted in fall 2017. The first set led to the identification of the climate-related changes that have affected the itineraries (Table 1). Some of these have been the subject of scientific research, which has enabled us to confirm their existence and describe them more accurately. A second set of interviews was conducted in order to list the geomorphic and cryospheric changes affecting each of the 95 itineraries studied. At least 10 itineraries were considered per interview, which thus tended to be relatively long (up to 2–3 hours). The studied itineraries varied from one interview to another, depending on the memories of the interviewees. In the end, each of the 95 itineraries was studied during at least two different interviews. The database was formalized as a table, cross-

referencing each of the 95 itineraries with the 25 geomorphic and cryospheric changes. This was completed during the interviews. The results are presented in Table 1. However, one of the limits of this method of data formalization is that the location and the intensity/characteristics of each of the changes identified were not recorded. Each itinerary was divided into three parts: (i) the approach, which begins in the valley or at the top of a cable car and ends either at the foot of the rock wall to be climbed or at the bergschrund; (ii) the route and its continuation to the summit; and (iii) the descent, which begins at the summit and ends in the valley or at the top of a lift.

During this second set of interviews, a 5-level scale was developed to evaluate the evolution of the climbing parameters of each itinerary. The climbing parameters considered are: itinerary type (ice, snow, mixed or

Table 1. Climate-related geomorphic and cryospheric changes affecting mountaineering itineraries and their climbing parameters.

Main effects of climate change on high alpine environments	Geomorphic changes affecting and modifying mountaineering itineraries	Number of itineraries affected (XX/95 - YY %)	Part(s) of the itinerary affected the most	Effects on the climbing parameters	References	
Permafrost degradation	1. Rockfalls	55 - 52	↗	●	Matsuoka and Sakai, 1999; Matsuoka, 2001	
	2. Rock collapse	30 - 31	↗	●	Gruber and Haeberli, 2007; Ravelin <i>et al.</i> , 2017	
Melting of ice/snow covers and evolution of snow ridges	3. Surface of ice/snow covers in bare ice earlier in the season (or almost permanently)	58 - 55	↗	●	Galibert, 1960	
	4. Slope angle increase	53 - 50	↗	●		
	5. Retreat of ice/snow covers; apparition of the bedrock in general very fractured	53 - 50	↗	●	Delaloye, 2008	
	6. Snow ridges becoming narrower	25 - 24	↗	●		
Paraglacial processes	7. Appearance of moraines and increase of their height	47 - 45	↗ ↘	● ▲	Mortara and Chiarle, 2005	
	8. Increase of the moraines slope angle	47 - 45	↗ ↘	●	Luckas <i>et al.</i> , 2012; Ravelin and Lambiel, 2013	
	9. Destabilization of rocks (rockfalls, landslides) in the moraines	47 - 45	↗ ↘	●	Deline, 2008; McColl, 2012; Eichel <i>et al.</i> , 2018	
	10. Development of torrent on proglacial zones	3 - 3	↗ ↘	●	Collins, 2008	
	11. Appearance of smooth slabs of bedrock	77 - 73	↗	●	Berthier <i>et al.</i> , 2014	
	12. Appearance of destructured bedrock	30 - 28	↗	● ●	Ravelin <i>et al.</i> , 2013	
	13. Appearance of new crevassed area	47 - 45	↗ ↘	● ●	Ogier <i>et al.</i> , 2017	
	14. Wider crevasses and bergschrunds	78 - 74	↗ ↘	● ●		
	15. Weakening of snow bridges				●	
	16. Collapse of the front of cold-based glaciers	4 - 4	↘	●	Margreth <i>et al.</i> , 2011; Faillietaz <i>et al.</i> , 2015	
17. Serac falls from the front of cold-based glaciers	12 - 11	↘	●			
18. Serac falls from glaciers surfaces	23 - 22	↘	●	Le Meur and Vincent, 2006; Vincent <i>et al.</i> , 2015		
19. Collapse of the front of warm-based glaciers	7 - 7	↘	●			
20. Modification of the supraglacial hydrology (drainage channels more frequent, wider and deeper)	4 - 4	↗ ↘	▲ ●	Miller <i>et al.</i> , 2012		
21. Glacier slope angle increase	73 - 70	↘	●	Berthier <i>et al.</i> , 2014		
22. Glaciers surfaces more often in bare ice	49 - 47	↗ ↘	●	Rabatel <i>et al.</i> , 2013		
23. Development of supraglacial debris covers	24 - 23	↗ ↘	▲	Deline, 2005		
24. Rocks falling and sliding from the glaciers surfaces	11 - 10	↗ ↘	●	Purdie <i>et al.</i> , 2015		
25. Less frequent night freezing				●	Böhm <i>et al.</i> , 2010; Pohl <i>et al.</i> , 2019	

 Approach
 Route
 Descent
 Increase in danger
 Increase in technical difficulty
 Lengthening and greater drudgery of the way

rock), technical difficulty, level of exposure to objective dangers, and any changes to the optimal period for making an ascent (i.e., when the number/intensity of the changes affecting it are the lowest).

- *Level 0.* The itinerary and the parameters determining the way it is climbed have not changed.
- *Level 1.* The itinerary and its climbing parameters have slightly evolved. Only a short section of the itinerary is affected by geomorphic and cryospheric changes, and this does not result in a significant increase in objective dangers and/or in technical difficulty.
- *Level 2.* The itinerary and its climbing parameters have moderately evolved. The optimal periods for making an ascent have become rare/unpredictable in summer and shifted toward spring and sometimes fall. Objective dangers and technical difficulty are increasing and mountaineers therefore have to adapt their technique.
- *Level 3.* The itinerary and its climbing parameters have greatly evolved. Generally, the itinerary can no longer be climbed in summer. Objective dangers and technical difficulty have greatly increased due to the number and intensity of the geomorphic changes affecting it. Mountaineers have had to fundamentally change the manner in which they climb the itinerary.
- *Level 4.* The itinerary has completely disappeared. The itinerary can no longer be climbed.

The identification of the changes affecting a mountaineering itinerary varied greatly from one person to another depending on the climbing circumstances encountered during the ascent (i.e., the occurrence/absence and the intensity of the changes previously identified), the technical level and number of their clients and their personal perception. The changes identified were not always the same, nor assessed to the same degree. As an example, at the end of the summer season when the glacier surface is icy, any increase in steepness is more significant and easier to identify compared to the beginning of the season when the glacier surface is still covered with snow. Moreover, the interviewees tended to underestimate the number of changes affecting an itinerary. Indeed, it seems that individuals usually notice only the changes that are relevant when they are making an ascent, without necessarily taking into account the season and high mountain climate-related evolution. It was the interviewers' role to encourage interviewees to identify only long-term changes rather than focusing on

their last ascent. For this reason, a great number of interviews were conducted in order to validate the data collected.

Results

Geomorphic and cryospheric changes affecting mountaineering itineraries and the manner in which they are climbed

Twenty-five geomorphic and cryospheric changes were identified (Table 1). These result from glacial shrinkage, a reduction of ice-snow cover, changes in the structure of snow ridges, and permafrost warming. For each geomorphic change, its impact on the climbing parameters was identified (Table 1): increase in objective dangers, technical difficulty and commitment, lengthening of the itinerary and any increase in the effort required to climb it.

All the types of changes that have affected each route between the 1970s and today were listed. On average, an itinerary has been affected by nine geomorphic changes. The appearance of bedrock (85 itineraries affected), wider crevasses and bergschrunds (78) and steeper glaciers (73) are the three most commonly observed changes. They cause an increase in dangerousness and technical difficulty. The alpine guides interviewed all had to deal with thinner and weaker snow bridges, while crevasses that were never or rarely observed, now appear more often.

Finally, regarding the evolution scale used to evaluate changes to the itineraries studied from a mountaineering point of view (Figure 1), 2 had not evolved (level 0), 30 had slightly evolved (level 1), 34 had moderately evolved (level 2), 26 had greatly evolved (level 3), and three had disappeared (level 4). Four examples are described below to better illustrate those evolutions and the implications for mountaineering. Moreover, there is a direct correlation between the number of geomorphic changes affecting an itinerary and its level of evolution. On average, for level 1, 7.4 changes were affecting the itineraries, 10 for level 2, 11.5 for level 3 and 12.5 for level 4. It is also important to note that during the summer of 2018, the evolution levels of three itineraries changed: from 1 to 3 (Cosmiques ridge—itinerary 17), 1 to 4 (Lépiney route—itinerary 37) and 1 to 2 (Rébuffat-Bacquet route—itinerary 55). The geomorphic changes responsible for those three evolutions have been identified thanks to a network of observers (mainly alpine guides and hut keepers) developed to study geomorphic changes in the MBM (Ravel and Deline 2013).

Different patterns of evolution depending on the nature of the routes (rock, snow, ice or mixed)

- **Disappearance of rock route because of massive rockfall: the example of the Petit Dru (3,733 m a.s.l.) west face**

The Bonatti route on the Petit Dru west face (itinerary 92) was an emblematic rock climb first ascended in 1955 by the well-known Italian mountaineer Walter Bonatti. However, most of the route disappeared after a 700 m-high pillar collapsed in 2005 (Figure 2; Ravel and Deline 2008). This route has a level 4 evolution.

- **Snow and mixed route which can no longer be climbed in summer because of ice/snow cover melting early: the example of the Whymper couloir on the Aiguille Verte (4,122 m a.s.l.)**

The Whymper couloir (itinerary 41) is the original route used by Edward Whymper for the first ascent of



Figure 2. The Petit Dru West face, October 2017. A major part of the route has disappeared because of a rock collapse in 2005 and a further rockfall in 2011 (292,000 m³).

the Aiguille Verte (4,122 m a.s.l.) in 1865. It is still a classic and emblematic route.

In 1973, Rébuffat classified this itinerary as a snow climb. Today, the ice/snow cover necessary for an ascent of the couloir has been very significantly reduced (Figure 3). Indeed, it completely melts out early in summer and fractured bedrock appears. This creates circumstances where rock fall is frequent. In addition, the bergschrund at the bottom of the couloir becomes very wide and difficult to cross. Rockfall is observed frequently (oral communication, C. Lelièvre, keeper of the Couvercle hut) and a 22,000 m³ rockfall occurred on the right bank of the couloir in August 2015 (Ravel, Magnin, and Deline 2017; Figure 3). These environmental changes have led to an increase in the technical difficulty and inherent danger of the route and it is now possible to climb it only very early in summer. The level of evolution applied to this itinerary is 3.

- **Rock routes whose approach has been affected: the examples of the Aiguille du Midi (3,842 m a.s.l.) south face and the Aiguille du Moine (3,412 m a.s.l.) east face**

The Rébuffat-Bacquet route (itinerary 55), climbed in 1956 on the south face of the Aiguille du Midi, is a classic rock climb that sees a lot of traffic in summer. Apart from a small rockfall, it has not yet been directly affected by climate change, but the approach to the original starting-point of the route has become more difficult because of two main factors. First, the east ridge of the Aiguille du Midi that leads to the bottom of the face is becoming narrower. It is orientated west-east, meaning that melting is much more important on its south side than on its north side. This makes it steeper, and it tends to become icy earlier in summer. Crevasses also now appear. Secondly, because the Géant glacier at the foot of the face has lost over 25 m in depth over the past 30 years, the route's historic starting-point is now difficult to reach (Figure 4). Climbers now have to follow the start of the Contamine route, which is technically more difficult (graded F6b instead of F6a; see Hagenmuller, Marsigny, and Pallandre 2016) than any other pitches on the Rébuffat-Bacquet route. These environmental changes have led to an increase in the technical difficulty and commitment needed to reach the start of the route. The level of evolution applied to this itinerary is 2. Because the surface of the Géant glacier lowered greatly during the 2018 heat wave, the route was not accessible at the end of the summer period. A very difficult climbing section has appeared.

This situation is identical for the majority of rock routes but the increase in difficulty varies depending on

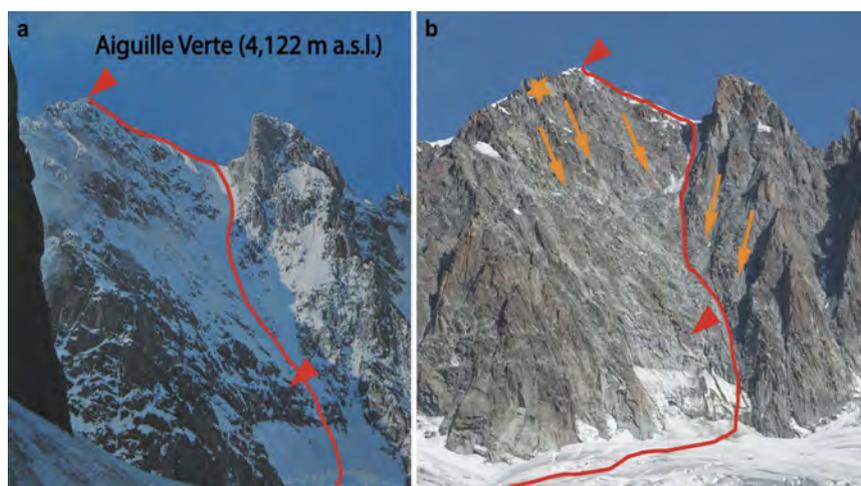


Figure 3. The Whympfer couloir on the Aiguille Verte (4,122 m a.s.l.) south face. The route is marked in red. A: situation at the end of the 1960s (picture from the guidebook). B: situation at the end of August 2017 (photo C. Lelièvre). The ice/snow cover in the couloir has undergone a very significant reduction, which has exposed fractured bedrock, leading to frequent rockfalls (orange arrows). The orange star indicates the point where a 22,000 m³ rockfall released in 2015. The red triangles indicate similar features.

the extent of the ice thickness loss and the nature of the terrain exposed. In some cases, the route may lose its intrinsic logic and aesthetics if sections of climbing appear which are much more difficult than the rest of the route. This is the case for the Labrunie-Contamine route (itinerary 51) on the Aiguille du Moine (3,412 m a.s.l.) east face. A 15 m-high section of F6c climbing is now exposed at the start of the route because of the lowered surface of the Talèfre glacier. The rest of the route is graded F6a maximum. This short, difficult section has made the route less attractive, and it is now climbed less frequently than before. The level of evolution applied to this itinerary is 2.

- **Rock route whose descent is more difficult and dangerous because of glacial shrinkage: the example of the Aiguille de l'M (2,844 m a.s.l.).**

The Aiguille de l'M north ridge (itinerary 18) is a very popular rock route. The approach and the route are not affected by geomorphic or cryospheric changes, notably because of its relatively low altitude. However, the way down follows a south-facing couloir to reach the Nantillon Glacier, at 2,500 m a.s.l. Because of the lowering of the glacier surface, the couloir is becoming steeper and very exposed to rockfall coming from the lateral moraine of the glacier. In order to reduce the danger and the technical difficulty, abseils and ladders have been installed in the couloir. Therefore, the itinerary can be climbed all summer and the descent is now less technically difficult. The level of evolution applied to this itinerary is 1.

Discussion

The degree and type of evolution to an itinerary depends on the nature of the terrain

In general, snow, ice and mixed itineraries have been more affected by climate change, with a 2.4 average level of evolution, than rock routes with a 1.6 average level of evolution. This finding is confirmed by a Correspondence Factor Analysis (CFA; Volle 1997) linking the level of evolution of the itineraries with their type (rocky, snow, ice and mixed), difficulty, and orientation (Figure 5). Itineraries undergoing level 3 evolution are mainly mixed and snow routes (46.2% and 26.9%, respectively) graded “*assez difficile*” (quite difficult) or “*peu difficile*” (not very difficult) and facing north-east. On the other hand, rock routes are statistically underrepresented (11.5%) in this level of evolution. The routes undergoing level 0, 1 and 2 evolutions are mostly rock routes (100%, 82.8% and 54.3%, respectively) for the highest level of difficulty (*extrêmement difficile* [extremely difficult] and *très difficile* [very difficult]). Variable aspects are represented. In the 0 level of evolution, ice routes are statistically underrepresented (0%). We can conclude that rock routes are less affected by the effects of climate change than snow, ice and mixed routes.

Not all the geomorphic changes identified in this work affect the itineraries in the same way. The approaches are mainly affected by wider crevasses and bergschrunds (53/95), paraglacial processes (41/95) and the appearance of new crevassed areas (27/95). The changes mainly affecting the routes are the appearance

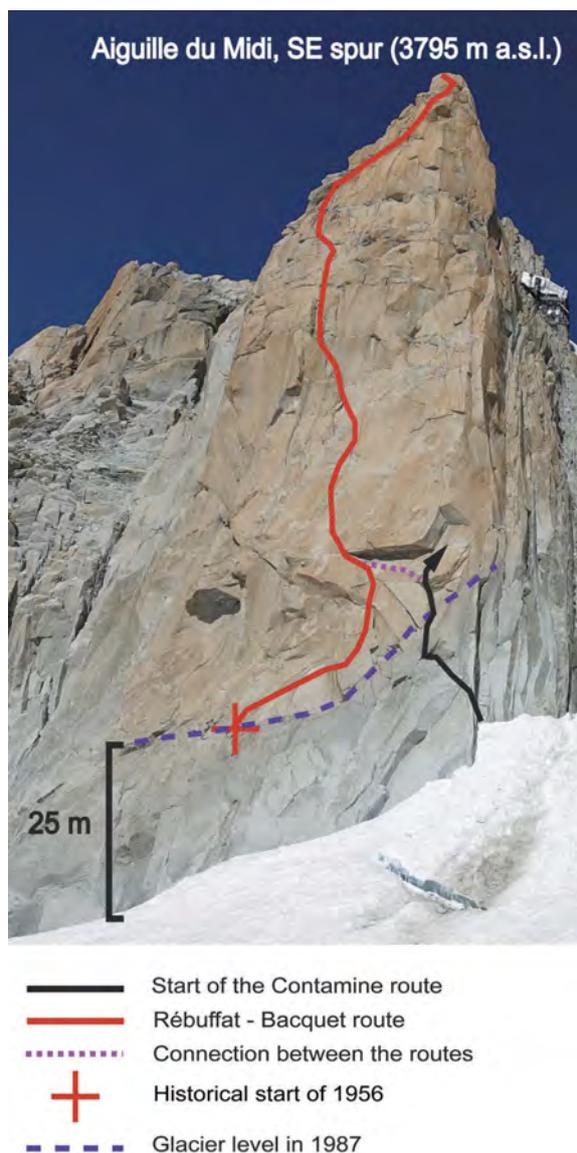


Figure 4. Aiguille du Midi south face, September 2018. The original start to the Rébuffat-Bacquet route (1956) is no longer accessible directly. The lower part of another route must be climbed to join it.

of smooth slabs or unstable bedrock (77/95) and all changes related to the disappearance of ice/snow cover and the evolution of snow ridges (52/95). Finally, the changes predominantly affecting the descents are a steepening of glaciated slopes (63/95), wider crevasses and bergschrunds (59/95), and paraglacial processes (41/95). There is also a correlation between some changes and the orientation of the routes. For 39 routes located on southern slopes, 23 are affected by processes due to permafrost degradation and 22 by the appearance of smooth slabs or fractured bedrock. On the other hand, changes in serac fall and the appearance

of bare ice mainly affect north-facing routes. Other changes, such as the reduction in ice/snow cover, equally affect routes on southern and northern aspects.

Changes in the optimal season for making an ascent as a result of increased levels of difficulty, commitment and objective danger

It is difficult to measure the effects of one or several changes on the climbing parameters of an itinerary. In general, the identified changes imply an increase in technical difficulty, dangerousness and commitment of these itineraries in summer, but seasonality must be addressed.

The evolution of mountaineering itineraries is conditioned on two different time scales. The main time scale addressed in this study is climate related and covers the period from the 1970s to 2018. However, deterioration on mountaineering itineraries' climbing parameters can be reduced or increased by seasonal factors. Changes are usually less impactful at the beginning of the summer season, when the winter snow pack has not yet completely melted out (even though snow pack in general is decreasing both in quantity and duration), and they increase at the end of the summer season or during heat waves (which are becoming more and more frequent and intense due to climate change) (IPCC [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., et al.] 2014). Therefore, itineraries when in an optimal period for making an ascent—more and more commonly outside the summer period—are not necessarily any more difficult or dangerous than before. It is for this reason that good and stable periods for mountaineering tend to be more variable in summer and shift toward spring, fall (as temperatures start to drop and new snow falls occur) and even winter, especially for snow, ice and mixed routes. Depending on the nature of the itinerary, much more attention must be paid to the evolution of climbing parameters. According to the interviewees, the summer mountaineering season has shifted by three weeks toward spring compared with the 1980s. This finding confirms the work of Bourdeau (2014) conducted in the Écrins massif.

An itinerary greatly affected by the effects of climate change effects may still be very popular

There is not necessarily a direct link between the level of change of an itinerary and its popularity. A notable example is the “normal” (classic) itinerary to the

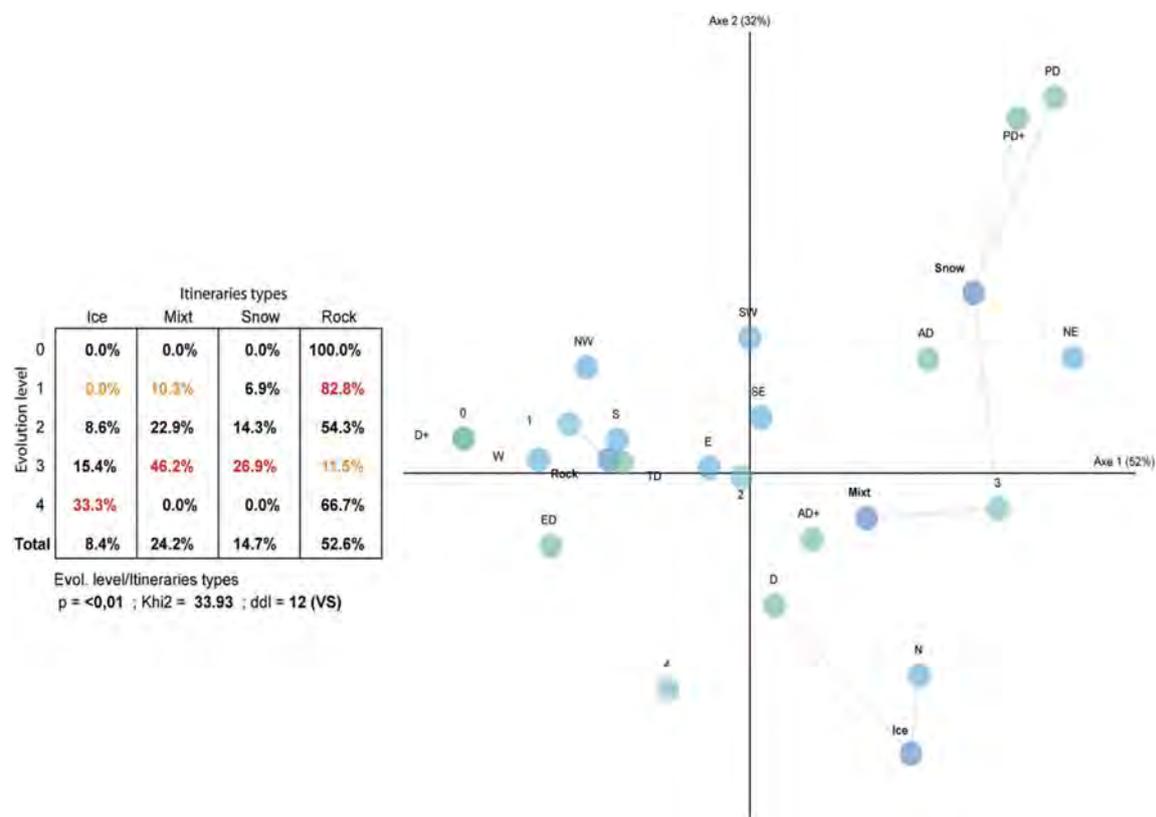


Figure 5. Cross-tabulation and graphical representation (CFA type) of the relationships between the level of evolution of a route for mountaineering purposes and its nature (rock, snow, ice and mixed), difficulty and aspect. The closer the circles are, the more meaningful their relations are. The statistically strongest relationships are underlined.

summit of Mont Blanc (itinerary 24). It has been greatly affected by climate change, with an increase in technical difficulty and especially in dangerousness. Rockfall is increasingly frequent in the *Grand Couloir du Goûter* and causes a significant number of accidents. Between 1990 and 2017, there were an average of 3.7 deaths and 8.5 injuries per summer on the crossing of the couloir and the climb to the Goûter ridge, mainly due to human error and rockfall (Mourey et al. 2018). In addition, large crevasses which are difficult to cross are appearing even at high altitude (above 4,000 m a.s.l.), while the summit ridge is becoming narrower. The descent described by Rébuffat is no longer used in summer, as it has become too crevassed. Even though the level of evolution applied to this itinerary is 3, it is still one of the busiest mountaineering itineraries in the world because of the prestige of climbing the highest summit in the Alps.

On the other hand, some itineraries that have only been slightly affected by climate change are much less popular than in the past. To explain this, other socio-economic factors and the evolution of mountaineering itself must be considered. Today, mountaineers tend to

limit their risk-taking and their exposure to objective dangers such as rock and serac fall. Other itineraries are no longer popular because the approach is long and/or the *in situ* equipment is old (Bourdeau 2003). As an example, according to the alpine guides interviewed, the north face of the Aiguille de Bionnassay (4,052 m a.s.l.—itinerary 49) was a classic ascent during the 1980s. Today, it is no longer climbed in summer despite a relatively low level of evolution (2) because of the danger of serac fall. This danger was also present 40 years ago.

In some cases, the evolution of mountaineering itineraries due to the effects of climate change leads to them becoming less popular. This is the case for the traverse of the Dômes de Miage (3,673 m a.s.l. – itinerary 13), a very famous and beautiful snow climb. During the summer of 2015, a crevasse opened on the summit ridge, which itself had become narrower and icier. In addition, a rockfall occurred on the route, making it more technically difficult and exposing it to further rockfall. The ridgeline was no longer being traversed, with climbers choosing to descend by the ascent route. This made the itinerary less aesthetically pleasing and the number of people staying at the

Conscrits hut (2,602 m a.s.l.), which gives access to the route, fell by 25% that summer. This situation occurred again in 2016 and 2017, with significant economic consequences for the hut keeper. The Couvercle hut (2,679 m a.s.l.) is facing the same situation, with climbing parameters on most routes deteriorating earlier in the summer season. According to the former two hut keepers, the steady decline in the number of overnight stays (35% over the last 15 years) has been accentuated by the evolution of the mountain itineraries, perhaps concurrently with socio-economic factors.

Is the aesthetic quality of high mountain areas deteriorating?

Climate change-related geomorphic and cryospheric changes result in significant changes to the landscape (Moreau 2010). The general drying of high mountain environments leads to the appearance of more and more rocky terrain while glacial surfaces are decreasing. As snow cover on glacier surfaces melts out faster and at higher altitudes, bare ice is appearing, and supraglacial debris cover is increasing (Deline 2005; Martin 2011) while rock falls form more continuous deposits. All the interviews carried out indicate that high mountain landscapes no longer conform to the classic representation of blue ice and “eternal snow” (Moreau 2010; Bourdeau et al., 2014). The motivation of some mountaineers to go into the high mountains is thus reduced. “I note that there is less interest to go on glaciers [...] that are dirty, with a dull color; they are less attractive in a certain way” (oral comm. B. Pelissier, alpine guide, Oct. 2017).

Limits

Because Rébuffat’s guidebook dates from the 1970s, it does not present any steep, narrow ice climbs. These “concealed and narrow ice couloirs” (Jouty and Odier 1999) are seasonal (Faup 2003) and were largely developed in later years thanks to improvements in mountaineering equipment. According to the alpine guides interviewed, the formation of ice gullies is becoming increasingly less frequent and often the quality of the ice is lower. During the 2016 and 2017 winters, almost no such ice gullies formed in the MBM. It seems that the main factors explaining the disappearance of these routes are the lack of winter and spring snowfall and the more rapid melting of the ice/snow cover. This phenomenon seems to be very recent and due, to a large extent, to an increase in the frequency of winter warm spells since the beginning of the 2000s.

Another factor limiting our methodology must also be highlighted. Because some itineraries have the same

approach and/or descent, some changes have been overrepresented. This is particularly the case for paraglacial processes that affect all the approaches and descents in the Mer de Glace basin (Mourey and Ravanel 2017). One way of limiting this bias would have been to consider only the routes themselves, and not the approaches and the descents; but this method would not have given an accurate representation of the difficulties that mountaineers are facing throughout the whole itinerary.

Moreover, it is not possible to objectively compare the grade of the itineraries between the 1970s and today, as the grading system (Cox and Fulsaas 2006), equipment and technical level have changed considerably.

Finally, because rock slope instabilities resulting from post-glacial decompression (Ballantyne 2002) are relatively uncommon in the MBM (Deline et al. 2012) and difficult to differentiate from the many rockfalls resulting from permafrost degradation, they have not been considered in this study.

Conclusion

The effects of climate change on high mountain environments has led to changes to mountaineering itineraries and their climbing parameters. In addition to previous studies, this one presents an exhaustive list of the 25 geomorphic and cryospheric changes related to climate change that can affect a mountaineering itinerary. On average, an itinerary in the MBM is affected by nine of these changes. Moreover, the impacts of each of these changes have been documented and quantified for the first time. The exposure of bedrock, widening of crevasses and bergschrunds and steepening of glaciated slopes are the main changes.

The impact of these changes on mountaineering has been quantified for 95 itineraries. Only two routes have not evolved, 30 have slightly evolved, 34 moderately evolved, 26 strongly evolved and three have disappeared. As a result, mountaineering itineraries tend to be more technically difficult and more dangerous. Optimal periods during the summer months have become rarer and more unpredictable. This results in the progressive reduction in the terrain available for mountaineers as the summer season progresses and good periods are now more likely to occur in spring, fall and even winter on some itineraries. The evolution of a mountaineering itinerary due to the effects of climate change may lead to an important decrease in its popularity, but socio-economic factors (changes in techniques, customers, etc.) must also be considered.

Climate change is expected to accelerate during the coming decades (IPCC [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E.,

Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., et al.] 2014), and this would lead to ever-increasing changes to the highly sensitive high mountain environment. Changes to mountaineering itineraries as attested to in this article are expected to continue and increase. This perspective may have significant consequences for mountaineering and the ability of high mountain professionals, such as alpine guides and hut keepers, to adapt.

Acknowledgments

The authors thank the personnel of the ENSA library for making the library and all its resources available to us and Neil Brodie, professor at ENSA, for the English language editing. This study was funded by the EU ALOCTRA project AdaPT Mont Blanc. Finally, we gratefully thank the anonymous reviewers and the editor for their constructive comments on the manuscript.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

ORCID

Jacques Mourey  <http://orcid.org/0000-0002-3717-8553>

References

- Allen, S., S. Cox, and I. Owens. 2011. Rock avalanches and other landslides in the central Southern Alps of New Zealand: A regional study considering possible climate change impacts. *Landslides* 8:33. doi:10.1007/s10346-010-0222-z.
- Auer, I., R. Böhm, A. Jurkovic, W. Lipa, A. Orlik, R. Potzmann, W. Schöner, M. Ungersböck, C. Matulla, K. Briffa, et al. 2007. HISTALP—Historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology* 27:17–46. doi:10.1002/(ISSN)1097-0088.
- Ballantyne, C. K. 2002. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews* 21:1935–2017. doi:10.1016/S0277-3791(02)00005-7.
- Batoux, P. 2012. *Mont-Blanc: Les plus belles courses: Rocher, neige, glace et mixte*, 215. Grenoble: Glénat.
- Behm, M., G. Raffener, and W. Schöner. 2006. *Auswirkungen der Klima- und Gletscheränderung auf den Alpinismus*, 99. Vienna: Umweltdachverband.
- Beniston, M. 2005. Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics* 162:1587–606. doi:10.1007/s00024-005-2684-9.
- Berthier, E. 2005. *Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Himalaya): contribution de l'imagerie satellitaire*. PhD diss., Laboratoire d'étude en Géophysique et océanographie spatiales, Université de Toulouse, France, 251 p.
- Berthier, E., and C. Vincent. 2012. Relative contribution of surface mass balance and ice flux changes to the accelerated thinning of the Mer de Glace (Alps) over 1979–2008. *Journal of Glaciology* 58:501–512. doi:10.3189/2012JG11J083.
- Berthier, E., C. Vincent, E. Magnússon, Á. Gunnlaugsson, P. Pitte, E. Le Meur, M. Masiokas, L. Ruiz, F. Pálsson, J. M. C. Belart, et al. 2014. Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere* 8:2275–91. doi:10.5194/tc-8-2275-2014.
- Böhm, R., P. D. Jones, J. Hiebl, D. Frank, M. Brunetti, and M. Maugeri. 2010. The early instrumental warm-bias: A solution for long central European temperature series 1760–2007. *Climatic Change* 101 (1–2):41–67. doi:10.1007/s10584-009-9649-4.
- Bourdeau, P. 2003. *Territoires du hors quotidien: Une géographie culturelle du rapport à l'ailleurs dans les sociétés urbaines contemporaines; le cas du tourisme sportif de montagne et de nature*, 270. Grenoble: Habilitation à diriger des recherches, Université Joseph-Fourier.
- Bourdeau, P. 2014. *Effets du changement climatique sur l'alpinisme et nouvelles interactions avec la gestion des espaces protégés en haute montagne. Le cas du Parc National des Écrins*. Rapport de recherche. Association Observation des Dynamiques et du Développement Territorial, 38 p.
- Church, M., and J. M. Ryder. 1972. Paraglacial sedimentation: A consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin* 83:3059–3072.
- Collins, B., and G. Stock. 2016. Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nature Geoscience* 9:395–400. doi:10.1038/ngeo2686.
- Collins, D. N. 2008. Climatic warming, glacier recession and runoff from Alpine basins after the little ice age maximum. *Annals of Glaciology* 48:119–24. doi:10.3189/172756408784700761.
- Cox, S., and K. Fulsas. 2006. *Mountaineering, The Freedom of the Hills*, 553. Seattle: The Mountaineering Books.
- D'Amato, J., D. Hantz, A. Guerin, M. Jaboyedoff, L. Baillet, and A. Mariscal. 2016. Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16:719–35. doi:10.5194/nhess-16-719-2016.
- Damilano, F. 2005. *Neige glace et mixte, le topo du massif du Mont Blanc T1: Du bassin du Trient au bassin du Géant*, 284. Chamonix-Mont-Blanc: JMÉditions.
- Damilano, F. 2006. *Neige glace et mixte, le topo du massif du Mont Blanc T2: De l'Envers des Aiguilles au bassin de Tré-la-Tête*, 348. Chamonix-Mont-Blanc: JMÉditions.
- Delalay, R. 2008. Parois glaciaires... parois rocheuses: L'évolution séculaire des grandes faces alpines. In *Klimaveränderungen auf der Spur. Jahrestagung der Schweizerischen Gesellschaft*, ed. C. Rothenbühler, 93–104. Samedan: Academia Engiadina.
- Deline, P. 2005. Change in surface debris cover on Mont Blanc massif glaciers after the 'Little Ice Age' termination. *The Holocene* 15:302–09. doi:10.1191/0959683605hl809rr.
- Deline, P. 2008. Les changements climatiques et la dynamique paraglaciale dans le massif du Mont Blanc (Climatic changes and paraglacial dynamics in the Mont Blanc Massif). *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 85:153–60. doi:10.3406/bagf.2008.2608.
- Deline, P., M. Gardent, F. Magnin, and L. Ravel. 2012. The morphodynamics of the Mont Blanc massif in a changing cryosphere: A comprehensive review. *Geografiska Annaler*:

- Series A, *Physical Geography* 94:265–83. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x.
- Deline, P., S. Gruber, R. Delaloye, L. Fischer, M. Geertsema, M. Giardino, A. Hasler, M. Kirkbride, M. Krautblatter, and F. Magnin. 2015. Ice loss and slope stability in high-mountain regions. In *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*, ed. Haeberli, W. Whiteman, C. and Shroder, J.F., et al., 521–61. Saint-Louis: Elsevier Science.
- Devies, L., and P. Menry. 1975. *Guide vallot: La chaîne du Mont-Blanc, Aiguille Verte - Triolet - Dolent - Argentière - Trient*, 493 p. 4e éd. ed. Paris: Arthaud.
- Dobinski, W. 2011. Permafrost. *Earth Science Reviews* 108:158–69. doi:10.1016/j.earscirev.2011.06.007.
- Draebing, D., and J. Eichel. 2018. Divergence, convergence, and path dependency of paraglacial adjustment of alpine lateral moraine slopes. *Land Degradation and Development* 29:1979–1999. doi:org/10.1002/ldr.2983
- Duez, J.-B. 2009. The climber's tool. Techniques et culture. *Revue semestrielle d'anthropologie des techniques*, 52, 21p.
- Durand, Y., G. Giraud, M. Latemser, P. Etchevers, L. Mérindol, and B. Lesaffre. 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* 48:2487–512. doi:10.1175/2009JAMC1810.1.
- Eichel, J., D. Draebing, and N. Meyer. 2018. From active to stable: Paraglacial transition of Alpine lateral moraine slopes. *Land Degradation & Development* 29–11:4158–72. doi:10.1002/ldr.3140.
- Faillietaz, J., M. Funk, and C. Vincent. 2015. Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Reviews of Geophysics* 53:203–24. doi:10.1002/2014RG000466.
- Faup, H. 2003. *Goulottes du massif du Mont Blanc. Géographie, fonctionnement et évolution glacio-morphologiques*, 88. Univ. Paris VII.Paris, Mémoire DEA.
- Fischer, L., A. Kaab, C. Huggel, and J. Noetzlieology. 2006. Glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall: The Monte Rosa east face. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6:761–772.
- Galibert, G. 1960. L'évolution actuelle des «faces nord» de la haute montagne alpine dans le massif de Zermatt. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen* 31 (2):133–63. doi:10.3406/rgpso.1960.4718.
- Gardent, M., A. Rabatel, J. P. Dedieu, and P. Deline. 2014. Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change* 120:24–37. doi:10.1016/j.gloplacha.2014.05.004.
- Geertsema, M., J. J. Clague, J. W. Schwab, and S. G. Evans. 2006. An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Engineering Geology* 83 (1):120–43. doi:10.1016/j.enggeo.2005.06.028.
- Gilbert, A., and C. Vincent. 2013. Atmospheric temperature changes over the 20th century at very high elevations in the European Alps from englacial temperatures. *Geophysical Research Letters* 40–10:2102–08. doi:10.1002/grl.50401.
- Gruber, S., and W. Haerberli. 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research* 112:F02S18. doi:10.1029/2006JF000547.
- Haerberli, W., and S. Gruber. 2009. Global warming and mountain permafrost. In *Permafrost Soils*, ed. R. Margesin., Vol. 16, 205–18. Berlin Heidelberg, Springer.
- Hagenmuller, J. F., F. Marsigny, and F. Pallandre. 2016. *L'alpinisme - Des premiers pas aux grandes ascensions*, 144. Grenoble: Glénat.
- Harris, C., L. U. Arenson, H. H. Christiansen, B. Eitzelmüller, R. Frauenfelder, S. Gruber, W. Haerberli, C. Hauck, M. Hoelzle, O. Humlum, et al. 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews* 92:117–71. doi:10.1016/j.earscirev.2008.12.002.
- Harris, C., M. C. Davies, and B. Eitzelmüller. 2001. The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes* 12:145–56. doi:10.1002/ppp.376.
- Hoibian, O., and J. Defrance. 2002. Deux siècles d'alpinisme européens. *Origines et mutations des activités de grimpe*. L'Harmattan, Paris.
- Hoibian, O. 2008. L'alpinisme: déclin ou mutation. La lettre de l'OPMA n°23, Observatoire des pratiques de la montagne et de l'alpinisme.
- Huss, M. 2012. Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: The European Alps 1900–2100. *The Cryosphere* 6:1117–56. doi:10.5194/tcd-6-1117-2012.
- IPCC [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., et al.]. 2014. *Climate change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 169. Cambridge-New York: Cambridge University Press.
- Jouty, S., and H. Odier. 1999. *Dictionnaire de la montagne, illustré*, 720. Paris, Arthaud.
- Klein, G., Y. Vitasse, C. Rixen, C. Marty, and M. Rebetez. 2016. Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change* 139:637–49. doi:10.1007/s10584-016-1806-y.
- Laroche, J. L., and F. Lelong. 2010. *Sommets du Mont Blanc: Les plus belles courses de Facile à Difficile*, 160. Grenoble: Glénat.
- Le Meur, E., and C. Vincent. 2006. Monitoring of the Tacconnaz ice fall (French Alps) using measurements of mass balance, surface velocities and ice cliff position. *Cold Regions Science and Technology* 46:1–11. doi:10.1016/j.coldregions.2006.05.001.
- Lukas, S., A. Graf, S. Coray, and C. Schlüchter. 2012. Genesis, stability and preservation potential of large lateral moraines of Alpine valley glaciers – Toward a unifying based on Findelengletscher, Switzerland. *Quaternary Science Reviews* 38:27–48. doi:10.1016/j.quascirev.2012.01.022.
- Magnin, F., A. Brenning, X. Bodin, P. Deline, and L. Ravanel. 2015. Statistical modelling of rock wall permafrost distribution: Application to the Mont Blanc massif. *Geomorphologie* 21:145–62. doi:10.4000/geomorphologie.
- Margreth, S., J. Faillietaz, M. Funk, M. Vagliasindi, F. Diotri, and M. Broccolato. 2011. Safety concept for hazards caused by ice avalanches from the Whymper hanging glacier in the Mont Blanc Massif. *Cold Regions Science and Technology* 69:194–201. doi:10.1016/j.coldregions.2011.03.006.

- Martin, B., 2011. *Analyse diachronique de la couverture détritique supraglaciaire de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc) de 1939 à 2008*. MS diss., Université de Savoie, France.
- Matsuoka, N., 2001. Direct observation of frost wedging in alpine bedrock. *Earth Surface Processes and Landforms* 26:601–14. doi:10.1002/(ISSN)1096-9837.
- Matsuoka, N., and H. Sakai. 1999. Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology* 28:309–28. doi:10.1016/S0169-555X(98)00116-0.
- McColl, S. T. 2012. Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology* 153–154:1–16. doi:10.1016/j.geomorph.2012.02.015.
- Miller, J., W. Immerzeel, and G. Rees. 2012. Climate change impacts on glacier hydrology and river discharge in the Hindu Kush – Himalayas. *Mountain Research and Development* 32 (4):461–67. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-12-00027.1.
- Modica, G. 2015. *1865 L'âge d'or de l'alpinisme*, 400. Guérin: Chamonix Mont Blanc.
- Moreau, M. 2010. Visual perception of changes in a high mountain landscape: The case of the retreat of the Évettes Glacier (Haute-Maurienne, northern French Alps). *Géomorphologie* 16 (2):165–74. doi:10.4000/geomorphologie.7901.
- Mortara, G., and M. Chiarle. 2005. Instability of recent moraines in the Italian Alps. Effects of natural processes and human intervention having environmental and hazard implications. *Giornale Di Geologia Applicata* 1:139–46.
- Mourey, J., and L. Ravel. 2017. Evolution of access routes to high mountain refuges of the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif, France) - An example of adapting to climate change effects in the Alpine high mountains. *Journal of Alpine Research* 105. doi:10.4000/rga.3780.
- Mourey, J., O. Moret, P. Descamps, and P. Bozon. 2018. *Accidentology of the normal route up Mont Blanc between 1990 and 2017*, 20. Grenoble, France: Fondation Petzl.
- Ogier, C., L. Ravel, and E. Graff. 2017. Parcours glaciaires et ruptures de ponts de neige. Première connaissances issues de retours d'expérience. *Neige Et Avalanches* 158:4.
- Piola, M. 2006. *Massif du Mont-Blanc, Envers des Aiguilles*, 248. Genève: Michel Piola éditions.
- Pohl, B., D. Joly, J. Pergaud, J.-F. Buoncristiani, P. Soare, and A. Berger. 2019. Huge decrease of frost frequency in the Mont-Blanc Massif under climate change. *Scientific Reports* 9:4919. doi:10.1038/s41598-019-41398-5.
- Purdie, H., C. Gomez, and S. Espiner. 2015. Glacier recession and the changing rockfall hazard: Implications for glacier tourism. *New Zealand Geographer* 71–3:189–202.
- Pusch, W., H. Dumler, and W. P. Burkhardt. 2014. *4000 des Alpes. Les plus belles courses d'alpinisme*, 271. Grenoble: Glénat.
- Rabatel, A., A. Letréguilly, J. P. Dedieu, and N. Eckert. 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* 7:1455–71.
- Ravel, L., and C. Lambiel. 2013. Evolution récente de la moraine des Gentianes (2894 m, Valais, Suisse) un cas de réajustement paraglaciaire? *Environnements Périglaciaires* 18–19:8.
- Ravel, L., F. Magnin, and P. Deline. 2017. Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment* 609:132–43.
- Ravel, L., and P. Deline. 2008. La face ouest des drus (massif du Mont-Blanc): évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire. *Géomorphologie* 4:261–72.
- Ravel, L., and P. Deline. 2011. Climate influence on rock-falls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc Massif) since the end of the "Little Ice Age". *The Holocene* 21:357–65.
- Ravel, L., and P. Deline. 2013. *A network of observers in the Mont Blanc massif to study rockfalls in high alpine rock-walls*, 151–58. Torino, Italy: Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, Comitato Glaciologico Italiano.
- Ravel, L., and P. Deline. 2015. Rockfall hazard in the Mont Blanc massif increased by current atmospheric warming. *Engineering Geology for Society and Territory* 1:425–28.
- Ravel, L., P. Deline, C. Lambiel, and C. Vincent. 2013. Instability of a high alpine rock ridge: The lower Arête des Cosmiques, Mont Blanc Massif, France. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 95:51–66.
- Ravel, L., P.-A. Duvillard, M. Jaboyedoff, and C. Lambiel. 2018. Recent evolution of an ice-cored moraine at the Gentianes Pass, Valais Alps, Switzerland. *Land Degradation & Development* 29 (10):3693–708.
- Rebuffat, G. 1973. *Le massif du Mont-Blanc – Les 100 plus belles courses*, 238. Paris: Denoël.
- Ritter, F., M. Fiebig, and A. Muhar. 2012. Impacts of global warming on mountaineering: A classification of phenomena affecting the alpine trail network. *Mountain Research and Development* 32:4–15.
- Serquet, G., C. Marty, J.-P. Dulex, and M. Rebetez. 2011. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters* 38:L07703.
- Temme, A. J. A. M. 2015. Using climber's guidebooks to assess rock fall patterns over large spatial and decadal temporal scales: An example from the Swiss Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 97 (4):793–807.
- Vincent, C. 2002. Influence of climate change on French glaciers mass balance over the 20th century. *La Houille Blanche*, 8.
- Vincent, C. 2010. *L'impact des changements climatiques sur les glaciers alpins*. Thèse de Doctorat, University of Grenoble, 212p.
- Vincent, C., A. Fischer, C. Mayer, A. Bauder, S. P. Galos, M. Funk, E. Thibert, D. Six, L. Braun, and M. Huss. 2017. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years: Common climatic signal in the Alps. *Geophysical Research Letters* 44:1376–83.
- Vincent, C., E. Thibert, M. Harter, A. Soruco, and A. Gilbert. 2015. Volume and frequency of ice avalanches from Taconnaz hanging glacier, French Alps. *Annals of Glaciology* 56 (70):17–25.
- Volle, M. 1997. *Analyse des données*. 4^e ed. 323 p. Paris: Economica.