



HAL
open science

L'alpinisme à l'épreuve du changement climatique : Évolution géomorphologique des itinéraires, impacts sur la pratique estivale et outils d'aide à la décision dans le massif du Mont Blanc

Jacques Mourey

► To cite this version:

Jacques Mourey. L'alpinisme à l'épreuve du changement climatique : Évolution géomorphologique des itinéraires, impacts sur la pratique estivale et outils d'aide à la décision dans le massif du Mont Blanc. Géographie. Université Grenoble Alpes, 2019. Français. NNT : 2019GREAA020 . tel-03510607

HAL Id: tel-03510607

<https://theses.hal.science/tel-03510607v1>

Submitted on 4 Jan 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Géographie**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Jacques Mourey

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

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

Thèse soutenue publiquement le **4 octobre 2019**,
devant le jury composé de :

M. Emmanuel REYNARD

Professeur des Universités, Université de Lausanne, Suisse (Rapporteur)

Mme Isabelle SACAREAU

Professeure des Universités, Université Bordeaux Montaigne (Rapporteuse)

M. Bastien SOULE

Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1 (Examinateur)

M. Denis MERCIER

Professeur des Universités, Sorbonne Université (Président)

M. Christophe GAUCHON

Professeur des Universités, Université Savoie Mont Blanc (Directeur)

M. Ludovic RAVANEL

Chargé de Recherche, Université Savoie Mont Blanc (co-directeur)

Mme Clémence PERRIN-MALTERRE

Maître de Conférences, Université Savoie Mont Blanc (co-directrice)



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 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.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
Sommaire.....	9
Sigles et abréviations.....	11
Introduction générale.....	13
Partie I. La pratique de l'alpinisme face aux évolutions des milieux de haute montagne.....	19
Chapitre 1. L'alpinisme : historique et définition de l'objet d'étude.....	21
Chapitre 2. Impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne.....	43
Chapitre 3. Tourisme de nature et alpinisme face au changement climatique.....	63
Conclusion de la Partie I.....	82
Partie II. Évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	83
Chapitre 4. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation.....	85
Chapitre 5. Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation..	129
Conclusion de la Partie II.....	154
Partie III. Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique sur les itinéraires.....	155
Chapitre 6. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique, perception et adaptation.....	157
Chapitre 7. Les effets du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne.....	191
Chapitre 8. Mesure de la fréquentation des itinéraires d'alpinisme : quantification des flux, comportements adaptatifs et accidentologie.....	209
Conclusion de la Partie III.....	262
Conclusion générale.....	263
Bibliographie.....	271
Bibliographie personnelle.....	284
Table des figures, tableaux et encadrés.....	287
Liste des Annexes.....	291
Table des matières.....	329

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*.

ISterre : 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).

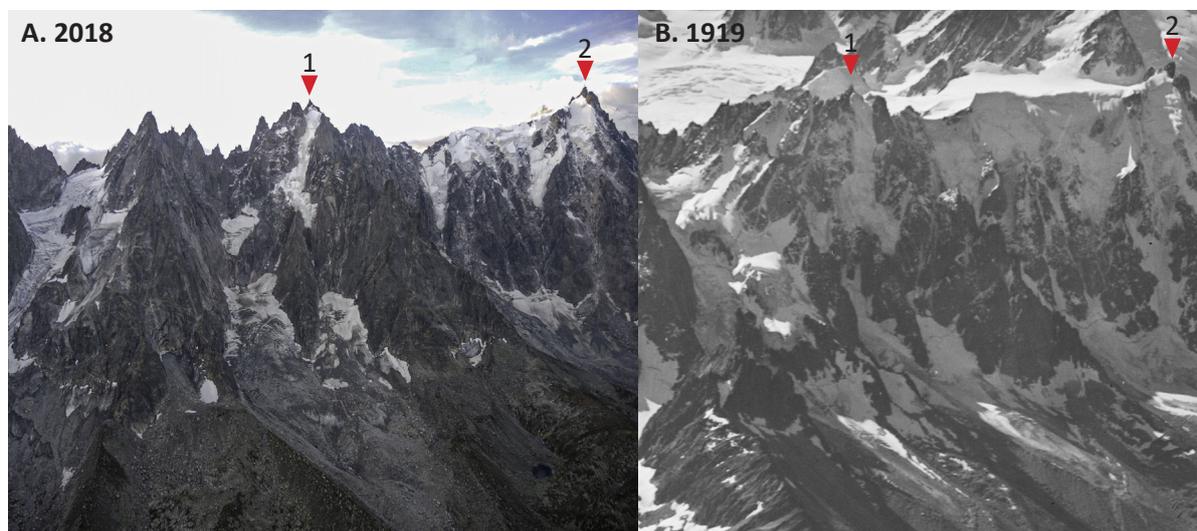


Figure I.1. Photo comparaison du versant nord des Aiguilles de Chamonix (massif du Mont Blanc) entre la fin de l'été 2018 (A) et l'été 1919 (B) (Mittelholzer W., ETH Zürich). 1. Aiguille du Plan (3673 m). 2. Aiguille du Midi (3842 m). On remarque l'importance de la fonte des glaciers suspendus et des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

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).

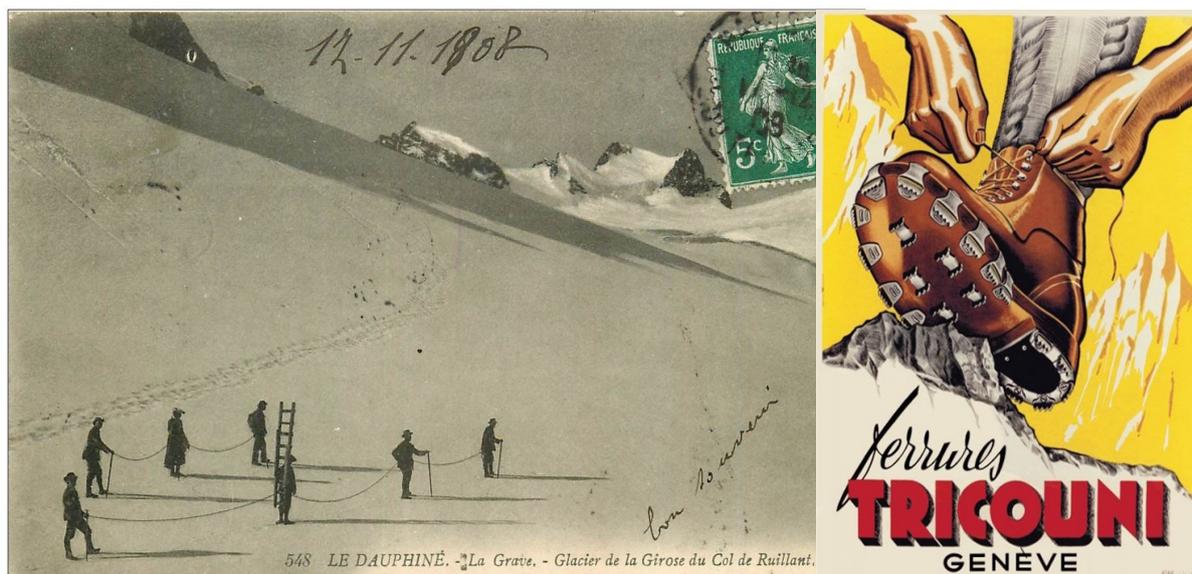


Figure 1.2. L'équipement d'alpinisme au début du XX^e siècle. A. Deux cordées sur le glacier de la Girose (massif des Écrins), septembre 1908. L'équipement est rudimentaire : échelle pour passer les crevasses et cordes simplement nouées autour de la taille (Maison de la Mémoire et du Patrimoine, Chamonix).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

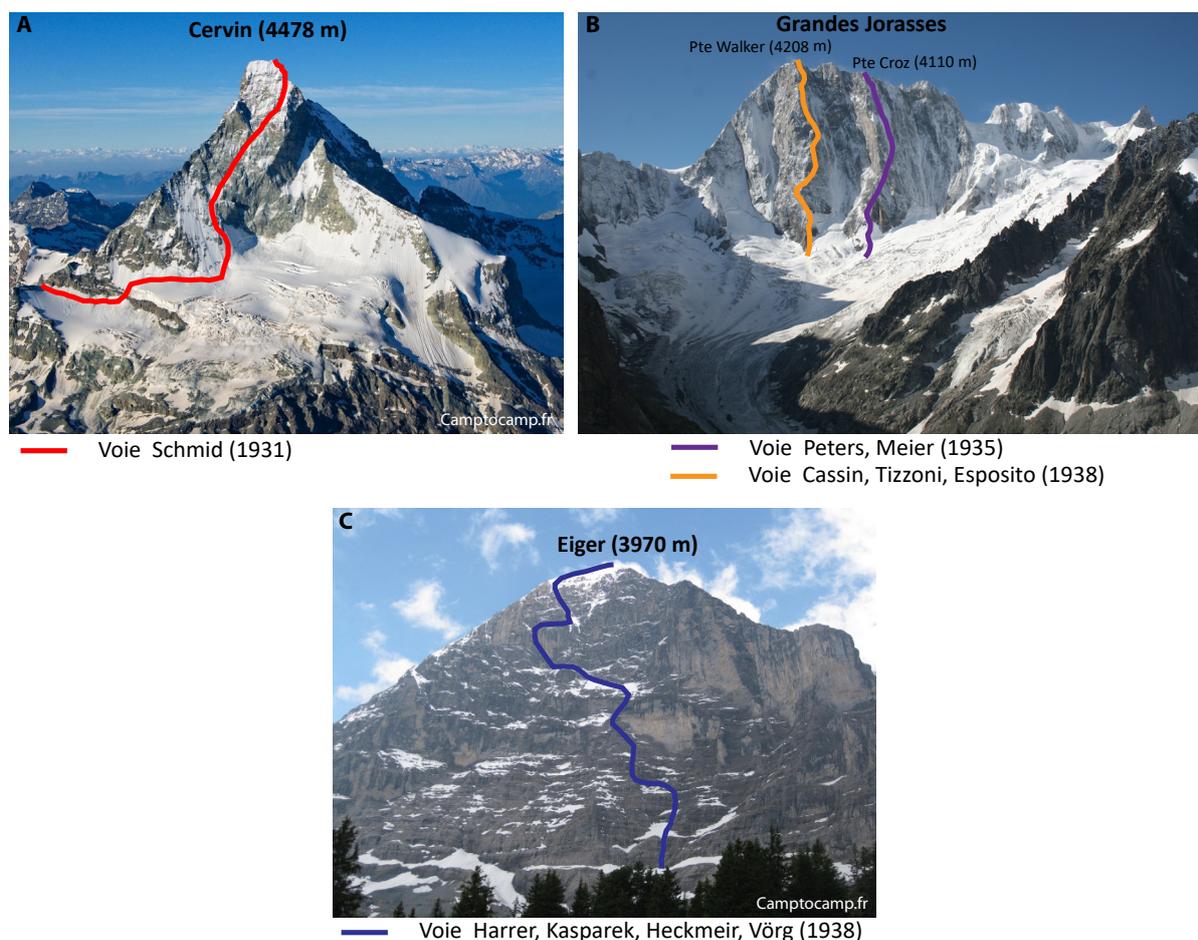


Figure 1.4. Les « trois derniers grands problèmes des Alpes » : (A) la face nord du Cervin, (B) la face nord des Grandes Jorasses, et (C) la face nord de l'Eiger avec leurs premières voies d'ascension.

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.

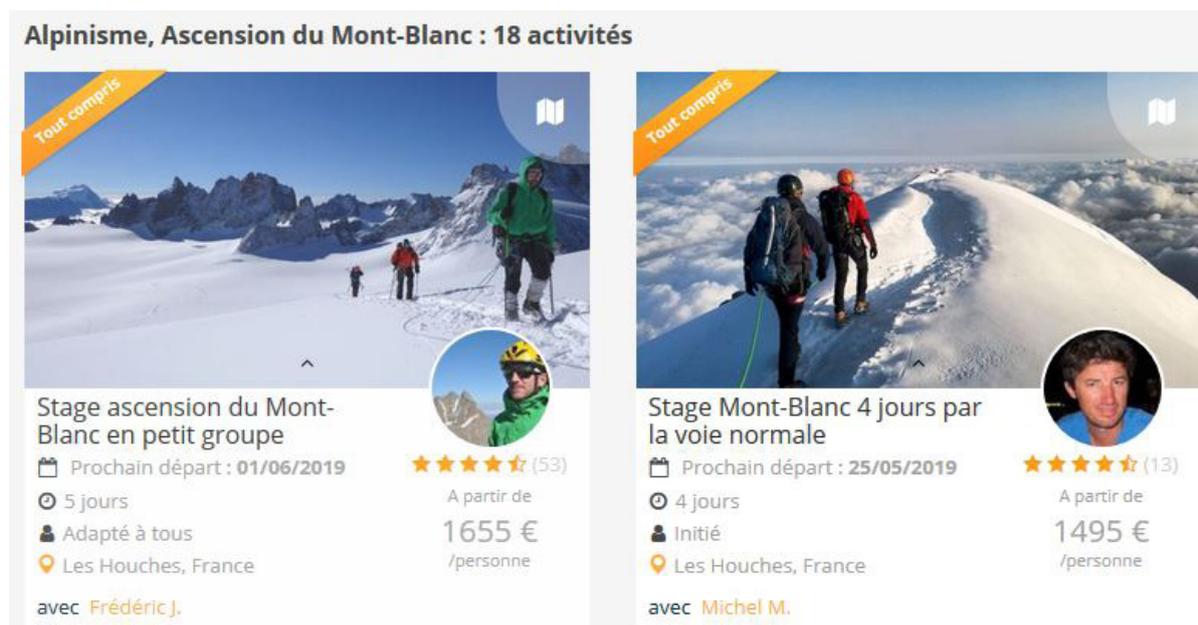


Figure 1.8. Vente de l'ascension du mont Blanc avec un guide de haute montagne sur le site de l'agence de voyage Kazaden (Kazaden.com, consulté le 28 jan. 2018).

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).

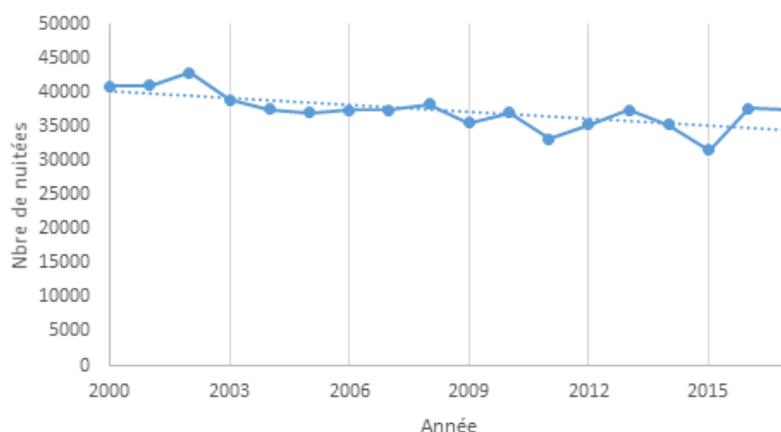


Figure 1.9. Évolution de la fréquentation des onze refuges de haute montagne du CAF dans le massif du Mont Blanc entre 2000 et 2017 (données FFCAM).

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 « 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.

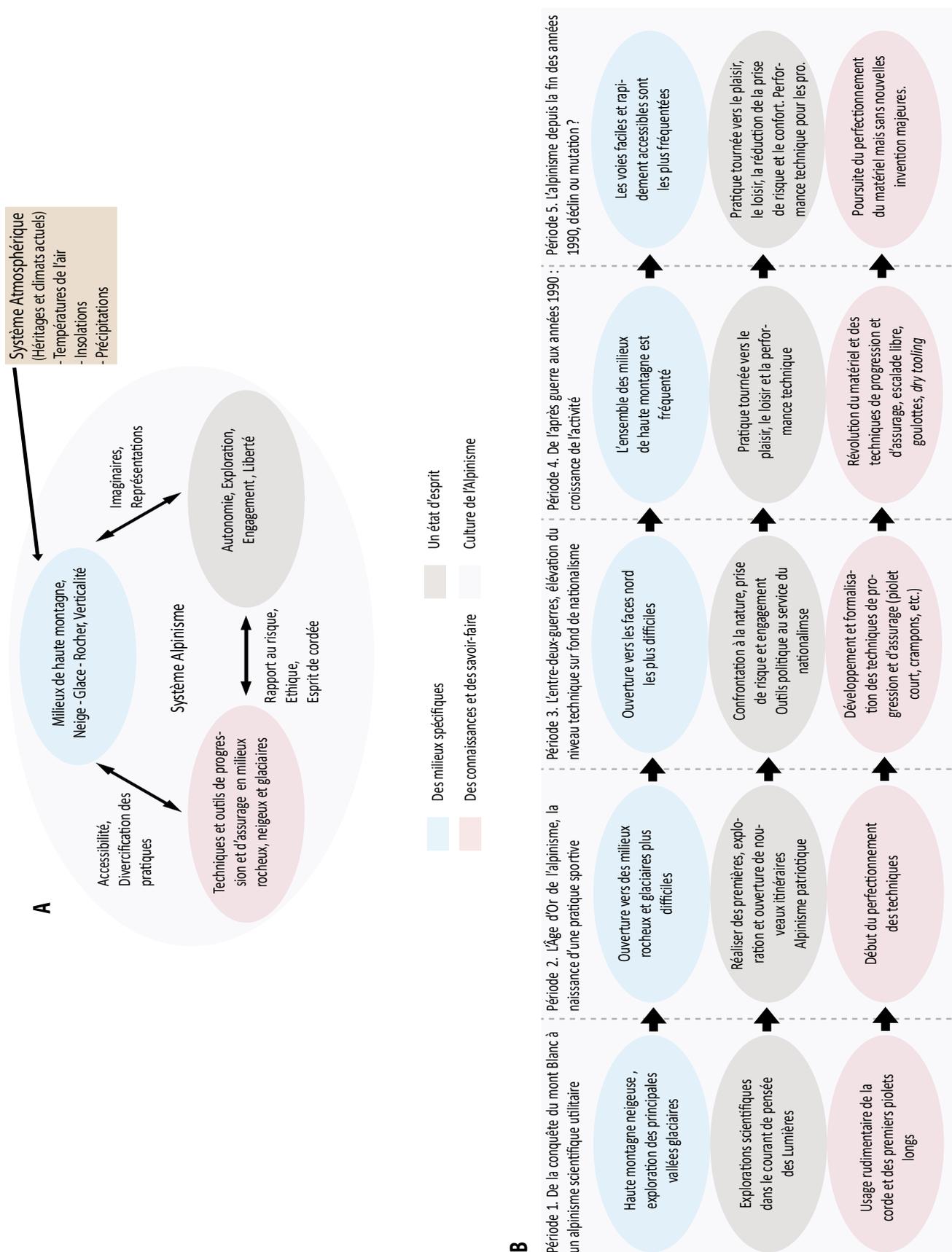


Figure 1.10. Définition de l'alpinisme dans les Alpes (A) selon trois constantes structurantes : des milieux de pratiques, un état d'esprit et des savoir-faire, dont l'évolution, (B) en 4 périodes principales, construit aujourd'hui une culture de l'alpinisme.

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.

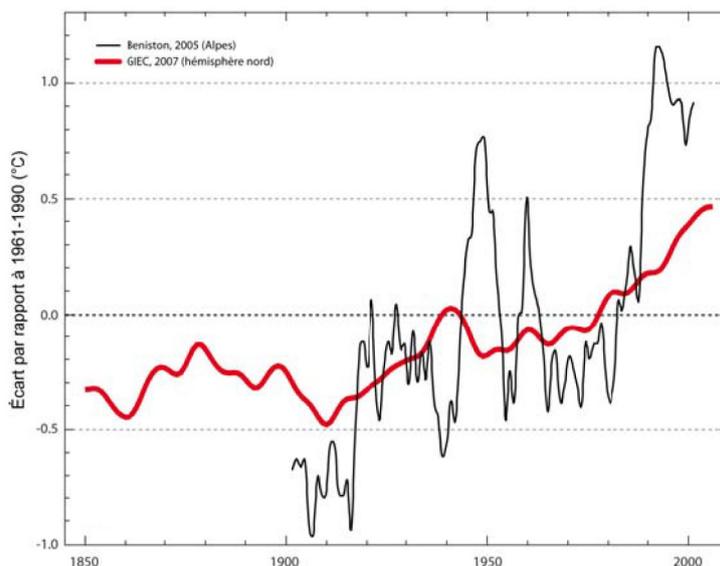


Figure 2.1. Evolution de l'écart des températures moyennes annuelles dans l'hémisphère nord et dans les Alpes par rapport à la température moyenne de la période 1961-1990.

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 décline (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).

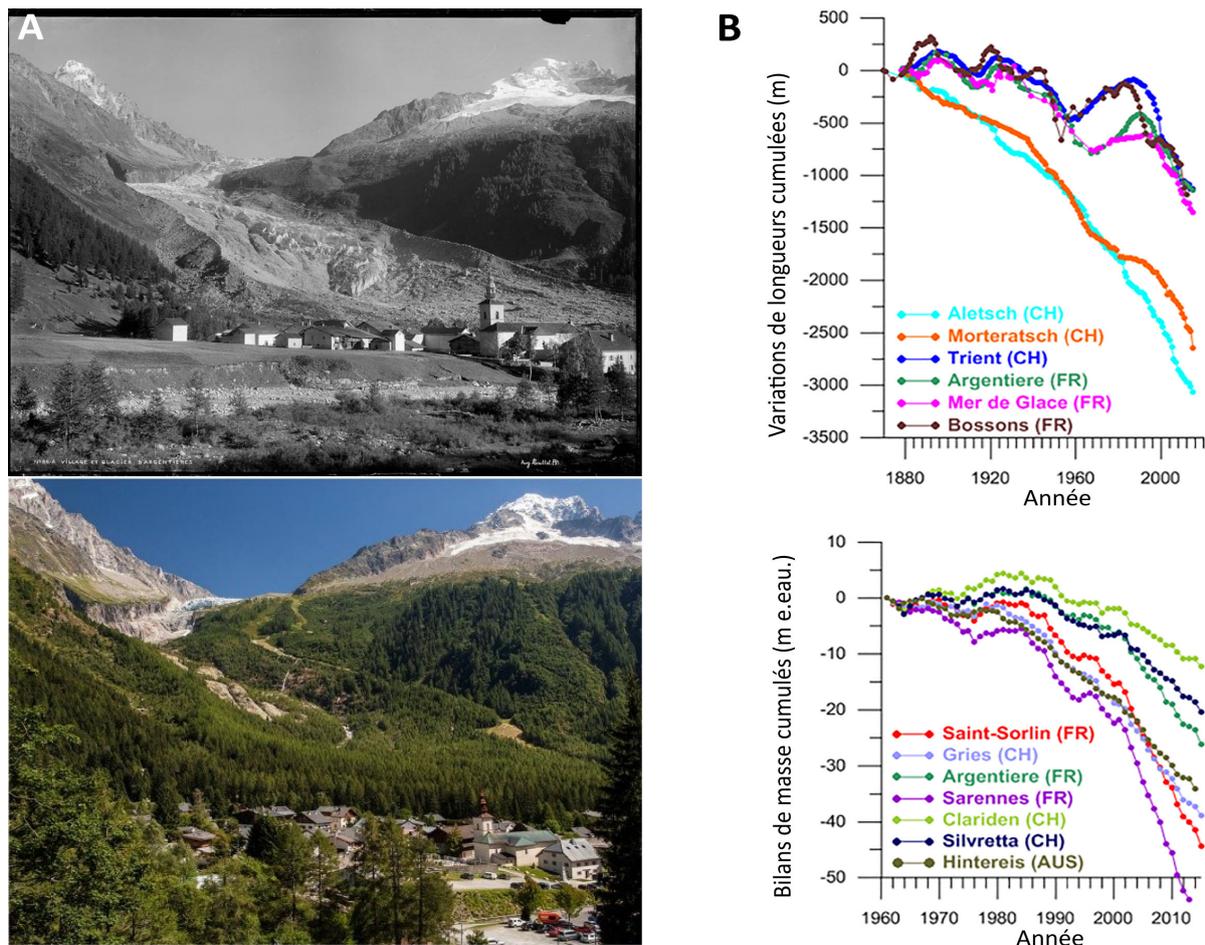


Figure 2.2. A. Photo-comparaison du glacier d'Argentière entre le début du XX^e siècle (Fond Gay-Couttet, Maison de la Mémoire et du Patrimoine de Chamonix) et 2015 (CREA Mont-Blanc). B. Variations de la longueur et du bilan de masse de plusieurs glaciers alpins (Beniston et al., 2018).

- (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).

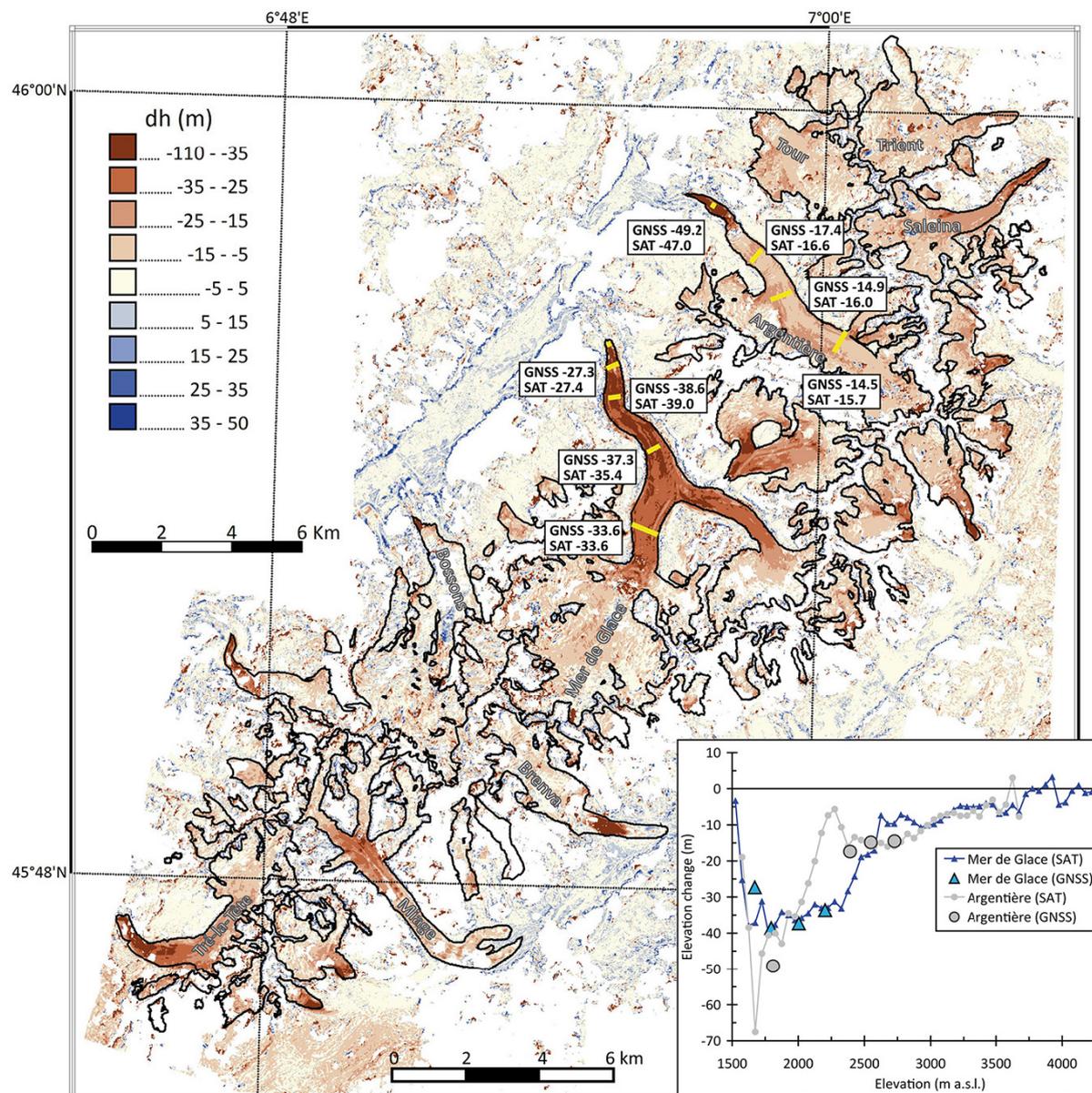


Figure 2.3. Différence d'altitude de la surface des glaciers entre août 2003 et août 2012 sur l'ensemble du massif du Mont Blanc (Berthier *et al.*, 2014). Les profils jaunes représentent les sites où l'altitude est mesurée tous les ans par GPS différentiel. Le graphique présente les différences de niveau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

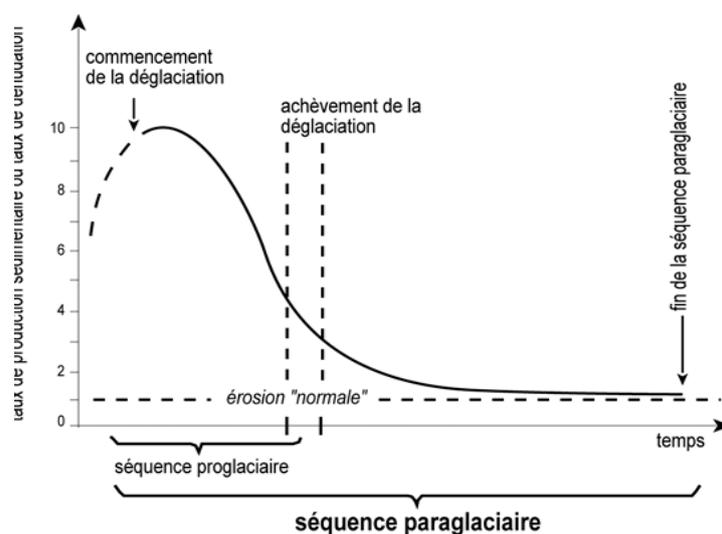


Figure 2.4. Durée de vie d'une séquence paraglaciale (d'après Church et Ryder, 1972 ; Mercier, 2010).

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).

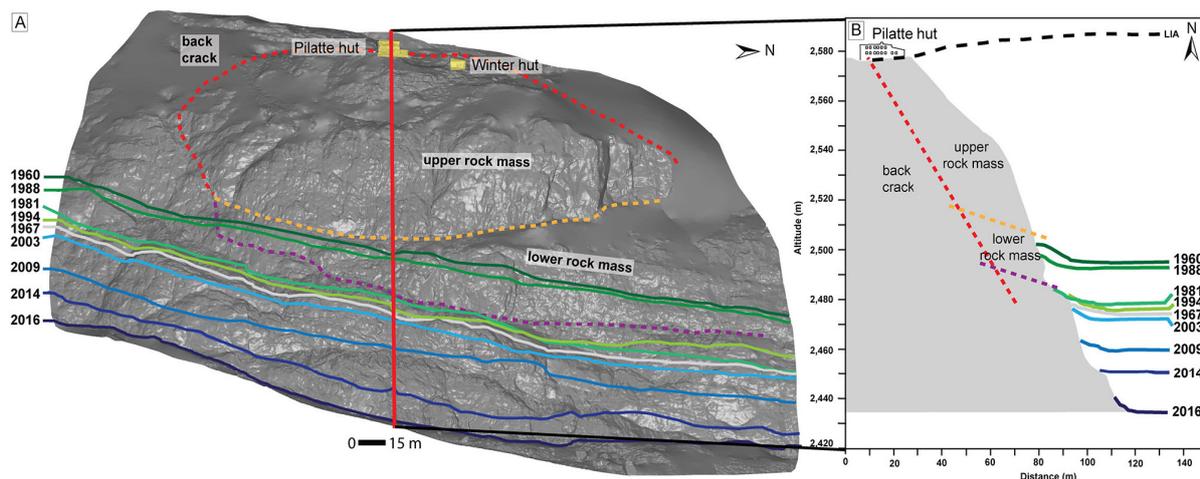


Figure 2.5. Évolution du niveau de la surface du glacier de la Pilatte en aval du refuge du même nom (massif des Ecrins, France ; Duvillard et al., 2018) A. Modèle 3D du secteur. B. Coupe transversale du versant.

-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.

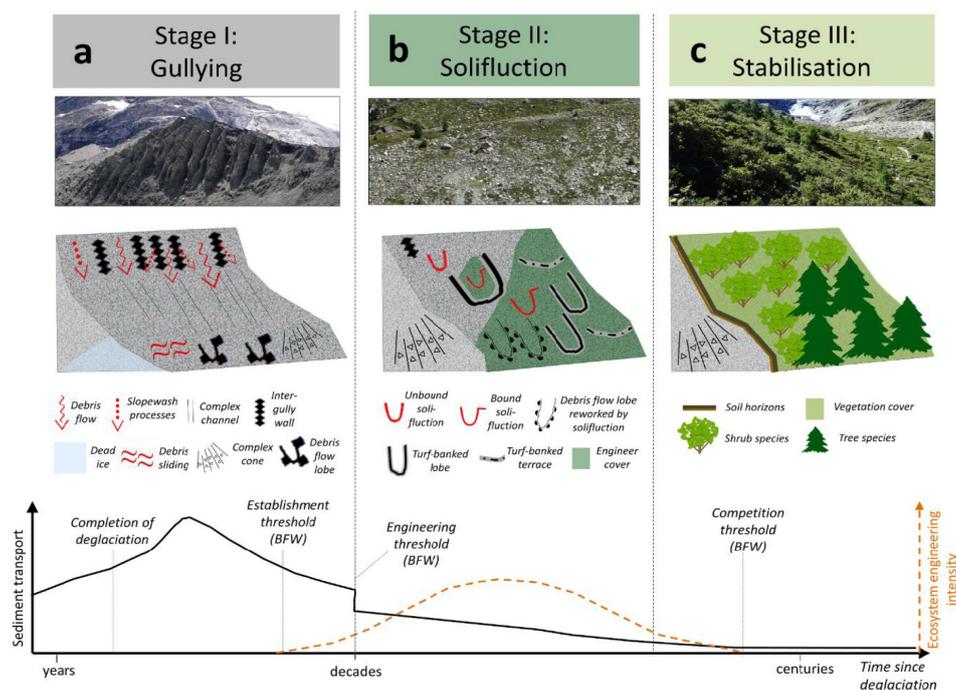


Figure 2.6. Modèle conceptuel d'évolution d'une moraine latérale alpine, depuis un état géomorphologique actif à stable (Eichel et al., 2018).

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.

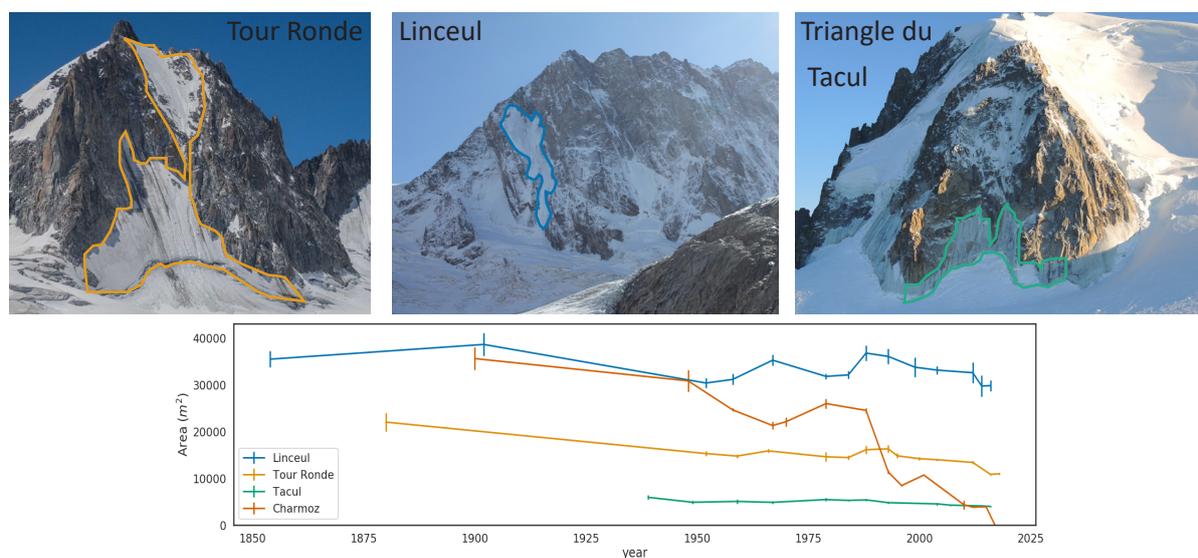


Figure 2.8. Les couvertures glacio-nivales de la Tour Ronde, du Linceul et du Triangle du Tacul (massif du Mont Blanc) et leur dynamique de retrait (Guillet, 2016).

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).

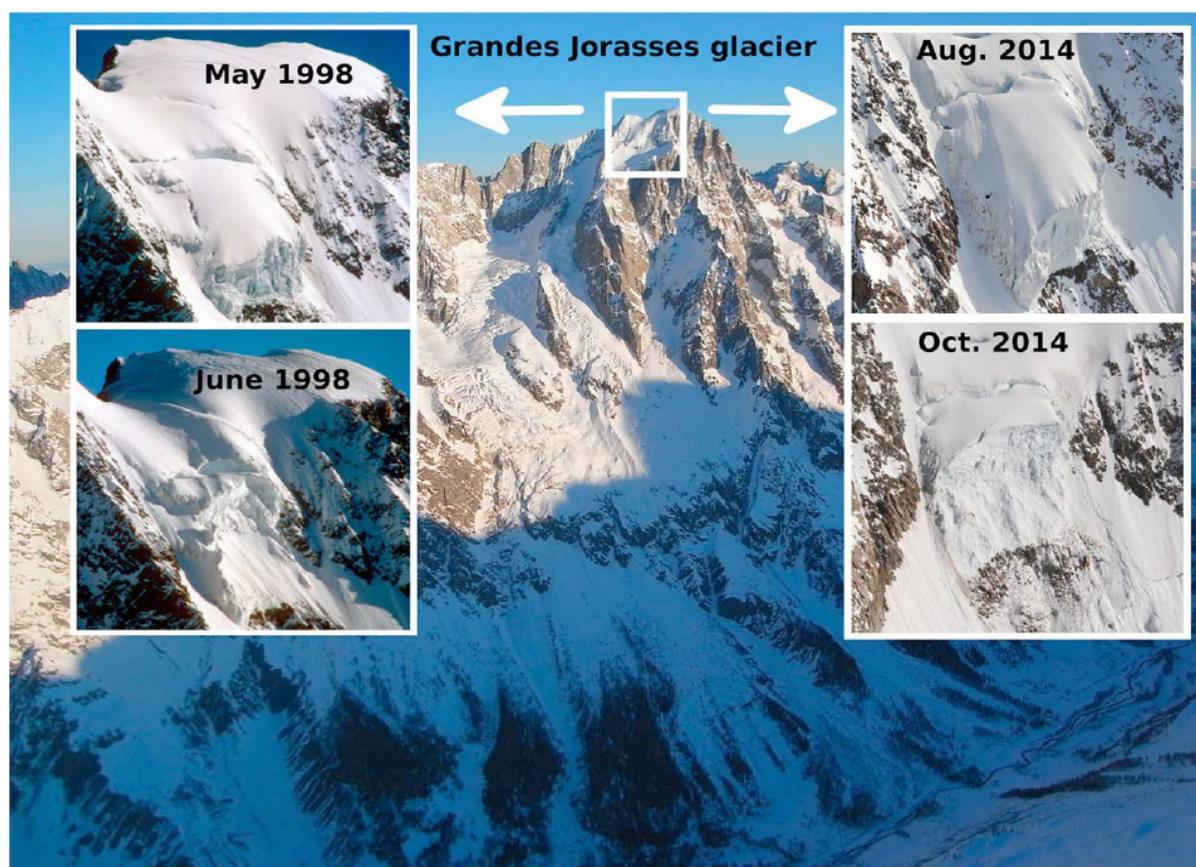


Figure 2.9. Face sud des Grandes Jorasses. Effondrement du front du glacier suspendu en 1998 et 2014 (Failletaz *et al.*, 2015).

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).

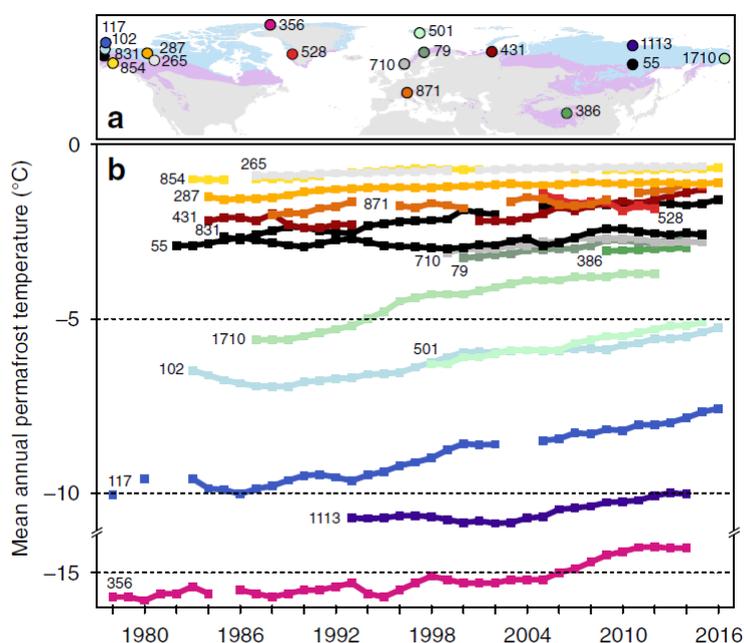


Figure 2.10. Mesure de la température du permafrost dans différents sites à travers le monde depuis les années 1970 (Biskaborn *et al.*, 2019). A. Localisation des forages de mesures. Les zones en bleu représentent les secteurs de permafrost continu (> 90 %). Les zones en violet représentent les secteurs 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).

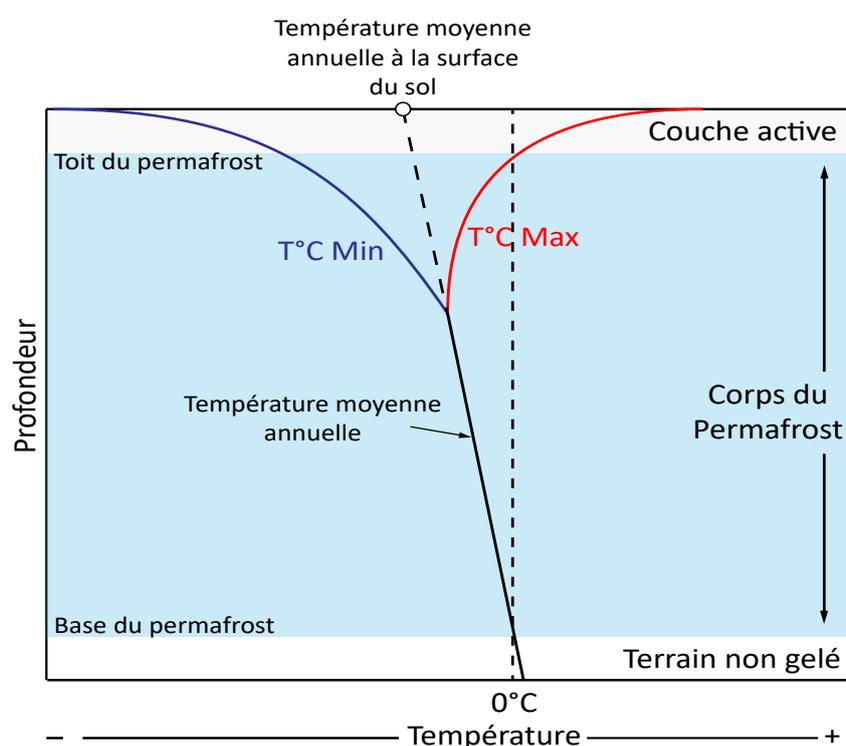


Figure 2.11. Profil thermique des terrains à permafrost.

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.

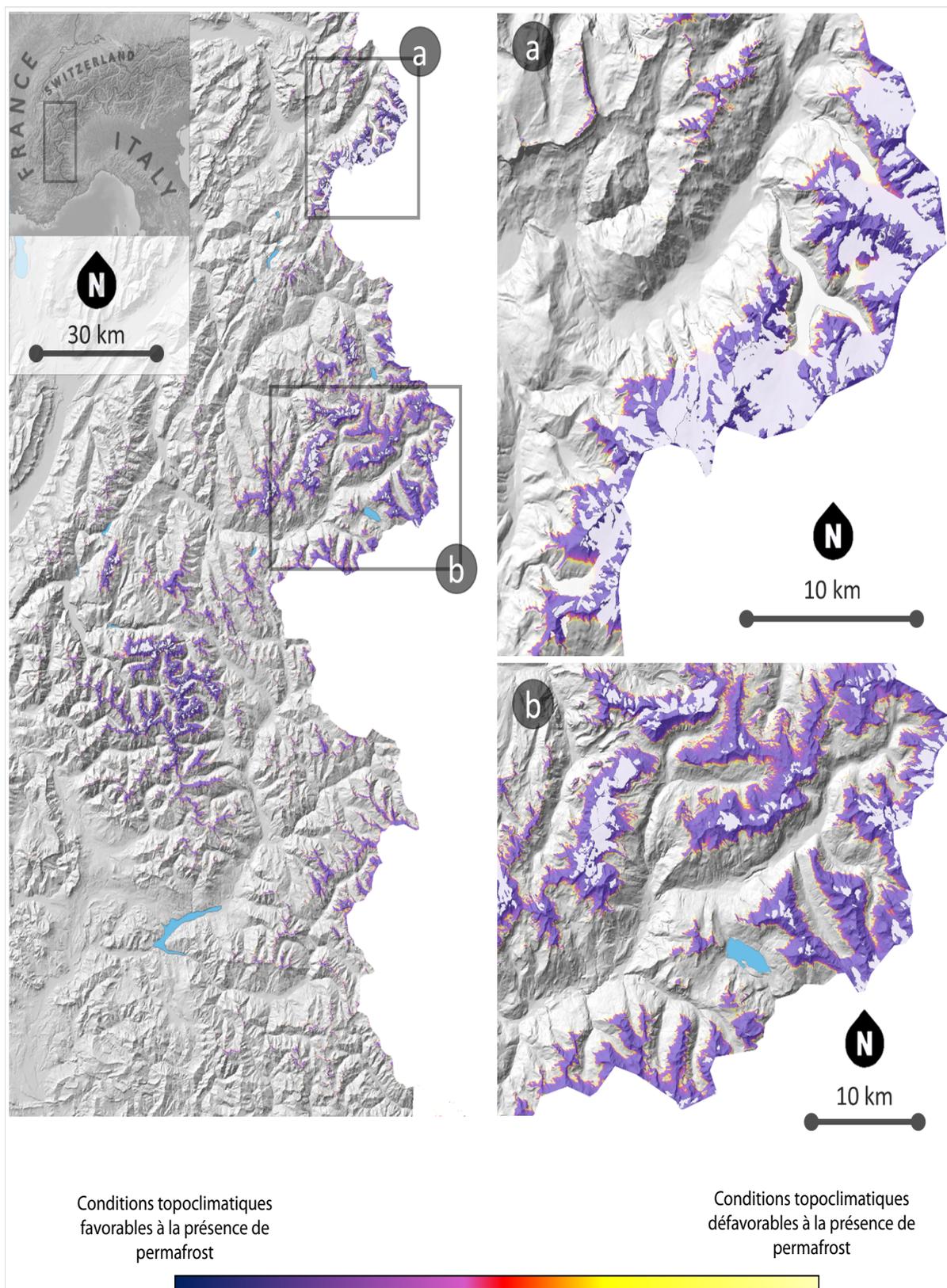


Figure 2.12. Carte de l'Index de Favorabilité du Permafrost (PFI) dans les Alpes françaises (Marcer, 2018). A : massif du Mont Blanc ; B : massif de la Vanoise.

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).

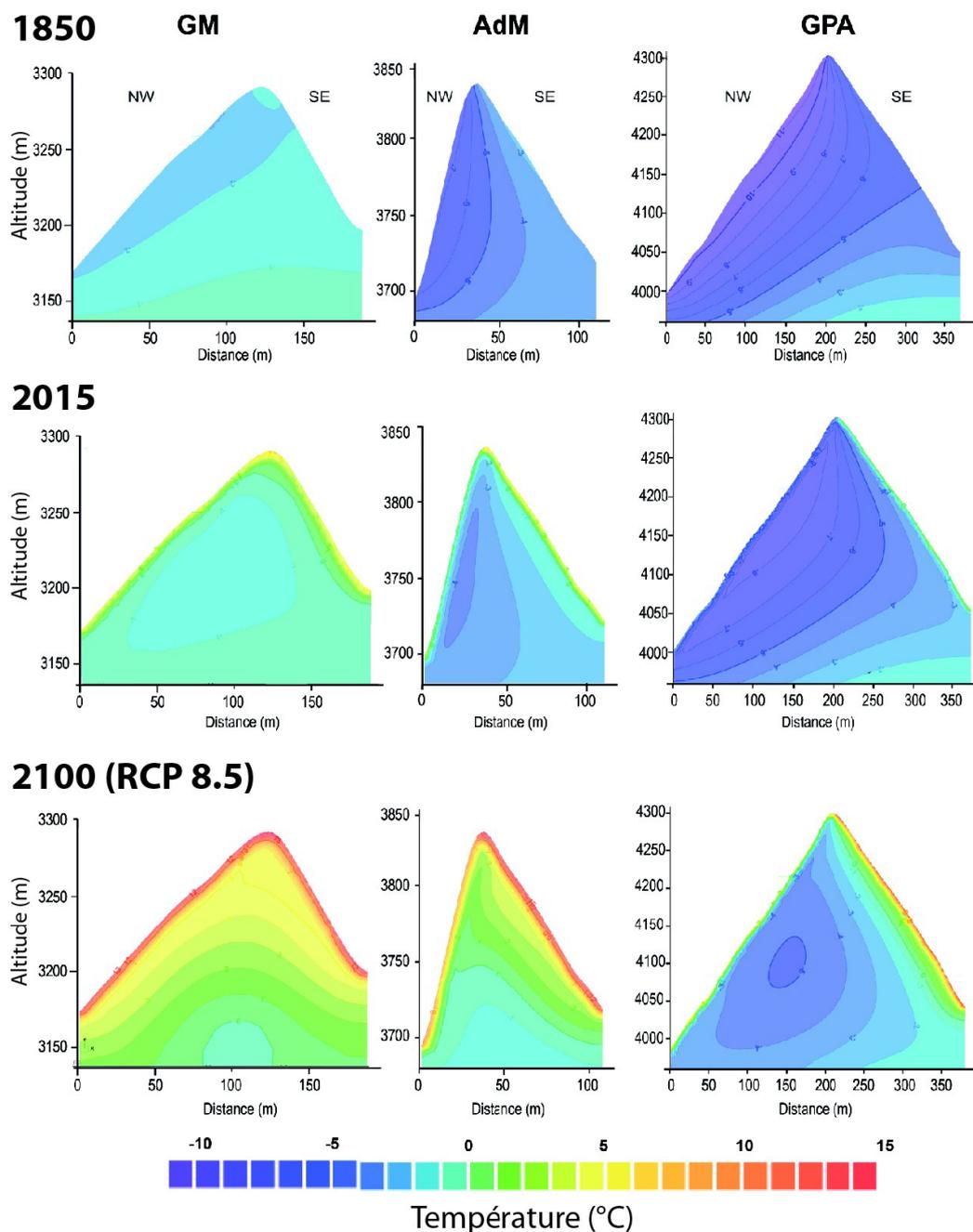


Figure 2.13. Modélisation de l'état thermique du permafrost dans le massif du Mont Blanc à la fin du PAG, aujourd'hui, et à la fin du XXI^e siècle selon le scénario climatique RCP 8.5 (Magnin et al., 2017) pour le sommet des Grands Montets (GM, 3296 m), de l'aiguille du Midi (AdM, 3842 m) et du Grands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

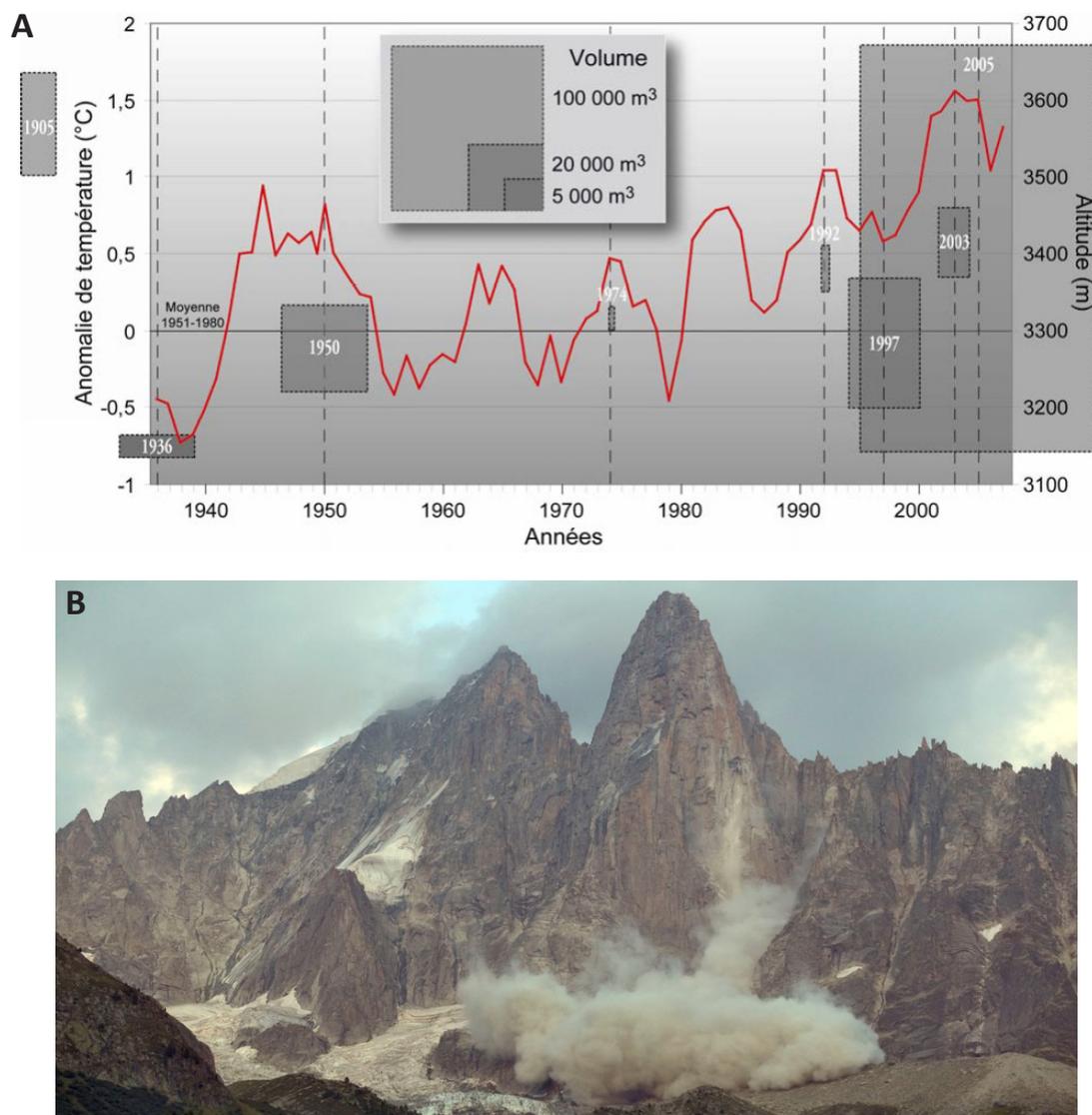


Figure 2.14. A. Évolution sur près d'un siècle du volume et de l'altitude des écroulements rocheux relevés dans la face ouest des Drus et de la température moyenne estivale à Chamonix (données Météo France). Les quadrilatères représentent les différents écroulements (Ravel et Deline, 2008). B. Écroulement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

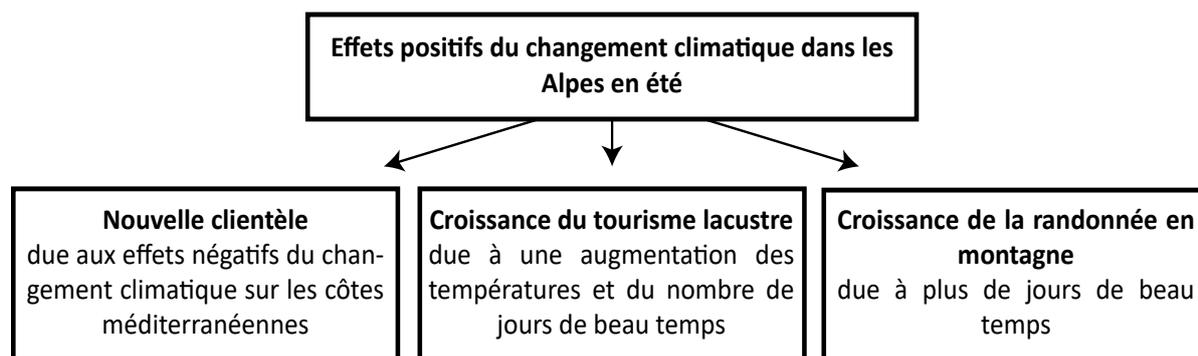


Figure 3.1. Effets positifs possibles du changement climatique sur le tourisme d'été dans les Alpes autrichienne (traduit de Probstl-Haider *et al.*, 2015).

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.

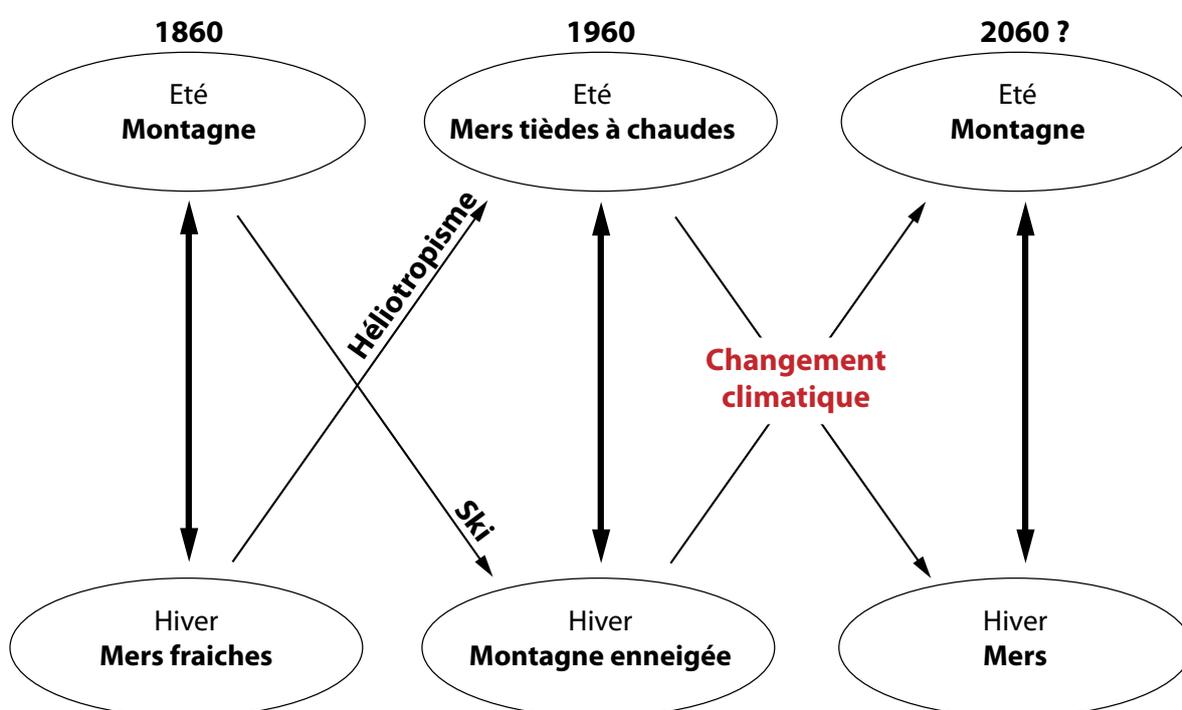


Figure 3.2. Vers un nouveau retournement des polarités touristiques saisonnières (traduit de Bourdeau, 2009 ; modifié).

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).

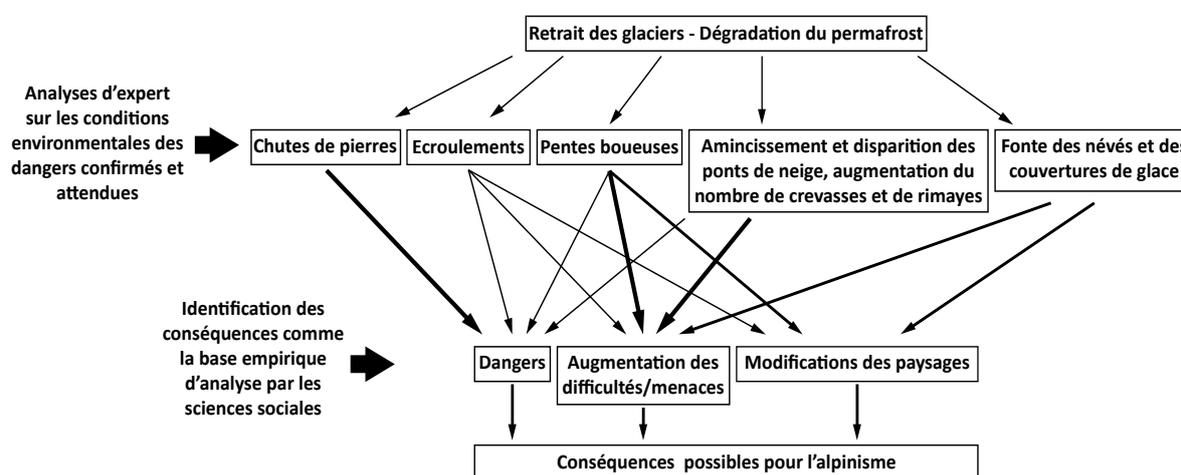


Figure 3.3. Influence du retrait glaciaire et de la dégradation du permafrost sur l'alpinisme. L'épaisseur des flèches exprime quel aléa est le plus susceptible d'affecter l'alpinisme (traduit de Probstl et Damm, 2008).

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.

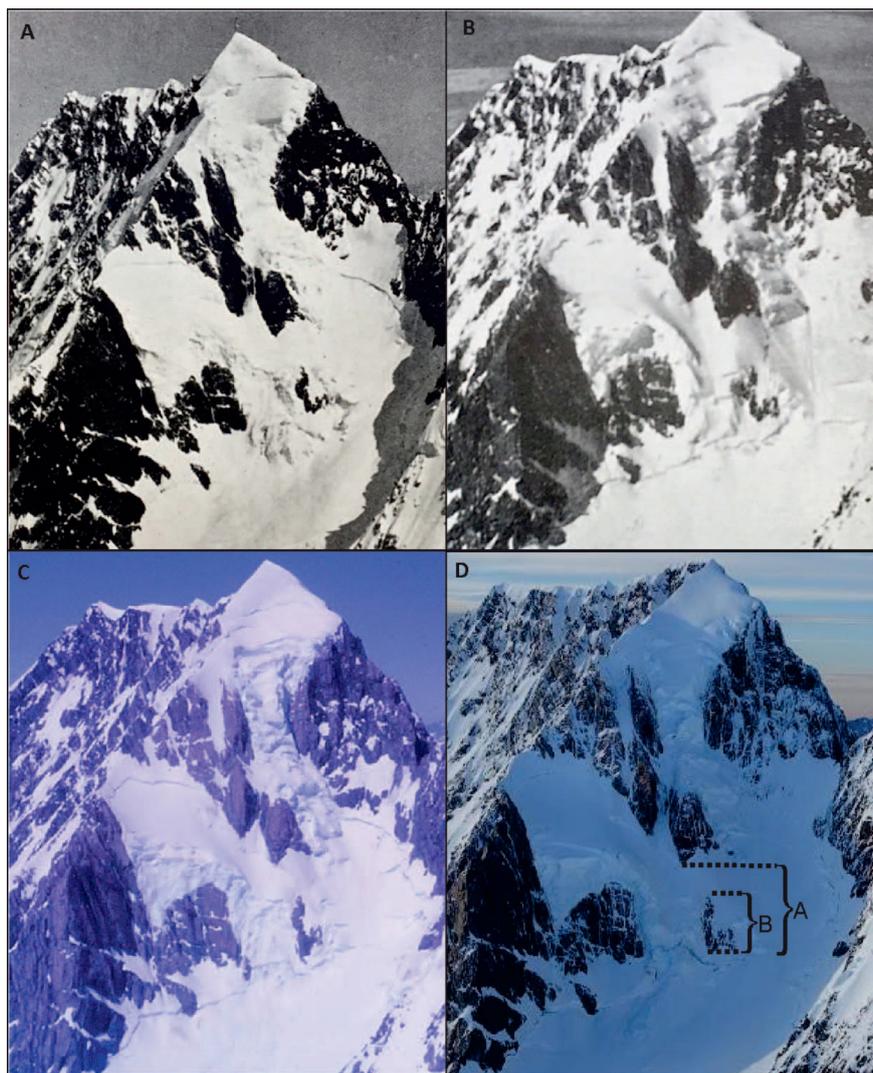


Figure 3.4. Partie haute du glacier Linda vue depuis le Mont Tasman par (A) F. Du Faur en mars 1912 (Ross 1930a), (B) H.K. Douglas en décembre 1935 (Bryant, 1938), (C) B. Keir en décembre 1961 et (D) R. Measures en novembre 2015. L'index de fonte du glacier Linda a été calculé en comparant les distance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

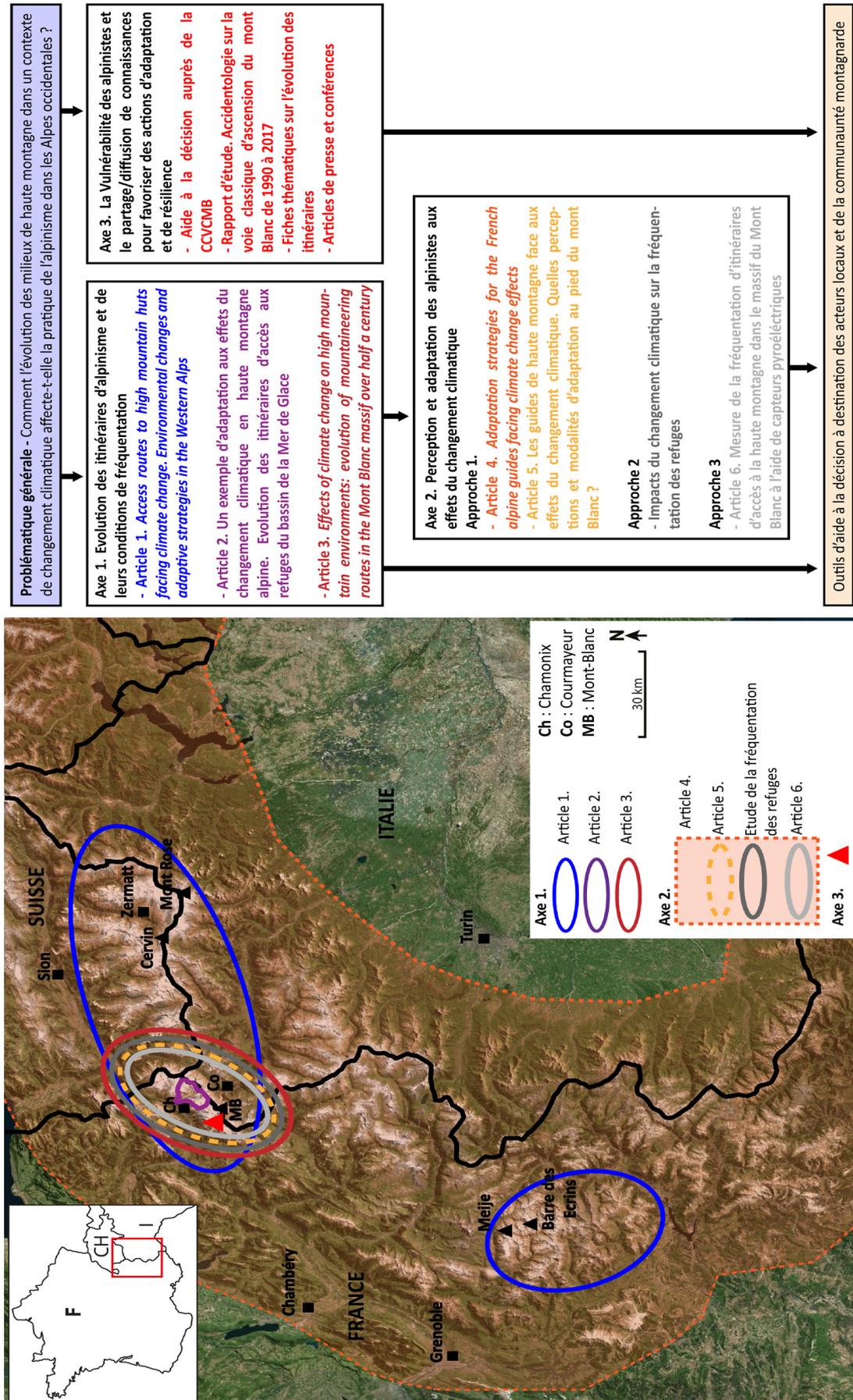


Figure 3.5. Structuration du travail doctoral et échelles spatiales d'investigation.

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.

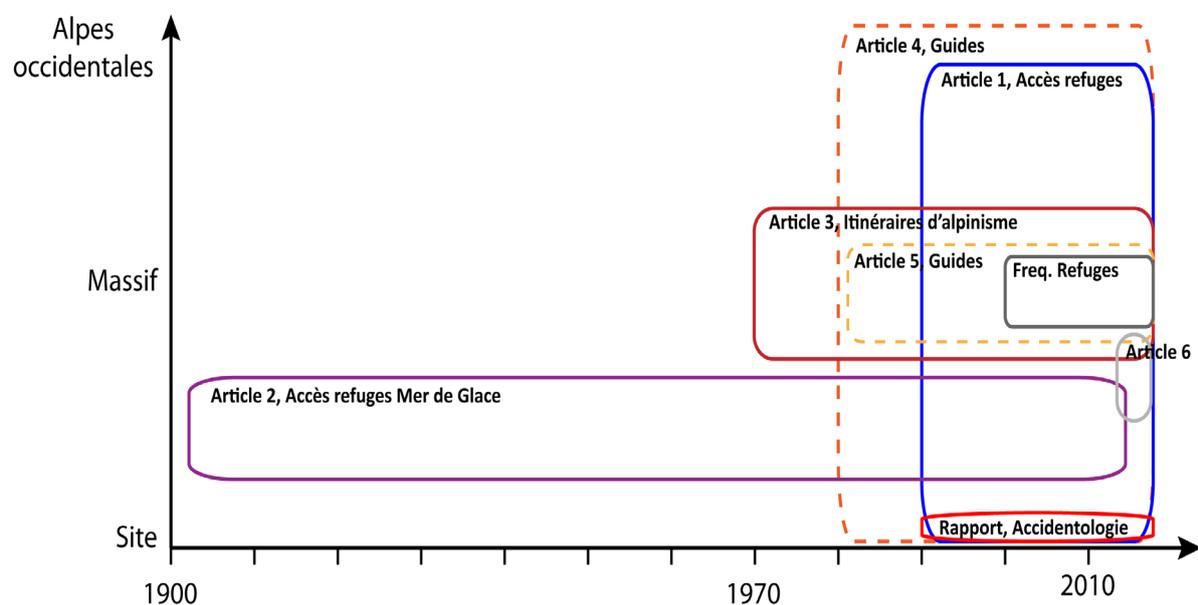


Figure 3.6. Échelles de temps et d'espace traitées dans ce travail doctoral.

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.

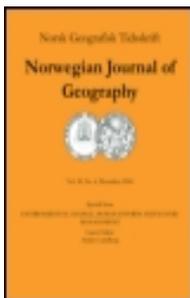
Rôle des auteurs

- 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?

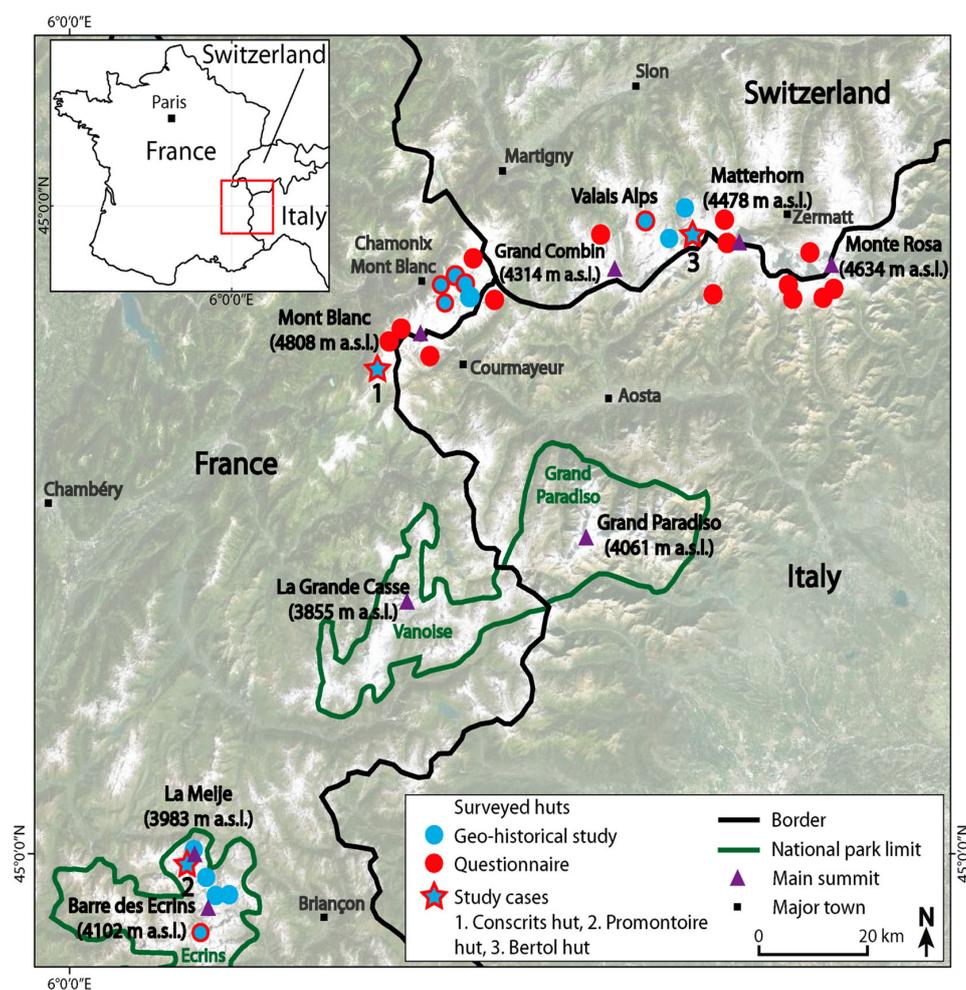


Fig. 1. Location of the 30 huts included in the study conducted in the Écrins massif, Mont-Blanc massif and Valais Alps (main map accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) in 2017)

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 proglacial 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

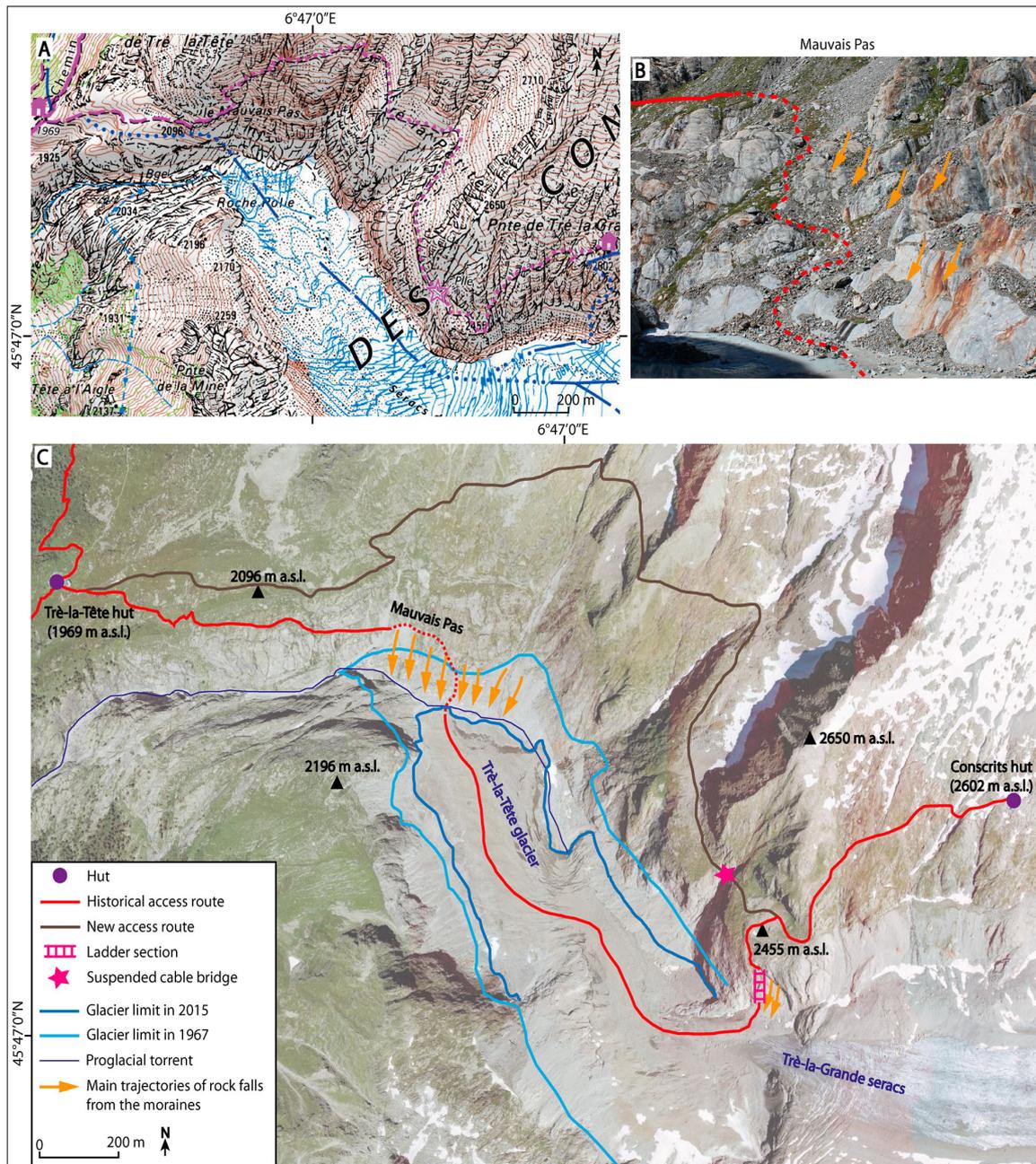


Fig. 2. Change in the access route to the Concrits hut since the 1990s: A. Concrits hut sector (map accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) in 2017); B. the Mauvais Pas in 2015 (Photo: Jacques Mourey, 2015); C. Location of the old and new access routes to the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

Concrits 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 cover

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).

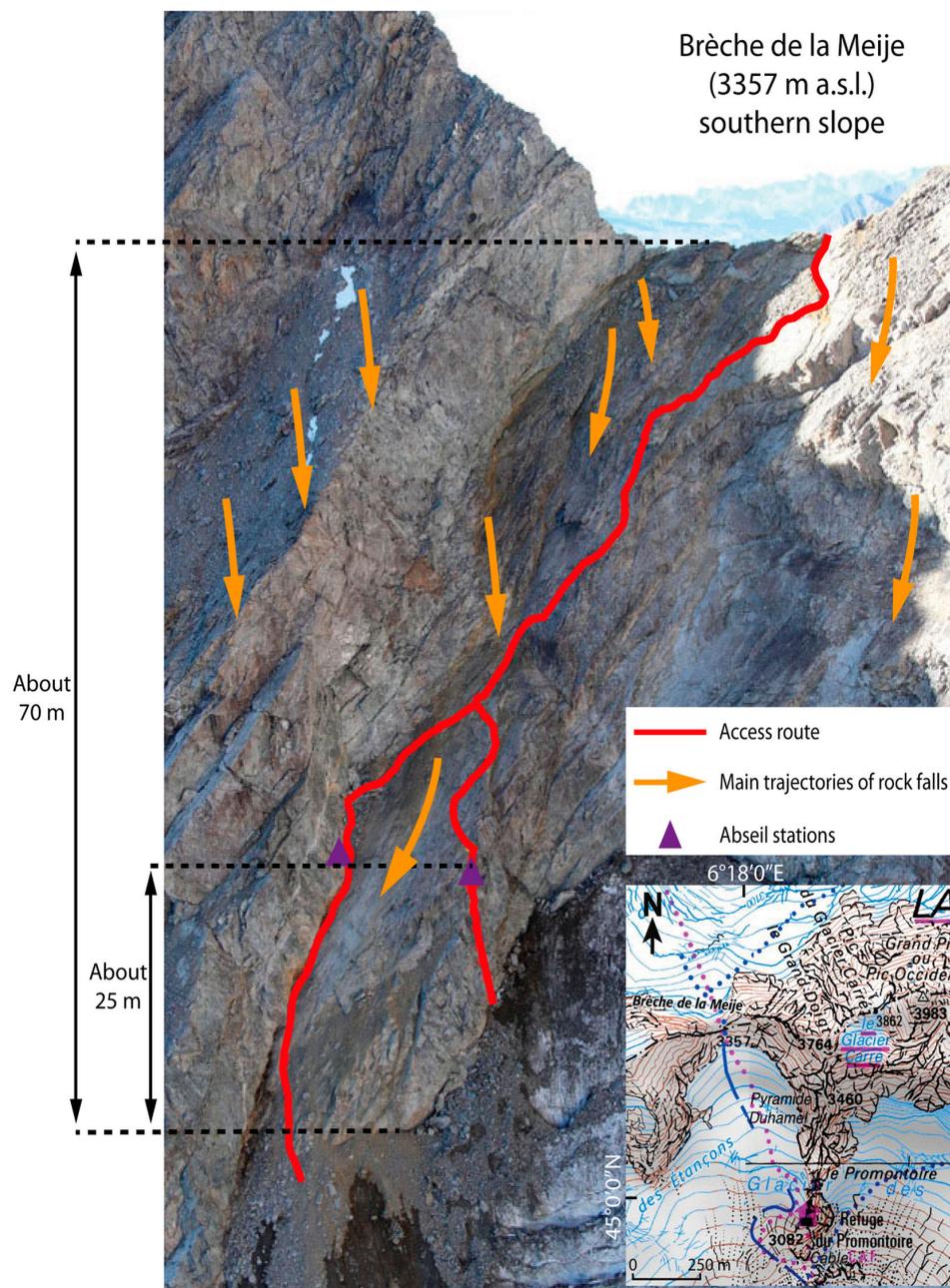


Fig. 3. The southern side of the Brèche de la Meije (3357 m a.s.l.) (photo: Parc national des écrins, 2012; location of the Brèche de la Meije shown in the inset map (accessed from IGN (Institut national de l'information géographique et forestier) in 2018)

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

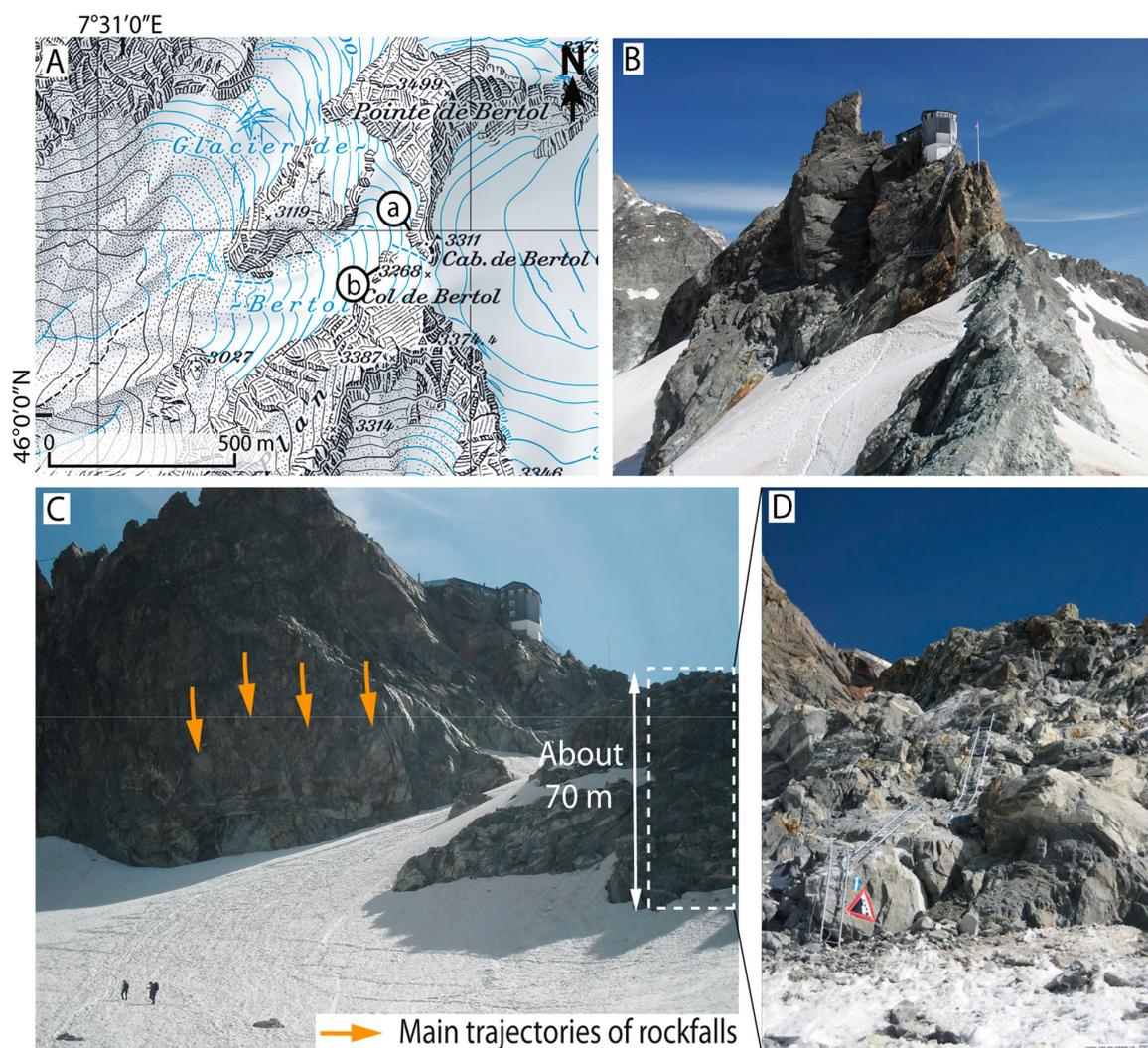


Fig. 4. Change in the access route to the Bertol hut since the 1990s: A. The Bertol hut sector (source: Swisstopo (Swiss Federal Office of Topography), 2017) – a = location of photo in 4C; b = location of photo in 4D; B. View of the hut, with the new location of the ladders and the recently deglaciated 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

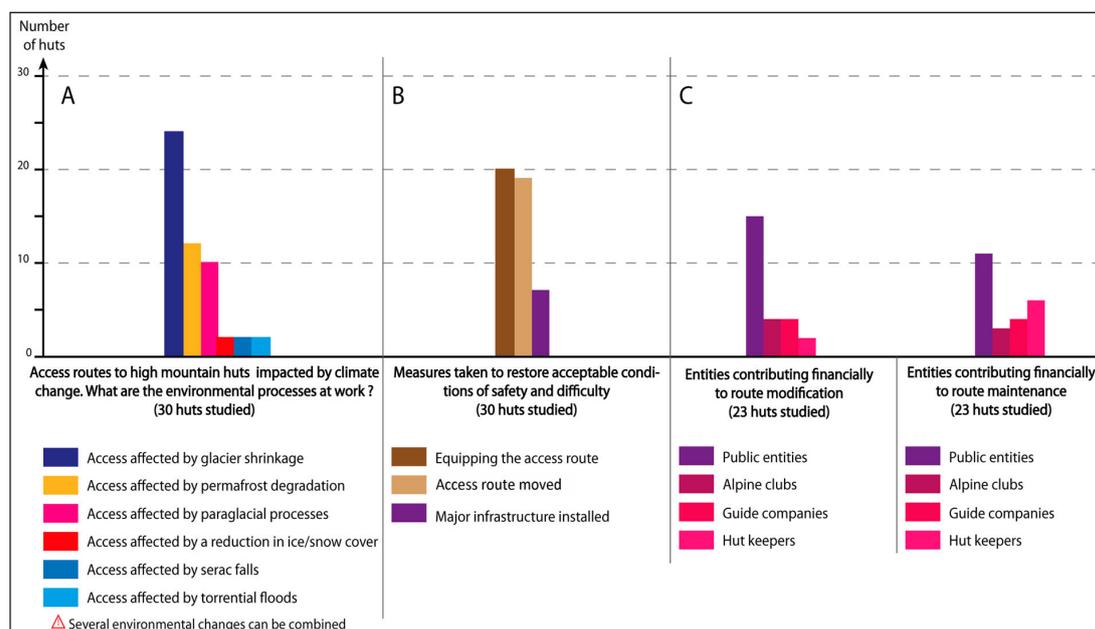


Fig. 5. Access routes to high mountain huts affected by climate change between the 1990s and 2018: A. Processes due to climate change affecting the access routes; B. Modifications carried out to restore acceptable levels of safety and difficulty; C. Organisations that have funded modification and maintenance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

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 paraglacière 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



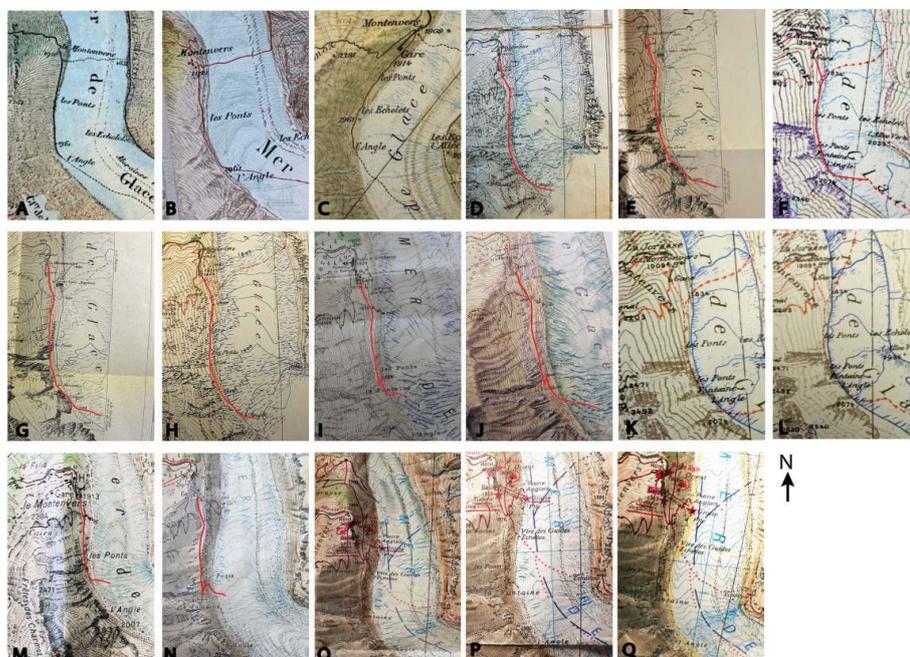
A : Glacier d'Envers du Plan ; B : Glacier du Requin ; C : Glacier d'Envers de Blaitière.

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

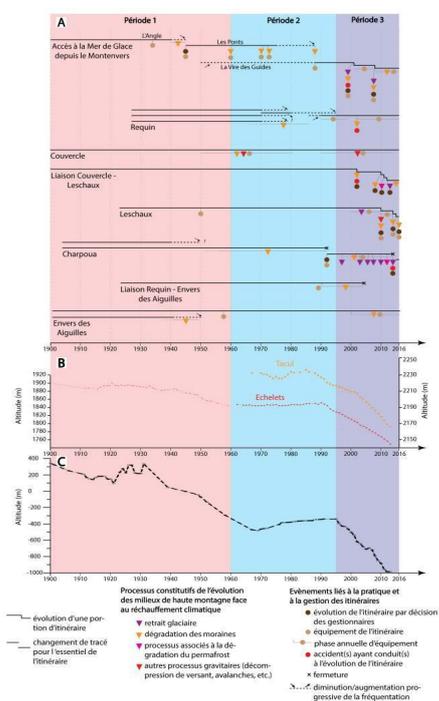
Réalisation : Mourey, 2017.

- 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).

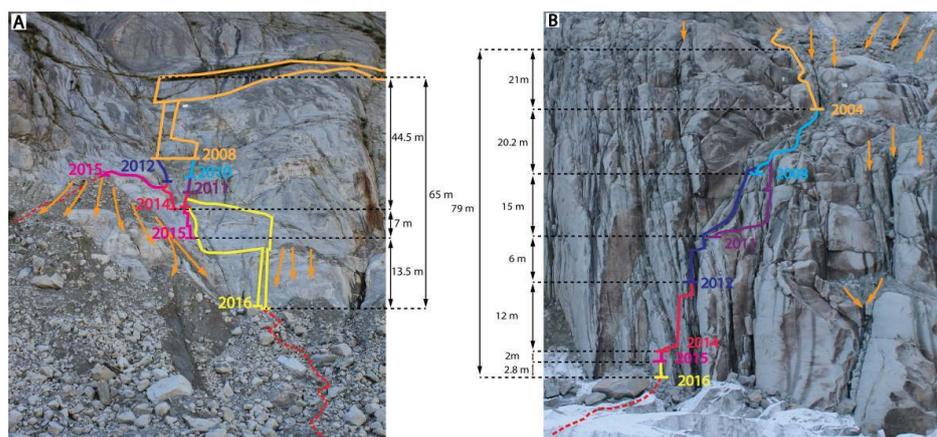
Figure 3. Historique des itinéraires



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'autre 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 ; Ravel 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 paraglaciaux, 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

h_1

h_2

h_3

h_4

h

h'

h_1'

h_2'

h_3'

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°).

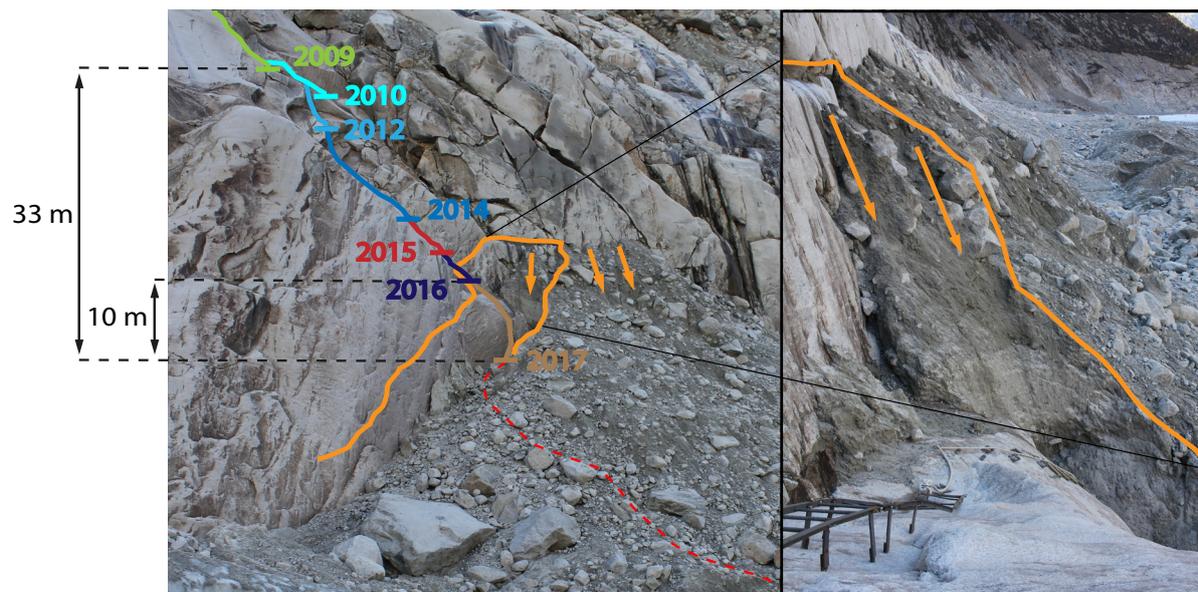


Figure 4.2. Évolution de la transition glacier-versant pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles. Le secteur glissé/affaissé apparaît en orange. Dates : position du pied des échelles pour les années en question. Flèches : trajectoires principales des chutes de pierres issues de la moraine.

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).

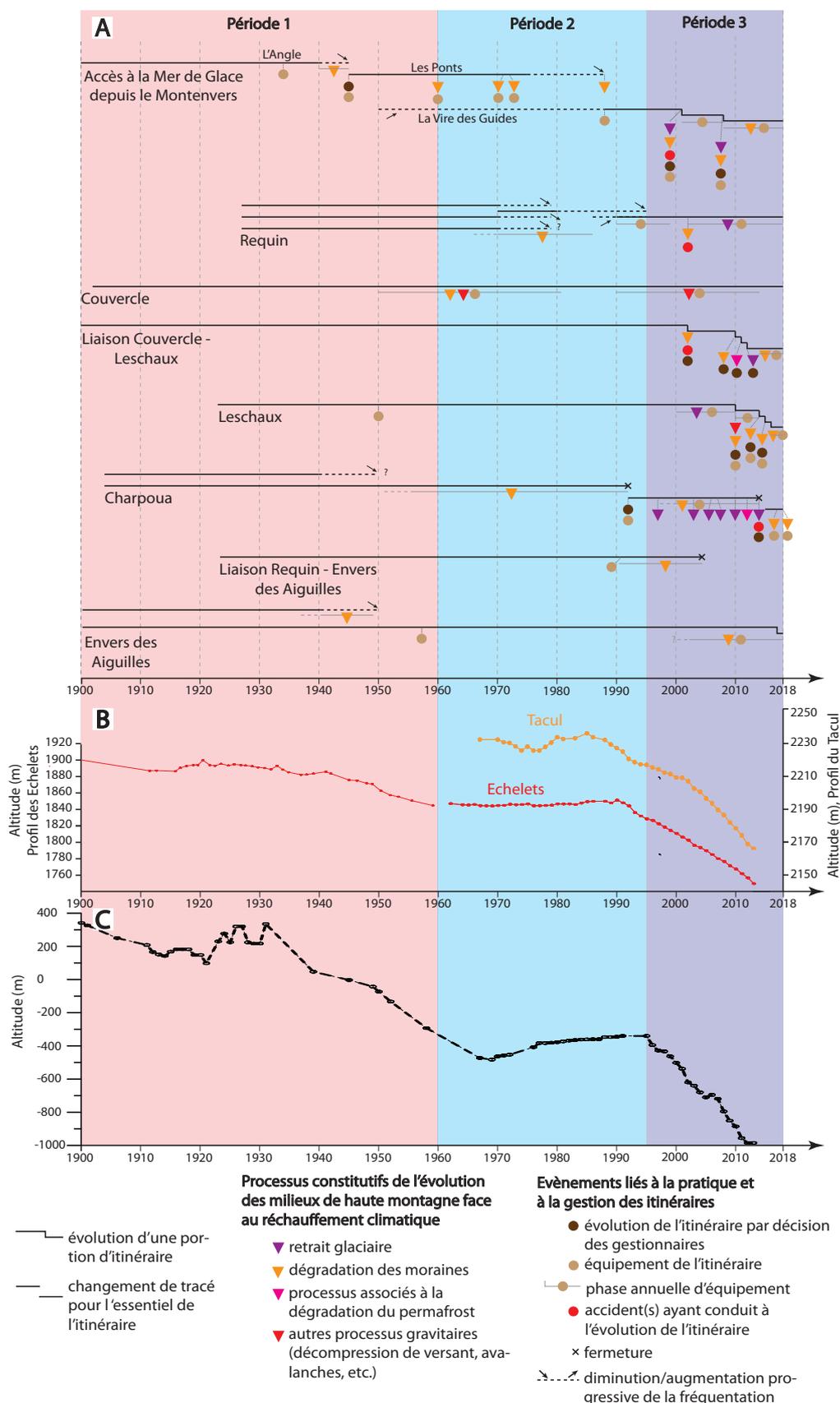


Figure 4.3. Historique des itinéraires entre le début du XX^e siècle et la fin de l'été 2018. A : Évolution des itinéraires d'accès aux refuges ; B : variations de l'altitude de la surface du glacier au niveau du profil des Échelets et du Tacul (données GLACIOCLIM) ; C : évolution du front de la Mer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

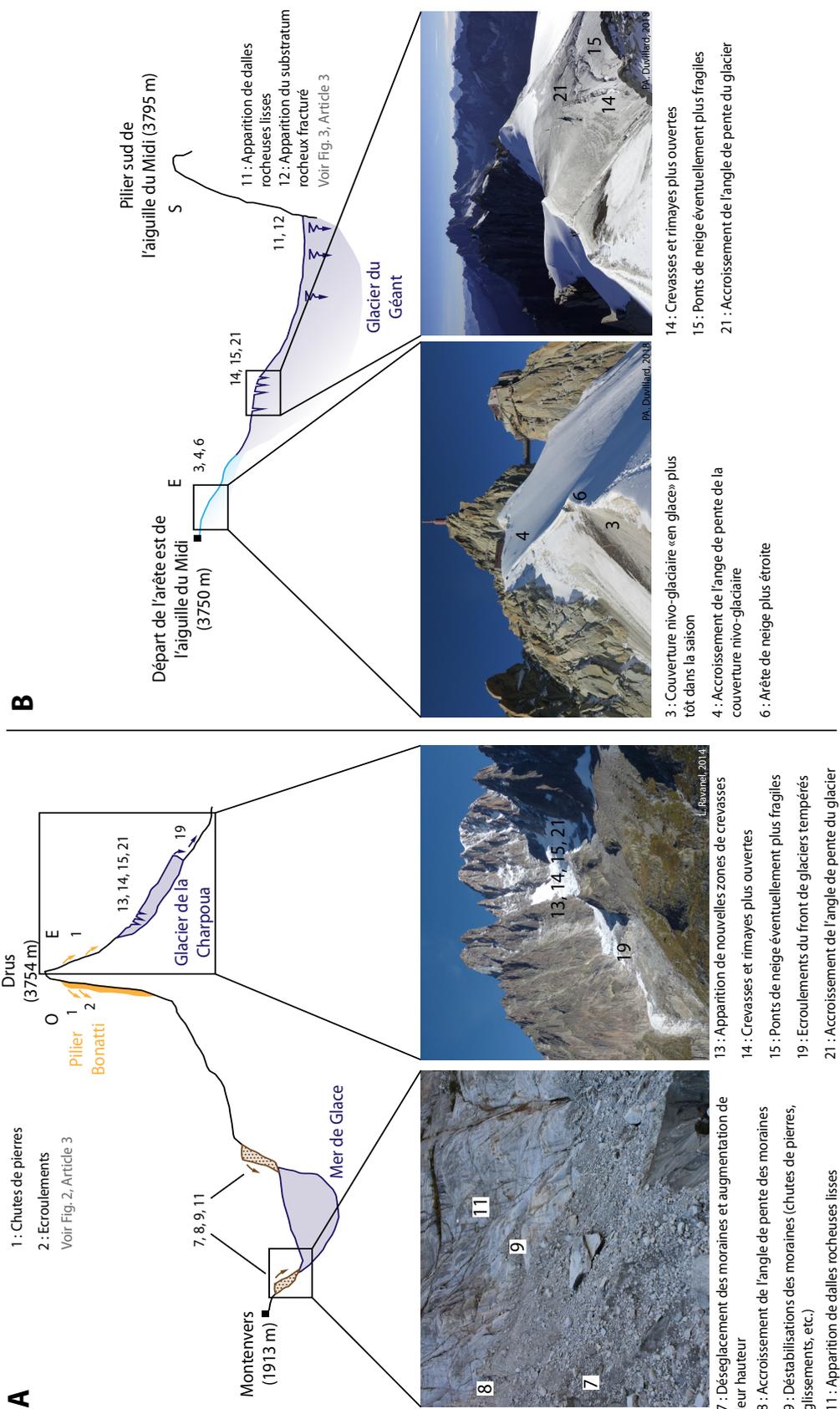


Figure 5.1. Représentation des itinéraires avec les phénomènes qui les affectent (voir Tab. 1 de l'Article 3). (A) La voie Bonatti dans la face ouest des Drus (itinéraire 92) et (B) la voie Rébuffat-Bacquet dans la face sud de l'aiguille du Midi (itinéraire 55).

- 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.

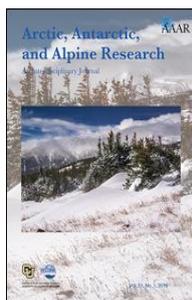
Rôle des auteurs

- 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

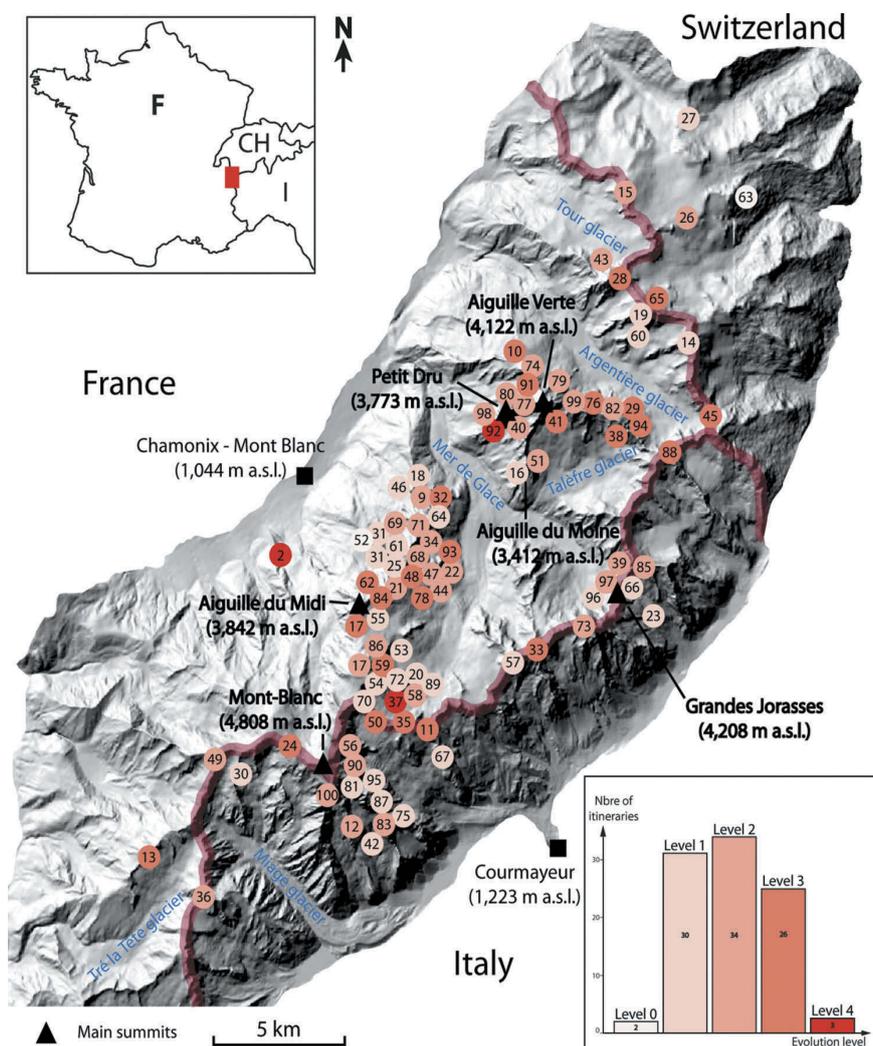


Figure 1. Location of the Mont Blanc massif, the itineraries studied and their level of evolution.

(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	↗	●		
Glacial shrinkage	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

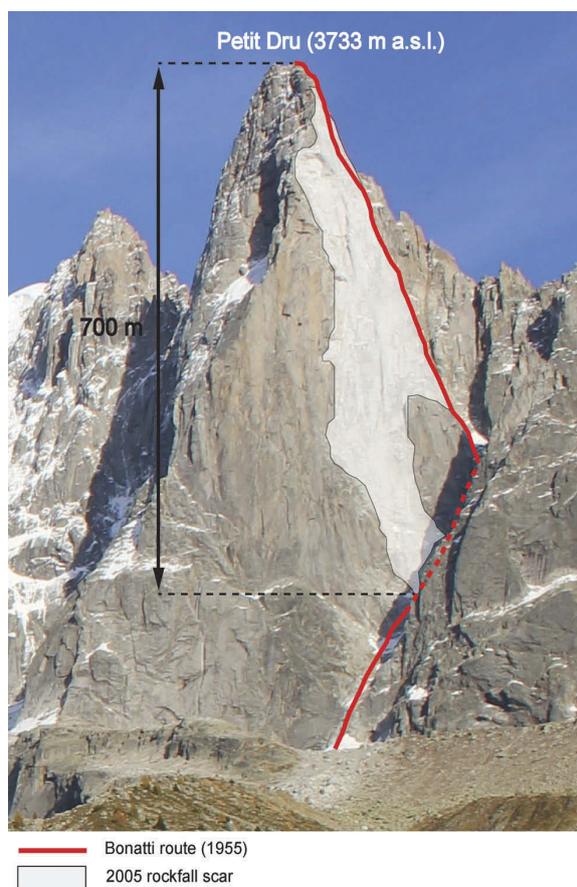


Figure 2. The Petit Dru West face, October 2017. A major part of the route has disappeared because of a rock collapse in 2005 and a further rockfall in 2011 (292,000 m³).

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

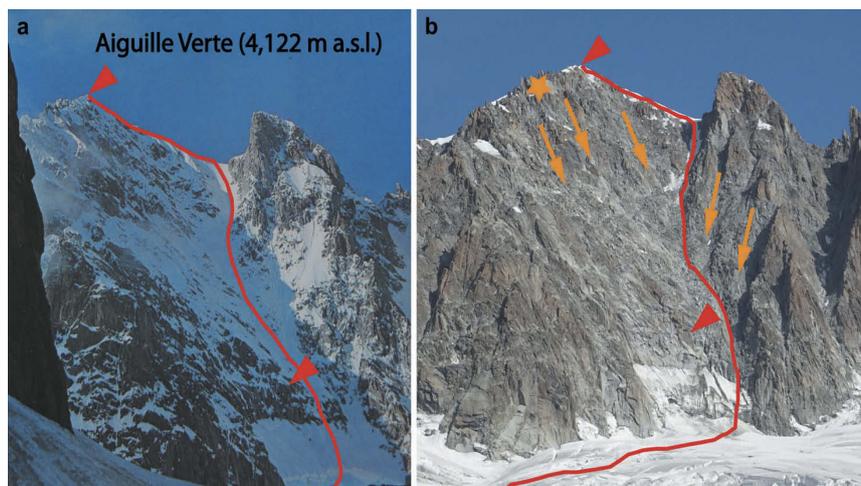


Figure 3. The Whympfer couloir on the Aiguille Verte (4,122 m a.s.l.) south face. The route is marked in red. A: situation at the end of the 1960s (picture from the guidebook). B: situation at the end of August 2017 (photo C. Lelièvre). The ice/snow cover in the couloir has undergone a very significant 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

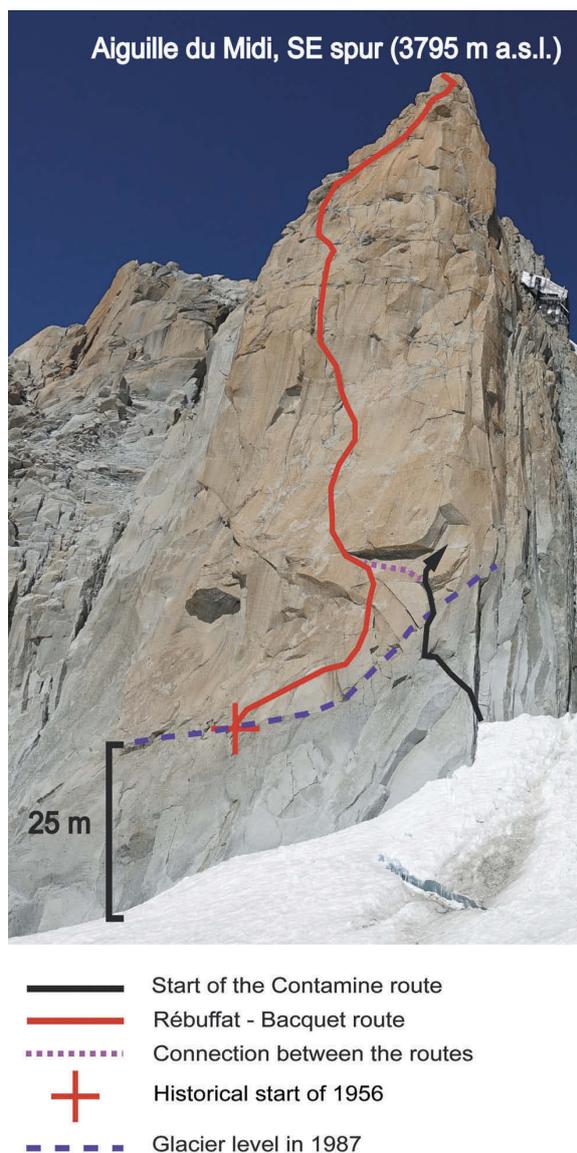


Figure 4. Aiguille du Midi south face, September 2018. The original start to the Rébuffat-Bacquet route (1956) is no longer accessible directly. The lower part of another route must be climbed to join it.

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

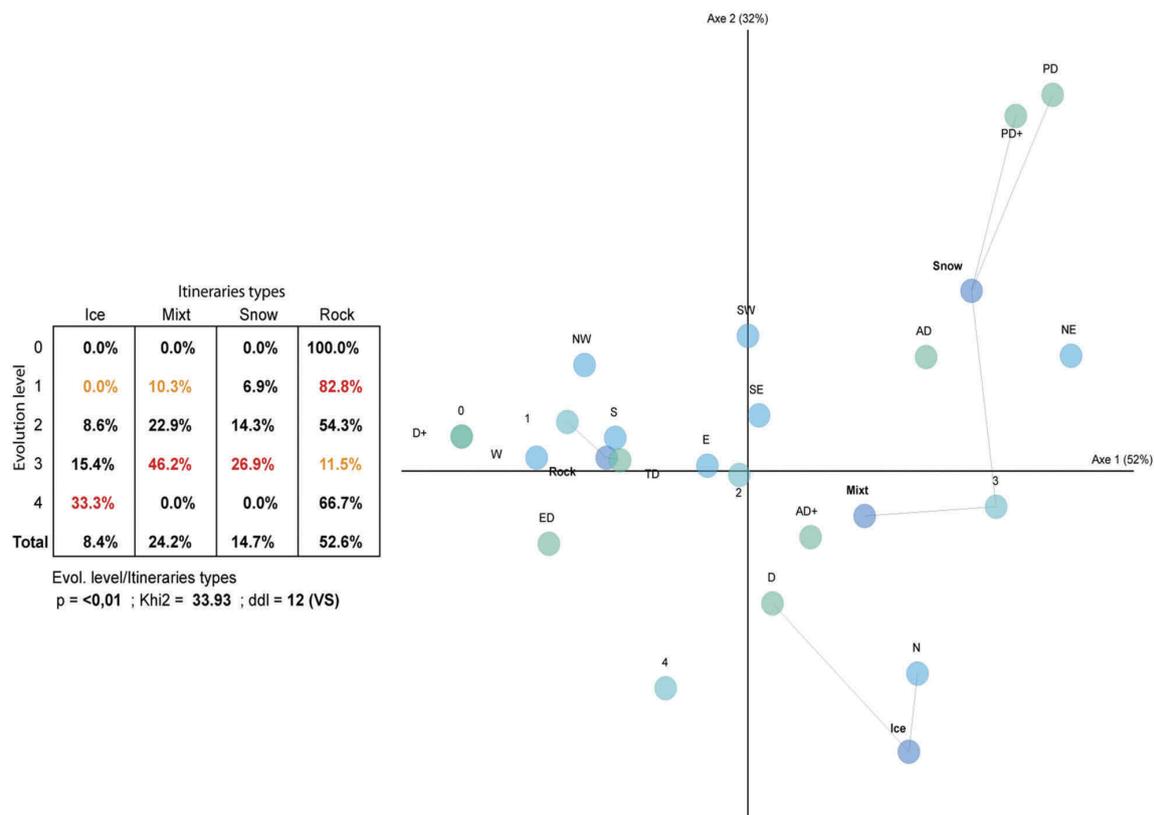


Figure 5. Cross-tabulation and graphical representation (CFA type) of the relationships between the level of evolution of a route for mountaineering purposes and its nature (rock, snow, ice and mixed), difficulty and aspect. The closer the circles are, the more meaningful their relations are. The statistically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

5.2. La voie normale d'ascension du mont Blanc : analyse multi-méthode du risque de chutes de pierres dans le Grand Couloir du Goûter

D'après l'étude présentée dans l'Article 3, les conditions de pratique de la voie normale d'ascension du mont Blanc (4809 m, itinéraire 24) ont fortement évoluées à cause des impacts du changement climatique (niveau de modification 3). Ces impacts sont particulièrement importants dans la traversée du Grand Couloir du Goûter à 3270 m et la montée jusqu'à l'aiguille du Goûter (3863 m), où les chutes de pierres sont particulièrement fréquentes et intenses. D'après une étude menée par AlpeIngé (2012), la période de la journée où elles sont les plus fréquentes est entre 10h et 16h et dans la tranche horaire la plus critiques, entre 11h et 11h30, une chute de pierre se produit en moyenne toutes les 17 minutes. Lors des entretiens menés dans le cadre de l'étude sur l'évolution des itinéraires (Article 3), de nombreux guides ont souligné la forte détérioration des conditions dans le couloir où les chutes de pierres sont de plus en plus fréquentes, notamment à la faveur d'épisodes caniculaires, dont la fréquence a été multipliée par trois depuis la fin du XIX^e siècle (*cf.* : Chapitre 2, Della-Marta *et al.*, 2017). Ainsi, en 2015, les chutes de pierres étant particulièrement fréquentes et intenses dans le couloir en raison de deux épisodes caniculaires, le couloir était très fortement déconseillé et le refuge du Goûter a été fermé par arrêté préfectoral du 15 au 31 juillet et du 6 au 19 août (soit 23 % de la période d'ouverture du refuge).

Malgré l'importance des chutes de pierres et du danger qu'elles représentent pour les alpinistes, peu d'études ont été réalisées sur ce secteur particulièrement fréquenté (*cf.* : Chapitre 8) et il y a un manque de données pour caractériser les conditions géomorphologiques et météorologiques qui les contrôlent. Aussi, plusieurs systèmes de suivi ont été installés progressivement à partir de l'été 2016 (Fig. 5.2) : (i) 4 capteurs de température du sol pour caractériser l'état thermique du permafrost, (ii) un appareil photo automatique qui prend 4 photos par jour du couloir pour étudier son enneigement, (iii) des capteurs sismiques pour mesurer l'occurrence et l'intensité des chutes de pierres et (iv) un capteur de fréquentation qui comptabilise le nombre et la direction des alpinistes. Deux acquisitions lidar ont aussi été réalisées en 2016 et en 2018. Les compétences d'une douzaine de chercheurs, issus de quatre laboratoires différents (EDYTEM, LISTIC, PACTE, ISTerre), sont mobilisés. Couplé aux données issues du capteur de fréquentation (*cf.* : Chapitre 8), l'objectif final sera d'arriver à une meilleure évaluation de la vulnérabilité des alpinistes face au risque local de chute de pierre, en en mesurant la part climatique.

Par manque de temps, l'ensemble des données acquises n'ont pour le moment pas fait l'objet d'un traitement approfondi, bien que les méthodes d'analyses soient connues et fonctionnent. Dans cette section, nous nous limiterons à une présentation succincte des instruments installés, des objectifs poursuivis et des méthodes de traitements.

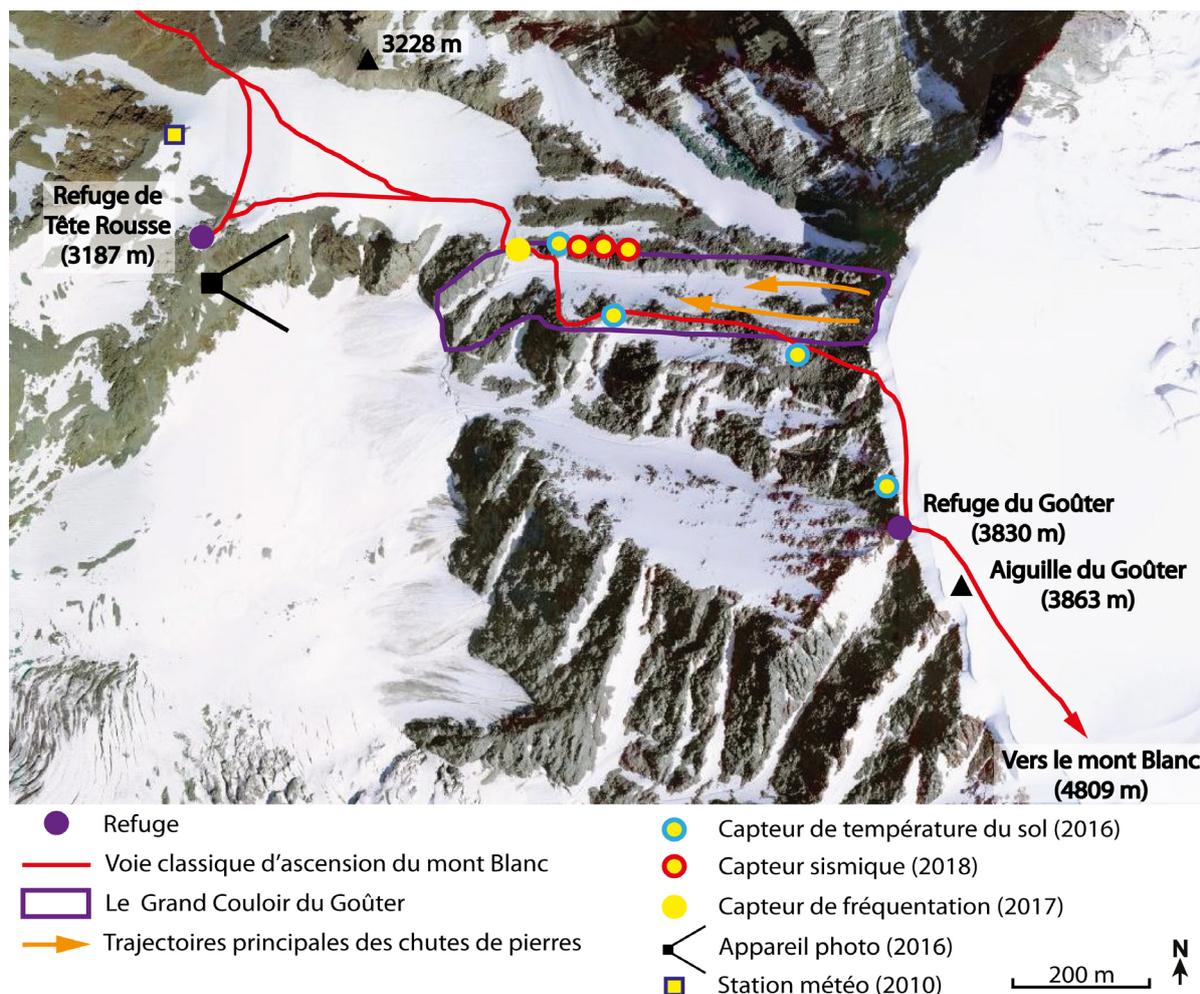


Figure 5.2. Carte de localisation du couloir du Goûter et de l'ensemble des systèmes de suivi ainsi que leur date de première installation (fond. IGN).

Ces données ont une portée autant opérationnelle – avec comme ambition d'être un outil d'aide à la décision pour les acteurs politiques et plus largement la communauté montagnarde et ses instances représentatives (FFCAM, SNGM, Compagnies et Bureau de Guides, acteurs politiques locaux) – que scientifique par la production de connaissances nouvelles sur les processus géomorphologiques à l'œuvre et leurs évolutions en réaction au changement climatique.

5.2.1. Un appareil photo automatique pour l'analyse de l'enneigement

L'évolution du manteau neigeux dans le couloir est un facteur potentiellement important dans l'occurrence des chutes de pierres. En effet, la présence du manteau neigeux peut limiter mécaniquement la déstabilisation de pierres située sous la neige et il va aussi freiner ou stopper une pierre issue de la partie amont du couloir. A l'inverse, lors de sa fonte, une quantité d'eau potentiellement importante va s'infiltrer dans les terrains, ce qui est un facteur favorisant l'occurrence de chutes de pierres (D'Amato *et al.*, 2016).

Aussi, afin d'étudier l'évolution du manteau neigeux, un appareil photo automatique installé en face du couloir en juin 2016 (Fig. 5.2 et 5.3) prend 4 photos par jour sur l'ensemble de la période estivale. Les photos font l'objet d'un traitement en 3 étapes qui permet d'étudier l'évolution des surfaces enneigées. La première étape consiste en une sélection des images propices à l'étude de la neige (Fig. 5.3). Les photos où il y a des nuages, de la buée, des ombres etc. sont supprimées. Ensuite, sur chaque photo, les pixels qui représentent la neige sont détectés (Fig. 5.3). Pour cela, seul le canal de couleur bleu des photos est utilisé (Fedorov *et al.*, 2016). Dans ce canal, l'histogramme des pixels présente deux pics de couleur dont le seuillage permet de segmenter efficacement les pixels en neige des pixels déneigés. Cette segmentation est faite automatiquement en utilisant l'algorithme *Isodata* (Ridler et Calvard, 1978). Pour finir, dans une troisième étape, les pixels représentant de la neige sont convertis en une surface en m² par une technique de *monoploting* (Fig. 5.3). En se basant sur les paramètres intrinsèques (taille du capteur, distance focale, centre optique, distorsion) et extrinsèques (position et orientation dans l'espace) de la caméra (Hartley et Zisserman, 2003), un lancer de rayon sur un MNT -acquis en 2016 par TLS - est réalisé pour chaque pixel des photos qui sont alors convertis en une surface métrique. Ce traitement est réalisé par Guilhem Marsy (doctorant, LISTIC-EDYTEM) et Marco Marcer (docteur, PACTE).

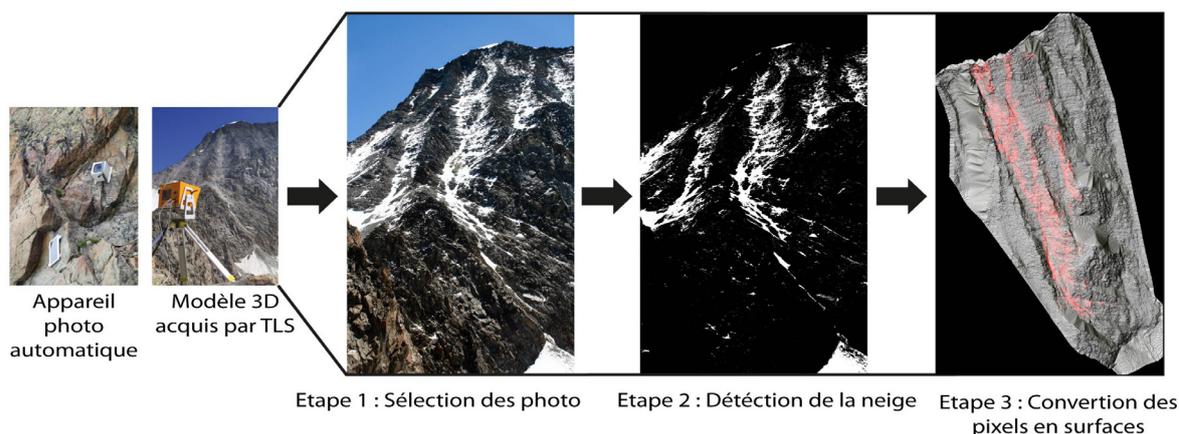


Figure 5.3. Traitement des photos de l'appareil automatique pour retracer l'évolution des surfaces enneigées dans le couloir du Goûter.

Cette méthode permet donc de retracer l'évolution des surfaces enneigées sur l'ensemble de la saison estivale et d'identifier avec précision les périodes de fonte. En revanche, la qualité et la quantité de neige (et indirectement d'eau liquide) ne sont pas renseignées ce qui peut mener à de mauvaises interprétations. Par exemple, la surface enneigée dans le couloir peut apparaître d'un coup très élevée alors qu'il n'a été que saupoudré de neige. Cette dernière n'aura alors que peu d'impacts sur les chutes de pierres. Une qualification visuelle des caractéristiques du manteau neigeux (épaisseur, type de neige etc.) est souvent nécessaire, en complément de l'analyse des surfaces enneigées.

D'autre part, un second modèle 3D a été acquis en 2018. En le comparant à celui de 2016 (Kenner *et al.*, 2011 ; Jaboyedoff *et al.*, 2014), les secteurs d'origine des déstabilisations rocheuses devraient être identifiés et leur volume global depuis 2016 devrait être calculé.

5.2.2. Des capteurs de températures pour caractériser l'état thermique local du permafrost

L'état thermique du permafrost est un des facteurs qui influencent les déstabilisations rocheuses en haute montagne (Ravanel *et al.*, 2017 ; Gallach, 2018). Aussi, dans le cas du couloir du Goûter, situé entre 3300 m et 3800 m d'altitude, 4 capteurs de températures du sol ont été installés (Fig. 5.2) en juillet 2016. Le suivi de la température de la subsurface du sol s'effectue au moyen de capteurs/enregistreurs miniatures et autonomes (*MTD* pour *Miniature Temperature Datalogger*). Les capteurs sont placés à l'abri du rayonnement solaire, à 10 cm de profondeur dans la roche. Pour s'assurer qu'il n'y a pas d'influence de la température de l'air, un joint de silicone assure l'absence de circulation d'air entre l'extérieur et le trou dans lequel le capteur est installé (Bodin *et al.*, 2010 ; Magnin *et al.*, 2015). Les données acquises par les *MTD* permettent ainsi d'analyser en détail le comportement thermique annuel de la subsurface du sol et d'attester de la présence/absence de permafrost. Ces données sont aussi une des données d'entrée qui permettent de modéliser l'état thermique du permafrost dans le secteur et d'en retracer l'évolution en comparaison avec l'évolution de la température de l'air sur le modèle de Magnin *et al.*, 2015, 2017. Ces modélisations et le suivi de l'instrumentation est principalement assuré par Pierre Allain Duvillard (docteur, lab. EDYTEM) et Florence Magnin (CR, CNRS, lab. EDYTEM).

5.2.3. Des capteurs sismiques pour documenter l'occurrence des déstabilisations rocheuses

Bien que de nombreuses données aient été acquises depuis 2016, nous n'étions toujours pas en mesure d'identifier, en continu, les périodes où des chutes de pierres se produisent dans le couloir. Cette donnée est pourtant indispensable pour mieux comprendre l'accidentologie et la vulnérabilité des alpinistes sur l'itinéraire, en faisant aussi le lien avec l'enneigement, la température du sol, la météorologie et la fréquentation.

Aussi, en collaboration avec Pascal Lacroix du laboratoire ISTerre, 3 capteurs sismiques ont été installés en rive droite du couloir le 02 juillet 2018 (Fig. 5.2) afin de mesurer l'occurrence des chutes de pierres, en continu, sur l'ensemble de la saison estivale. D'après la littérature, cette méthode permet de mesurer des volumes minimums de 0,05 m³ (Helmstetter et Garambois, 2010 ; Dietze *et al.*, 2017). Toutefois, dans nos configurations de terrain, les capteurs étant très proches de la zone d'occurrence des chutes de pierres (quelques mètres), nous estimons pouvoir mesurer des volumes minimums inférieur à 0,05 m³. Mesurer les volumes les plus petits possibles est un des enjeux majeurs dans ce travail, tant au niveau méthodologiques qu'au niveau des résultats attendus. En effet, une pierre même d'un volume très réduit, peut être fatale à un alpiniste, d'autant plus si elle est issue du sommet du couloir, 600 m plus haut. Afin de calibrer les signaux enregistrés par les capteurs sismiques, quatre comptages visuels des chutes de pierres dans le couloir ont été réalisées au cours de l'été.

Plusieurs difficultés ont été rencontrées dans le fonctionnement des capteurs et dans le traitement des données. En plus d'un problème d'alimentation qui a coupé la mesure pendant 15 jours, les capteurs ont enregistré un léger mouvement de rotation (*tilt*) qui les éloigne de leur position verticale et biaise la mesure. L'origine de ce phénomène reste pour le moment inconnue. De plus, les capteurs étant installés du même côté du couloir, l'origine géographique des signaux mesurés est difficile à déterminer précisément. Par conséquent, des chutes de pierres qui se sont produites à proximité des capteurs mais pas nécessairement dans le couloir du Goûter seront aussi prises en compte. Aussi, pour l'été 2019, 6 capteurs seront installés, de part et d'autres du couloir afin de contraindre la localisation précise des signaux enregistrés. De plus, pour éviter le risque de rotation des capteurs, ces derniers seront insérés dans des tubes en PVC, plantés dans le sol et remplis de sable.

Le moment d'occurrence et l'intensité des chutes de pierres, mesurés en continu de juillet à mi-septembre 2018 et 2019, seront alors connus dans ce secteur. Par ailleurs, un pluviomètre complète cette installation, les précipitations et notamment les orages étant des facteurs favorisant l'occurrence de chutes de pierres (Gruber, 2007).

Conclusion du Chapitre 5

Bien que le massif du Mont Blanc soit l'un des plus hauts et des plus englacés des Alpes, les itinéraires d'alpinisme et leurs conditions de fréquentation sont très affectés par les effets du changement climatique. 25 processus liés au réchauffement climatique et affectant les itinéraires ont été identifiés. Cette liste regroupe principalement des processus liés à la fonte des glaciers et des couvertures nivo-glaciaires et à la dégradation du permafrost. C'est l'une des principales différences par rapport à la liste proposée par Ritter *et al.* (2011) pour les Alpes orientales. En effet, bien que l'origine géomorphologique et glaciologique des phénomènes présentés ne soit pas identifiée (fonte des glaciers, dégradation du permafrost, etc.), la liste que les auteurs proposent est principalement centrée sur l'évolution paraglaciale des milieux et les processus liés à la fonte des langues glaciaires. On peut émettre l'hypothèse que cette différence est liée au plus faible englacement des massifs autrichiens et/ou au fait que les sentiers de randonnées d'altitude soient aussi pris en compte dans leur étude.

Pour le massif du Mont Blanc, chacun des 95 itinéraires étudiés est affecté en moyenne par 9 des 25 phénomènes identifiés. Autrement dit, un alpiniste qui veut les fréquenter doit prendre en compte et potentiellement adapter sa pratique à 9 phénomènes liés au changement climatique. Les phénomènes identifiés et leurs impacts sur les itinéraires d'alpinisme doivent toutefois être appréhendés à différentes échelles de temps. L'échelle temporelle sur laquelle ils ont été mis en évidence est pluri-décennale (années 1970 à 2018). Sur l'ensemble de cette période, ils entraînent un décalage progressif de la période de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme vers le printemps, l'automne et même l'hiver pour certains itinéraires. Cependant, ces phénomènes peuvent être réduits ou au contraire accentués à l'échelle saisonnière et hebdomadaire, notamment en

fonction des conditions météorologiques. Ils sont en général réduits au début de la saison estivale, lorsque l'enneigement hivernal est encore présent, et accentués à la fin de la saison ou au cours de périodes caniculaires. Il en résulte une difficulté à identifier les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme, ces dernières étant distribuées de plus en plus aléatoirement au cours de l'été. Aussi, un surcroît d'attention doit être porté afin de fréquenter un itinéraire lorsqu'il est en bonnes conditions, c'est-à-dire pas nécessairement plus dangereux ou plus difficile qu'auparavant. Il est important de noter que certains passages peuvent aussi devenir plus faciles, notamment à la faveur d'un glacier plus plat et/ou moins crevassé dans sa partie basse. Toutefois, sur les 95 itinéraires étudiés, ce constat ne s'applique jamais à la totalité de l'itinéraire, dont le niveau technique maximum reste inchangé ou majoré.

L'ensemble de ces résultats a fait l'objet d'une attention et d'une utilisation importante de la part des médias avec notamment un article détaillé, publié dans le *Dauphiné Libéré* du 28 mars 2019, deux autres articles publiés dans le média Internet *Alpine Mag* les 08 et 10 avril 2019, un article dans *The Guardian* le 24/08/2018 et un article dans *El Pais*, le 26 juin 2019. Un article décrivant spécifiquement l'étude sur la voie normale d'ascension du mont Blanc a été publié dans *Montagnes Magazine* (Annexe 5.2) à l'occasion d'un numéro dédié au débat sur la mise en place d'un système d'encadrement de la fréquentation sur cette voie. Un numéro spécial de *Montagnes Magazine* est aussi en cours de préparation sur l'étude des 100 plus belles courses du massif du Mont Blanc de G. Rébuffat. Ces résultats sont par ailleurs diffusés à l'occasion de cours à destination des futurs guides lors de leur formation à l'ENSA et une vidéo de sensibilisation est aussi en cours de réalisation pour la chaîne *you-tube* de l'ENSA. De plus, des fiches thématiques à l'attention des pratiquants, et notamment des alpinistes amateurs sont en cours de réalisation en partenariat avec *La Chamoniarde* afin de les sensibiliser à l'évolution des itinéraires (exemple Annexe 5.3).

On peut estimer que l'évolution en cours des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation va se poursuivre, voire même s'intensifier, au cours des prochaines décennies. Cela nous poussera, dans la partie suivante, à interroger les pratiquants de l'alpinisme et notamment les guides de haute montagne sur leur perception et leur adaptation aux effets du changement climatique.

Enfin, un travail identique sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation va être réalisé pour le massif des Écrins, basé de nouveau sur le topoguide publié par G. Rébuffat en 1974, *Le massif des Écrins, Les 100 plus belles courses et randonnées*. Un stage de Master 2 Géographie est en cours (été 2019) à l'Institut de Géographie Alpine (IGA) de Grenoble, dans le cadre du programme *Refuge Sentinelles* afin d'améliorer la méthodologie avec l'objectif de localiser les processus identifiés et de produire des rendus cartographiques.

Conclusion de la Partie II

L'axe de recherche traité dans cette deuxième partie avait pour objectif de mesurer les impacts de l'évolution des milieux de haute montagne sur les itinéraires d'alpinisme et leurs conditions de fréquentations en période estivale.

Deux types d'itinéraires ont été étudiés et donnent lieu à trois articles : les accès aux refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales (Article 1) et dans le bassin de la Mer de Glace (Article 2) et, les voies d'alpinisme à proprement dites, dans le massif du Mont Blanc (Article 3). Les deux types d'itinéraires sont principalement affectés par la fonte des glaciers et les processus concomitants tels que la dégradation des moraines et l'augmentation de l'angle de pente des glaciers. Dans les deux cas, il en résulte une augmentation de la difficulté technique et de la dangerosité des itinéraires, support de la pratique de l'alpinisme. En conséquence, les périodes de bonnes conditions pour les fréquenter sont plus aléatoires en été et se décalent d'environ 4 semaines vers le printemps et parfois vers l'automne.

Le constat issu de cette première partie nous conduit à poser la question de la perception de ces changements et surtout de l'adaptation que les acteurs de l'alpinisme mettent en place pour faire face à cette évolution des conditions de fréquentation des itinéraires. Cette question sera l'objet de la troisième partie de ce manuscrit.

Partie III

Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique sur les itinéraires

La troisième partie de ce manuscrit présente principalement nos résultats issus du deuxième axe de recherche identifié dans le Chapitre 3 soit la perception et l'adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique. L'objectif est d'évaluer si l'évolution des itinéraires mis en évidence dans la deuxième partie entraîne une adaptation de la part des alpinistes et une évolution de la fréquentation de la haute montagne. Le Chapitre 6 se concentre sur les guides de haute montagne français et valdotains et se structure autour des Articles 4 et 5 de ce manuscrit. Le Chapitre 7 présente l'étude du nombre de nuitées des refuges de haute montagne dans le massif du Mont Blanc. Enfin, dans le Chapitre 8, les flux d'alpinistes au niveau des principaux points d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc sont étudiés avec l'objectif initial d'identifier des comportements adaptatifs de la part des alpinistes au fur et à mesure de l'évolution des conditions de pratique au cours d'une saison estivale. La méthodologie mise en place pour quantifier et qualifier les flux d'alpinistes est présentée au début de ce chapitre, dans le sixième et dernier article de ce manuscrit. 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 ». Il permet de mettre en perspective et de discuter la fréquentation et l'adaptation des alpinistes à l'évolution des conditions. Il sert aussi d'outils d'aide à la décision pour les acteurs locaux ayant en charge la gestion de cet itinéraire.

Chapitre 6. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique, perception et adaptation

L'évolution des conditions de pratique de l'alpinisme, mise en évidence dans la Partie II de ce manuscrit, pose la question de la manière dont les alpinistes sont affectés par ces modifications. Pour des raisons méthodologiques et logistiques, il est toutefois difficile d'interroger l'ensemble des groupes de pratiquants de l'alpinisme. Aussi, nous nous sommes d'abord concentrés sur les guides de haute montagne, professionnels emblématiques de l'alpinisme, autour de la principale problématique qui est de comprendre comment ils sont affectés par les effets du changement climatique et comment ils s'adaptent en conséquence.

Dans la première section de ce chapitre, nous présenterons un résumé de l'évolution de la profession de guide de haute montagne depuis les années 1950 et les modalités actuelles de pratique du métier à des fins de contextualisation. La deuxième section du chapitre se structure autour des Articles 4 et 5 de ce manuscrit. L'Article 4 est basé sur une enquête par questionnaire effectuée auprès des guides du Syndicat National des Guides de Montagne (SNGM) et des entretiens semi-directifs afin d'identifier leurs stratégies d'adaptation face à l'évolution des itinéraires sur les périodes estivales. Une typologie des guides en fonction de leurs difficultés et stratégies d'adaptation est proposée. Le terme de stratégie est utilisé dans son acception générale, qui inclut l'ensemble des mesures et des actions – réactives ou proactives, préméditées ou spontanées - mises en place dans le but d'atteindre un résultat souhaité. Il s'agit en l'occurrence des actions mises en œuvre par les guides de haute montagne dans leur adaptation aux impacts du changement climatique. L'objectif à atteindre est alors variable d'un guide à un autre : réduction de la prise de risque, maintien de l'activité économique, satisfaction de la clientèle etc. L'Article 5, dont E. Salim est premier auteur à la suite de son travail de Maîtrise, présente une étude comparative de la perception et de l'adaptation au changement climatique entre les guides de la vallée de Chamonix et les guides valdotains. Il est basé sur les données de l'enquête par questionnaire réalisée avec le SNGM et sur une seconde enquête conduite auprès des guides du Val d'Aoste. Des perceptions et des adaptations très distinctes aux impacts du changement climatique sont identifiées de part et d'autre du massif du Mont Blanc.

6.1. Les guides de haute montagne, professionnels emblématiques de l'alpinisme

C'est au cours de la période dite de l'Âge d'Or de l'alpinisme que le métier de guide de haute montagne commence à se structurer notamment avec la création des premières Compagnies de Guides (*cf.* : Chapitre 1). Le CAF va aussi contribuer à la réglementation de la profession en mettant en place un registre certifiant les catégories de guides autorisées à accompagner des touristes : les muletiers, les porteurs et les guides de deuxième ou première classe. Toutefois, dans cette section,

nous nous concentrerons sur l'évolution et les caractéristiques du métier de guide depuis le milieu du XX^e siècle, période principalement traitée dans cette étude.

En France, la Loi Montagne de 1948 est la première loi qui officialise le métier de guide. Elle se traduit notamment par la mise en place d'un dispositif de formation décernant les brevets d'Aspirant Guide et de Guide de Montagne. D'après M. Martinez (2015), la formation délivrée par l'ENSA, et plus largement la profession de guide, est conditionnée et a évolué depuis les années 1950 en lien avec i) la réglementation croissante des sports de nature, ii) l'évolution de l'alpinisme, iii) l'évolution du contexte touristique, notamment dans les Alpes, iv) les revendications syndicales, ainsi que v) les interactions entre les guides et les autres métiers sportifs de montagne. Dans l'ensemble, cela se traduit par une extension progressive du champ d'activité des guides. La première activité à faire l'objet d'une telle extension est le ski, dans la mesure où les sports d'hiver se sont largement développés et diffusés en parallèle avec la création de nombreuses stations de ski. Ainsi, la pratique du ski est introduite dans la formation des guides en 1973 (Bourdeau, 1991 ; Martinez, 2015). Ce processus d'ouverture des prérogatives attribuées au métier va s'accélérer à partir des années 1980. En 1986, le diplôme de guide intègre un monitorat d'escalade et, en 1996, le *canyoning*. Ainsi, à partir des années 1970, le métier de guide se transforme et le contenu de la formation se densifie progressivement, non sans polémiques. En effet, l'ouverture des prérogatives des guides, notamment vers le canyon, se heurte à la représentation classique du métier de l'époque (Martinez, 2015). Il en résulte toutefois que les prérogatives des guides sont aujourd'hui les plus ouvertes et englobent une grande partie des prérogatives d'autres professionnels de la montagne (Moniteur de Ski, Brevet d'Etat (BE)/Diplôme d'Etat (DE) Escalade, AMM, BE/DE *Canyoning*) ce qui leur offre une très bonne compétitivité (Bonnemaison, 2018) et adaptabilité.

Cette ouverture et diversification des prérogatives des guides, conjuguée à l'évolution de l'offre et de la demande et du type de clientèle en terme de loisirs sportifs de montagne, vont se traduire par de nouvelles aptitudes techniques et pédagogiques mais surtout par de nouvelles fonctions qui vont « alimenter une identité professionnelle plus ample » (Martinez, 2015). Pour illustrer cette évolution, on peut notamment citer les travaux de Philippe Bourdeau qui l'a mise en évidence à travers l'étude de la culture professionnelle des guides. Cette dernière se recompose d'une culture « moderne » ou c'est le guide « qui va devant » - qui montre l'itinéraire - à une culture « trans-moderne » ou c'est le guide « qui transmet » et fait partager ses connaissances et une expérience avec sa clientèle (Tab. 6.1) (Bourdeau *et al.*, 2006).

	Première génération Culture professionnelle moderne (1950-1980)	Deuxième génération Culture professionnelle postmoderne (1980-2000)	Troisième génération Culture professionnelle trans-moderne (2000-...)
Rôle du guide	« Celui qui va devant »	« Celui qui est avec »	« Celui qui transmet »
Registre d'intervention du guide	La technique	Le marketing	La culture
Ligne de force de la formation	Jusqu'en 1984 : aptitude physique et technique	Logique client et logique d'adaptation socioculturelle (favoriser l'adaptation du guide au contexte culturel et économique)	2010 : pédagogie, formation, gestion du risque, logique métier

Tableau 6.1. La dynamique des cultures professionnelles (Bourdeau et al., 2006 ; modifié).

Aujourd'hui, l'Union Internationale des Guide de Montagne (UIAGM) inclut 23 pays et compte 6000 guides dont 75 % exercent dans l'arc alpin. En France, deux syndicats représentent aujourd'hui les guides de haute montagne. Le syndicat historique, le Syndicat National des guides de Montagne (SNGM), regroupe aujourd'hui 1332 guides actifs et le Syndicat Interprofessionnel de la Montagne (SIM), créé en 2014, regroupe quant à lui 200 guides actifs.

Bien que la profession de guide s'exerce de manière très variée d'un guide à l'autre, d'après « l'enquête métier » réalisée en 2016 par le SNGM (SNGM, 2016), deux grands types de guides se distinguent aujourd'hui :

- (i) les guides « cœur de métier », mono-actifs, qui travaillent principalement avec une clientèle privée (prise de contact dite « en direct ») autant l'été en alpinisme que l'hiver en ski hors-piste, ski de randonnée et cascade de glace ;
- (ii) les guides « multi-activités », pluriactifs, qui travaillent principalement *via* une compagnie ou un bureau de guides (prise de contact *via* un intermédiaire) l'été, et qui pratiquent des activités très variées – *canyoning*, école d'escalade, *trekking* – et des courses d'alpinisme faciles dans une moindre mesure.

Pour l'ensemble des guides, 45 % de l'activité globale se concentre sur la période estivale contre 30 % pour l'hiver. Toutes saisons confondues, les principales activités pratiquées par les guides sont l'alpinisme estival (26 jours de travail en moyenne par an), le ski hors-piste (19 jours), le ski de montagne/voyage à ski (17 jours), l'escalade (école d'escalade, 7 jours ; escalade en falaise, 6,7 jours) et le *canyoning* (6,3 jours). 35 % des guides sont mono-actifs et travaillent en moyenne 128 jours par an (2015). 65 % sont pluriactifs et travaillent en moyenne 83 jours par an (2015) en tant que guide. Parmi ces guides pluriactifs, 46 % exercent en parallèle le métier de moniteur de ski, 20 % une activité de secouriste et 18 % le métier de cordiste. Le nombre de clients qu'un guide emmène par sortie est

très variable d'une activité à une autre. En alpinisme, un guide emmène en moyenne 2 clients par sortie, contre 4 à 5 en ski hors-piste et de randonnée et jusqu'à 6 en *canyoning*. Enfin, la majorité des guides résident dans les départements alpins, et principalement en Haute Savoie (272 membres), qui est aussi le premier département d'exercice pour 50 % d'entre eux (Fig. 6.1).

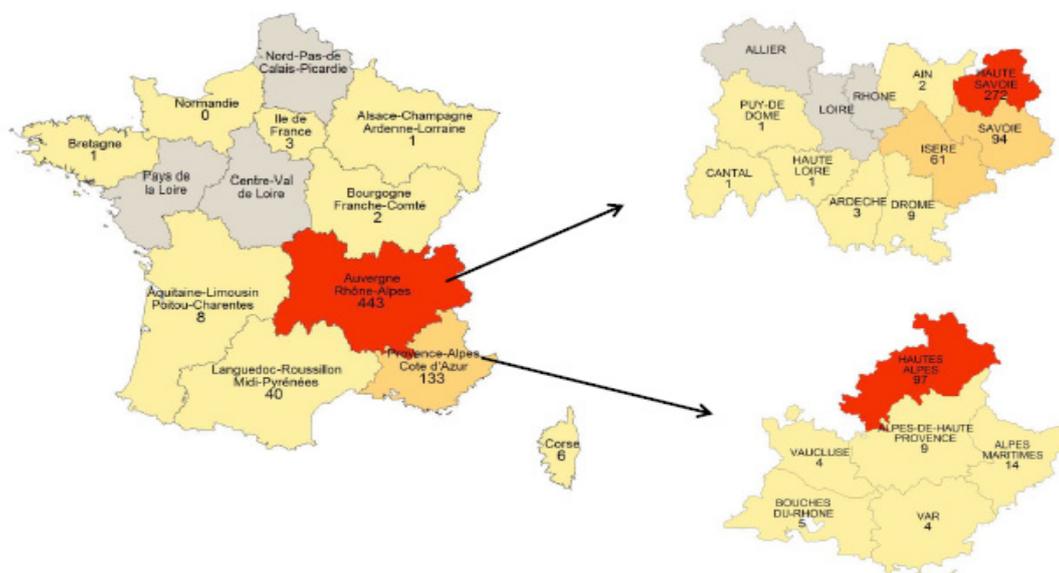


Figure 6.1. Département de résidence des guides du SNGM en 2016 (SNGM, 2016)

Toujours d'après cette enquête métier, les guides sont relativement inquiets quant à l'avenir de leur profession et souhaiteraient pouvoir continuer à exercer de manière traditionnelle (*i.e.* alpinisme en été et ski hors-piste en hiver). Les principales raisons de cette inquiétude sont (i) le changement climatique, (ii) les contraintes économiques et administratives, (iii) la réorganisation de leur métier autour de prestations de voyages/exploration, où le guide a surtout un rôle d'organisateur de séjours en « tout compris » et d'animation, les attentes des clients évoluant fortement avec une demande d'activités ludiques, accessibles à tous avec une prise de risque la plus faible possible (*cf.* : Chapitre 1). En conséquence, l'alpinisme est souvent perçu comme étant relégué au second plan.

La profession fait de plus face à une judiciarisation croissante et à un refus de la prise de risque, posant des difficultés judiciaires et assurantielles. Le montant des indemnités des préjudices subis par des clients de guide lors d'un accident a très fortement augmenté ces 10 dernières années (SNGM, 2017). C'est notamment pour cette raison que le SNGM a changé de compagnie d'assurance, renégocié l'ensemble de ses contrats en 2017 et organisé les *Assises de la Sécurité en Montagne* avec notamment pour but la mise en place de mesures permettant de réduire le nombre d'accidents. C'est autour de ces dernières thématiques, structurant l'évolution actuelle de la profession, que s'organise le projet « *Horizons Guides – Pour l'avenir d'une profession humaine et solidaire* », feuille de route du SNGM entre 2017 et 2020 avec en particulier les priorités d'actions suivantes : « Penser client », « Assurer la sécurité et la protection des guides et du métier » et « S'adapter au changement climatique ». C'est dans ce contexte et dans le cadre du projet *Horizons Guides* du SNGM que s'inscrit ce chapitre de thèse avec l'objectif d'interroger les guides sur leur perception des effets du changement climatique et sur leur adaptation à ces effets.

6.2. Article 4 – Fiche synoptique

Strategies used by French Alpine guides to adapt to the effects of climate change

Stratégies d'adaptation des guides de haute montagne français pour s'adapter aux impacts du changement climatique

Mourey J.¹, Perrin-Malterre C.¹, Ravanel L.¹, 2020, *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*.

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

Objectifs de l'article

- Identifier les stratégies d'adaptation mises en place par les guides de haute montagne face aux impacts du changement climatique
- Evaluer la difficulté/facilité des guides à s'adapter.
- Identifier différents profils de guides en fonction de leurs perceptions du changement climatique et des difficultés et des stratégies d'adaptation mises en place.

Problématique

- Comment les guides de haute montagne sont-ils affectés et comment s'adaptent-ils aux impacts du changement climatique sur les conditions de pratique de l'alpinisme ?

Méthodologie

- Enquête par questionnaire auprès des guides du SNGM (Annexe 6.1).
- Entretiens semi-directifs.

Principaux résultats

- Tous les répondants au questionnaire observent une évolution des milieux de haute montagne face au changement climatique ; cette évolution suscite principalement des sentiments négatifs tels que l'anxiété (63 % des répondants), la tristesse (52 %) et la nostalgie (32 %).
- 71 % des répondants considèrent que le changement climatique a des impacts significatifs pour la pratique de l'alpinisme depuis les années 1990.
- 99 % des répondants sont contraints d'adapter leurs pratiques du métier aux impacts du changement climatique.
- Cinq stratégies principales d'adaptation ont été identifiées : (i) le changement de saisonnalité (43,7 % des répondants), (ii) le changement des activités pratiquées (34,5 %) notamment vers des

activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne, (iii) la réactivité face aux conditions de la haute montagne (31 %), (iv) le changement des lieux de pratique (30,2 %), et (v) le changement des techniques de progression (10,1 %).

- Les guides qui cumulent les difficultés – économiques, augmentation de la prise de risques – et qui considèrent leur adaptation comme difficile sont les guides qui ne diversifient pas leur activité, basée principalement sur l'alpinisme. À l'inverse, les guides qui semblent faire face aux impacts du changement climatique avec facilité sont les guides qui se diversifient vers d'autres activités que l'alpinisme.

- Le changement climatique est un facteur qui accélère l'évolution actuelle du métier de guide, dans laquelle l'alpinisme tend à être relégué au second plan, en poussant les guides à se diversifier vers des activités hors haute montagne en été.

Rôle des auteurs

- J. Mourey : réalisation de l'ensemble de l'étude, analyse et discussion des données, rédaction de l'article.

- C. Perrin-Malterre (co-encadrante de thèse) : aide à l'analyse des données et contribution à la rédaction de l'article.

- L. Ravanel (co-encadrant de thèse) : aide à la discussion des résultats et à la rédaction de l'article.

Résumé

Les effets du changement climatique affectent sérieusement les itinéraires d'alpinisme dans les Alpes. La pratique devient progressivement plus dangereuse et plus difficile techniquement et les périodes de bonnes conditions sont plus aléatoires en été et se décalent vers le printemps, l'automne voire même l'hiver pour certains itinéraires. Dans ce contexte, cet article est basé sur une enquête par questionnaire et des entretiens semi-directifs, afin d'étudier comment les guides de haute montagne français sont affectés par le changement climatique et comment ils s'adaptent en conséquence. Nous avons d'abord identifié 33 méthodes d'adaptation qui peuvent être regroupées en 5 stratégies principales et deux catégories de guides se distinguent en fonction de leur difficulté à s'adapter. Ce degré de difficulté d'adaptation dépend notamment des modalités d'adaptation que chaque guide décide de mettre en place. En été, les guides qui décident de maintenir leur activité principalement sur l'alpinisme traditionnel ont plus de difficultés que ceux qui se sont diversifiés vers des activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne. Les guides ont donc la possibilité de s'adapter par la diversification, cependant, cela implique une redéfinition de leur profession avec laquelle il ne sont pas toujours en accord.

Mots clés : Guides de haute montagne, alpinisme, changement climatique, adaptation.



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Outdoor Recreation and Tourism

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/jort>



Strategies used by French Alpine guides to adapt to the effects of climate change

Jacques Mourey^{*}, Clémence Perrin-Malterre, Ludovic Ravel

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

ARTICLE INFO

Keywords:
Alpine guides
Mountaineering
Climate change
Adaptation

ABSTRACT

The effects of climate change on high mountain environments are seriously affecting summer Alpine climbing. Summer mountaineering in the Alps has become progressively more dangerous and technically difficult in recent years and good periods for mountaineering tend to be unpredictable in summer and have shifted towards spring, autumn and even winter for some routes. In this context, this research paper- based on a questionnaire survey and semi-structured interviews- examines how French Alpine guides are affected by climate change and how they adapt accordingly. This study enabled us to identify 33 methods of adaptation which we grouped in 5 main strategies. Two categories of Alpine guides were distinguished. One seems to have difficulties in adapting to the effects of climate change while the other seems to face the challenge with greater ease. This difference depends on the activities which each Alpine guide chooses to practice. In summer, those guides who mainly practice traditional mountaineering are less adaptable than those who have diversified, offering activities which can be done outside the high mountain environment. Alpine guides have the possibility to adapt through the diversification of their activities. However, this implies a redefinition of their job that does not always correspond to their preferred vision of the profession.

Management implications

Alpine guides confirm that high mountain environments are becoming more dangerous. Therefore, it is important that Alpine guides unions and politic entities start considering this situation in order to help Alpine guides implement adaptation measures and especially diversification. One of the main issue will be maintaining their economic activity without taking too much risks in the practice of mountaineering. For resort operators and local tourism officials, it is important to consider the activities Alpine guides are using to diversify their offer. It is an opportunity to develop nature-based tourism but it also implies that Alpine guides will start competing with other tourism stakeholders.

1. Introduction

Many studies have discussed the possible consequences of climate change on nature-based tourism and outdoor recreation. Most of these have concentrated on skiing and the behavioral adaptation of skiers (Rutty et al., 2015) who are facing a significant decline in the amount of snow and the duration of the snow cover (Koenig & Abegg, 2010; Rixen et al., 2011; Scott, 2011; Scott & McBoyle, 2007). On the other hand,

several studies have showed that climate change can have a positive effect on summer nature-based tourism, thanks to an increase in the number of sunny days in the European Alps (Pröbstl, Haider, Hægeli, & Rupf, 2011; Pröbstl-Haider, Haider, Wirth, & Beardmore, 2015; Serquet & Rebetz, 2011). In Canada, Jones and Scott (2006b) showed that climate change will cause an increase in the number of visits to national parks from 10 to 40% by the end of the 21st century, due to an increase in daily maximum temperatures. Moreover, Wall et al. (1986) predicted that the camping season in eight of Ontario's Provincial Parks would increase by 40 days by 2050. However, such findings are not relevant for all outdoor recreation activities, especially those which take place in high mountain environments, such as mountaineering.

Areas at high altitudes are being strongly modified by climate change. In the Alps, the total surface area of glaciers decreased by half between 1900 and 2012, and there has been a considerable acceleration of this phenomenon since the 1990s (Gardent, Rabatel, Dedieu, & Deline, 2014; Huss, 2012; Vincent et al., 2017). Concurrently, periglacial environments (cf.: French Hugh, 2013) in the Alps, which are mainly characterized by frost-action and permafrost (lithosphere materials that remain at or below 0°C for at least two consecutive years) are

^{*} Corresponding author.

E-mail address: jacques.mourey@univ-smb.fr (J. Mourey).

<https://doi.org/10.1016/j.jort.2020.100278>

Received 18 February 2019; Received in revised form 3 December 2019; Accepted 2 January 2020

Available online 11 January 2020

2213-0780/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved.

tending to warm up and degrade (Haeberli & Gruber, 2009) resulting in an increase in the frequency and volume of rockfalls (Harris et al., 2001, 2009; Ravanel & Deline, 2011; Ravanel, Deline, Lambiel, & Vincent, 2013, 2017).

Thus, conditions for summer mountaineering in the Alps tend to deteriorate year by year. This leads to an increase in the danger and technical difficulty of routes (Behm, Raffener, & Schöner, 2006; Pröbstl-Haider et al., 2015; Temme, 2015; Ritter, Fiebig, & Muhar, 2011; Purdie, Gomez, & Espiner, 2015; Mourey & Ravanel, 2017) due to a growing number of detrimental geomorphological processes. As a result, good periods for mountaineering tend to be more unpredictable in summer and have shifted towards spring, autumn and even winter for some routes. As such, high mountain activities do not benefit from the positive effects of climate change on summer nature-based tourism. In this work, risk and danger are differentiated in the sense of Luhmann (1991, p. 256), risk being the way an individual comprehends and manages exposure to dangers, the latter being inherent to an activity and the environment in which it takes place (eg. rock falls or avalanches).

Some previous studies have examined the evolution of mountaineering routes in summer (Mourey, Marcuzzi, Ravanel, & Pallandre, 2019; Purdie & Kerr, 2018; Temme, 2015), but almost no studies have investigated how mountaineers are affected by those modifications and how they have adapted, except for example Behm et al. (2006) that questions how mountain professionals (Alpine guides, mountain leaders and ski instructors) are adapting to climate change effects in Austria. Our article focuses on French Alpine guides, well-regarded mountaineering professionals. Its purpose is to examine how they are affected by the evolution of high mountain routes, and what methods they use to adapt. Other social, economic and cultural issues affecting alpine guides in their adaptation, but not climate related, will also be discussed. Alpine guides have been the subject of many studies in various disciplines (Caille, 2002; Ferclay & Radiguet de la Bastaie, 2015; Martinoia, 2012, 2015; Mennesson & Galissaire, 2004; Wozniak, 2011). Specifically, social sciences studies have examined the socio-cultural and economic evolution of this profession and the reasons behind it (Bourdeau, 1991). However, the evolution of the high mountain environment due to climate change as a possible factor in the evolution of the Alpine guide profession has not yet been studied in detail.

The objective of this work is to study the connections between the way in which Alpine guides organize their professional activity and how they adapt to the effects of climate change. It is based on a questionnaire survey and semi-structured interviews. Our hypothesis is that Alpine guides adapt to climate change differently depending on how they organize their professional activities (seasonality, activities practiced etc.). Moreover, thanks to a better vulnerability and adaptability assessment, this study should help guides and especially their representative bodies (such as the French National Union of Mountain Guides - SNGM) to support and lead guides in their adaptation to climate change.

2. Methodology

This study combines a quantitative method based on a survey questionnaire with a qualitative method based on semi-structured interviews.

2.1. Questionnaire survey

The questionnaire was composed of open and closed questions (q = 49), structured in 5 sections. The objective of the first two sections is to get the key information on how each respondent organizes its work, and more precisely for the summer period. The objectives of the third and fourth sections are to evaluate respondents' perception of the effect of climate change, to identify adaptation strategies they employ, and to examine whether witnessing the impacts of climate change on mountaineering has made them change their personal practices to reduce their

own contribution to climate change.

1. Type of guiding work (7 questions). Respondents were questioned on the way they organize their job such as the number of days of work per year, the activities practiced, the main period of work during the year, etc.
2. Summer work (5 questions). Specific questions on their summer activities were asked such as the kind of clientele, the activities practiced, the main mountain ranges and the kind of mountaineering routes frequented etc.
3. Perception of climate change and adaptation to its effects on mountaineering routes (22 questions). This is the main section of the survey, questioning the respondents on the effects of climate change on high mountain environments, the processes involved and their impacts on mountaineering (eg. risk taking, evolution of the routes, periods of good conditions etc.). Then, respondents were questioned on their need to adapt the way they work and to describe, in an open question, what adaptation measures they implement. Using a ten-point scales, they also had to evaluate their difficulty to adapt and the evolution of their economic activity because of climate change. In both cases they were also asked to explain their answers in an open question and to describe their feelings, sparked by climate change effects.
4. Actions to reduce their own contribution to climate change (9 questions). In this section, respondents were questioned on their motivation to reduce their own contribution to climate change and how they do so.
5. Socio-professional profile (6 questions)

In order to i) validate the questionnaire, ii) make sure it would answer the main issues addressed, and iii) be suitable for every Alpine guide, it went through two testing stages. First it was sent to a group of 15 Alpine guides who have very different ways of organizing their day to day work, before being finally validated by a group of experts made up of researchers and members of the SNGM directing committee.

The base-population of this study are guides who are members of the SNGM (N = 1332). They represent the great majority of active French Alpine guides (1332 out of 1515 in 2017). The questionnaire was self-administered, sent by e-mail as a Google form on November 27th 2017, with two reminders two weeks apart. In order to ensure the best response rate, it was sent in autumn as this is the least busy period for an Alpine guide. It is a period when Alpine guides are assessing their activity and are more disposed to answering questions about it.

Questionnaire answers were analyzed with Sphinx IQ2 (Ganassali, 2014, p. 234), a survey and statistical analysis software tool. A codification process was used to analyze the open questions. Most of the analyses came from flat sorting and cross-tabulated results. The significances of statistical relations between variables were evaluated running chi-square tests. A Factorial Correspondence Analyses (FCA; Benzecri, 1992; Dore et al., 1996) was also carried out to study in more detail the relationship between the four levels of difficulty to adapt and the 33 adaptation methods implemented. It is important to note that all the answers are the result of a self-evaluation and inevitably variable from one respondent to another.

2.2. Semi-structured interviews

During the same period, 26 semi-structured interviews were carried out with Alpine guides so as to complete the questionnaire survey with qualitative data. The interviews were structured along three main questions: (i) how do you organize your work as an Alpine guide, (ii) what are the impacts of climate change on high mountain environments and mountaineering and, (iii) how are you adapting accordingly? On average, the interviews were 1 h long and allowed us to discuss the results of the questionnaire. The interviewees were not representative of the base-population. They were chosen in order to represent a very diversified sample (seniority, place of residency, type of guiding

activity), representing the diversity of the base-population and the very variable behavioral adaptations to the effects of climate change.

All the semi-structured interviews were transcribed. We performed an individual thematic analysis, based on the same framework as the questionnaire as a closed categorization procedure (Ghiglione & Matalon, 1998, p. 104). Then, a comparative data analysis was done with the questionnaire results which allowed us to illustrate and identify the limits of the behavioral adaptations identified thanks to the questionnaire. Also, the results from the interviews are mainly used in the second section of the results, which put into perspective the questionnaire results, presenting the difficulties and limits in the implementation of adaptation strategies.

3. Results

3.1. Sample characteristics

230 Alpine guides responded to the questionnaire survey, out of the 1332 contacted. The sample representativeness of the base population has been assessed, running chi-square goodness of fit tests (Laurencelle, 2005), using data of the base-population provided by the SNGM, and considering the location (department of residency) and the seniority of Alpines guides. Those two variables are considered in this study as crucial to the perception and adaptation to climate change. To run the chi-square test, some departments of residency were grouped according to the principal mountain range when necessary. Therefore, all departments of the Pyrenees (5 departments, 4.10% of the respondents) and the Alpes du Sud (3 departments, 2.3%) were grouped together (Table 1). The departments that do not cover a mountain range were grouped in the "others" category (21 departments, 6.6%). For the two variables, chi-square values calculated for the sample are inferior to the theoretical chi-square value for the base population, which means that the sample distribution appears to be identical to the theoretical sample needed. Then, considering those two variables, the sample is representative of the base population.

In terms of seniority, most respondents are Alpine guides for 1–10 years (25.7%) and 21–30 years (25.7%). The majority of respondents live in the northern French Alps, and especially in Haute Savoie (40.5% of the respondents).

On average, respondents work as certified Alpine guides for 102 days per year, of which 48 days are in summer (May to October). The substantial interquartile ranges, 90 and 30 days respectively, illustrates the high level of heterogeneity in individuals' professional situations. 64% are multi-active (i.e. they have a second professional activity). The main mountain activities practiced are mountaineering by 77% of respondents, rock climbing (36%) and glacier hiking (30%). The Mont Blanc massif is the most frequented one (73% of respondents consider it is one of the three massifs they mostly frequent), followed by the Écrins

massif (40%) and the Valais Alps (31%). In general, the overall difficulty of the mountaineering routes which are guided is "Peu Difficile"¹ (slightly difficult – 62%) and "Assez Difficile" (quite difficult – 56%). On average, respondents work 17 days for a guides' cooperative (Compagnie or Bureau), but the standard deviation is high (17,23) which also illustrates the large variety of possible individual professional situations (min. = 0 day, max. = 80 days).

3.2. Alpine guides facing climate change effects

All respondents observed an evolution in the high mountain environment due to climate change. This is mainly construed as being negative, arousing feelings such as anxiety (63%), sadness (52%) and nostalgia (32%). Only two relatively positive feelings were observed, each with a very low proportion: curiosity (13%) and optimism (4%). However, 86% of respondents still think mountaineering is as enjoyable as in the past.

A large majority of respondents (71%) consider that the effects of climate change have been significant for the sport of mountaineering since the 1990s, which corresponds to the accelerating pattern of warming and the resultant ice melting (IPCC, 2014) since the 1990s. Glacial shrinkage (Gardent et al., 2014) and more frequent rockfalls (Harris et al., 2009) are the two main processes identified (by 77% and 29% of the respondents respectively). As a result, 84% of respondents consider that high mountain environments become more dangerous for mountaineers in summer than in the past. However, it is important to note that 60% of respondents consider that they are not taking more risks due to the effects of climate change. This suggests that Alpine guides are taking into consideration the fact that high mountains are more dangerous than before and adapting the way they work in order to reduce the level of risk. Indeed, 99% of the respondent answered "yes" to the question "Do you have to adapt the way you work because of the effects of climate change?". This first finding raises the following questions: What are these methods of adaptation? Are they difficult to implement? Are all Alpine guides adapting in the same way?

3.3. Adaptation methods and strategies

In order to identify the methods of adaptation, an open question was asked: "How are you adapting your everyday work to the effects of climate change". 33 methods of adaptation were identified and regrouped into 5 main strategies (Fig. 1).

The most mentioned strategy (43.7% of respondents) has been the change in seasonality of the work. This consists mainly in shifting summer mountaineering activities to spring, early summer and/or autumn, when routes are in good conditions. 17.5% of respondents are now only guiding snow routes early in the summer season when they are still in good condition.

A change in the main guiding activity has been the second-most mentioned strategy (34.5% of respondents). It mostly consists of prioritizing rock routes (18% of respondents), which are considered the least affected by climate change (Bourdeau, 2014; Mourey et al., 2019). It also consists of increasing the amount of winter mountaineering and diversifying summer activities (e.g. canyoning and *via ferrata*).

The third-most mentioned strategy (31% of respondents) has been to pay more attention and be more responsive to high mountain conditions. This mostly means spending more time assessing conditions in the high mountains, for example using weather forecasts and professional social networks. 14% of respondents are more careful in choosing routes which are in sufficiently good condition.

The fourth-most mentioned strategy (30.2% of respondents) has been to change the location of work. This mainly consists of avoiding routes that are in bad condition (9.7%). This has been made possible

Table 1
Seniority and department of residency of the sample (n = 230).

Variable	Subcategory (yr)	Respondents (%)	Base-population (%)
Seniority	<1 and aspirants	8.9	8.7
	1 to 10	25.7	25.2
	11 to 20	19.6	22.6
	21 to 30	25.7	23
	31 to 40	15.9	13.5
	>40	4.2	6.9
Department of residence	Haute Savoie	40.5	42.4
	Savoie	17.6	14.7
	Isère	9	9.4
	Hautes Alpes	20.3	15.2
	Pyrénées	4.1	6.7
	Alpes du Sud	2.3	4.2
	Others	6.6	6.9

¹ For grades, see Hagenmuller, Marsigny, and Pallandre (2016).

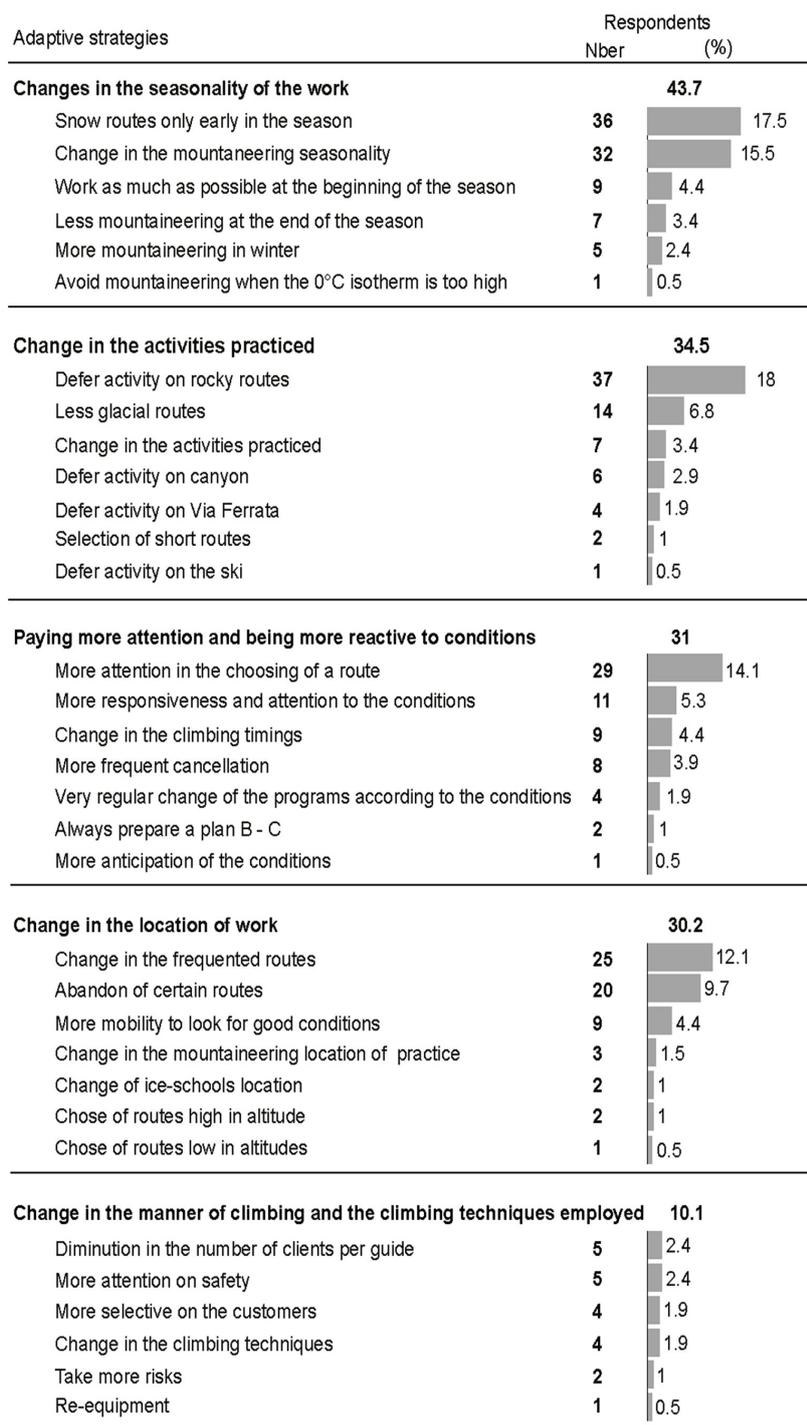


Fig. 1. Adaptation strategies implemented.

through increased mobility which has enabled guides to go where conditions are good for mountaineering. 54% of respondents consider they have to be more mobile between mountain ranges in order to find good mountaineering conditions. For example, when rock falls occur in the Gûter Couloir on the normal route up Mont Blanc (Mourey, Moret, Descamps, & Bozon, 2018), the Saint Gervais and Chamonix Guides' Companies (the two largest French guiding cooperatives with respectively 70 and 200 members) have taken the decision over recent years to

stop guiding this route until conditions improve. Instead they try to persuade their clients to climb another 4000 m summit such as Monte Rosa (4634 m a.s.l.) in Switzerland or the Grand Paradiso (4061 m a.s.l.) in Italy (pers. comm. P. Chapelland and Y. Delvaux, Alpine guide and Directors of Saint Gervais and Chamonix Guides' Companies).

Finally, the least mentioned strategy (10.1% of respondents) is for guides to change their way of climbing and the techniques employed. This mainly consists of reducing the number of clients per guide (2.4%),

especially when a route becomes more technically difficult. The equipping of some passages with ladders, new bolts and belay anchors etc. occasionally eases/restores the difficulty that may have increased because of the effects of climate change. It also improves safety, which in some cases, enables guides to stay with the same number of clients on their rope, with no need to reduce it.

3.4. Difficulty of adaption depending on the strategies implemented

52% of respondents consider that these adaptation strategies were “quite difficult” to implement, while 48% consider them to be “quite easy”. This second observation raises the following question: Which Alpine guides consider the adaptation easy to implement, which ones consider it difficult and why?

Our starting hypothesis was that the difficulty to adapt depends on the way an Alpine guide works eg. seasonality of the work, mono- or multi-activity, the proportion of work coming from a company/bureau (guiding cooperative), the department of residency, seniority, type of activity, main mountain range frequented, etc. However, no significant statistical relationships were found within those variables. In the end, we only found three variables that have a significant relation with the level of difficulty to adapt and help better characterize the alpine guide of each category (adaptation “quite easy” or “quite difficult”).

The first two significant relationships are based on risk-taking and the economic activity. 60% of Alpine guides consider they are taking more risks and 56% consider their economic activity is decreasing because of the effects of climate change. There is a very significant relation between those three questions (Fig. 2): Alpine guides who consider the adaptation as “quite difficult” (48%) also consider they take more risks ($X^2 = 10.37$; $p < 0.01$) while their economic activity is also affected ($X^2 = 51.15$; $p < 0.01$). On the other hand, the ones who consider their adaptation as “quite easy” (52%) do not consider they take more risks and do not consider that their economic activity has been affected. Therefore, two categories of Alpine guides can be identified: one seems to accumulate difficulties because of the effects of climate change while the other seems to deal with it with relative ease.

Then, the third significant relationship that allows to better characterize the guides considering their level of difficulty to adapt, is based on the adaptation methods implemented ($X^2 = 86.33$; $p = 0.05$; Fig. 3). Respondents who consider that their adaptation to climate change is “very easy” or “easy” are diversifying their guiding work with activities which take place outside the high mountain environment, such as *via ferratas* or canyoning. They do not try to maintain a large part of their income through traditional mountaineering. Respondents who consider that their adaptation is “difficult” or “very difficult” are the ones who continue to work in traditional mountaineering, without trying to diversify. Those who consider their adaptation as “difficult” are nonetheless trying to adapt their mountaineering methods, especially by

paying more attention and being more responsive to high mountain conditions and by changing the routes they frequently climb, while respondents considering their adaptation as “very difficult” endure the effects of climate change and do not really adapt their work. They thus take more risks and they change their trip plans very often. They work as much as possible at the beginning of the season – when conditions are still good for mountaineering – and must frequently cancel their mountaineering-orientated programs. Prioritizing rock climbs over snow/ice/mixed routes is one of the most implemented adaptation methods and respondents considering their adaptation as “very difficult” are the ones that are implementing it the least.

Our findings show that the type of guided activity and the way individual Alpine guides work stand as determinant factors in their level of difficulty to adapt.

3.5. Difficulties and limits in the implementation of adaptation strategies

While implementing the identified adaptation methods and strategies, Alpine guides face a number of difficulties and limitations. The following results are mainly drawn from the semi-structured interviews performed. Those difficulties can be grouped into two categories: i) organizational issues and ii) type of clientele.

The strategies employed highlight that the effects of climate change are forcing Alpine guides to become more flexible and mobile. Changing activities, locations, seasons, etc. requires more flexibility in time and space and it is therefore difficult to establish and sell set programs in advance as guides can no longer rely on long periods of good mountaineering conditions. This causes financial and logistical issues because travel and accommodation arrangements must be more flexible. This inevitably means a bigger workload for guides. They regularly have to reorganize because of changing conditions as summer progresses and they must try to make the most of any short and unpredictable periods of good conditions. It is important to note that the development of digital technologies has helped them to adapt, particularly the use of social media networks, specialized websites (La Chamoniarde, CamptoCamp, Skitour, etc.) and professional mailing lists which inform them about the daily of conditions in the mountains. For example, SNGM guides have set up an email service and several WhatsApp groups, particularly in the Chamonix and Tarentaise valleys (personal com. C. Jacquier, Alpine guide and SNGM president).

On the other hand, from the point of view of the Alpine guides interviewed, the clientele may not have the ability and/or may simply refuse the constraints that these adaptation strategies require. For many people, it is not easy to go mountaineering in spring or very early in the summer season, because these periods are outside the traditional summer holiday period which runs from July to August. Moreover, the clients may refuse to change their preferred activity and/or may not have the physical and technical abilities to do something else. For example,

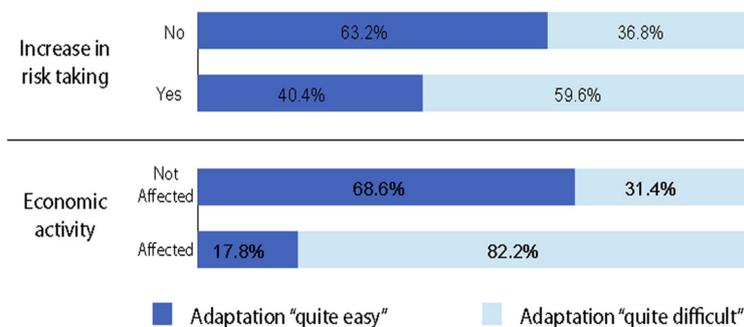


Fig. 2. Variations in the difficulty of adapting to climate change relative to a perceived increase in risk taking and a decrease in economic activity due to the effects of climate change. Each line presents Alpine guides' difficulty of adaptation, according to their answers to the questions "Do you take more risks because of climate change effects?" and "Is your economic activity decreasing because of climate change effects?".



Fig. 3. Graphical representation (FCA-type) of the relationship between the variables: (i) the difficulty to adapt (purple circles) and (ii) the adaptation methods implemented (blue circles). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

prioritizing rock climbs – which is one of the most implemented adaptation modalities (18% of the respondents to the questionnaire survey) – requires higher technical and physical skills, especially when compared to glacier hiking and easy mountaineering routes. Therefore, this method cannot be implemented with every client. Many Alpine guides who work in mountaineering and make a significant portion of their income in summer were interviewed. It turns out that the type of clients a guide works with, plays an important role in being able to tackle these difficulties. A guide who works mostly with private clients has generally less difficulty in adapting. A relationship of trust has already been developed between guide and client and it is easier for the guide to change the program, to propose different routes and periods when conditions for mountaineering are good, or to propose another activity if the one for which the guide was first contacted cannot be carried out. For example, at the end of December 2016, there was not enough snow to ski in Chamonix and some guides managed to go rock-climbing in the

Pre-Alps massifs with the clients who had hired them for skiing. In most cases, this was made possible because they knew each other beforehand. However, an Alpine guide who works mostly with clients who book through a company or bureau, often finds it more difficult to adapt. This type of “daily” clientele is usually present for a short period of time, defined in advance (accommodation and transport booked in advance) and during the summer holidays (July–August), *i.e.* the period when conditions for mountaineering are most uncertain. In addition, this clientele often hires a guide to do glacier hiking or easy Alpine routes which are often in bad condition very early in the season, or the ascent of prestigious summits such as Mont Blanc. But they are not necessarily interested in doing something else if the coveted summit is not in good condition.

In both cases, increasingly unpredictable conditions for summer mountaineering and a higher level of technical difficulty and danger, mean that Alpine guides must negotiate with their clients. They have to

work on their communication skills in order to persuade their clients to climb different routes, or change activity and dates, but there is nevertheless a risk of losing clients and working less. As a result, according to the questionnaire survey, 98% of respondents are trying to educate their clients about climate change. 60% consider that their clients are aware that high mountain environments are evolving because of climate change while 82% think that their clients are ready to adapt to these changes.

3.6. Is climate change redefining the job of the Alpine guide?

It is interesting to note that, according to the questionnaire survey, there is a significant relationship between Alpine guides who no longer consider that the high mountain environment corresponds to their personal mental image (47% of respondents) and their difficulty to adapt ($X^2 = 16.6$; $p = 0.01$). This illustrates that high mountain environments can be idealized, and the effects of climate change are creating a discrepancy with regards to a traditional and nostalgic view of mountaineering which has become difficult to implement. Indeed, climate change and the adaptation responses that Alpine guides have implemented to maintain their professional activity has contributed to redefine the job. It has become more diversified and is increasingly practised outside the high mountain environment. "I am no longer into adaptation, I am into reorganization. That's it, I have passed the turning point" (F. Meyer, Alpine guide since 2002). In the questionnaire survey, when respondents were asked if they think that, in the future, the effects of climate change will force guides to reorganize and reconsider the way they work as Alpine guides, the majority (60%) consider this would be very much the case (8–10 on a scale of 10).

Finally, according to our questionnaire survey, 69% of respondents consider their potential influence to limit climate change in the Alps as "very low" but 64% are trying to reduce their own contribution to climate change, which also contributes to the ongoing redefinition of their job. It shows that most of them have an awareness of climate change issues, even though they generally choose to prioritize the implementation of adaptation strategies in order to maintain their professional and economic activity. Actions taken to reduce personal carbon output include: i) organizing carpooling with clients and colleagues (for 45% of respondents), ii) reducing travel (25%), iii) using public transport (13%), iv) not going far abroad or at least reducing the number of expeditions away from France (9%) and v) refusing to guide on heliskiing excursions (5%). As an illustration of how some Alpine guides are motivated to combat climate change, a new type of guide bureau has been created. The "Immersion Alpine Bureau des Guides" – mainly composed of young guides – promotes a different way of working as an Alpine guide, in particular by limiting their contribution to climate change and by having a role as sentinels and raising awareness of the effects of climate change on high mountain areas. This bureau will also try to change the way high mountains and mountaineering are marketed by selling a "mountaineering experience rather than a specific summit or route" (Y. Borgnet, aspirant Alpine guide).

4. Discussion

4.1. French Alpine guides as tourism stakeholders who are very aware of climate change

Many studies have examined the impacts of climate change on mountain outdoor recreation and tourism (e.g. Hewer & Gough, 2017). According to Bourdeau (2009), mountain tourism is under stress because of climate and geo-cultural changes.

Our work confirms studies which have focused on high altitude and latitude activities such as those conducted by Behm et al. (2006), Bourdeau (2014), Temme (2015), Purdie et al. (2015) or Pröbstl-Haider, Dabrowska, and Haider (2016), which conclude that climate change has negative effects. It leads to increased danger due to more intense and

frequent climate-related processes and a shortening of the summer season. Optimal periods for mountaineering are less predictable and shift towards spring and autumn.

However, unlike other mountain tourism stakeholders (outdoor activities center manager, hut keepers, hotel manager, etc.) (Saarinen & Tervo, 2006), high mountain guides are very aware and mindful of the effects of climate change. For example, when Alpine guides already started to consider and adapt to climate change in the 1990s, small tourism entrepreneurs in New Zealand considered climate change a medium to long term issue (5 + years) (Hall, 2006) and considered other more immediate business concerns as being more important to business survival. The main characteristics of Alpine guides adaptation strategies (temporal and spatial substitution) were also identified in Ontario, especially with regards to expert skiers (Rutty et al., 2015). The level of commitment to an activity seems to be a key factor in the implementation of adaptive strategies, because participants wish to continue doing their chosen activity as often as before. Moreover, our results confirm some of Behm's results (2006) which demonstrated that 93% of Alpine guides, mountain leaders and ski instructors have had to adapt to the effects of climate change. The main adaptation methods identified by Behm's are very similar to those we identify in this study: the abandonment of certain routes (75% of respondents), the modification of activities (56%) and increased mobility between mountain ranges (percentage unknown). However, Behm concluded in 2006 that at that time the consequences of climate change were not considered important by respondents. Conversely, our results show that the effects of climate change are contributing to the redefinition of the Alpine guide profession. Different hypotheses may explain this difference: (i) in our study, we focused only on French Alpine guides whereas (Behm et al. (2006)) studied Alpine guides, mountain leaders and ski instructors in the same time, (ii) the two studies are separated by a period of 12 years, during which the effects of climate change have intensified (Beniston et al., 2018), (iii) it is possible that the evolution of mountaineering routes due to climate change follows different patterns in the Eastern Alps, and (iv) the socio-economic context and the tourism industry are very different in the Eastern and the Western Alps.

4.2. The social, economic and cultural context affecting the adaptability of Alpine guides

Alongside climatic issues, risk-taking and its social acceptance are factors which influences the way in which Alpine guides conduct their work and their ability to adapt to climate change. Giddens (1990, 27) explains that modern society is characterized by a trust in the "expert system [...] that organizes large areas of the material and social environments". As a consequence, although risk is permanent in these systems, it is seen as being made up of calculated and controllable factors to which an individual becomes desensitized creating an impression of permanent safety. However, mountaineering is an activity which exposes participants to numerous objective and subjective dangers (Opaschowski, 2000, p. 29). These dangers are hard to predict and measure – especially because of the effects of climate change – and, consequently, there is a continual high level of risk taking. This idea of risk taking and the fear of a potentially fatal accident, which has been largely encouraged by the media, is perceived as a negative factor and discourages people from going mountaineering. Therefore, in a societal context pushing to limit risk taking, it is harder for Alpine guides to maintain their activity on mountaineering, and especially as climate change effects make the practice more dangerous. However, we can also ask whether the increased danger of high mountain environments due to climate change might have a positive impact on Alpine guiding by legitimizing the role and expertise of the guide?

The ability of Alpine guides to adapt is also determined by the duration of the holiday period, the type of activities that tourists want to do and the average household budget. Until the 1990s, it was not uncommon for a guide to be hired several times by the same person during

an average stay of 17,2 days (INSEE data, 1979), while these days' tourists want to do several fun activities (mountain biking, white water sports, bathing, treetop adventure ropeways, etc.) during an average stay of 11 days (INSEE data, 2004). Alpine guides are also partly responsible for the diversification of activities proposed in Alpine resorts through the development of new products and new activities such as canyoning, *via ferrata*, treetop ropeways etc., which are less dangerous than mountaineering. Moreover, household budget for leisure and cultural activities is decreasing. In France, in 2005, it represented 7.4% of the household budget, whereas in 2015 this had reduced to 6.3% (INSEE data, 2017). Therefore, in a context where the duration and the budget dedicated for the holidays are decreasing and the expectations of customers are changing and turning to the consumption of varied and fun activities, the time available and the motivations for the practice of mountaineering – which generally requires two days and is relatively expensive – tend to decrease and make Alpine guides adaptation more difficult.

Furthermore, while reducing the number of clients per guide can be linked to safety and technical concerns as a climate related adaptation method, it can also be linked to economic interests. This can be especially true for guiding companies and bureaus (cooperatives) that have a lot of demand for prestigious summits such as Mont Blanc. Reducing the number of clients per guide potentially multiplies the number of days of work, which ensures work for a greater number of guides and over a longer period of time. It also enables prices to be increased.

Finally, mountaineering is the traditional activity of Alpine guides and remains their most common form of work. However, for social and economic reasons (Martinez, 2015), combined with the effects of climate change, guides are diversifying their offer and proposing activities that are done outside the high mountain environment. However, individual motivations and dispositions acquired during socialization process (Lahire, 2003) which influences the conception of guide's profession are important factors in explaining why some Alpine guides find it more difficult to adapt than others. According to F. Pallandre (Alpine guide since 1990 and instructor at ENSA, the National School of Skiing and Mountaineering): "The adaptability level is variable from one guide to another, depending on their skills and motivations". Thus, guides who have a "technicist" conception of mountaineering (Hoibian, 2001, p. 342) do not accept to diversify their professional activity towards practices, such as canyoning, in which clients look for sensations but do not wish to learn the practice's techniques. This shows that the professional field of mountain professions, such as Alpine guide, are characterised by tensions and competitions for the legitimate definition of the activity and the exercise of the profession (Hoibian, 2015).

5. Conclusions and perspectives

The evolution of high mountain environments due to climate change has had an impact on the way in which Alpine guides work, and so guides have had to adapt and change the way they operate. This study identified 33 adaptation methods, which can be grouped into 5 main strategic categories. Half of the respondents consider these changes as being difficult to implement. However, the difficulty depends on the activities Alpine guides choose to offer to their clients. In summer, those who mainly offer traditional mountaineering excursions are less adaptable than those who are willing to diversify and offer activities outside the high mountain environment. Then, adapting to climate change can be considered as an innovation (Bourdeau, 2014) and some Alpine guides are developing a "climatic intelligence" (Bourdeau, 2014) by developing new products and new ways of working. Thus, Alpine guides have the possibility to adapt through diversification but this implies a redefinition of their work that they are not always comfortable with. Furthermore, their ability to adapt is limited by organizational issues, the type and the characteristics of the clientele and socio-cultural and economic factors, including some which are also driving guides away from traditional mountaineering routes during the summer

season.

In the future, other aspects of the impact of climate change on Alpine guiding could be studied, and in particular the number of accidents. This could be considered an indication of the effectiveness of the guides' adaptation strategies. Will accidents become more frequent and severe because of the effects of climate change? Comparative analysis can also be made by studying Alpine guides in other areas in the European Alps or in other mountain ranges in the world. Do they adapt in the same ways? Do they face the same difficulties? These are some of the questions, in the time when mountaineering may be facing the greatest challenge in its almost 250-year history.

Author contributions section

Jacques Mourey: Conceptualization, Methodology, Formal Analysis, Writing original draft, Clémence Perrin-Malterre: Resources, Formal Analysis, Validation, Writing and reviewing, Ludovic Ravanel: Funding acquisition, Validation, Writing and reviewing, Supervision.

Acknowledgements

The authors wish to thank the SNGM for supporting this study and making their data available, and M. Sall for his help on the methodological approach. This study was funded by the EU ALCOTRA AdaPT Mont Blanc project.

References

- Behm, M., Raffener, G., & Schöner, W. (2006). *Auswirkungen der Klima- und Gletscheränderung auf den Alpinismus* (Vol 99). Vienna, Umweltdachverband.
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andressen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., et al. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12, 759–794.
- Benzecri, J. P. (1992). *Correspondence analysis handbook. Series: Statistics, textbooks and monographs* (Vol 125). New York: Marcel Dekker.
- Bourdeau, P. (1991). Guides de haute montagne. Territoire et identité. Recherche sur la territorialité d'un groupe professionnel. *Journal of Alpine Research*, 288. Special issue.
- Bourdeau, P. (2009). Mountain tourism in a climate of change. Global change and sustainable development in mountain regions, COST strategic workshop. *Alpine Space – Man and Environment*, 7, 160.
- 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.
- Caille, F. (2002). Le guide comme professionnel de l'alpinisme : Perceptions et enjeux du traitement judiciaire de la responsabilité dans le domaine des sports de montagne. In *Deux siècles d'alpinismes européens : Origines et mutations des activités de grimpe* (pp. 369–384). L'Harmattan.
- Dore, J.-C., Ojasoo, T., Okubo, Y., Durand, T., Dudognon, G., & Miquel, J. F. (1996). Correspondence factor analysis of the publication patterns of 48 countries over the period 1981–1992. *Journal of the American Society for Information Science*, 47(3), 588–602.
- Ferclay, R., & Radiguet de la Bastia, C. (2015). Thèse de Doctorat de Médecine. *Accidents des guides de haute montagne français de 2003 à 2013 : Étude rétrospective de 286 cas et de leurs conséquences* (Vol 100). Université Joseph Fourier.
- French Hugh, M. (2013). *Periglacial environment* (3rd ed., p. 480). John Wiley and Sons.
- Ganassali, S. (2014). *Enquêtes et analyse de données avec Sphinx*. LM Pearson.
- Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J. P., & Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120, 24–37.
- Ghiglione, R., & Matalon, B. (1998). *Les enquêtes sociologiques. Théories et pratique*. Paris, A. Colin.
- Giddens, A. (1990). *The consequences of modernity*. Cambridge: Polity Press.
- Haerberli, W., & Gruber, S. (2009). Global warming and mountain permafrost. In R. Margesin (Ed.), *Permafrost soils* (Vol 16, pp. 205–218). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hagenmuller, J. F., Marsigny, F., & Pallandre, F. (2016). *L'alpinisme - des premiers pas aux grandes ascensions* (p. 144). Grenoble: Glénat.
- Hall, C. M. (2006). New Zealand tourism entrepreneur attitudes and behaviors with respects to climate change adaptation and mitigation. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 1(3), 214–228.
- Harris, C., Arenson, L. U., Christiansen, H. H., Eitzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., et al. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92, 117–171.

- Harris, C., Davies, M. C., & Eitzmüller, B. (2001). The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 145–156.
- Hewer, M., & Gough, W. (2017). Thirty years of assessing the impacts of climate change on outdoor recreation and tourism in Canada. *Tourism Management Perspectives*. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.07.003>.
- Hoibian, O. (2001). *Les alpinistes en France 1870-1950. Une histoire culturelle*. Paris: L'Harmattan.
- Hoibian, O. (2015). La montagne redéfinie. L'exercice professionnel aux prises avec les évolutions de la demande. In M. Attali, dir (Ed.), *L'ENSA à la conquête des sommets. La montagne sur les voies de l'excellence* (pp. 345–362). Grenoble, PUG.
- Huss, M. (2012). Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: The European Alps 1900–2100. *The Cryosphere*, 6, 1117–1156.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K (p. 151)*. Geneva, Switzerland: Pachauri and L.A. Meyer (eds.)). IPCC.
- Koenig, U., & Abegg, B. (2010). Impacts of climate change on winter tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5, 46–58.
- Lahire, B. (2003). From the habitus to an individual heritage of dispositions. Towards a sociology at the level of the individual. *Poetics*, 31(5–6), 329–355.
- Laurencelle, L. (2005). Testing the representativeness of a sample. *Letres statistiques*, 12, 131–146.
- Luhman, N. (1991). *Soziologie des Risikos* (p. 256). Berlin, Germany: De Gruyter.
- Martinez, M. (2015). La formation des guides de haute montagne depuis 1948. A la croisée des évolutions sociétales, du savoir-faire de l'ENSA et de la profession de guide. In M. Attali, dir (Ed.), *L'ENSA à la conquête des sommets. La montagne sur les voies de l'excellence*. Grenoble (pp. 149–169). PUG.
- Martinoia, R. (2012). Coproduction de service : La prestation dyadique des guides de haute montagne. *Annales des Mines – Gérer et comprendre*, 2, 66–76.
- Martinoia, R. (2015). Du « serviteur » au « seigneur ». Une relecture historique de la domination dans la relation guide-client, au prisme de l'institutionnalisation du métier. In M. Attali, dir (Ed.), *L'ENSA à la conquête des sommets, la montagne sur les voies de l'excellence* (pp. 125–146). Grenoble, PUG.
- Mennesson, C., & Galissaire, R. (2004). Les femmes guides de haute montagne : Modes de socialisation et identités sexuées. *Recherches Feministes*, 17(1), 111–141.
- Mourey, J., Marcuzzi, M., Ravanel, L., & Pallandre, F. (2019). Effects of climate change on high Alpine environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (western Alps) over half a century. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 1938–4246. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>.
- Mourey, J., Moret, O., Descamps, P., & Bozon, S. (2018). *Accidentology on the normal route up to Mont Blanc from 1990 to 2017* (Vol 20). Fondation Petzl.
- Mourey, J., & Ravanel, 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.
- Opaschowski, H. W. (2000). *Xtrem : Der kalkulierte Wahnsinn, Extremsport als zeitphänomen*. Hamburg: German press.
- Pröbstl, U., Haider, W., Hägeli, P., & Ruf, R. (2011). Klimawandel und Bergtourismus-Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation. (Hrsg.), *Wandel als Chance für den alpinen Tourismus*. Schweizer Jahrbuch für Tourismus 2011. St. Galler Schriften für Tourismus und Verkehr, 3, 83–89.
- 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.
- Pröbstl-Haider, U., Haider, W., Wirth, V., & Beardmore, B. (2015). Will climate change increase attractiveness of summer destinations in the European Alps? A survey of German tourists. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 11, 44–57.
- Purdie, H., Gomez, C., & Espiner, S. (2015). Glacier recession and the changing rockfall hazard: Implications for glacier tourism. *New Zealand Geographer*, 71–3, 189–202.
- Purdie, H., & Kerr, T. (2018). Aoraki Mont Cook : Environmental change on an iconic mountaineering route. *Mountain Research and Development*, 38(4), 364–379. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00042.1>.
- 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". *The Holocene*, 21, 357–365.
- 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. *Geografiska Annaler A*, 95, 51–66.
- Ravanel, L., Magnin, F., & Deline, P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heat waves on permafrost-affected rockwalls in the Mont Blanc massif. *The Science of the Total Environment*, 609, 132–143.
- Ritter, F., Fiebig, M., & Muhar, A. (2011). 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., et al. (2011). Winter tourism and climate change in the Alps: An assessment of resource consumption, snow reliability, and futur snowmaking potential. *Mountain Research and Development*, 31(3), 229–236.
- Rutty, M., Scott, D., Johnson, P., Jover, E., Pons, M., & Steiger, R. (2015). Behavioural adaptation of skiers to climatic variability and change in Ontario, Canada. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 11, 13–21.
- Saarienen, J., & Tervo, K. (2006). Perceptions and adaptation strategies of the tourism industry to climate change: The case of Finnish nature-based tourism entrepreneurs. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 1(3), 214–228.
- Scott, D. (2011). Why sustainable tourism must address climate change. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(1), 17–34.
- Scott, D., & McBoyle, G. (2007). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(8), 1411–1431.
- 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 A*, 97–4, 793–807.
- Vincent, C., Fischer, A., Mayer, C., Bauder, A., Galos, S. P., Funk, M., et al. (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, 1376–1383.
- Wozniak, S. (2011). Thèse de doctorat. *Contribution à la caractérisation de l'anglais de l'alpinisme, par l'étude du domaine spécialisé des guides de haute montagne états-unien* (Vol 2). Bordeaux.

6.3. Article 5 – Fiche synoptique

Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique

Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du mont Blanc ?

Alpine guides facing climate change effects

Which perceptions and adaptation strategies around the Mont Blanc?

Salim E.¹, Mourey J.¹, Ravanel L.¹. 2019, *Revue de géographie alpine/Journal of Alpine Research*.

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

Objectifs de l'article

- Identifier les stratégies d'adaptation mises en place par les guides de haute montagne dans la vallée de Chamonix et dans la vallée d'Aoste et évaluer leurs difficultés à s'adapter.
- Mener une étude comparative entre deux populations de guides, de part et d'autre d'un massif-frontière.

Problématique

- Comment les guides de haute montagne sont-ils affectés et s'adaptent-ils aux impacts du changement climatique ? Les guides valdotains et chamoniards ont-ils la même perception des impacts du changement climatique et s'adaptent-ils de la même manière ?

Méthodologie

- Enquêtes par questionnaires auprès des guides du SNGM et de la vallée d'Aoste.
- Entretiens semi-directifs avec des guides chamoniards et valdotains.

Principaux résultats

- En réaction aux impacts du changement climatique, les guides adaptent leurs manières de travailler en été par la diversification de leurs activités, une mobilité et une réactivité accrue – vis-à-vis des conditions et de la clientèle.
- Pour un même espace de pratique (le massif du Mont Blanc), les guides de la vallée de Chamonix et de la vallée d'Aoste ont une perception et des stratégies d'adaptation différentes aux impacts du changement climatique.
 - Les guides valdotains considèrent que seul le mois d'août présente des conditions plus mauvaises pour la pratique alors que les chamoniards considèrent que l'ensemble de la saison

propice à l'alpinisme estival se décale vers le printemps et l'automne.

- Dans la vallée de Chamonix, la diversification des activités vers le multisport-outdoor est plus rependue que dans la vallée d'Aoste où les guides maintiennent la majorité de leur activité sur l'alpinisme, en modifiant les itinéraires fréquentés, au grès de l'évolution des conditions.

- Les guides de la vallée d'Aoste considèrent l'adaptation comme plus facile que les guides chamoniards. Cette divergence est notamment contrôlée par la relation guide-client et des types de clientèle différents. La clientèle des guides valdotains est perçue comme plus flexible et habituée à la pratique de l'alpinisme contrairement aux guides chamoniards dont la clientèle « d'un jour » est plus tournée vers le multisport-outdoor.

Rôle des auteurs

- E. Salim : conduite de l'enquête auprès des guides valdotains, rédaction de l'article.

- J. Mourey : construction du questionnaire utilisé pour les guides valdotains comme lors de l'enquête auprès des guides du SNGM, aide à la rédaction de l'article.

- L. Ravanel (co-encadrant de thèse) : Directeur du Master d'E. Salim, aide à la prise de contacts avec les acteurs de la vallée de Chamonix et du Val d'Aoste, contribution à la rédaction de l'article.

Abstract

The evolution of the high Alpine mountain environment, especially the cryosphere that faces climate change, deeply modifies the human activities that take place there. The mountaineering routes are directly impacted and they sometimes become inaccessible. In order to recover a good balance, adaptation is necessary. Mountain guides are among the most dependent professionals on the field on which they practice. As a result, they are probably some of the most impacted professionals but, at the same time, they are also those who can create a lot of adaptation strategies. The aim of this paper is therefore to identify how mountain guides from Chamonix and Courmayeur are impacted and the different adaptation strategies they developed to face climate change. By this cross-border study, using quantitative and qualitative methods, this paper is also showing that the adaptation strategies are controlled by the territory dynamics.

Key words: Alpin guide, high mountain, adaptation, climate change, perception.



Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine
Varia 2019

Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du Mont Blanc ?

Emmanuel Salim, Jacques Mourey, Ludovic Ravel, Pietro Picco et Christophe Gauchon



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/rga/5842>

ISSN : 1760-7426

Éditeur

Association pour la diffusion de la recherche alpine

Référence électronique

Emmanuel Salim, Jacques Mourey, Ludovic Ravel, Pietro Picco et Christophe Gauchon, « Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du Mont Blanc ? », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], Varia 2019, mis en ligne le 26 août 2019, consulté le 28 août 2019. URL : <http://journals.openedition.org/rga/5842>

Ce document a été généré automatiquement le 28 août 2019.



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.

Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du Mont Blanc ?

Emmanuel Salim, Jacques Mourey, Ludovic Ravanel, Pietro Picco et Christophe Gauchon

Remerciements

Les auteurs remercient A. Barberis pour son concours à l'occasion de la traduction en italien du formulaire d'enquête. Ils remercient également E. Motta et J.-P. Fosson (Fondation Montagne sûre) pour leur relecture attentive du manuscrit.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet EU ALCOTRA AdaPT Mont Blanc (Adaptation de la planification territoriale aux changements climatiques dans l'espace Mont Blanc) financé par le programme Interreg V-A Italie-France 2014-2020.

Introduction

- 1 Les conséquences du changement climatique en cours sont de mieux en mieux connues (F.Stocker *et al.*, 2013). La manière dont il modifie les caractéristiques glaciologiques et géomorphologiques de la haute montagne fait l'objet de nombreuses recherches (Beniston *et al.*, 2018 ; Einhorn *et al.*, 2015 ; Haeberli *et al.*, 2010). Si son impact sur la pratique du ski alpin est bien documenté (Joly et Ungureanu, 2018 ; Paccard, 2009) ses conséquences sur les pratiques estivales ont jusqu'alors fait l'objet d'une investigation plus limitée. D'après les premières études réalisées, la haute montagne alpine semble globalement plus dangereuse pour la pratique de l'alpinisme (Pröbstl-Haider *et al.*, 2016 ; Temme, 2015 ; Ritter *et al.*, 2012)

- 2 La question de l'adaptation aux conséquences du réchauffement est aujourd'hui un point capital dans les discussions politiques (Garcia, 2015) et constitue l'une des deux stratégies de réponse au changement climatique prônées GIEC (Simonet, 2015).
- 3 Au pied du mont Blanc, point culminant des Alpes (4809 m), la présence historique et massive des guides à Chamonix et à Courmayeur offre la possibilité de questionner une profession évoluant au cœur de la haute montagne. L'objectif de cet article est d'interroger la relation entre la profession de guide de haute montagne, ses espaces de pratique (Mao, 2003) et le changement climatique afin de révéler les stratégies d'adaptation que ces professionnels développent.
- 4 La haute montagne est l'un des espaces les plus impactés par le réchauffement des températures (Haeberli *et al.*, 2010). Dans les Alpes françaises l'augmentation de la température moyenne annuelle est de +1,8°C à +2,1°C depuis 1950 (Einhorn *et al.*, 2015) tandis qu'elle n'est que de 0,85°C au niveau mondial entre 1880 et 2012 (Stocker *et al.*, 2013).
- 5 Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (~1855), l'ensemble des glaciers alpins est en régression (Zemp *et al.*, 2015) ; leur superficie a ainsi été divisée par 2 entre 1900 et 2012 (Huss, 2012), et la tendance devrait mener à leur quasi disparition d'ici 2100 (Zekollari *et al.*, 2019)
- 6 En haute montagne, le permafrost, c'est-à-dire les terrains gelés en permanence pendant au moins deux années consécutives, se réchauffe rapidement. Les modèles thermiques pour plusieurs sommets du massif du Mont Blanc dont l'aiguille du Midi (3842 m) montrent une dégradation notable entre 1850 et 2015 (Magnin *et al.*, 2017).
- 7 Ce réchauffement du permafrost entraîne une augmentation de la fréquence des instabilités de versant et en particulier des écroulements rocheux ($V > 100 \text{ m}^3$), avec des pics observés lors des étés caniculaires dans les versants nord et sud du Massif du Mont Blanc (Chiarle *et al.*, 2017 ; Ravelle *et al.*, 2017).

Des évolutions du milieu aux mutations du métier de guide de haute montagne, une question d'adaptation

- 8 La construction de la profession de guide de haute montagne est le fruit de nombreuses adaptations successives (Bourdeau, 1991) qui mènent aujourd'hui à la question de l'adaptation aux changements environnementaux d'origine climatique. Cette dernière peut se définir comme l'ajustement d'un individu ou d'un groupe en réponse aux stimulus climatiques et à leurs effets (Swart et Raes, 2007). L'adaptation est alors une réponse à un problème (Godard, 2010) dont l'objectif est de réduire la vulnérabilité de l'individu soumis à des bouleversements profonds et rapides (Simonet, 2015). Dans le champ du tourisme, la question de l'adaptation au changement climatique s'est rapidement développée depuis les années 2000 (Kaján et Saarinen, 2013). Pour les auteurs, la capacité d'adaptation d'un individu consiste à son efficience à mettre en œuvre des mécanismes et stratégies lui permettant de survivre face à une menace (Adger, 2000 ; Pielke, 1998). Bien que d'une manière générale dans le secteur du tourisme et des loisirs, la capacité d'adaptation soit considérée comme forte (Scott *et al.*, 2009), elle reste spécifique à un contexte et varie d'un groupe ou d'un individu à un autre (Smit et Wandel, 2006).

- 9 Cette question de l'adaptation au changement climatique appliquée aux guides de haute montagne est peu présente dans la littérature. Le rapport de Bourdeau (2014) explore l'évolution des guides de haute montagne du massif des Écrins et montre la mise en place d'une « intelligence climatique » visant à maintenir l'activité professionnelle. Hors des Alpes, des études portent sur l'impact du retrait glaciaire sur les guides de Norvège soumis à une difficulté d'accès aux glaciers accrue (Furunes et Mykletun, 2012). En Nouvelle-Zélande, les guides proposant des randonnées glaciaires font face à une augmentation de la difficulté d'accès aux glaciers ainsi qu'à une augmentation de la dangerosité liée aux chutes de pierres (Purdie, 2013 ; Purdie *et al.*, 2015). Il en résulte notamment que les guides ont réduit de moitié la période pendant laquelle ils font l'ascension du Mont Cook (3724 m) (Purdie et Kerr, 2018). La question de l'accès aux glaciers est également posée autour du camp de base de l'Everest (Watson and King, 2018) et représente aussi un enjeu particulier pour l'accès aux refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc (Mourey and Ravel, 2017).
- 10 Par leur pratique de la montagne, les guides de haute montagne ont « inventé les itinéraires » (de Bellefon, 1999), ceux-là mêmes qui constituent le support principal de leur activité et qui sont aujourd'hui impactés par le changement climatique (Bourdeau, 2014 ; Purdie and Kerr, 2018). L'ensemble de ces itinéraires constituent l'espace de pratique (Mao, 2003) des guides de haute montagne.
- 11 L'évolution géomorphologique de la haute montagne liée au changement climatique implique de profondes modifications des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation. Dans le massif du Mont Blanc, 25 processus et phénomènes liés au changement climatique affectent les itinéraires qui ont tendance à devenir plus difficile techniquement et plus dangereux pendant la période estivale (Mourey *et al.*, 2019). Dans ce cadre, l'objectif de cet article est : i) D'identifier l'impact des évolutions des itinéraires et des conditions de pratique de d'alpinisme sur la pratique du métier de guide. ii) Dans un second temps il s'agit d'identifier les stratégies d'adaptations qu'ils mettent en place pour limiter la vulnérabilité de leur activité. iii) Enfin, l'objectif est aussi de déterminer, à travers une analyse transfrontalière, les facteurs extérieurs qui influencent les stratégies d'adaptation.

Méthodologie

- 12 Afin de bien cerner l'impact du contexte territorial sur les évolutions du métier de guide, il convient de définir ce que l'on nommera : i) l'espace de pratique (Mao, 2003) dans lequel se déroule l'essentiel de l'activité d'encadrement, soit la haute montagne constituée d'itinéraires d'alpinisme, et ii) le lieu d'ancrage professionnel, communal ou intercommunal où sont implantées les principaux bureaux des guides et guides.
- 13 Le massif du Mont Blanc représente alors un espace de pratique particulièrement adapté à notre recherche. Avec ses 165 km² de surface englacée et ses 24 sommets prestigieux de plus de 4000 m (mont Blanc ; aiguille Verte, 4122 m ; Grandes Jorasses, 4208 m ; etc.), il est un massif emblématique de la pratique de l'alpinisme et le principal berceau de l'activité (Debarbieux, 2012). Il possède deux principales « portes » qui représentent les deux territoires émetteurs : Chamonix pour l'accès au versant nord-ouest français, facilité par des aménagements comme le téléphérique de l'aiguille du Midi (3777 m), et Courmayeur pour le versant sud-est italien avec le Skyway, téléphérique permettant l'accès à la Pointe

- Helbronner (3462 m). De plus, ces deux territoires émetteurs sont le lieu de naissance du métier de guides avec la création des deux premières compagnies de guides : à Chamonix en 1821 et à Courmayeur en 1850.
- 14 La méthode déployée des deux côtés du mont Blanc consiste en une enquête quantitative par questionnaire appuyée par une série d'entretiens semi-directifs.
- 15 L'enquête quantitative se compose de 50 questions (Annexe 1) et se structure comme suit :
- les habitudes de travail générales des guides (7 questions) ;
 - un focus sur leurs habitudes de travail en été (5 questions) ;
 - les difficultés induites par le changement climatique, la manière dont les guides s'y adaptent et les perçoivent (22 questions) ;
 - leur profil socio-professionnel (6 questions).
- 16 La grille d'entretien se développe ainsi :
- le parcours professionnel du guide ;
 - la manière dont il pratique le métier ;
 - le changement climatique, subdivisé en deux sous-thèmes :
 - la manière dont le changement climatique contraint la pratique du métier de guide ;
 - la manière dont les guides s'adaptent à ces contraintes ;
 - la manière dont contraintes et adaptations sont perçues.
- 17 Côté français, l'enquête quantitative a tout d'abord été envoyée par courriel aux 1332 guides actifs adhérents au Syndicat National des Guides de haute Montagne (SNGM) en novembre 2017. Elle a reçu un taux de réponse de 17 % (230 réponses) après un mois et deux relances. L'enquête portant sur la population nationale des guides, le profil socio-professionnel a permis d'isoler ceux travaillant dans la vallée de Chamonix : il a été choisi pour cette étude de ne conserver que les réponses des guides résidant dans la communauté de communes de la vallée de Chamonix-Mont-Blanc (Chamonix, Servoz et Vallorcine), excluant ainsi les guides résidant à Saint-Gervais-les-Bains, autre « porte d'entrée » du massif du Mont Blanc qui, par son histoire et l'importance de sa compagnie des guides (plus de 80 professionnels), constitue géographiquement un autre lieu d'ancrage professionnel. Les entretiens semi-directifs, d'une durée moyenne de 1 h, ont quant à eux été réalisés à Chamonix auprès de 11 guides choisis de manière à présenter une large palette d'âges et d'expériences, ainsi que de statuts de travail (indépendants, salariés, inscrits dans une compagnie ou non) entre mars et avril 2017.
- 18 À Courmayeur, le formulaire d'enquête a été traduit en italien et envoyé à l'ensemble des guides du Val d'Aoste d'avril à mai 2018. Il a fait l'objet de deux relances. La compagnie d'appartenance a permis de créer une strate incluant uniquement les guides de Courmayeur. À noter que contrairement à la France où les guides ne sont pas nécessairement rattachés à une compagnie, en Vallée d'Aoste, sur les 50 guides travaillant sur le territoire de Courmayeur, 47 (94 %) sont adhérents à la Société des Guides (donnée Société des Guides de Courmayeur). 14 d'entre eux ont répondu, soit 30 %. Les 8 entretiens semi-directifs ont également été réalisés en avril 2018, sur les mêmes critères de sélection et structurés de la même manière que ceux réalisés côté chamoniard. D'une durée moyenne de 1 h, ils se sont déroulés en français. Deux membres de la *Fondation Montagne sûre* (dont un aspirant-guide), bilingues italien/français, ont assisté à l'ensemble des entretiens afin d'éviter d'éventuels biais liés à la langue.

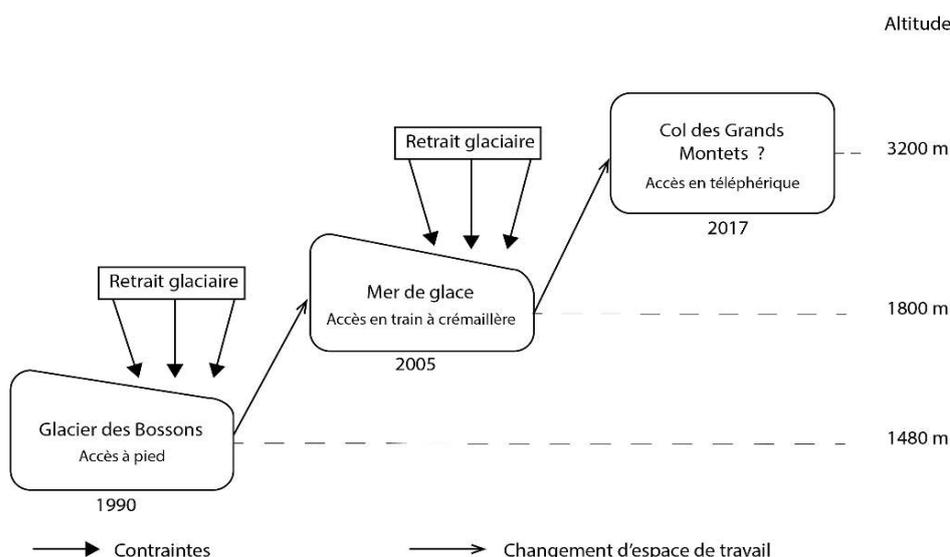
- 19 Les données quantitatives ont été analysées à l'aide du logiciel Sphinx IQ². Quant aux entretiens, ils ont été intégralement retranscrits et analysés qualitativement à l'aide du logiciel MaxQDA.

Les guides de haute montagne face au changement climatique : impacts et adaptations

Des impacts notables sur la pratique de l'alpinisme

- 20 L'ensemble des guides ayant participé aux entretiens ou ayant répondu aux enquêtes quantitatives, à Chamonix ou à Courmayeur, déclarent observer une évolution de la haute montagne en lien avec le changement climatique.
- 21 Le retrait glaciaire est perçu comme l'élément le plus flagrant parmi ces évolutions. Il occasionne notamment une disparition des sites de pratique des « écoles de glace », c'est-à-dire des espaces support de l'activité consistant à apprendre les techniques d'évolution sur glacier. C'est tout particulièrement le cas coté Chamonix avec le glacier des Bossons. La dangerosité croissante du glacier liée à son retrait a poussé les guides à déplacer les écoles de glace vers la Mer de Glace à partir du début des années 1990. Cependant, le retrait du front glaciaire, largement évoqué lors des entretiens, questionne aujourd'hui la profession quant à un nouveau déplacement de l'activité en direction du col des Grands Montets situé près de 1500 m plus haut en altitude (3233 m) et plus rapidement accessible grâce à un téléphérique (figure 1). Côté Courmayeur, la situation est proche en ce qui concerne le retrait du glacier de Pré-de-Bard. Cependant, selon G. Signò, ancien directeur de la Société des Guides de Courmayeur, les guides courmayeurins travaillent peu avec les « écoles de glace ».

Figure 1 : Déplacement de l'espace de pratique des « écoles de glace » dans la vallée de Chamonix



Réalisation E. Salim, J. Mourey, L. Ravel et C. Gauchon, 2019.

- 22 Le retrait glaciaire provoque également une difficulté d'accès à certaines voies. Les itinéraires rocheux comme la voie Rébuffat à l'Aiguille du Midi ou au Grand Capucin (3838 m) sont largement cités par les guides des deux versants. Le retrait glaciaire y a provoqué l'apparition d'une longueur supplémentaire de 25 m depuis la fin des années 1980, modifiant l'itinéraire historique (Mourey *et al.*, 2019).
- 23 L'« assèchement » estival de la montagne, c'est-à-dire la disparition des couvertures glacio-nivales, est le deuxième phénomène le plus fréquemment évoqué lors des entretiens. Il se traduit par un nombre grandissant d'itinéraires impraticables en été : couloirs Whymper et Couturier à l'Aiguille Verte, voie normale de la Tour Ronde (3792 m), etc. Ces itinéraires classiques sont désormais infréquentables en période estivale selon de nombreux guides interrogés à Courmayeur comme à Chamonix.
- 24 La question de la dangerosité est également largement évoquée. Corrélée aux périodes caniculaires en été, l'augmentation de la fréquence des déstabilisations rocheuses restreint l'accès à certains secteurs. Pour E. Ratouis ou F. Chapon (guides de la vallée de Chamonix), le secteur des aiguilles de Chamonix est soumis à des éboulements de plus en plus fréquents. Pour O. Taiola (guide et responsable du secours en montagne valdôtain de 1985 à 2015), on observe une augmentation des accidents liés aux chutes de pierres lors des périodes caniculaires.
- 25 Le changement climatique impacte également la saison hivernale des guides, principalement en réduisant la durée d'enneigement. Les guides interrogés, de Courmayeur comme de Chamonix, pratiquant tous la descente à ski de la célèbre Vallée Blanche en hiver, évoquent les difficultés liées au déneigement souvent précoce de la partie basse de la descente.

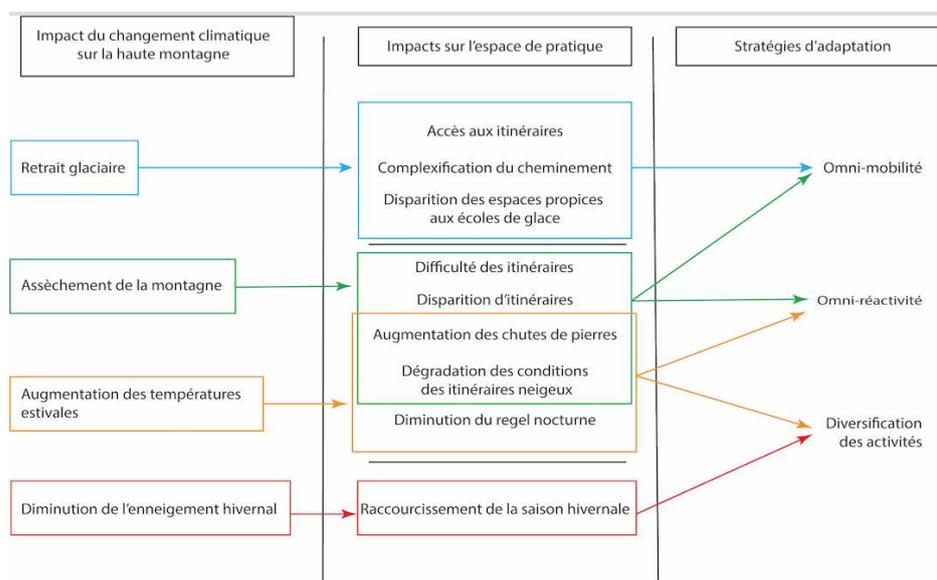
Le développement de stratégies d'adaptation

- 26 Lors des entretiens, l'ensemble des guides français et italiens disent modifier leur manière de travailler afin de s'adapter aux effets du changement climatique selon trois modalités principales (figure 2).
- 27 À Chamonix comme à Courmayeur, la première stratégie évoquée consiste à modifier le type d'itinéraire fréquenté lorsque les conditions sont mauvaises. 6 des 8 guides interrogés à Courmayeur citent en exemple la voie normale de la Tour Ronde. Puisque les conditions y sont très souvent mauvaises en été, les guides se reportent sur l'arête sud-est, itinéraire en rocher, moins soumis à des conditions devenues très aléatoires. À Chamonix, de mauvaises conditions sur des itinéraires glaciaires très fréquentés comme la Petite Aiguille Verte (3512 m) poussent les guides à choisir un objectif rocheux, souvent dans les Aiguilles de Chamonix ou dans le massif des Aiguilles Rouges, plus bas en altitude. De plus, de nombreux guides chamoniards et courmayeurins disent emmener régulièrement leurs clients dans des massifs plus éloignés comme ceux du Grand Paradis, du Valais ou encore des Écrins, ce qui leur permet de multiplier les possibilités de bonnes conditions. L'ensemble de ces pratiques fait ressortir une forme d'*omni-mobilité*, stratégie permettant de se soustraire en partie aux contraintes locales liées au changement climatique.
- 28 À Chamonix, de nombreux guides comme Y. Delevaux (Directeur de la Compagnie des Guides de Chamonix en 2017) parlent de la nécessité d'être plus flexible vis-à-vis de la clientèle. Pour M. Bordet (président des Guides indépendants de Chamonix), à cette

flexibilité s'adjoint une *déssegmentation* des temporalités de pratique. Il devient ainsi de plus en plus classique de pratiquer un alpinisme « estival » en décembre. L'enjeu étant pour Y. Delevaux de convaincre la clientèle. Cette adaptation traduit une nécessité d'*omni-réactivité* vis-à-vis des conditions et de la clientèle.

- 29 Une forme de diversification des activités semble également se dessiner. Afin de s'affranchir des effets du changement climatique, des guides français comme F. Bernard ou E. Ratouis disent encadrer de plus en plus d'activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne comme les écoles d'escalade, le VTT, le trail ou encore la *via ferrata*. Enfin, de nombreux guides français comme M. Bordet, F. Bernard, F. Chapon ou italiens comme A. ou O. Clavel parlent d'un report de la pratique du métier sur l'hiver et notamment sur la pratique du ski hors-piste, qui en plus de répondre aux demandes de la clientèle, leur permet de pallier les conditions qu'ils jugent « hasardeuses » l'été.

Figure 2 : Schéma récapitulatif des différents impacts liés au changement climatique et des stratégies d'adaptation mises en œuvre



Réalisation E. Salim, J. Mourey, L. Ravel et C. Gauchon, 2019.

Impacts, adaptations et perceptions influencés par le lieu d'ancrage professionnel

Un même espace de pratique

- 30 Si les guides de Chamonix et ceux de Courmayeur exercent leur métier depuis deux territoires émetteurs différents, ils exercent leur activité sur le même espace de pratique, le massif du Mont Blanc, et les itinéraires qu'ils fréquentent sont pour beaucoup les mêmes : Tour Ronde (voie normale ou face nord), le mont Blanc (par le Gôûter ou les « Trois Monts ») et le mont Blanc du Tacul (4248 m). Les grandes courses mixtes comme les Grandes Jorasses, l'arête de Rochefort ou encore le mont Blanc par l'arête de l'Innominata ou la Brenva, sont également évoquées par les guides des deux versants.

Néanmoins, quelques grands itinéraires chamoniards comme les couloirs Whymper et Couturier à l'aiguille Verte ou les goulottes du bassin glaciaire d'Argentière ne sont pas mentionnés par les guides de Courmayeur.

- 31 Pour les courses rocheuses, les guides de Courmayeur ne mentionnent pas les itinéraires des aiguilles de Chamonix, tandis que la Dent du Géant (4013 m) est peu prise en exemple lors des entretiens à Chamonix. Cependant, d'autres hauts lieux de l'escalade comme le Grand Capucin sont cités par les deux groupes de guides.
- 32 Pour la période hivernale, peu d'itinéraires spécifiques sont cités, hormis la descente de la Vallée Blanche qui représente l'itinéraire de ski hors-piste principal pour les guides des deux secteurs. Les guides chamoniards y accèdent *via* le téléphérique de l'Aiguille du Midi et les guides courmayeurins prennent pied sur le glacier par le Skyway, des navettes Chamonix-Courmayeur étant prévues pour le retour. Concernant le ski de randonnée, les quelques itinéraires majeurs évoqués sont les mêmes d'un versant à l'autre : Haute Route entre Chamonix et Zermatt, Mont Blanc à ski par le refuge des Grands Mulets, etc.

Une perception différente des impacts du changement climatique

- 33 Si les guides des deux versants sont unanimes quant à l'observation d'une évolution de la haute montagne face au changement climatique, leur perception du décalage saisonnier des périodes de bonnes conditions pour la pratique diverge. À Chamonix, la saison est perçue comme se déplaçant vers le printemps et l'automne, s'allongeant d'environ 4 semaines, ce qui confirme les résultats de Bourdeau (2014) pour le massif des Ecrins. À Courmayeur, seul le mois d'août est perçu comme très mauvais en termes de conditions, mais les guides interviewés ne perçoivent pas d'allongement de la saison de pratique.
- 34 D'après les entretiens réalisés, cette différence de perception des impacts est principalement liée à la relation guides-clients. Lors des entretiens, les guides courmayeurins insistent sur la relation très étroite qu'ils ont avec leurs clients, majoritairement réguliers. À Chamonix, s'ils entretiennent également une relation étroite avec certains clients, les guides sont plus nombreux à dire travailler régulièrement avec une clientèle « d'un jour ». Cette distinction se retrouve également dans le niveau de difficultés des voies réalisé par les deux populations de guides. En effet, du côté chamoniard, les guides réalisent principalement des voies d'un niveau facile ou Peu Difficile (56 %) tandis qu'à Courmayeur seuls 28 % des courses sont de ce niveau. À l'inverse, 36 % des courses réalisées à Courmayeur sont d'un niveau difficile (D) ou très difficile (TD) contre seulement 17 % à Chamonix, ce qui appuie l'idée d'une clientèle plus « habituée » à Courmayeur. Les guides courmayeurins évoquent leur relation plus étroite avec leurs clients en affirmant qu'il leur est facile de changer l'itinéraire prévu au dernier moment en fonction des conditions. Dans le même temps, les guides chamoniards expliquent qu'il est difficile de convaincre les clients d'un jour de changer d'itinéraires si les conditions sont mauvaises. Cela peut expliquer que les guides de Courmayeur ne perçoivent pas d'allongement de saison puisqu'ils peuvent remplir leur été en adaptant facilement leur itinéraire aux conditions.

Différentes stratégies d'adaptation pour une même contrainte

- 35 La comparaison des stratégies d'adaptation développées sur les deux territoires laisse apparaître des différences. À Courmayeur, la stratégie d'*omni-réactivité* est peu évoquée

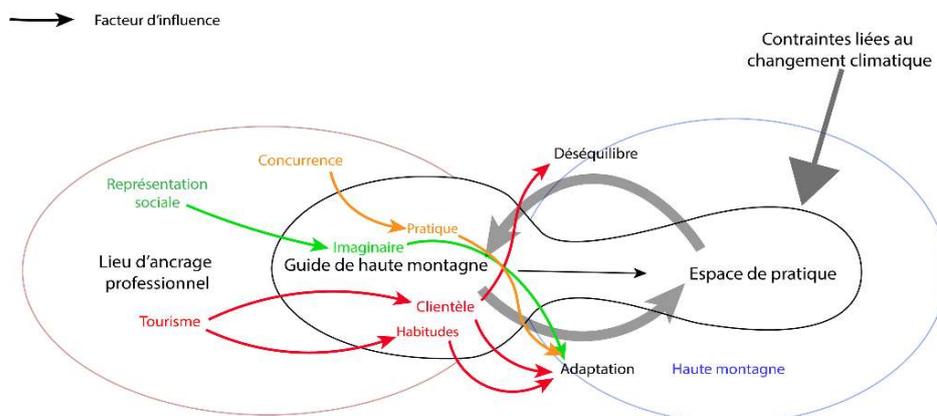
dans les entretiens. La concurrence entre les guides au sein des deux territoires pourrait constituer une explication avec, en saison estivale, plus de 400 guides à Chamonix contre 50 à Courmayeur. De plus, 13 structures vendent l'activité alpinisme à Chamonix contre la seule Société des Guides à Courmayeur. D'après G. Signò, cette configuration peut amener les guides chamoniards à se sentir obligés d'accepter une course dont l'itinéraire est en mauvaise condition de peur que leur potentiel client trouve un guide dans une autre structure. À l'inverse, cette considération n'est pas prise en compte par les guides courmayeurins qui n'hésitent pas à changer d'itinéraire sachant qu'aucune autre structure ne pourra répondre favorablement au client.

- 36 Cela se ressent également dans la manière dont les guides se représentent leur clientèle puisque seuls 14 % des guides courmayeurins estiment que leur clientèle n'est pas disposée à modifier ses objectifs en fonction des contraintes du changement climatique, contre 33 % à Chamonix.
- 37 Autre divergence dans les stratégies d'adaptation, la multi-activité est moins présente à Courmayeur qu'à Chamonix. Cette différence semble une fois de plus liée au type de clientèle. Davantage tournée vers le multisport-*outdoor* à Chamonix (l'activité alpinisme ne représente jamais plus de 20 % du chiffre d'affaire des structures), la clientèle est considérée comme plus « traditionnelle » à Courmayeur. G. Signò y affirme que « l'alpinisme représente l'activité principale pour la Société des guides en été ».
- 38 Les guides de Chamonix, comme E. Ratouis, F. Bernard ou J.-P. Lacoste (Directeur de l'UCPA Chamonix), se tournent vers des activités comme le VTT, le *trail* ou la *via ferrata* afin de se soustraire aux dangers trop présents en haute montagne liés, notamment, à la dégradation du permafrost. Cependant, l'évolution de l'identité sportive de Chamonix, notamment par le biais d'événements comme l'Ultra-Trail-du-Mont-Blanc (Bessy, 2016) peut être un facteur explicatif de l'évolution de la clientèle. De plus, cette tendance à la diversification des activités touristiques sportives en montagne est visible dans d'autres territoires (Savelli, 2012 ; Perrin-Malterre, 2016). Dans ce cas, ce phénomène de glissement de l'activité alpinisme vers du multisport-*outdoor* perçut comme une stratégie d'adaptation au changement climatique par les guides chamoniards serait également un ajustement de leur pratique face aux évolutions du tourisme, qui serait vécu comme une opportunité de s'affranchir des contraintes dues au changement climatique.
- 39 Ces différences entre territoires peuvent donc être expliquées par les flux touristiques singuliers à chacun d'eux. La vallée de Chamonix (Servoz, Les Houches, Vallorcine et Chamonix) compte pour sa part 4 700 000 nuitées annuelles réparties à 55 % en hiver et constituées par des touristes majoritairement étrangers (57 %) (Données OT Chamonix, 2017). À Courmayeur, le nombre total de nuitées annuelles s'élève à 1 001 343 réparties à 53 % en hiver et constituées par des touristes majoritairement Italiens (58 %) (donnée TourismOK, 2018). Selon N.Durochat (Directeur de l'OT Chamonix), les touristes à Chamonix sont attirés par l'image « montagne », mais ne la pratiquent pas. La communication de l'office du tourisme porte alors sur l'ensemble des sports de montagne qui sont pratiqués par les touristes dans un but de divertissement. À l'inverse, la clientèle touristique de Courmayeur est plutôt animée par des motivations de « nature », de bien-être et de repos (données TourismOK, 2016).

Une adaptation perçue comme plus aisée à Courmayeur qu'à Chamonix

- 40 Concernant la perception de l'adaptation, les enquêtes quantitatives montrent que, sur une échelle de 1 (adaptation très facile) à 10 (adaptation très difficile), la moyenne des réponses pour Courmayeur est de 3,46 avec un maximum de 5/10 contre une moyenne de 5,38 avec un maximum de 9/10 à Chamonix. Ce résultat est confirmé par les entretiens où les Chamoniards se montrent nettement plus inquiets que les Courmayeurins.
- 41 Cette différence peut une nouvelle fois s'expliquer par une clientèle moins flexible à Chamonix qu'à Courmayeur, la relation statistique entre la difficulté d'adaptation perçue et la question « Est-ce que votre clientèle est prête à adapter sa pratique de la haute montagne à l'évolution des milieux ? » pour les guides chamoniards est « non significative » ($p = 0,18$; $\text{Khi}^2 = 11,34$). Cependant, en élargissant l'échantillon à l'ensemble des guides français, la relation devient « très significative » ($p = <0,01$; $\text{Khi}^2 = 28,73$). La *plasticité* de la clientèle semble donc être un élément important dans la perception de la difficulté à s'adapter.
- 42 L'imaginaire des guides semble également différent entre les deux versants : à la question « est-ce que la transformation des paysages est en décalage avec votre imaginaire de la haute montagne ? », 54 % des guides chamoniards répondent « oui » contre seulement 7 % à Courmayeur. Cette différence est difficile à analyser puisque la question de l'imaginaire n'a pas été approfondie lors des entretiens. On peut cependant émettre l'hypothèse qu'elle serait liée au fait que les guides courmayeurins indiquent travailler davantage que les guides chamoniards sur des itinéraires classiques à des altitudes supérieures à 4 000 m où les impacts du changement climatique sont moins rapides (Einhorn *et al.*, 2015). De fait, le tri croisé entre la difficulté d'adaptation et le décalage de l'imaginaire chez les guides français montre une relation « très significative » ($p = 0,003$; $\text{Khi}^2 = 24,71$).
- 43 Quelques limites peuvent être mentionnées au regard de ces résultats : le nombre de guides interviewés tout d'abord, s'il est satisfaisant à Courmayeur (8/50), est questionnable à Chamonix (11/400). Cependant, une saturation de l'échantillon s'observe rapidement : les informations nouvelles sont peu nombreuses dès le 4^{ème} entretien. Ensuite, le nombre de réponses à l'enquête quantitative, s'il permet une analyse statistique (Ganassali, 2014), reste faible pour que celle-ci soit pleinement satisfaisante. Cependant, l'approche méthodologique visant à croiser données quantitatives et qualitatives permet de recouper les résultats : ils montrent ici comment les dynamiques, notamment touristiques, du lieu d'ancrage professionnel influent sur les stratégies d'adaptation et la perception qu'en ont les professionnels (figure 3). La recherche dans ce domaine étant récente, il semblerait intéressant de poursuivre les investigations, notamment du côté de l'évolution de la clientèle ou encore du point de vue du rapport à la culture professionnelle (Corneloup et Bourdeau, 2002) et à la place du métier de guide parmi les professionnels des sports de pleine nature.

Figure 3 : Synthèse des facteurs influençant l'adaptation aux effets du changement climatique chez les guides de haute montagne



Réalisation E. Salim, J. Mourey, L. Ravel et C. Gauchon, 2019.

Conclusions

- 44 Les évolutions de la haute montagne alpine provoquées par le changement climatique – dégradation généralisée de la cryosphère et processus associés – agissent comme une injonction adaptative pour les guides de haute montagne. Les réponses à ces évolutions sont variées : apparition d'une forme d'*omni-réactivité* et d'*omni-mobilité*, report d'une partie de l'activité sur la période hivernale ou encore diversification des activités encadrées sont autant de stratégies d'adaptation qui permettent d'augmenter la résilience des guides de haute montagne.
- 45 Cependant, bien que les guides de Courmayeur et de Chamonix aient majoritairement le même espace de pratique effective, leur perception des contraintes et les stratégies d'adaptation qu'ils développent face au changement climatique sont différentes. Les guides courmayeurins ont peu développé l'*omni-réactivité*, tandis que les guides chamoniards semblent se tourner de plus en plus vers une diversification de leur activité.
- 46 L'adaptation au changement climatique est également perçue différemment d'un groupe de guides à l'autre. À Courmayeur, les guides considèrent l'adaptation comme plus facile que les guides chamoniards. Ces divergences de perception sont contrôlées d'une part par la relation guide-client et une clientèle perçue comme plus flexible à Courmayeur et, d'autre part, par l'imaginaire qu'a le guide de la haute montagne : un décalage entre réalité et imaginaire plus important à Chamonix contribuant à une adaptation perçue comme plus difficile.

BIBLIOGRAPHIE

- Adger W. N., 2000.- "Social and ecological resilience : are they related ?" *Progress in Human Geography* 24(3) pp. 347-364
- de Bellefon R., 1999.- "L'invention du terrain de jeu de l'alpinisme : d'une montagne l'autre" *Ethnologie française* 29(1) pp. 66-78
- Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L. M., Coppola E., Eckert N., Fantini A., Giacona F., Hauck C., Huss M., Huwald H., Lehning M., López-Moreno J-I., Magnusson J., Marty C., Morán-Tejeda E., Morin S., Naaïm M., Provenzale A., Rabatel A., *et al.*, 2018.- "The European mountain cryosphere : a review of its current state, trends, and future challenges" *Cryosphere* 12(2) pp. 759-794
- Bessy O., 2016.- "Innovations événementielles et structuration des destinations touristiques. Pour une hybridation des approches : l'exemple de l'Ultra-Trail du Mont-Blanc" *Mondes du Tourisme* (Hors-série), <http://journals.openedition.org/tourisme/1277>
- Bourdeau P., 1991.- « Territoire et identité : recherches sur la territorialité d'un groupe professionnel : les guides de haute montagne en France », Université Joseph Fourier, Grenoble, <http://www.theses.fr/1991GRE19003>
- Bourdeau P., 2014.- « Effet 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 », PACTE.
- Chiarle M., Cat Berro D., Mercalli L., Mortara G., Nigrelli G., 2017.- "Slope instabilities occurred at high elevation in the Italian Alps in 2016 : regional landscape fragility and meteorological framework", Vienna, p 8498, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2017EGUGA..19.8498C>
- Corneloup J., Bourdeau P., 2002.- « Culture professionnelle et métiers du tourisme sportif de montagne ». *Téoros* 20(3) pp. 32-44
- Debarbieux B., 2012, « Tourisme, imaginaires et identités : inverser le point de vue ». *Tourism Review* (1), <http://journals.openedition.org/viatourism/1191>
- 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 » *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* (103-2), <http://journals.openedition.org/rga/2829>
- F. Stocker T., Qin D., Plattner G-K., Tignor M., K. Allen S., Boschung J., 2013.- « Changements climatiques 2013, les éléments scientifiques ; Résumé à l'intention des décideurs, Résumé technique et foire aux questions. », GIEC.
- Furunes T., Mykletun R.J., 2012.- "Frozen Adventure at Risk ? A 7-year Follow-up Study of Norwegian Glacier Tourism" *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism* 12(4) pp.324-348
- Garcia P-O., 2015.- « Sous l'adaptation, l'immunité : étude sur le discours de l'adaptation au changement climatique », Université Grenoble Alpes, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01470390/document>

- Godard O., 2010.- « Cette ambiguë adaptation au changement climatique », *Abstract Natures Sciences Sociétés* 18(3) pp. 287-297
- Haeberli W., Noetzli J., Arenson L., Delaloye R., Gärtner-Roer I., Gruber S., Isaksen K., Kneisel C., Krautblatter M., Phillips M., 2010.- “Mountain permafrost : development and challenges of a young research field” *Journal of Glaciology* 56(200) pp. 1043-1058
- Huss M., 2012.- “Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale : the European Alps 1900-2100” *The Cryosphere* 6(4) pp. 713-727
- Joly M., Ungureanu E. I., 2018.- “Global warming and skiing : analysis of the future of skiing in the Aosta Valley” *Worldwide Hospitality and Tourism Themes*
- Kaján E., Saarinen J., 2013.- “Tourism, climate change and adaptation : a review” *Current Issues in Tourism* 16(2) pp. 167-195
- Magnin F., Josnin J.-Y., Ravanel L., Pergaud J., Pohl B., Deline P., 2017.- “Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century.” *The Cryosphere* 11(4) pp. 1813-1834
- Mao P., 2003.- « Les lieux de pratiques sportives de nature dans les espaces ruraux et montagnards, Contribution à l’analyse de l’espace géographique des sports », Université Joseph-Fourier - Grenoble I, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00280034/document>
- Mourey J., Marcuzzi M., Ravanel L., Pallandre, 2019.- “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*, <https://hal-sde.archives-ouvertes.fr/hal-01898233>
- Mourey J., Ravanel L., 2017.- « 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* (105-4), <http://journals.openedition.org/rga/3780>
- Paccard P., 2009.- « Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables » *Collection Edytem* 8 pp.181-192
- Perrin-Malterre C., 2016.- « Processus de diversification touristique autour des sports de nature dans une station de moyenne montagne » *Mondes du Tourisme* (11), <http://journals.openedition.org/tourisme/1012>
- Pielke R A., 1998.- “Rethinking the role of adaptation in climate policy” *Global Environmental Change* 8(2) pp.159-170
- 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 pp. 66-78
- Purdie H., 2013.- “Glacier Retreat and Tourism : Insights from New Zealand” *Mountain Research and Development* 33(4) pp. 463-472
- Purdie H., Gomez C., Espiner S., 2015.- “Glacier recession and the changing rockfall hazard : Implications for glacier tourism” *New Zealand Geographer* 71(3) pp. 189-202
- Purdie H., Kerr T., 2018.- “Aoraki Mount Cook : Environmental Change on an Iconic Mountaineering Route” *Mountain Research and Development* 38(4) pp. 364-379
- Ravanel L., Magnin F., Deline P., 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 pp. 132-143

- 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(1) pp. 4-15
- Savelli N., 2012, « Géopolitique touristique d'un « bout du monde ». le développement territorial du Valgaudemar en questions » *Journal of Alpine Research / Revue de géographie alpine* (100-2), <http://journals.openedition.org/rga/1790>
- Scott D., de Freitas C., Matzarakis A., 2009.- "Adaptation in the Tourism and Recreation Sector", in *Biometeorology for Adaptation to Climate Variability and Change* Eds K L Ebi, I Burton, and G R McGregor (Springer Netherlands, Dordrecht), pp. 171-194, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3_8
- Simonet G., 2015.- « Une brève histoire de l'adaptation : l'évolution conceptuelle au fil des rapports du GIEC (1990-2014) » *Natures Sciences Sociétés* 23 S52-S64
- Smit B., Wandel J., 2006.- "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability" *Global Environmental Change* 16(3) pp. 282-292
- Swart R., Raes F., 2007.- "Making integration of adaptation and mitigation work : mainstreaming into sustainable development policies ?" *Climate Policy* 7(4) pp.288-303
- 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) pp.793-807
- Watson C.S., King O., 2018.- "Everest's thinning glaciers : implications for tourism and mountaineering" *Geology Today* 34(1) pp.18-25
- Zekollari H., Huss M., Farinotti D., 2019.- "Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble" *The Cryosphere* 13(4) pp.1125-1146
- Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlstrøm A.P., Anderson B., Bajracharya S., Baroni C., Braun L.N., Cáceres B.E., Casassa G., Cobos G., Dávila L.R., Granados H.D., Demuth M.N., Espizua L., *et al.*, 2015.- "Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century" *Journal of Glaciology* 61(228) pp. 745-762

RÉSUMÉS

L'évolution des milieux de la haute montagne alpine, et notamment de la cryosphère face au changement climatique, modifie considérablement les pratiques qui s'y déroulent. Les itinéraires d'alpinisme subissent tout particulièrement ces changements et deviennent parfois difficilement accessibles. L'adaptation est alors nécessaire pour retrouver un équilibre. Les guides de haute montagne font partie de ces professionnels les plus dépendants de l'espace sur lequel ils exercent. De ce fait, ils sont certainement les plus contraints, mais également ceux qui développent le plus de stratégies d'adaptation. L'objectif de cet article est de déterminer de quelle manière les guides de haute montagne de Chamonix et de Courmayeur sont impactés et s'adaptent aux contraintes liées au changement climatique. À travers une étude transfrontalière se nourrissant de méthodes quantitatives et qualitatives, ce travail montre également en quoi les stratégies d'adaptation des guides sont dépendantes des dynamiques des territoires dont ils sont issus.

The evolution of the high Alpine mountain environment, especially the cryosphere that faces climate change, deeply modifies the human activities that take place there. The mountaineering routes are directly impacted and they sometimes become inaccessible. In order to recover a good balance, adaptation is necessary. Mountain guides are among the most dependent professionals on the field on which they practice. As a result, they are probably some of the most impacted professionals but, at the same time, they are also those who can create a lot of adaptation strategies. The aim of this paper is therefore to identify how mountain guides from Chamonix and Courmayeur are impacted and the different adaptation strategies they developed to face climate change. By this cross-border study, using quantitative and qualitative methods, this paper is also showing that the adaptation strategies are controlled by the territory dynamics.

INDEX

Keywords : guide ; haute montagne ; adaptation ; changement climatique ; perception

AUTEURS

EMMANUEL SALIM

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – CNRS, Chambéry, France.
emmanuel.salim@univ-smb.fr

JACQUES MOUREY

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – CNRS, Chambéry, France.

LUDOVIC RAVANEL

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – CNRS, Chambéry, France.

PIETRO PICCO

Fondation Montagne sûre, 11013 Courmayeur (AO), Italie

CHRISTOPHE GAUCHON

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – CNRS, Chambéry, France.

Conclusion du Chapitre 6

Les guides de haute montagne français sont très sensibles aux impacts du changement climatique et 99 % d'entre eux sont contraints d'adapter leur pratique du métier à ces impacts à travers 5 stratégies principales : (i) le changement de saisonnalité (43 % des répondants), (ii) le changement des activités pratiquées (34 %), (iii) porter plus d'attention et être plus réactifs aux conditions en haute montagne (31 %), (iv) le changement des lieux de pratique (30 %) et (v) le changement des techniques de progression (7 %). Tous les guides ne sont pas affectés de la même manière et n'ont pas les mêmes difficultés à s'adapter. Les guides qui font face au changement climatique avec le plus de facilité (50 % de la population) sont ceux qui diversifient leurs activités hors haute montagne. Aussi, le changement climatique est un facteur qui accentue l'évolution actuelle du métier de guide en France, où l'alpinisme tend à être relégué au second plan, au profit d'activités plus ludiques avec une prise de risques limitée. L'ensemble de ces résultats constitue un état des lieux pour le SNGM qui prévoit de sensibiliser, former et accompagner ses adhérents dans leur adaptation au changement climatique. Les résultats de l'enquête ont été communiqués à l'ensemble des guides sous la forme d'un rapport (Annexe 6.2) et ont notamment été mobilisés dans l'émission *Dimanche en Politique* (France3), *Les Alpes face au réchauffement*. La *Royal Dutch Climbing and Mountaineering Association* (NKBV) a également écrit un article à partir de cette étude qui sera publié au cours de l'été 2019 afin de sensibiliser ses adhérents (65 000 personnes) aux impacts du changement climatique.

L'étude comparative menée entre les guides chamoniards et valdotains (Article 5) permet de nuancer les résultats de l'Article 4. En effet, bien que travaillant sur un même espace – le massif du Mont Blanc – la sensibilité des guides valdotains au changement climatique semble bien inférieure à celle des guides chamoniards. Le type de clientèle, régulière pour les guides valdotains et plutôt « d'un jour » du côté français du Mont Blanc, ainsi que deux structurations très différentes du fait touristique entre les deux versants du massif, sont les principales raisons de cette différence. L'adaptabilité des guides semble donc également conditionnée par le type de clientèle des guides, et l'approche régionale du tourisme et non pas uniquement par le type d'activité pratiquée.

Ces deux articles complètent la littérature scientifique actuelle, proposant des résultats spécifiques à la pratique de l'alpinisme et au métier de guide de haute montagne. De plus, l'Article 5 permet de mieux documenter le cas du massif du Mont Blanc – « berceau historique et mythique du métier de guide » (Bourdeau, 1991) – qui n'avait pas été étudié auparavant sous cet angle.

Chapitre 7. Les effets du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne

Par leur rôle d'abri et de lieu d'étape pour les alpinistes, les refuges de haute montagne sont des objets importants dans la structuration du cheminement des pratiquants et de nombreux schémas d'ascension. Par conséquent, le nombre de personnes qui y dorment pendant la période estivale est l'une des données phares pour l'étude de la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes et peut aussi être utilisée pour apprécier les impacts du changement climatique sur les pratiques de la montagne. Dans ce chapitre est étudiée, l'évolution de la fréquentation (nombre de nuitées par saison) des refuges de haute montagne dans le massif du Mont Blanc entre 2000 et 2017. Notre objectif est d'analyser cette évolution afin d'évaluer si la modification des itinéraires d'alpinisme face au changement climatique peut se traduire par une diminution de la fréquentation des refuges de haute montagne.

Il peut sembler discutable de ne considérer que 17 années consécutives pour une étude sur les impacts de phénomènes climatiques puisqu'il pourrait être difficile de faire la part entre l'évolution de la fréquentation liée au climat qui devrait théoriquement présenter une tendance sur le long terme (depuis les années 1970, *cf.* Partie II) et l'évolution liée à d'autres facteurs météorologiques et socio-économiques s'inscrivant dans des dynamiques à court terme (fermeture annuelle pour rénovation, etc.) ou moyen terme (mode de pratiques). Cependant, on ne retrouve que très peu de données antérieures aux années 2000 et dans tous les cas, elles ne sont pas suffisantes pour permettre une analyse précise de la fréquentation. Aussi, nous nous appuyerons dans ce chapitre sur la question du lien entre l'évolution des itinéraires supports de la pratique de l'alpinisme lors des étés caniculaires, où les effets du changement climatique sont exacerbés (*cf.* : Conclusion Chapitre 5) et la fréquentation des refuges. Pour terminer, seront présentés quelques éléments sur les stratégies d'adaptations mises en place par les gardiens de refuges dont la fréquentation diminue, notamment face aux impacts du changement climatique.

7.1. Les données de fréquentation des refuges, limites et intérêts

Dans cette section, nous commencerons par présenter les limites et les biais que présentent les données de fréquentation des refuges avant de justifier leur utilisation, comme unique donnée disponible pour quantifier et localiser la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes.

7.1.1. La fréquentation des refuges : difficulté d'accès et limites de la donnée

A. Une donnée difficile d'accès

Contre toute attente, les données de fréquentation des refuges sont très difficiles à obtenir. Cela s'explique notamment par la multiplicité des gestionnaires - Clubs CAF, FFCAM, Compagnie de Guides, Mairies, Associations, acteurs privés - et par une réticence de la part des gestionnaires à communiquer ces données qui informent indirectement sur l'économie associée à la gestion des refuges. En général, nous devons l'accès aux données présentées ci-dessous à notre statut de chercheur.

Dans certains cas, les données n'ont pas été archivées correctement et/ou ont été perdues. Concernant la FFCAM, les données ont été informatisées en 2001 ce qui a permis d'avoir accès au nombre de nuitées par refuge et par année depuis cette date. Le sort des données plus anciennes reste cependant très flou. D'après le service Patrimoine bâti de la FFCAM, les données plus anciennes auraient été perdues. À l'échelle des sections locales du CAF, l'archivage et la sauvegarde des données se sont avérés très variables. Le Club Alpin de Briançon possède par exemple l'ensemble du nombre de nuitées par refuge et par année depuis 1946. À l'inverse, pour Chamonix et Grenoble, aucune donnée antérieure à 2001 n'a été retrouvée. La section de Saint Gervais a quant à elle conservé des données depuis 1995. Pour les refuges du massif du Mont Blanc, des données antérieures à 2001 ont été retrouvées dans plusieurs numéros de la revue *La Montagne et Alpinisme* et dans des rapports de l'*Association pour la Recherche, l'Innovation et l'Adaptation en Montagne* (APRIAM ; Belien, 1988), de l'*Agence Française de l'Ingénierie Touristique* (AFIT ; Giard, 1996 ; Steen *et al.*, 2001) et de la *Direction Tourisme Montagne et Parcs* (DTMP, 2012).

D'autre part, certains gardiens semblent ne pas déclarer à leur section de rattachement la totalité des nuitées qu'ils enregistrent, en intégrant certaines dans leurs propres revenus ou investissements, ce qui contribue à biaiser la donnée.

B. Tous les alpinistes n'utilisent pas les refuges

Certains alpinistes campent ou bivouaquent au pied des itinéraires prévus. Ainsi, tous les alpinistes n'utilisent pas les refuges. D'après l'étude *Dispositif Mont Blanc* réalisée par *La Chamoniarde* pendant les étés 2013 et 2014, environ 37,5 % des alpinistes qui utilisent le téléphérique de l'aiguille du Midi pour passer au moins une nuit en montagne bivouaquent. Les principaux lieux de bivouacs du massif du Mont Blanc par ordre d'importance sont : le col du Midi, le plan de l'Aiguille (gare

intermédiaire), le Cirque Maudit et le col du Géant. D'autre part, et en particulier pour le massif du Mont Blanc, l'accès à la haute montagne par les remontées mécaniques permet une très large pratique de l'alpinisme à la journée, hors du schéma classique intégrant un refuge. Par exemple, à proximité de l'aiguille des Grands Montets, de l'aiguille du Midi, ou de la pointe Helbronner (IT) accessibles en télécabine, de nombreuses courses d'alpinisme sont très fréquentées à la journée pendant la période estivale, telles que la petite aiguille Verte, la face sud de l'aiguille du Midi, l'arête des Cosmiques, la traversée du glacier du Géant, la pointe Lachenal ou l'aiguille d'Entrèves. Ainsi, c'est tout un pan de la fréquentation de la haute montagne que le nombre de nuitées des refuges ne reflète pas. En 2014, 28 % des alpinistes qui ont pris le téléphérique de l'aiguille du Midi n'ont pas dormi en refuge (comm. écrite *La Chamoniarde*, 2016). Cette pratique de l'alpinisme à la journée est d'ailleurs en progression depuis le début des années 2000 (cf. : Chapitre 1).

C. Les refuges de haute montagne ne sont pas uniquement fréquentés l'été par des alpinistes

De nombreux refuges de haute montagne, supports de la pratique de l'alpinisme, sont aussi fréquentés par des randonneurs. Dans ce cas, l'analyse du nombre de nuitées et de l'évolution de ce nombre face aux modifications des itinéraires d'alpinisme est faussée. Le nombre de randonneurs peut ainsi compenser une diminution du nombre d'alpinistes qui ne sera alors plus visible dans le nombre de nuitées enregistré par le refuge. Inversement, une diminution de la fréquentation d'un refuge pourrait être due à une diminution du nombre de randonneurs et non de celui des alpinistes.

De plus, la majorité des gestionnaires dont la FFCAM annualisent le nombre de nuitées dans leur refuge en additionnant les nuitées de l'hiver/printemps - liées à la pratique du ski de randonnée - aux nuitées de l'été liées à la pratique de l'alpinisme. Cette annualisation des nuitées est une des limites majeures des analyses reposant sur cette donnée. Différentes pratiques sont mélangées et il en devient difficile (voir impossible pour certains refuges) de mesurer une diminution ou une augmentation de la fréquentation sur la seule période estivale à laquelle s'intéresse ce travail. À l'heure où la pratique du ski de randonnée se développe de plus en plus, il est étonnant que le nombre de nuitées estivales ne soit pas dissocié du nombre de nuitées hivernales et printanières. Cette simple dissociation de chiffre permettrait une analyse beaucoup plus précise de la fréquentation des refuges et des pratiques dont ils sont le support. D'ailleurs, cette limite ne concerne pas les refuges suisses. Le CAS fait très clairement la distinction entre la fréquentation hivernale et estivale.

En outre, les chiffres des nuitées hors période de gardiennage sont des plus parcellaires. Le principe veut qu'en dehors des périodes gardées, les utilisateurs payent leur nuitée en laissant la somme correspondante dans un tronc installé dans la salle commune. Dans les faits, tous les alpinistes ne payent pas ou ne mettent pas le montant indiqué. Il en devient impossible de faire un comptage précis de la fréquentation hors gardiennage. Dans les chiffres des nuitées des refuges CAF du massif du Mont Blanc, si l'onglet « Nuitées hors gardiennage » existe, il n'est jamais renseigné, ce qui illustre la non prise en compte (ou l'accès trop limité) de cette donnée par le CAF.

D. Les limites de la collecte de données par les gardiens

Il serait possible de réaliser une étude qualitative détaillée de la fréquentation de chaque refuge en se basant sur les différents tarifs appliqués (jeunes, membres du CAF, professionnels, etc.). Cependant, des tarifs similaires pour différents statuts rendent la lecture difficile et impliquent plusieurs biais. Par exemple, le tarif pour un professionnel non-membre du CAF est le même que pour un non professionnel membre du CAF. Aussi est-il régulier que ces deux catégories soient intégrées dans la même colonne « Membre du CAF ». De plus, le nombre de statuts et de tarifs différents s'est accru et a beaucoup évolué depuis le début des années 2000, rendant toute comparaison diachronique des données quasi impossible.

Enfin, le nombre de nuitées devrait idéalement être analysé en fonction de la durée d'ouverture des refuges (soit un taux de remplissage par saison) qui peut varier d'année en année. Malheureusement, c'est une information difficile à obtenir car elle n'est pas (ou très rarement) conservée par le gestionnaire. Il faudrait alors contacter individuellement chaque gardien pour la lui demander.

7.1.2. Une donnée qui reste pertinente et nécessaire pour l'étude de la fréquentation de la haute montagne

Malgré les limites et biais que présente le nombre de nuitées par an dans les refuges, c'est la seule donnée qui permette à ce jour d'étudier l'évolution de la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes. On peut estimer qu'une majorité des alpinistes fréquente les refuges et que le nombre de nuitées qu'ils enregistrent reflète les principales tendances de la pratique de l'alpinisme. De plus, il est possible de mettre en place des méthodologies qui permettent de réduire, au moins en partie, certaines des limites évoquées. La principale est la réalisation d'entretiens semi-directifs avec les gardiens de refuges concernés en leur demandant d'expliquer pour chaque année la façon dont ils perçoivent les raisons qui expliquent les chiffres de la fréquentation du refuge. De plus, le programme *RefLab* qui a débuté en 2015 contribue aujourd'hui à proposer des données précises sur la fréquentation des refuges (Encadré 7.1).

Encadré 7.1. Le programme RefLab

Le programme *RefLab*, co-piloté par le LabEx ITEM et le Parc National des Écrins, vise à développer un dispositif d'observation des changements en haute montagne, avec les refuges comme lieux de mesure et d'observation des processus géophysiques, climatiques, biologiques et des pratiques touristiques et sportives. Un de ses objectifs est la récolte de données précises et inédites sur la fréquentation des refuges (nombre de nuitées par jour, caractéristiques sociodémographiques de la clientèle, etc.), en partenariat avec les gardiens et les gestionnaires (FFCAM, Syndicat National des Gardiens de Refuges, etc.). Ces données permettraient de s'affranchir d'un certain nombre des limites présentées ci-avant. De plus, dans le cadre de ce programme, une base de données sur l'ensemble des refuges des Alpes françaises est à l'étude. Elle aurait pour but de centraliser de nombreuses données, dont celles récoltées dans ce travail de thèse, sur les refuges et leurs fonctionnements et d'être utilisées autant comme outil d'aide à la décision pour les acteurs politiques que comme source de données pour la recherche scientifique.



7.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne dans le massif du Mont Blanc

Avec ce travail doctoral, l'étude des impacts du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne devait considérer l'ensemble des refuges des Alpes occidentales (France, Suisse et Italie). La récupération des données de fréquentation des refuges s'étant montrée particulièrement longue et laborieuse, il a rapidement été nécessaire de revoir cet objectif à la baisse. Aussi, les entretiens semi-directifs ont été réalisés en priorité avec les gardiens des refuges du massif du Mont Blanc. Malheureusement, il s'est avéré par la suite qu'il s'agissait du massif pour lequel nous disposions de la série de données la plus courte, les données de fréquentation des refuges des Écrins ayant été retrouvées pour certains refuges jusqu'en 1946, et des Alpes suisses jusqu'en 1976. Cependant, les entretiens avec les gardiens étant indispensables à l'évaluation de la part climatique dans l'évolution de la fréquentation des refuges et face à l'impératif de répondre aux attentes du projet *ALCOTRA AdaPt Mont-Blanc*, l'étude qui suit se concentre sur le massif du Mont Blanc et sur la période 1999-2016.

7.2.1. Les refuges du massif du Mont Blanc considérés dans ce travail

Au même titre que dans les Articles 1 et 2 de ce manuscrit, les refuges considérés dans ce chapitre sont les refuges de haute montagne, définis comme les refuges supports de la pratique de l'alpinisme estival, dans le massif du Mont Blanc. Les bivouacs non gardés ne sont pas inclus, notamment en raison de la difficulté de mesurer leur fréquentation (*cf.* : § 7.1.1).

Seront considérés, dans cette section, 16 des 22 refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc (Tab. 7.1). L'ensemble des refuges du versant italien du massif (Gonnella, Monzino, Torino, Boccalatte, etc.) n'ont pas été pris en compte, leurs données de fréquentation étant trop parcellaires. En effet, pour des raisons de confidentialité, l'Assessorat au tourisme de la vallée d'Aoste refuse de communiquer les chiffres de fréquentation pour chacun des refuges et seule la totalité des nuitées enregistrées sur l'ensemble des refuges de haute montagne est accessible. Cependant, tous les gardiens ne communiquent pas à cette structure le nombre de nuitées enregistrée par saison, ce qui engendre un biais important et l'impossibilité de prendre en considération ces données. Sur le versant français du massif, seuls les refuges de la Charpoua et de Robert Blanc n'ont pas été considérés, leurs données de fréquentation n'ayant pas été retrouvées sur une période suffisamment longue.

Pays	Gestionnaire	Refuge	Altitude (m)	Nbre de place	Ouverture au printemps	Accessible aux randonneurs
France	CAF Chamonix	Albert 1er	2712	137 (2014)	Non	Oui
		Argentière	2771	94 (2009)	Oui	Non
		Couvercle	2679	128	Oui	Oui
		Leschaux	2431	20	Non	Oui
		Envers des Aiguilles	2523	68	Non	Oui
		Requin	2867	57	Oui	Oui
		Grands Mulets	3051	68	Oui	Non
	CAF Saint Gervais	Conscrits	2580	90	Oui	Oui
		Tête Rousse	3167	72	Non	Oui
	Comité Départemental FFCAM Haute Savoie	Goûter	3835	120 (2014)	Non	Non
Compagnies des Guides de Chamonix						
Suisse	CAS Diablerets	L'A Neuve	2735	28	Non	Oui
		Orny	2831	86	Non	Oui
		Trient	3170	129	Oui	Non
	CAS Neuchatel	Saleina	2691	48	Oui	Oui

Tableau 7.1. Refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc pris en compte dans ce travail avec leurs principales caractéristiques.

L'évolution du nombre de nuitées par an et pour chacun des refuges considérés sera étudiée pour la période 1999-2016, seule période pour laquelle le jeu de données est complet. 12 entretiens semi-directifs de 30 minutes à 1 heure (Annexe 7.1) ont été réalisés avec des gardiens des refuges du versant français du massif. Nous les avons d'abord questionnés sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme accessibles depuis le refuge et plus spécifiquement sur les itinéraires étudiés dans l'Article 3 sur *Les 100 plus belles courses du massif du Mont Blanc* décrites dans le topo-guide de G. Rébuffat (1973). Ensuite, l'essentiel des entretiens portaient sur le nombre des nuitées dans le refuge année par année et les facteurs explicatifs.

7.2.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc entre 1999 et 2016

Sur la période 1999-2016, la fréquentation totale des 16 refuges considérés représente 56 856 nuitées en moyenne par an. La fréquentation hivernale et printanière des refuges français (6 refuges concernés, Tab. 7.1) est incluse dans ces données. D'après plusieurs observateurs (CAF, Syndicat des guides, sociétés de remontées mécaniques, etc.), celle-ci serait en augmentation. Toutefois, le nombre total de nuitées est en diminution sur l'ensemble de la période (Fig. 7.1). Il passe de 62 222 nuitées en moyenne par an sur la période 1999-2001 à 50 966 nuitées pour la période 2014-2016, soit une diminution de 18 %. La diminution moyenne annuelle est ainsi de 1 %, soit une diminution moyenne annuelle de 654 nuitées.

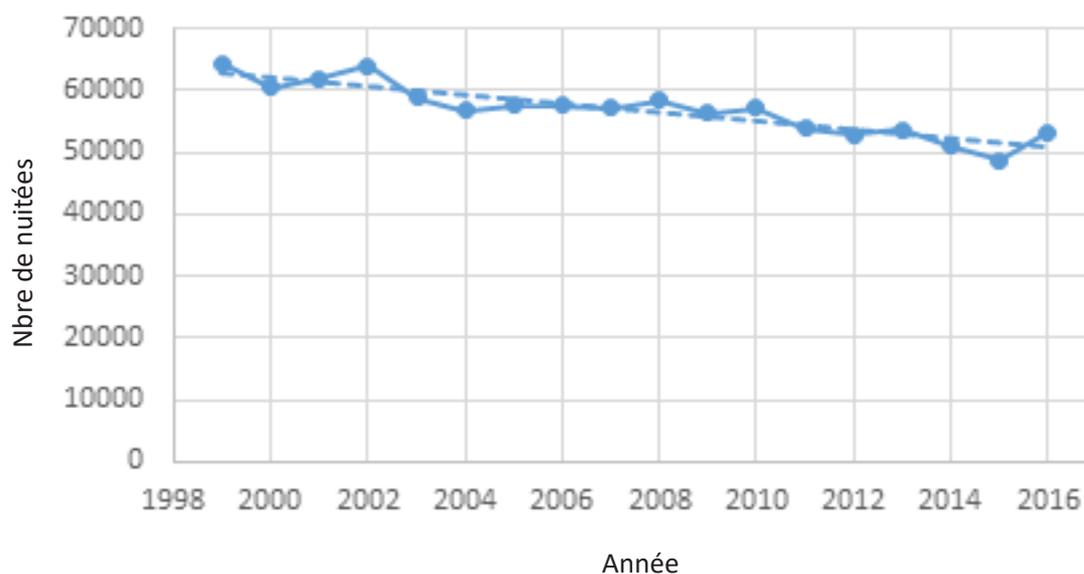


Figure 7.1. Évolution du nombre total de nuitées entre 1999 et 2016 pour l'ensemble des refuges considérés.

Bien que le nombre de nuitées dans chacun des refuges présente une forte variation interannuelle (Annexe 7.2), principalement liée à des facteurs météorologiques et à des travaux de rénovations des refuges certaines années (Giard, 1997), la tendance générale à la diminution s'explique par une baisse de la fréquentation pour 8 refuges pour lesquels le nombre de nuitées diminue d'au moins 1,5 % en moyenne par an sur l'ensemble de la période (Tab. 7.2). La diminution moyenne annuelle la plus

importante en pourcentage concerne le refuge des Grands Mulets (-9 %/an). En nombre de nuitées, c'est le refuge d'Argentière qui voit sa fréquentation se réduire le plus avec une diminution moyenne de 182 nuitées par an. Pour 6 refuges, la fréquentation stagne avec une variation de ± 1 % (Tab. 7.2). Enfin, seuls 2 refuges voient leur fréquentation augmenter : Durier (+4 %/an) et Tête Rousse (+ 3%/an).

Refuge	Évolution moyenne annuelle de la fréquentation	
	(en %)	(en nbre de nuitées)
Grands Mulets	-9	-88
Argentière	-4	-182
Couvercle	-4	-130
Saleina	-3	-27
Conscrits	-3	-172
L'A Neuve	-2	-11
Envers des Aiguilles	-1	-24
Cosmiques	-1	-166
Orny	-0,5	-16
Requin	-0,5	-3
Goûter	-0,2	-19
Trient	0	+3
Albert 1er	+0,5	+28
Leschaux	+1	+6
Tête Rousse	+3	+145
Durier	+4	+15

Tableau 7.2. *Évolution moyenne annuelle du nombre de nuitées dans les refuges étudiés sur la période 1999-2016.*

Comment expliquer cette diminution de la fréquentation ? Elle serait, selon notre interprétation, principalement le résultat de l'évolution qu'a connue la pratique de l'alpinisme à partir des années 1990 (Cf. : Chapitre 1). Toutefois, un travail plus approfondi, notamment par la conduite d'entretiens semi-directifs supplémentaires avec les gardiens serait nécessaire pour mettre clairement en évidence l'ensemble des facteurs explicatifs. Par exemple, pour le seul cas du refuge de Tête Rousse, plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer l'augmentation du nombre de nuitées qu'il enregistre : (i) le nombre de prétendants à l'ascension du mont Blanc augmente et le refuge du Goûter est régulièrement complet, ce qui contraint les alpinistes à dormir au refuge de Tête Rousse ; (ii) la dangerosité vraisemblablement croissante du couloir du Goûter pousse les alpinistes à dormir à Tête Rousse de manière à traverser le couloir tôt dans la nuit, lorsque les chutes de pierres sont les moins fréquentes (Alpes Ingé, 2012) ; (iii) le nombre de randonneurs venant passer la nuit au refuge augmente ; (iv) le système de réservation mis en place pour le nouveau refuge du Goûter, peu satisfaisant du point de vue des guides, les pousse à dormir plus fréquemment au refuge du Tête Rousse. Aussi, des entretiens avec les anciens et les actuels gardiens des refuges du Goûter et de Tête Rousse (d'ailleurs contactés infructueusement à plusieurs reprises au cours de ce travail) ainsi qu'avec

des guides de haute montagne seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer ces hypothèses.

Ce constat ne nous permet pas de répondre à la question posée au début de ce chapitre à savoir les impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme entraînent-ils une diminution de la fréquentation des refuges de haute montagne ? Dans la section suivante, nous nous concentrerons sur l'évolution de la fréquentation des refuges au cours de l'été caniculaire de 2015 lors duquel les conditions en haute montagne étaient particulièrement défavorables à la pratique de l'alpinisme. Les entretiens menés avec certains gardiens nous permettront de mieux évaluer la part climatique dans la diminution générale de la fréquentation des refuges.

7.3. Impacts de l'été caniculaire 2015 sur la fréquentation des refuges

7.3.1. L'été 2015

L'été 2015 est au second rang des étés les plus chauds en France derrière celui de 2003, avec une anomalie thermique de +1.5°C par rapport à la moyenne des températures estivales pour la période 1981-2010 (données Météo France). Deux vagues de chaleurs se sont succédées : du 30 juin au 7 juillet puis, du 15 au 22 juillet (*MétéoFrance*, 2016). En conséquence, les conditions en haute montagne pour la pratique de l'alpinisme étaient particulièrement défavorables (*cf.* : Conclusion Chapitre 5). Les températures particulièrement élevées et le faible voire inexistant regel nocturne même à très haute altitude, accentue une grande partie des processus et phénomènes identifiés dans le Tableau 1 de l'Article 3. Par exemple, l'occurrence de chutes de pierres et d'écroulements sont favorisés, les ponts de neige sont plus fragiles, les faces en neige deviennent « en glace » ou sont complètement sèches rapidement, ce qui accentue ponctuellement, à l'échelle de la période caniculaire, l'augmentation progressive de la dangerosité et de la technicité des itinéraires mise en évidence depuis les années 1970 (*cf.* : Article 3).

Le nombre total de nuitées en 2015 est le plus faible enregistré sur l'ensemble de la période considérée (Fig. 7.1). La diminution moyenne en 2015, par rapport à la moyenne des trois années précédentes, est la deuxième plus importante (-7 % soit -3759 nuitées) après 2004 (-7,8 % soit -4796 nuitées) (Fig. 7.2).

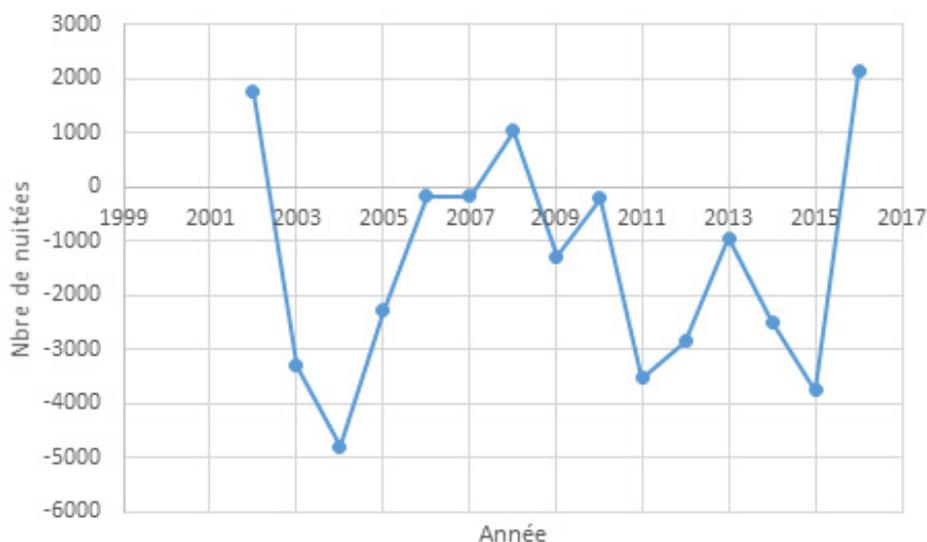


Figure 7.2. Evolution annuelle du nombre de nuitées par rapport à la moyenne des trois années précédentes. On considère la moyenne des trois années précédentes afin de gommer la variabilité interannuelle de la fréquentation.

Dix refuges voient leur fréquentation diminuer en 2015 par rapport à la moyenne de la période 2012-2014 (moyenne de référence dans cette section) (Tab. 7.3.). D'après les gardiens de refuges interrogés, cette diminution est en grande partie liée aux conséquences des deux périodes caniculaires du mois de juillet.

Refuge	Différence de fréquentation entre 2015 et la moyenne de la période 2012-2014	
	(en %)	(en nombre de nuitées)
Tête Rousse	-39	-2515
Conscrits	-28	-1291
Requin	-21	-215
Goûter	-17	-1348
Durier	-13	-56
Couvercle	-11	-352
L'A Neuve	-9	-42
Argentière	-5	-169
Saleina	-4,5	-27
Cosmiques	-3,5	-320
Grands Mulets	4	40
Trient	9,5	326
Albert 1er	16	1079
Envers des Aiguilles	17	261
Orny	26	738
Leschaux	27	132

Tableau 7.3. Différence de fréquentation entre l'année 2015 et la moyenne de la période 2012-2014.

Dans le cas du refuge du Goûter, les fortes chaleurs ont entraîné d'importantes chutes de pierres dans le Grand Couloir, sur la voie normale d'ascension du mont Blanc (comm. orale A. Rattin, gardien du refuge du Goûter, 27/10/2015 ; niveau de modification 3, cf. Article 3). Par conséquent, l'itinéraire a été déconseillé par avis préfectoral et municipal et le refuge du Goûter a été fermé par arrêté municipal à deux reprises : du 18 au 31 juillet et du 6 au 19 août. Malgré l'initiative de prolonger la période d'ouverture du refuge jusqu'au 15 octobre afin de profiter des bonnes conditions de neige de l'automne, la fréquentation du refuge a toutefois diminué de 17 % par rapport à la moyenne de la période 2012-2014 ; soit une baisse de 1348 nuitées. En lien avec les mauvaises conditions de la traversée du grand couloir et la fermeture du refuge du Goûter, le refuge de Tête Rousse a lui aussi enregistré une forte baisse du nombre de nuitées : -39 %, soit une diminution de 2515 nuitées, qui ne correspond pas à l'évolution de la fréquentation du refuge qui est à la hausse sur l'ensemble de la période (Tab. 7.1, Annexe 7.2).

Le refuge des Conscrits a lui aussi été fortement affecté par les mauvaises conditions en haute montagne liées aux deux périodes de canicules. À partir de mi-juillet, l'ascension du mont Tondu (3196 m) et la traversée des Dômes de Miage (3670 m) *via* l'aiguille de la Bérengère (3425 m) (itinéraire 13, niveau de modification 3, cf. Article 3), les deux principales courses d'alpinisme réalisées à partir du refuge, étaient difficilement réalisables (comm. orale C. Mattel, gardienne du refuge des Conscrits, 04/03/2016). Concernant le mont Tondu, la majorité de l'itinéraire était exposée à des chutes de pierres et le glacier du mont Tondu était difficile à traverser car devenu plus raide suite au retrait de son front. De plus, la surface de ce glacier a été « en glace » dès la mi-juillet (Fig. 7.3-A). Aussi, cet itinéraire coté « Facile » est devenu nettement plus difficile et plus exposé qu'en temps normal, obligeant la gardienne à déconseiller cette ascension aux alpinistes. Pour la traversée des Dômes de Miage – aiguille de la Bérengère, un écroulement rocheux au niveau de l'aiguille de la Bérengère survenu fin juillet a rendu le passage beaucoup plus difficile et très exposé aux chutes de pierres. Un secours effectué par le PGHM a d'ailleurs été nécessaire à cet endroit-là. L'ascension des Dômes de Miage devait alors se faire en aller-retour par le glacier de Trè-la-Tête, plus crevassé que les années précédentes (Fig. 7.3-B), ce qui a rendu la course beaucoup moins attractive car plus longue et moins logique. Les autres courses d'alpinisme accessibles depuis le refuge ont été dans leur ensemble très peu fréquentées car « en glace » très tôt dans la saison et exposées à des chutes de pierres plus fréquentes qu'habituellement, notamment dans certains passages clés. D'autre part, les fermetures du refuge du Goûter et les mauvaises conditions du Grand Couloir ont rendu impossible la traversée Dômes de Miage – Aiguilles de Bionnassay – Dôme du Goûter au départ du refuge des Conscrits. De plus, l'accès au mont Blanc étant presque impossible pendant une partie de la saison, les ascensions des Dômes de Miage comme course de préparation à l'ascension du mont Blanc ont également été annulées (comm. orale C. Mattel, gardienne du refuge des Conscrits, 04/03/2016).

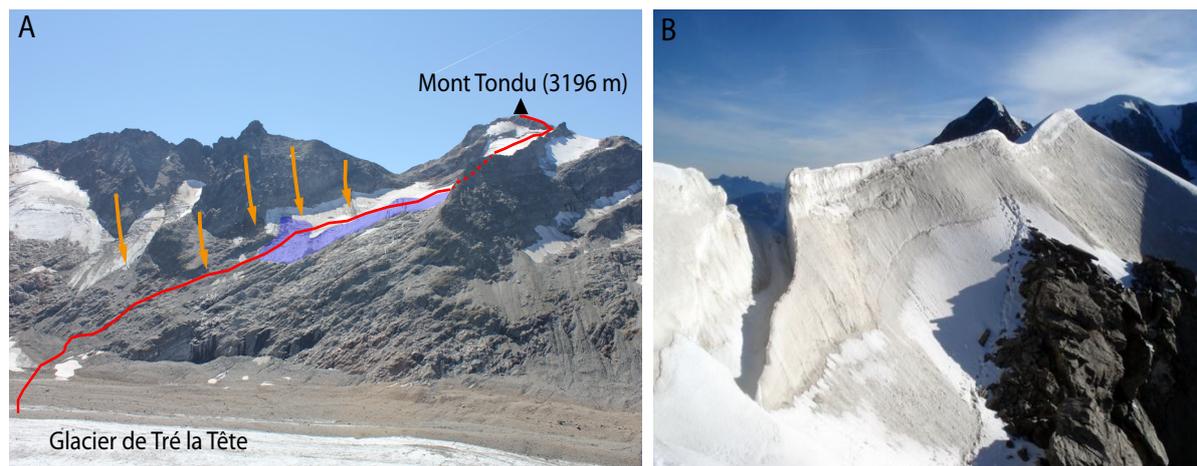


Figure 7.3. A. Voie normale d'ascension du Mont Tondu (3196 m) le 26/08/2015. La voie est très exposée aux chutes de pierres (flèches oranges) et la surface du glacier est en grande partie en glace (à plat bleu). B. Importante crevasse sur l'arête des Dômes de Miage le 27/08/2015.

Ces mauvaises conditions en haute montagne liées aux deux périodes de canicule du mois de juillet ont fortement affecté la fréquentation du refuge des Conscrits qui a enregistré une diminution du nombre de nuitées de 28 % ; soit une baisse de 1291 nuitées (Tab 7.3). Économiquement, cette saison fut donc difficile pour la gardienne qui n'a pas pu se dégager de salaire. La fréquentation du refuge pour le repas de midi a également baissé, notamment au mois de juillet. D'après la gardienne, cela est dû aux fortes chaleurs dans la vallée qui n'ont pas rendu la haute montagne attractive, au profit d'autres activités notamment aquatiques. Cette dernière remarque rejoint les conclusions formulées par Probstl et Damm (2008) et Probstl-Haider *et al.* (2015) (*cf.* : Chapitre 3)

Les refuges des Cosmiques, de Durier, du Requin, du Couvercle et de l'A Neuve ont eux aussi enregistrés une diminution du nombre de nuitées, respectivement de 3, 5, 13, 21, 11 et 9 % (Tabl. 7.3). Des informations complémentaires concernant notamment les conditions d'accès aux refuges et aux voies d'alpinisme seraient nécessaires pour expliquer cette baisse de fréquentation. Les gardiens notamment des refuges de Durier, du Requin et du Couvercle n'ont pas été en mesure d'expliquer cette baisse de fréquentation, considérant leurs connaissances et leur expérience du refuge trop limitée (Annexe 7.1).

Pour les refuges des Grands Mulets, de Saleina et d'Argentière, la variation du nombre de nuitées en 2015 par rapport à la moyenne de la période 2012-2014 (Tab. 7.3) est en cohérence avec leur variation de fréquentation moyenne annuelle sur l'ensemble de la période 1999-2016 (Tab 7.2). Par conséquent, on peut estimer qu'ils n'ont pas particulièrement été affectés par les effets du changement climatique ou qu'un autre facteur (ski de printemps, randonneurs, etc.) a compensé une éventuelle baisse de la fréquentation par les alpinistes l'été.

Les refuges de l'Envers des Aiguilles, d'Albert 1er, de Leschaux, d'Orny, de Trient ont quant à eux vu leur fréquentation augmenter de respectivement 17, 16, 27, 26 et 9,5 % (Tab 7.3). Une hypothèse qui permettrait d'expliquer cette augmentation est la suivante : les courses d'alpinisme qui concernent

ces refuges n'auraient pas été trop affectées par les fortes chaleurs de l'été 2015. Cette hypothèse est particulièrement plausible pour le refuge de l'Envers des Aiguilles qui donne principalement accès à des voies d'escalades rocheuses, parmi les moins affectées par le changement climatique (Fig. 7.4 ; cf. : Article 3). Un phénomène de report de la fréquentation vers les secteurs les moins affectés se mettrait ainsi en place, d'autant plus que les périodes caniculaires se caractérisent par des conditions météorologiques favorables à la pratique. Cette hypothèse est appuyée par le fait que ce sont principalement les refuges donnant accès à des courses de neige et de mixte qui ont vu leur fréquentation diminuer le plus face aux fortes chaleurs de l'été 2015. À l'inverse, les refuges donnant plutôt accès à des courses de rocher, souvent d'un niveau technique requis plus élevé, ont été moins affectés. Ce constat suggérerait que les alpinistes ayant un haut niveau technique sont moins affectés par les effets du changement climatique, ou s'adaptent plus facilement, que les alpinistes de niveau plus modeste qui réalisent des courses plutôt en neige et techniquement plus faciles. Ceux-ci auraient dès lors plus de mal à s'adapter. Cette hypothèse irait par ailleurs dans le sens des études de Bourdeau (2014) et de Probst-Haider *et al.* (2016).

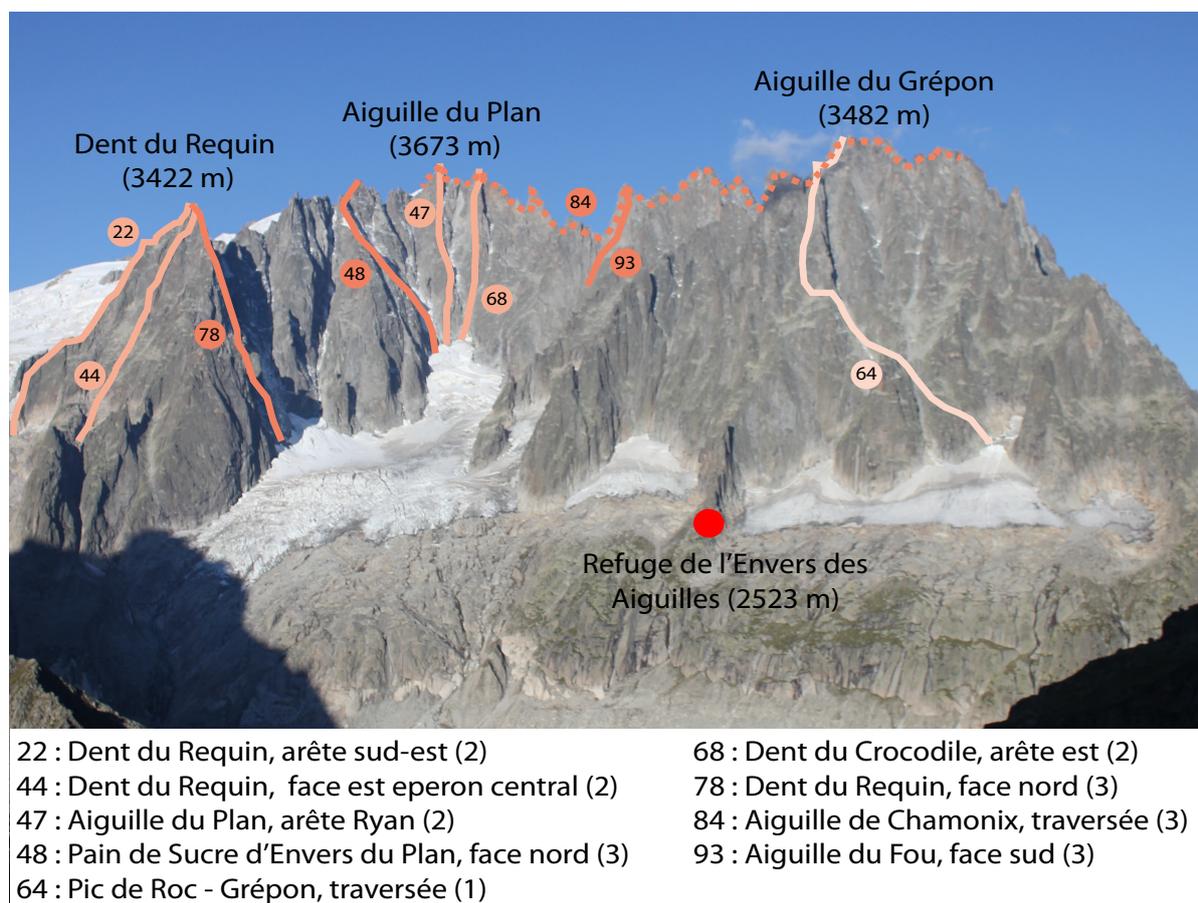


Figure 7.4. Vue du secteur de l'Envers des aiguilles de Chamonix le 09/09/2015. Les courses incluses dans l'Article 3 sont indiquées. On remarque que les voies rocheuses (itinéraires numéro 22, 44, 47, 64, 68, 84, 93) présentent les niveaux de modification indiqués entre parenthèses les plus faibles, à l'inverse des voies en neige/glace (48, 78).

Encadré 7.2. Le cas de l'été caniculaire de 2003

Pour l'été 2003, la diminution en terme de nuitées par rapport à la moyenne des trois années précédentes est la quatrième plus importante (-5,3 % soit -3302 nuitées), après 2004, 2015 et 2011 (Fig. 7.2). Cette baisse est principalement liée à une diminution du nombre de nuitées pour les refuges du Requin (-32 %), de Tête Rousse (-23 %), du Goûter (-21 %), et Albert 1er (-10 %), ce qui concorde avec le cas de 2015. La baisse de fréquentation qu'enregistrent ces refuges étant très importante par rapport à leur évolution sur l'ensemble de la période 1999-2016, on peut émettre l'hypothèse que les effets de la canicule sur les conditions de la haute montagne sont un facteur explicatif. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que la canicule en est l'unique responsable face à un manque d'informations sur l'état des voies d'alpinisme. Par ailleurs, le refuge des Conscrits, très affectés en 2015 par la canicule enregistre à l'inverse une hausse de sa fréquentation de 9 % en 2003. On peut émettre l'hypothèse que, cette année-là, les conditions sur la traversée des Dômes de Miage et du mont Tondu sont restées relativement bonnes et que le refuge a plutôt tiré profit des périodes de beau temps stable. De nouveaux entretiens seraient nécessaires pour étudier cette question.

7.3.3. Adaptation des gardiens – Les cas des massifs du Mont Blanc et des Écrins

Face à la diminution de leur fréquentation, certains refuges essaient de trouver des stratégies et de renouveler leur offre pour attirer une nouvelle clientèle, principalement de randonneurs et ouvrir le refuge aux Accompagnateurs en Montagne (AMM). Cela se traduit par la rénovation ou l'ouverture de nouveaux sentiers accessibles évitant les zones glaciaires. Le gardien du refuge du Pelvoux (2700 m, Écrins) envisage par ailleurs de ré-ouvrir l'ancien itinéraire des Rochers Rouges, l'ascension classique par le couloir Coolidge étant de plus en plus exposée aux chutes de pierres (Graff, 2015). La gardienne du refuge des Évettes (2590 m, Haute Maurienne) essaie de développer des offres et des itinéraires pour les AMM et aimerait rendre les repas de midi plus attractifs (comm. orale J. Gossay ; gardienne). Dans le bassin de la Mer de Glace, le sentier des balcons de la Mer de Glace qui relie les 5 refuges du secteur avait aussi été mis en place à destination principalement des randonneurs aguerris afin de redynamiser les refuges dont la fréquentation était en baisse. L'ouverture de nouvelles voies d'escalade sportive et d'écoles d'escalade est un autre moyen envisagé pour attirer des clients dans les refuges (refuge d'Argentière par exemple).

L'innovation se fait en outre par le développement de sites internet et de divers moyens de communication/publicité afin de relancer l'attractivité et d'informer en temps réel sur les conditions de la montagne. L'objectif est de se rendre plus visible et de mettre en valeur toutes les activités qu'il est possible de pratiquer à proximité. Par exemple, dans les Écrins, le gardien du refuge du Pelvoux, D. Haxaire, a beaucoup communiqué sur les voies d'escalade à proximité du refuge pour offrir de nouvelles possibilités aux alpinistes qui fréquentent classiquement ce refuge pour l'ascension du Pelvoux par le couloir Coolidge, ce dernier étant en mauvaises conditions de plus en plus tôt dans

la saison. Cette approche a permis d'accroître la fréquentation du refuge (com. orale M. Marcuzzi ; Ingénieur d'étude, programme Refuges Sentinelles). Certains refuges organisent jusqu'à des soirées, des concerts et des événements en tous genres (conférences, etc.) pour attirer une clientèle non alpiniste qui ne serait pas montée au refuge habituellement.

7.3.2. Limites de l'étude et perspectives de recherche

Cette étude nécessiterait un travail plus approfondi que celui qui a pu être réalisé à l'occasion de ce travail doctoral. Nombre de questions restent ainsi en suspens, dont l'origine de la diminution de la fréquentation en 2004 (-7 % par rapport à la moyenne des trois années précédentes). La météo n'était pas particulièrement mauvaise, il n'y a pas eu de canicules et l'enneigement hivernal était conforme aux normales saisonnières (données MétéoFrance). Ce constat montre que d'autres facteurs, déterminants pour la fréquentation des refuges de haute montagne, doivent encore être identifiés et pris en compte pour évaluer le plus précisément possible la part climatique de l'évolution de la fréquentation des refuges de haute montagne.

D'autre part, les effets des canicules de 2003, de 2015 et de 2017 ou encore 2018 sont-ils les mêmes sur la fréquentation des refuges ? Chaque canicule aurait-elle des effets plus ou moins importants sur la fréquentation des refuges notamment en fonction de leur date de survenue (début ou fin de saison) ? Une typologie (altitude, type de clientèle, type et difficulté des voies auxquelles il donne accès, etc.) des refuges pourrait-elle être réalisée en considérant leur vulnérabilité face aux impacts du changement climatique ? De plus, comme expliqué dans l'Article 3, un itinéraire fortement affecté par le changement climatique peut rester très fréquenté. Cela pousse à identifier plus précisément les facteurs explicatifs des variations de fréquentation.

L'ensemble de ces questions implique un besoin de davantage de données quantitatives et qualitatives. L'analyse de l'évolution du nombre de nuitées dans les refuges sur une période plus importante permettrait par exemple de mieux comprendre la diminution en cours notamment en identifiant la période où celle-ci a débuté. De nouveaux entretiens seraient de plus nécessaires pour identifier en détail les différents facteurs qui expliquent les variations interannuelles du nombre de nuitées par refuge et pour faire la part entre l'évolution liée au changement climatique et la part liée à des facteurs socio-économiques et culturels dus à l'évolution des pratiques touristiques sur la période récente (*cf.* : Chapitres 1 et 3). Les changements très réguliers de gardiens impliqueraient de nombreux entretiens pour couvrir une période longue.

Enfin, des évaluations statistiques plus approfondies (taux de remplissage, analyse de l'écart par rapport à une moyenne de référence et identification de schéma de fréquentation, etc.) permettraient d'obtenir des résultats plus précis et de limiter les biais et limites liés à la nature de la donnée de base.

Encadré 7.3. Quand le refuge lui-même est menacé par le changement climatique

Dans les Alpes occidentales, on recense quatre cas de refuge (Cosmiques, Pilatte, Carrel, Promontoire) endommagé par les impacts du changement climatique. En 1998, une partie du refuge des Cosmiques (3613 m, massif du Mont Blanc) a perdu ses points d'appui au sud à la suite d'un écoulement de 600 m³ survenu le 22 août 1998 (Fig. 7.5 ; Ravel *et al.*, 2013). La stabilité d'une partie du bâtiment n'était alors plus assurée que par la cohésion d'ensemble de l'infrastructure. Le refuge a été fermé pendant 8 mois et 120 pieux ont été installés pour stabiliser l'infrastructure (Ravel *et al.*, 2013).

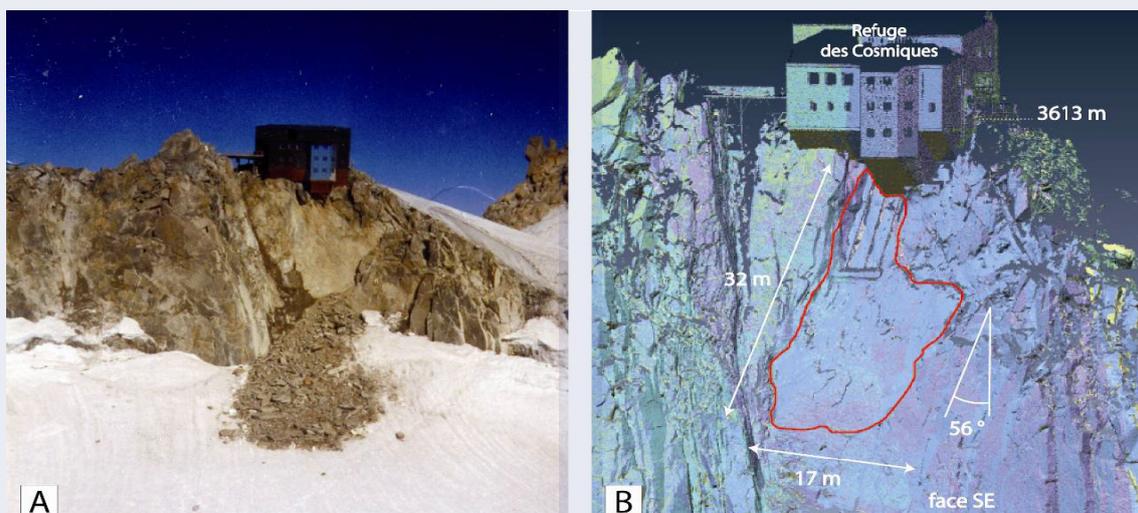


Figure 7.5. A. Cicatrice et dépôt de l'écroulement des Cosmiques du 22 août 1998 (600 m³) (ph. : A. Sage). B. Dimensions de la cicatrice d'écroulement mesurées sur un modèle 3D à haute résolution acquis par balayage laser terrestre (Ravane *et al.*, 2013).

Dans les Écrins, le refuge de la Pilatte a été endommagé à travers un mouvement de décompression post-glaciaire du versant depuis le début des années 2000 (*cf.* : Chapitre 2) tandis que le refuge du Promontoire a

été endommagé par des chutes de blocs le 30/08/2017 à la suite desquelles il est resté fermé pour le reste de la saison, le temps que des travaux de purge soient réalisés. Enfin, le refuge Jean Carrel (3835 m, Italie) au Cervin a aussi nécessité des travaux de consolidation de ses fondations à la suite d'un écoulement survenu le 19 août 2003 (Fig. 7.6). L'installation de filets et la consolidation



Figure 7.6. Installation de filets et rénovation des fondations du refuge Carrel (3835 m, Italie ; Vuillemier, 2014).

du soubassement du refuge ont coûté 180 000 € (Piccardi *et al.*, 2014). En outre, une variante de la voie normale italienne d'ascension du Cervin a dû être ouverte et équipée. Le coût de l'intervention a été de 10 000 €. Il est aussi à noter que les impacts du changement climatique peuvent poser des problèmes pour le fonctionnement du refuge et notamment pour son accès à l'eau. De nombreux névés ayant disparu, certains gardiens doivent aller chercher de l'eau de plus en plus loin pour approvisionner leur refuge comme aux refuges de l'Envers des Aiguilles, de la Charpoua et de Robert Blanc.

Conclusion du Chapitre 7

Sur l'ensemble de la période étudiée (1999-2016), le nombre de nuitées dans les refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc est en nette diminution. Il est cependant difficile d'identifier la part des impacts du changement climatique dans cette diminution. En effet, dans certains cas et certaines années, lorsque les conditions pour la pratique de l'alpinisme sont particulièrement mauvaises, le changement climatique est effectivement un facteur qui contribue à expliquer la diminution parfois importante de la fréquentation des refuges. Cependant, ce constat ne peut pas être généralisé et n'est pas applicable à l'ensemble des refuges et pour toutes les saisons. Dans certains cas, des itinéraires très affectés par le changement climatique voient même leur fréquentation augmenter, notamment s'il s'agit d'itinéraires emblématiques. Inversement, des itinéraires peu affectés par le changement climatique perdent leurs popularités pour des raisons socio-culturelles (*cf.* : Article 3). Aussi, un travail plus approfondi serait nécessaire pour mieux identifier et comprendre les différents facteurs à l'origine de cette baisse de fréquentation et mieux évaluer l'incidence climatique. L'utilisation de capteurs pyroélectriques pour affiner l'étude de la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes et leur adaptation aux impacts du changement climatique sera discutée dans le chapitre suivant.

Chapitre 8. Mesure de la fréquentation des itinéraires d'alpinisme : quantification des flux, comportements adaptatifs et accidentologie

Dans ce chapitre, nous continuons d'étudier la fréquentation de la haute montagne afin d'identifier si les impacts du changement climatique en induisent une diminution, par des comportements adaptatifs de la part des alpinistes. Aussi, nous présenterons dans un premier temps, les méthodes et résultats relatifs à la mesure de la fréquentation par les alpinistes de quelques-uns des principaux sites d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc : l'accès à la Mer de Glace (depuis le train du Montanvers), l'arête est de l'aiguille du Midi (depuis le téléphérique du même nom) et la voie normale d'ascension du mont Blanc au niveau du Grand Couloir du Goûter. Pour ce dernier cas, la fréquentation sera aussi mise en perspectives vis à vis de l'accidentologie.

Au même titre que l'évolution du nombre de nuitées dans les refuges, l'objectif premier de ces mesures de fréquentation est d'évaluer si les impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme impliquent une variation de la fréquentation de la haute montagne au cours d'une saison estivale, comme conséquence de la prise en compte et de l'adaptation des alpinistes à l'évolution des conditions : les secteurs/périodes en mauvaises conditions pour l'alpinisme voient-ils leur fréquentation diminuer et à l'inverse, les secteurs/périodes les moins affectés voient-ils leur fréquentation augmenter au cours d'un été – comme le suggère la fréquentation des refuges (cf. : Chapitre 7) ? D'une manière générale, la quantification et qualification 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. En dehors de la fréquentation des refuges, il n'existe en effet aucune donnée à propos de la fréquentation d'un massif comme celui du Mont Blanc.

La fréquentation de plusieurs sites a ainsi été mesurée à l'aide de capteurs pyroélectriques de la société *Eco-compteur*. Les raisons qui nous ont poussé à choisir ces capteurs ainsi que les difficultés et limites rencontrées dans le cadre de leur installation/utilisation en haute montagne sont présentées dans l'Article 6 de ce manuscrit intitulé « Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques » et publié en 2017 dans la *Collection EDYTEM*. Les résultats obtenus grâce à ces capteurs seront présentés dans la deuxième section de ce chapitre.

Ensuite, le schéma de fréquentation identifié pour la voie normale d'ascension du mont Blanc (4809 m) nous mène à présenter dans une troisième section les résultats de l'étude d'accidentologie réalisée pour ce secteur. La prise en compte et l'adaptation des alpinistes aux conditions sera alors discutée.

Enfin, dans une quatrième section, nous présenterons le dispositif de comptage automatique des alpinistes par caméra en cours de développement avec pour objectif de s'affranchir des principales difficultés rencontrées avec les capteurs pyroélectriques.

8.1. Article 6 – Fiche synoptique

Mesure de la fréquentation d'itinéraires d'accès à la haute montagne dans le massif du Mont Blanc à l'aide de capteurs pyroélectriques

Measuring the attendance of access routes to high mountain in the Mont Blanc massif using pyroelectric sensors

Mourey J.¹ et Ravanel L.¹, 2017. *Collections EDYTEM*

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

Objectifs de la recherche

- Installer des capteurs pyroélectriques pour quantifier et qualifier (sens et horaires de passage) la fréquentation par les alpinistes des itinéraires d'accès à la haute montagne en période estivale.

Problématique

- Comment installer et faire fonctionner avec des erreurs de mesure acceptables un capteur pyroélectrique dans les conditions difficiles et variables de haute montagne ?

Méthodologie

- Installation de 3 capteurs pyroélectriques dans le massif du Mont Blanc, dans des conditions de terrain très diverses, au cours de l'été 2017 (juin à octobre).
- Développement de systèmes de fixation spécifiques aux conditions locales des itinéraires.
- Test et évaluation de différents réglages des capteurs à l'aide de contre-comptages manuels.

Principaux résultats

- La manière de se déplacer des alpinistes et surtout leur vitesse le long d'un itinéraire sont des paramètres déterminants pour la qualité des résultats ; trop lent, le capteur comptera plusieurs fois le même alpiniste, même avec un comptage unitaire.
- Des contre-comptages manuels sont indispensables pour vérifier la qualité des mesures effectuées.
- Les conditions dans lesquelles les capteurs ont été installés à l'aiguille du Midi et sur l'accès à la Mer de Glace ne permettent pas leur bon fonctionnement. Seul le capteur du Grand Couloir du Gôûter, positionné à un endroit où les alpinistes marchent à plat, présente des erreurs de mesure acceptables.

Rôle des auteurs

- J. Mourey : réalisation de l'ensemble des mesures de terrain, de l'analyse et de la discussion des données, rédaction de l'article.
- L. Ravanel (co-encadrant de thèse) : aide aux mesures de terrain et à la rédaction de l'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

*MEASURING THE ATTENDANCE OF ACCESS ROUTES TO HIGH MOUNTAIN
IN THE MONT-BLANC MASSIF USING PYROELECTRIC SENSORS*

JACQUES MOUREY, LUDOVIC RAVANEL

Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc, CNRS, 73360 Le Bourget-du-Lac Cedex.

Contact : jacques.mourey@etu.univ-smb.fr

RÉSUMÉ

L'évolution des milieux de haute montagne induite par le réchauffement climatique conduit à une modification de plus en plus importante des itinéraires d'alpinisme. Afin de mieux quantifier et caractériser la vulnérabilité de la pratique de l'alpinisme, des capteurs de fréquentation pyroélectriques ont été installés sur trois des principaux itinéraires d'accès à la haute montagne du massif du Mont-Blanc. Cependant, les conditions montagnardes spécifiques dans lesquelles ils ont été installés impliquent des limites et des contraintes d'utilisation importantes. Il est impératif d'en tenir compte pour le bon fonctionnement des capteurs et l'analyse des résultats. Dans notre cas, des systèmes de fixation adaptés aux spécificités locales du terrain ont dû être développés et les capteurs ont été réglés dans un mode de mesure particulier de comptage unitaire. Toutefois, les conditions de terrain dans lesquelles les capteurs ont été installés et le mode de déplacement spécifique des alpinistes induisent manifestation des erreurs de mesures importantes et variables. Aussi, même si des connaissances seront acquises à travers cette étude, la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes ne sera pas quantifiée et qualifiée avec la précision attendue.

MOTS-CLÉS : ALPINISME, MESURE DE FRÉQUENTATION, CAPTEURS PYROÉLECTRIQUES, MASSIF DU MONT BLANC.

ABSTRACT

Global warming effects on high mountain environments are more and more affecting mountaineering routes. In order to better quantify and characterise the vulnerability of mountaineering as a result of those effects, pyroelectric sensors have been installed at three of the main access to high mountain of the Mont-Blanc massif. However, due to the specific conditions in which they have been installed, important limits and constraints must be taken into account to insure the effectiveness of the sensors and the data analysis. In our case, the mounting systems had to be adapted to the local specificities of the terrain and the sensors had to be set in a particular measurement mode of unite counting. However, the specificities of the terrains in which they have been installed and the specific mountaineers' way of walking lead to important and variable measurement errors. Also, information will be acquired but the mountaineers flux will not be quantified and characterized with the expected accuracy.

KEYWORDS: MOUNTAINEERING, ATTENDANCE MEASUREMENT, PYROELECTRIC SENSORS, MONT BLANC MASSIF.

INTRODUCTION

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique (IPCC, 2014), la haute montagne alpine est l'objet de profondes modifications (Deline *et al.*, 2015 ; Zemp *et al.*, 2015). Il en résulte une modification des conditions de pratique de l'alpinisme, notamment à travers l'évolution des itinéraires de haute montagne (Ritter *et al.*, 2011 ; Temme, 2015 ; Mourey et Ravel, 2017).

Afin de quantifier et de qualifier la vulnérabilité – notamment économique – qui résulte de ces modifications récentes et d'étudier les stratégies d'adaptation développées par les alpinistes, il est nécessaire de mesurer la fréquentation de la haute montagne. Il

s'agit cependant d'un phénomène difficile à étudier. Les voies d'alpinisme sont très nombreuses, évolutives dans le temps et dans l'espace, tandis que le territoire de pratique est vaste et présente de très nombreux points d'entrée. D'un point de vue méthodologique, quantifier de manière fiable de telles fréquentations constitue un exercice complexe.

Une source de données permettant d'étudier cette fréquentation est le nombre de nuitées dans les refuges. Ceux-ci supportent et structurent une part importante de la pratique de l'alpinisme. Cependant, c'est une donnée qui présente de nombreux biais et limites : (i) elle ne

représente pas l'ensemble des alpinistes – ceux qui n'utilisent pas les refuges ou fréquentent la haute montagne à la journée ne sont pas comptabilisés –, (ii) elle est uniquement quantitative et ne permet pas de caractériser avec précision la fréquentation de la haute montagne, et (iii) les périodes au cours desquelles les refuges ne sont pas ouverts ne sont pas renseignées.

Aussi avons-nous choisi d'installer des dispositifs de mesure automatique : des éco-compteurs pyroélectriques. Ils sont autonomes et permettent de quantifier (nombre de passages) et de caractériser (sens et horaire de passage) en continu les flux d'alpinistes sur l'ensemble d'une période estivale, en des lieux donnés. Trois capteurs ont été installés pour l'été 2017 dans le massif du Mont Blanc sur trois des principaux itinéraires d'accès à la haute montagne : à 3 270 m d'altitude sur la voie normale d'ascension du Mont Blanc (face ouest de l'aiguille du Goûter), à 3 760 m sur l'arête est

de l'aiguille du Midi, et à 1 820 m sur l'accès à la Mer de Glace depuis le site touristique du Montenvers.

Cependant, les conditions de haute montagne dans lesquelles ces capteurs ont été installés (conditions météorologiques difficiles, terrains spécifiques, types et conditions de pratique particuliers) impliquent des difficultés parfois importantes. Cet article présente ces limites d'utilisation ainsi que les solutions qui ont été développées en conséquence.

Le fonctionnement des capteurs, les technologies qu'ils utilisent et leurs principales exigences d'installation seront d'abord présentés en mobilisant les retours d'expériences du Parc National des Écrins (PNE) et du Conservatoire d'Espaces Naturels de Haute-Savoie (ASTERS) sur les difficultés qui se posent en milieu montagnard. L'installation des trois capteurs dans le massif du Mont-Blanc et les difficultés spécifiques rencontrées seront ensuite détaillées.

UTILISATION DES CAPTEURS PYRO ET DALLE EN MONTAGNE

De nombreuses méthodes de comptage direct ou indirect existent pour étudier la fréquentation de sites naturels et présentent chacune des avantages et des limites (Watson *et al.*, 2000 ; Muhar *et al.*, 2002). Le choix de la méthode est lié à l'objectif de l'étude et aux moyens matériels et humains disponibles. Dans notre cas, les principales exigences étaient de disposer d'un capteur qui fonctionne en continu, quelles que soient les conditions météorologiques, qui soit autonome en énergie et qui puisse être installé dans des configurations de terrain variées, y compris difficiles.

Notre choix des capteurs développés par la société *Eco-Compteurs* a notamment été motivé par les retours d'expérience du PNE et d'ASTERS, qui réalisent des études de fréquentation depuis les années 1990 (PNE, 2011 ; ASTERS, 2015). Ces deux structures ont respectivement installé 17 et 10 stations de comptage et ces expériences ont mis en avant les contraintes additionnelles liées aux spécificités des milieux de moyenne montagne. La société *Eco-Compteurs* propose cinq capteurs différents : Pyro, Dalle, Zelt, Tubes et Citix. Parmi ceux-ci, seuls les capteurs Dalle et Pyro sont potentiellement adaptés à la mesure de la fréquentation piétonne estivale des sentiers de montagne. Les capteurs Zelt (détection de la signature magnétique des roues de vélos) et Tubes (détection des variations de pression) sont destinés aux vélos tandis que le Citix est destiné au comptage des foules en ville par une caméra infrarouge.

Les capteurs Dalle (Figure 1a) sont des dalles pneumatiques, enterrés entre 5 et 10 cm de profondeur dans le sol, sensibles aux variations de pression induites par le poids des personnes. En installant deux rangées de dalles, ils sont aussi en mesure de détecter le sens de passage. À l'inverse du Pyro, le Dalle est capable de différencier plusieurs personnes qui passent de front et peut donc être installée sur des sentiers larges. De plus, sa solidité et son caractère invisible la rendent peu

vulnérable au vandalisme et aux processus gravitaires à l'œuvre en montagne (chutes de pierres, avalanches).

En revanche, il est indispensable d'identifier une portion de sentier plane, d'une largeur d'au moins 80 cm et où il est possible de creuser sur environ 20 cm de profondeur. Or, en montagne, l'affleurement d'une dalle rocheuse, un pierrier, une zone humide, de grosses racines, un sentier étroit et en pente viennent régulièrement contrarier le choix de l'emplacement. De plus, par érosion et/ou tassement de la terre qui recouvre les dalles, celles-ci peuvent être mises à nu et être rapidement endommagées. Une flaque d'eau peut aussi se former, ce qui conduirait les randonneurs à contourner ou à enjamber le capteur. Aussi, pour s'assurer de leur bon fonctionnement, il est nécessaire de venir régulièrement sur le site pour vérifier leur état. Par exemple, dans le PNE, les gardes sont chargés de vérifier fréquemment que les dalles restent correctement enterrées. En outre, les capteurs peuvent être endommagés par le passage de véhicules (4x4, engin agricole, etc.). Il s'agit donc de trouver un lieu fréquenté uniquement par des piétons. Enfin, la neige est une autre limite d'utilisation des Dalle en montagne : elle empêche le transfert de la pression de la surface du sol jusqu'aux capteurs, y compris s'il n'y en a qu'une très faible épaisseur (3-5 cm).

Les capteurs Pyro (Figure 1b) combinent quant à eux une technologie pyroélectrique infrarouge passive à une lentille haute précision et permettent à la fois de détecter la chaleur émise par le corps humain et de déterminer le sens de passage avec une portée qui peut aller de 1 à 15 m. Le Pyro doit être installé entre 70 et 80 cm de hauteur (soit la hauteur moyenne des hanches), perpendiculairement au sens de passage. Cette technologie présente l'intérêt de ne pas être affectée par les conditions météorologiques, exigence fondamentale en milieu naturel. De plus, le capteur peut être installé dans de très nombreuses configurations de terrain (pente, escalier, pont)

et quelle que soit la nature du sol (pierrier, zone humide, etc.). En revanche, il doit être installé sur un support stable (élément du paysage, poteau, barrière, etc.) pour être constamment à la hauteur requise. De plus, le capteur n'étant pas capable de différencier deux personnes qui passent de front, il est indispensable de l'installer à un endroit où le cheminement contraint les randonneurs à passer les uns derrière les autres (sentier étroit, barrière, chicane, pont, etc.).

D'autre part, si la lumière du soleil ou des reflets touchent directement la lentille du capteur, celle-ci va chauffer et de nombreux passages inexistantes seront comptabilisés. Ce problème est d'autant plus important en montagne que la présence de neige et de lacs réfléchissant la lumière du soleil est fréquente. Dans les cas où il n'est pas possible d'adapter l'orientation du capteur à la course du soleil, il faut le reculer de 10 cm dans son support afin de l'abriter au maximum des rayons du soleil. La société *Eco-Compteur* déconseille également d'installer le capteur dans un support en métal pouvant chauffer au soleil.

Malgré sa petite taille (18 x 40 x 90 mm), le capteur Pyro doit être correctement camouflé dans l'environnement pour être le moins visible possible. Sinon, il attire la curiosité, ce qui conduit les passants à stationner à proximité, engendrant un sur-comptage. D'autre part, le PNE et ASTERS signalent plusieurs cas de vandalisme et de vol. La neige et le givre peuvent par ailleurs obstruer la lentille du capteur et ainsi gêner son fonctionnement. Si un opérateur passe plusieurs fois la main

devant la lentille pour la dégivrer, plusieurs passages seront comptabilisés. De plus, au-delà de 30 cm de neige au sol, le niveau de passage est rehaussé et le capteur pourra compter les deux jambes d'une même personne comme deux passages.

Ces deux types de capteur sont reliés à un boîtier Eco-Combo (Figure 2) dans lequel est logé le système d'enregistrement des données et la batterie au lithium. Les données issues du capteur sont enregistrées au choix toutes les 15 ou 60 minutes.

Le déchargement des données se fait soit par un opérateur sur le terrain via une connexion Bluetooth en utilisant l'application Eco-Visio fournie par le constructeur, soit par une télétransmission des données via une puce GSM. La longévité de la batterie est de 10 ans mais cette autonomie est réduite à 2 ans en cas de télétransmission des données. L'ensemble de ces matériels est étanche (norme IP 68) et résiste à des températures comprises entre -40°C et +40°C.

Ainsi, bien que les spécificités des milieux montagnards impliquent des contraintes fortes et des limites d'utilisation particulières dont il faut tenir compte pour le choix du capteur comme pour leur lieu d'installation, leur fonctionnement et leurs technologies les amènent à être adaptés à une utilisation en montagne. Leur utilisation par ASTERS et le PNE pour étudier la fréquentation des sentiers de randonnées en montagne appuie cette conclusion. Cependant, pour leur première installation en haute montagne, des difficultés et des limites d'utilisation majeures et inédites ont été rencontrées.



Figure 1 - Deux capteurs capables de mesurer la fréquentation de sentiers de montagne. A) Mise en place d'un capteur Dalle (photo V. Fourcaudot). B) Capteur Pyro (photo G. Garcel).

MESURER LA FRÉQUENTATION DE LA HAUTE MONTAGNE PAR LES ALPINISTES : DES LIEUX D'IMPLANTATION TRÈS CONTRAINTS ET DES CONDITIONS DE FRÉQUENTATION SPÉCIFIQUES

Accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers : des échelles sur des dalles rocheuses lisses et raides

Même s'il est situé à une altitude modeste, l'accès à la Mer de Glace ($\approx 1\,700$ m) et à l'ensemble de son bassin (secteurs de la Charpoua, de Talèfre, de Leschaux, du Requin et de l'Envers des Aiguilles) depuis le Montenvers (1913 m) présente des conditions qui le rat-

tachent aux milieux de haute montagne. Il intègre un dénivelé d'échelles de 95 m permettant de franchir des dalles rocheuses lisses et raides qui apparaissent au fur et à mesure de la perte d'épaisseur du glacier (Mourey et Ravanel, 2017).



Figure 2 - Capteur Pyro sur l'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers. À droite : boîtier en plastique dans lequel l'Eco-Combo (a) et le capteur Pyro (b) ont été installés. Le boîtier constitue une protection efficace contre le soleil et le vandalisme.

Le type de terrain est le premier critère à prendre en compte. Les dalles rocheuses rendent l'enfouissement d'un capteur Dalle impossible, imposant l'utilisation du capteur Pyro. Concernant la position du capteur, cet itinéraire étant très fréquenté en été, le sentier et les échelles ont été doublés depuis les années 1990. Il en résulte que tous les alpinistes ne passent pas exactement au même endroit, sauf sur un court passage entre deux tronçons d'échelles. Par chance, ce secteur présente des conditions favorables à l'installation et

au bon fonctionnement du capteur : le sentier est peu incliné, le passage est étroit – interdisant le passage de deux personnes de front –, et le capteur peut être installé entre 70 et 80 cm de hauteur grâce à la présence d'un rebord rocheux (Figure 2). En revanche, il a été impossible de le camoufler dans un élément du paysage (bloc rocheux, cairn, végétation). Aussi a-t-il été installé avec son Eco-Combo dans un boîtier en plastique fermé mais proéminent, qui protège le capteur du soleil et limite le risque de vandalisme.

Arête est de l'aiguille du Midi : un itinéraire qui évolue avec l'enneigement

L'arête est de l'aiguille du Midi est une arête de neige située entre 3 650 et 3 760 m d'altitude dont la morphologie évolue tout au long de l'année et notamment l'été avec une alternance entre des périodes de mauvais temps (accumulation de neige) et de beaux temps (fonte). Elle permet d'accéder au refuge des Cosmiques (3 613 m), à des itinéraires très fréquentés (traversée de la Vallée Blanche, Mont Blanc du Tacul, Mont Blanc, arête des Cosmiques) et, plus généralement, à un large secteur depuis le col du Midi jusqu'à la frontière italienne.

Depuis quelques décennies, son niveau général semble s'abaisser progressivement. Les périodes de mauvais temps tendent à la rendre étroite et peuvent conduire à une modification importante de sa morphologie. Par conséquent, même s'il s'agit d'un passage obligatoire pour les alpinistes, la position et le niveau de la trace peuvent varier de nombreuses fois dans l'été et parfois très rapidement. Aussi, le système de fixation du capteur Pyro – l'omniprésence de la neige interdisait l'utilisation du capteur Dalle – doit prendre en compte cette variabilité et être facilement adaptable pour le maintenir dans des conditions de fonctionnement optimales grâce à un suivi régulier.

Bien que cela ne soit pas recommandé par *Eco-Compteur*, le capteur a été fixé dans une cellule en métal, peinte en blanc (Figure 3). À cette altitude et avec un vent quasiment permanent, la température reste suffisamment basse pour que celle du métal n'en-

genre pas de sur-comptage. Cette cellule a ensuite été fixée à un poteau d'une longueur de 250 cm enfoncé pour moitié dans la neige de l'arête à l'aide d'une sonde à vapeur. Des ailettes soudées sur le poteau évitent qu'il ne tourne sur lui-même. L'Eco-Combo a quant à lui été placé dans une boîte en plastique enfoui à quelques dizaines de centimètres dans la neige.

Ce système de fixation permet de modifier facilement la hauteur et l'orientation du capteur au fur et à mesure de l'évolution de l'arête. Par exemple, lors de l'installation du capteur le 20 juin 2017, le poteau était enfoncé sur environ 1 m de profondeur et le capteur Pyro positionné à 80 cm de hauteur (Figure 3a). Cinq jours plus tard, le poteau n'était déjà plus enfoncé dans la neige que sur 50 cm et la boîte était complètement abaissée. Le niveau du passage des alpinistes s'était abaissé et le capteur s'est alors retrouvé trop haut (Figure 3b). L'ensemble du dispositif a donc dû être réinstallé et réglé à nouveau : le poteau a été enfoncé au maximum dans la glace – des températures chaudes étant prévues pour les jours suivants – et le capteur positionné au plus bas afin qu'il soit en position *ad hoc* le plus longtemps possible et qu'il n'ait pas à être repositionné trop vite (Figure 3c). De plus, la chute de neige qui s'est produite le 25 juin, pourtant faible, avait obstrué les lentilles du capteur. Enlever la neige avec la main induisant un sur-comptage, il est préférable d'utiliser un outil (tournevis, brosse, etc.) en faisant attention de ne pas endommager les cellules du capteur.

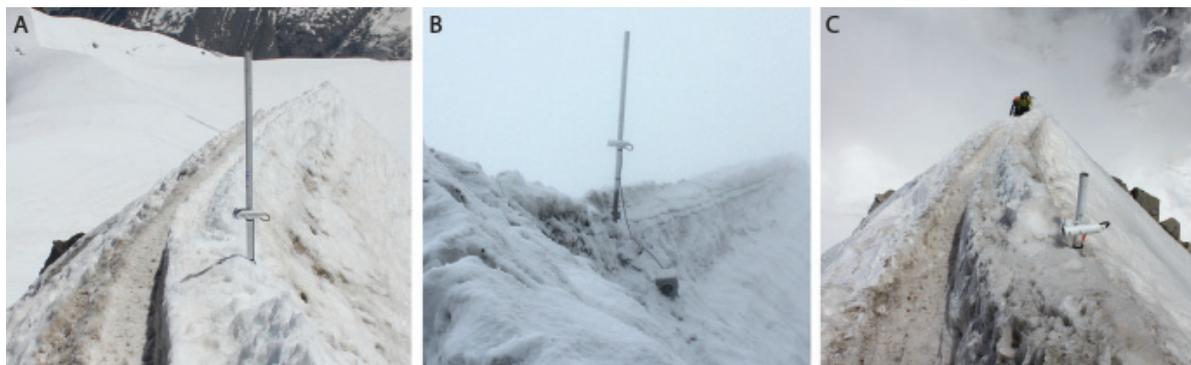


Figure 3 - Le capteur Pyro de l'aiguille du Midi : (a) installation du capteur le 20 juin 2017 ; (b) le 25 juin, le niveau de l'arête avait perdu environ 60 cm et le poteau était susceptible de basculer ; la boîte était déneigée ; (c) le poteau et le capteur ont été réinstallés le 25 juin.

Entre le 25 juin et le 06 août, le dispositif a dû être repositionné à cinq reprises en raison de la fonte de l'arête et une autre fois suite à une importante chute de neige qui a enseveli le capteur sous un mètre de neige fraîche. Six opérations de maintenance ont donc été nécessaires, en seulement 42 jours.

Face à ce besoin d'un entretien et d'un suivi très régulier du capteur, le personnel du téléphérique de

l'aiguille du Midi, celui du refuge des Cosmiques et des guides de haute montagne ont été sollicités pour vérifier l'état et la position du capteur quasi quotidiennement. En outre, une des webcams de l'aiguille du Midi permet de visualiser l'arête et son évolution et ainsi d'évaluer à distance le besoin éventuel d'un repositionnement.

Voie normale d'ascension du Mont-Blanc par le Goûter : un itinéraire à fort enjeu touristique et économique

Un dernier capteur a été installé le 23 juin 2017 sur l'itinéraire d'accès au refuge du Goûter (3 817 m) sur la voie normale d'accès au sommet du Mont Blanc, à 3 270 m d'altitude. C'est un secteur très fréquenté qui cristallise beaucoup d'enjeux touristiques et économiques, notamment en raison de la traversée du couloir du Goûter, dangereuse et accidentogène (chutes de pierres très fréquentes ; Alpes Ingé, 2012 ; PGHM, 2012). Pour des raisons d'enneigement fréquent et de l'impossibilité d'enterrer un capteur Dalle, un capteur Pyro a là aussi été choisi.

Le secteur étudié correspond à un versant raide, à la roche très fracturée et instable. Aussi, la difficulté principale a été de trouver un endroit où le terrain est suffisamment stable pour y installer le capteur et de trouver le moyen de le protéger du rayonnement solaire. Au niveau d'un passage où le sentier est étroit (1,5 m environ) et où les alpinistes peuvent difficilement passer à deux de front, un espace entre deux blocs stables a permis d'installer le capteur, préalablement inséré dans un tube métallique. Celui-ci a été scellé à l'aide de mortier

(Figure 4). Ce dispositif permet de protéger le capteur des rayons du soleil et de le dissimuler pour limiter tout risque de vandalisme.



Figure 4 - Le capteur Pyro, camouflé et scellé dans une anfractuosité, sur le bord de l'itinéraire d'accès au refuge du Goûter. Un regard avec l'Eco-Combo est installé dans les rochers en amont.

RÉGLAGE DU CAPTEUR ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES ACQUISES

Bien que toutes les exigences relatives à l'installation des capteurs édictées par le constructeur aient été prises en compte pour un fonctionnement optimal (installation entre 70 et 80 cm de hauteur, perpendiculairement au sens de passage, et avec les lentilles du capteur

protégées du soleil), des contre-comptages manuels ont été réalisés. Les deux premiers ont démontré le caractère aberrant des résultats avec un sur-comptage massif. Les capteurs étaient alors réglés sur un mode classique de fonctionnement avec une portée standard

de 4 m, une temporisation – durée des séquences de mesures – de 400 ms et l'option *Groupe* activée. Cette dernière augmente la sensibilité du capteur et permet de différencier plusieurs personnes très proches les unes des autres. À l'aiguille du Midi, sur une période de 2 h, 118 passages ont ainsi été enregistrés par le capteur alors que seules 62 personnes étaient réellement passées, soit un sur-comptage de 90%. Sur l'accès à la Mer de Glace, toujours sur une période de 2 h, 116 passages ont été enregistrés par le capteur alors que 74 personnes étaient réellement passées, soit un sur-comptage de 56%.

Afin de réduire ces erreurs de comptage, et compte tenu du fait que les sentiers sont très étroits (1,5 m environ), la sensibilité du capteur a été réduite, à travers deux paramètres : la portée du capteur et l'algorithme de calcul. Plus la portée du capteur est longue, plus le capteur est sensible, et favorise un sur-comptage. Cette portée a donc été réduite au minimum (1 m). Concernant l'algorithme de calcul, l'option *Groupe* a été désactivée car elle conduisait le capteur à compter plusieurs fois une même personne se déplaçant lentement.

Ces premiers réglages n'ont pas permis d'obtenir une amélioration significative des mesures. Un nouveau réglage a donc été nécessaire, qui a consisté à installer un mode de *Comptage unitaire*. Ce mode de fonctionnement ne comptabilise qu'un seul passage par séquence d'enregistrement. Pour passer d'une séquence à une autre, il faut une période d'inactivité d'au moins 400 millisecondes, qui correspond, dans ce système de réglage, à la temporisation. Cela doit permettre de ne pas compter plusieurs fois une même personne. La période d'inactivité peut être réglée entre 400 et 5000 ms. Si la période est trop longue, le risque est de manquer une personne marchant vite et/ou très proche de la précédente. Dans notre cas, plusieurs réglages de temporisation différents ont été testés en fonction des spécificités de chacun des sites. Cependant, même si ce nouveau réglage a permis de diminuer sensiblement les erreurs de mesure, des contre-comptages manuels ont montré que les marges d'erreurs restent importantes et très variables (Tableau 1).

Ces erreurs de mesures sont principalement liées au mode de déplacement lent et discontinu (pauses nombreuses) des alpinistes, qui les amène à rester trop longtemps devant les capteurs. De plus, les vitesses de progression sont très variables d'un alpiniste à un autre et en fonction du sens de passage (montée/descente), ce qui rend le réglage de la temporisation difficile. Si cette dernière est importante, le sur-comptage lié à la lenteur des alpinistes sera limité, en revanche, elle induira un sous-comptage des passages rapides ou proches les uns des autres, et inversement pour une temporisation faible.

Les conditions dans lesquelles opèrent les capteurs expliquent également une part des erreurs de mesure. Pour le capteur de l'aiguille du Midi, l'évolution de la morphologie de l'arête, par accumulation ou fonte de

la neige, entraîne une modification de la position du capteur par rapport au niveau de passage des alpinistes. Il en résulte que le capteur n'est pas toujours dans la bonne position pour effectuer une mesure de qualité, ce qui contribue à expliquer la variabilité des erreurs de mesure.

Pour l'accès à la Mer de Glace, le capteur a été installé au seul endroit qui réunit l'ensemble des conditions indispensables à son fonctionnement. Cependant, comme il avait été impossible de le camoufler, les alpinistes ont tendance à s'appuyer sur la boîte dans laquelle il est installé ou à regarder à l'intérieur par curiosité (Figure 2) et il arrive aussi que des personnes s'arrêtent devant le capteur, par fatigue, en raison d'un bouchon, ou pour prendre une photo, ce qui peut engendrer un sur-comptage parfois important.

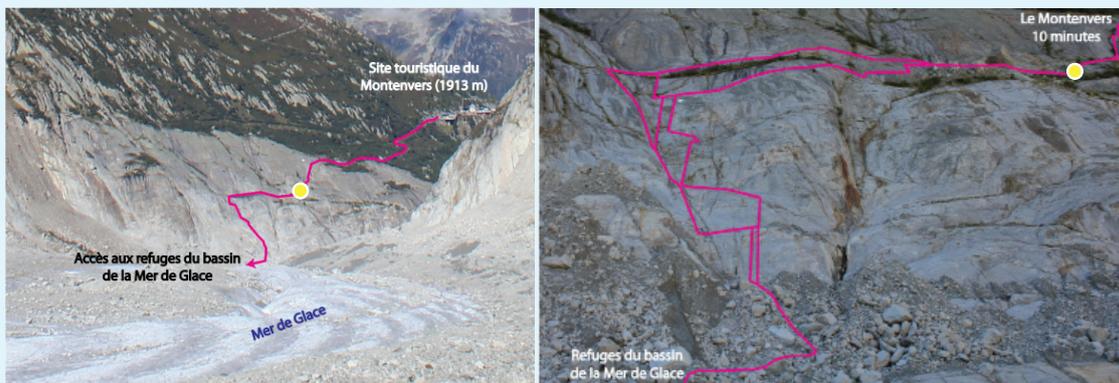
Pour ces deux capteurs, les erreurs de mesures sont donc directement liées au terrain et au mode de déplacement spécifique des alpinistes. Aussi semble-t-il difficile d'améliorer significativement les mesures.

En revanche, pour le capteur du Goûter, les marges d'erreurs sont plus faibles et moins variables (Tableau 1). Cela est principalement lié au fait qu'il est mieux camouflé et que sa position et celle du sentier sont stables. De plus, le capteur est situé à un endroit où le sentier est plan : les alpinistes ne sont donc pas encordés et adoptent un mode de déplacement classique. Des contre-comptages manuels supplémentaires seront néanmoins nécessaires pour préciser la marge d'erreur.

Enfin, une limite importante quant à la qualité des données doit être soulignée : le système d'enregistrement des données sur un pas de temps de 15 minutes ne permet pas une analyse très fine des données. Si chacun des passages détectés par le capteur était enregistré individuellement, les mesures séparées par un intervalle de temps trop court pour correspondre à deux personnes différentes pourraient ainsi être supprimées, ce qui permettrait de réduire considérablement l'erreur. Un développement en ce sens pourrait être attendu du constructeur.

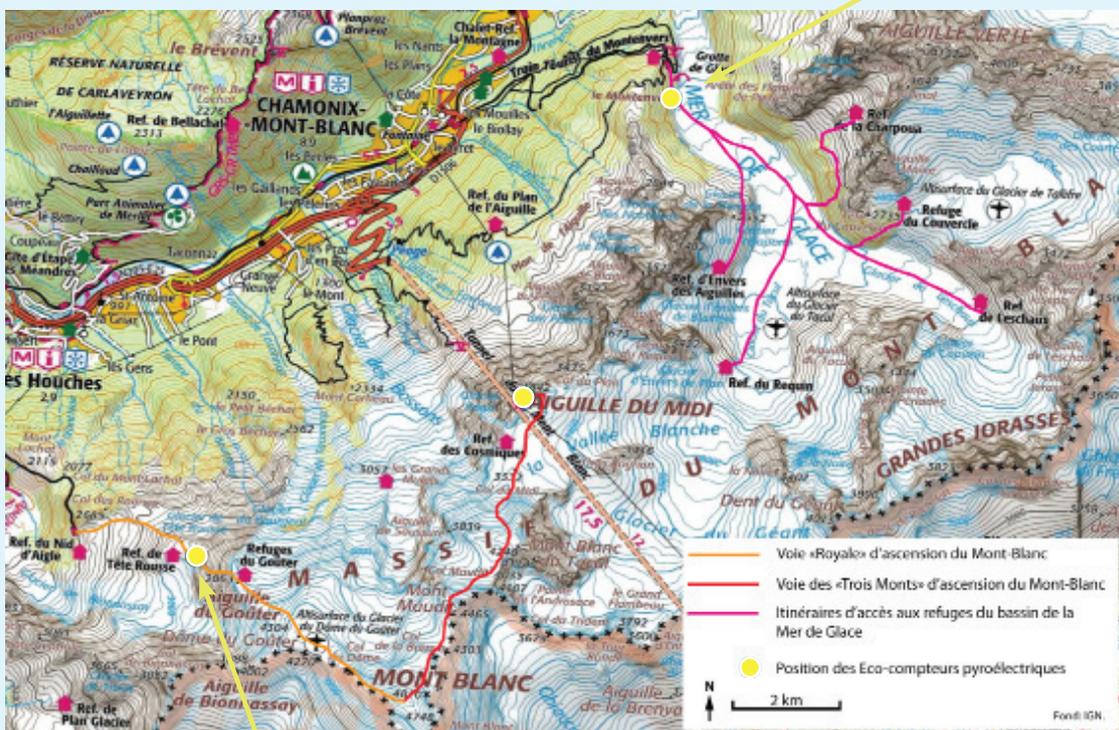
Capteur	Date	Temps de contre-comptage	Erreur	Erreur moyenne
Aiguille du Midi	30/06/2017	1h45	+22 %	-8 %
	13/07/2017	1h30	-36 %	
	22/07/2017	2h15	-10 %	
Mer de Glace	30/06/2017	2h30	+10 %	+27 %
	12/07/2017	2h15	+74 %	
	02/08/2017	3h00	+24 %	
Goûter	27/06/2017	2h00	+4 %	-4 %
	03/07/2017	1h45	-17 %	
	11/07/2017	0h45	+5 %	

Tableau 1 - Erreurs calculées pour chaque capteur réglé en mode comptage unitaire, sur 3 périodes de contre-comptage.



Accès à la Mer de Glace depuis le Montanvers

Localisation des sites de mesure de fréquentation d'itinéraire par capteurs pyroélectriques



Voie normale d'ascension du Mont-Blanc



CONCLUSION

Bien que les capteurs Pyro et Dalle aient été conçus pour une utilisation en milieux naturels et qu'ils fonctionnent correctement pour mesurer la fréquentation sur des sentiers de randonnées en moyenne montagne, leur installation en haute montagne suppose une série de contraintes lourdes et de limites d'utilisation supplémentaires. Les spécificités du terrain et l'organisation spatiale des itinéraires d'alpinisme contraignent fortement le choix du capteur et son site d'installation, alors que les alpinistes ont un mode de déplacement lent, discontinu et penché en avant. Il est donc indispensable d'adapter les systèmes de fixation et les réglages des capteurs pour que les conditions indispensables à leur bon fonctionnement soient réunies.

Cependant, les réglages réalisés n'ont pas permis d'adapter le fonctionnement des capteurs Pyro aux conditions dans lesquelles ils fonctionnent et les erreurs de mesures restent importantes et variables,

notamment pour 2 des 3 capteurs. D'autre part, cette méthode présente le désavantage d'être très chronophage, alors même que les capteurs sont censés être « autonomes ». En effet, le nombre de journées de terrain nécessaires pour entretenir les capteurs, les régler et calculer leur marge d'erreur s'est avéré beaucoup plus important que prévu. Entre le 20 juin et le 2 août 2017, 18 journées de terrain ont été nécessaires.

Toutefois, si la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes ne sera pas quantifiée et qualifiée avec la précision attendue, un ordre de grandeur quant au nombre d'alpinistes qui fréquentent chacun des trois sites ainsi que les périodes de la saison et de la journée durant lesquelles ils accèdent à la haute montagne sont tout de même des données inédites qui contribueront à mieux évaluer la sensibilité de l'alpinisme aux effets du changement climatique.

Remerciements

Les auteurs remercient le PNE et ASTERS pour nous avoir fait part de leur expérience dans l'installation de capteurs Éco-compteurs en montagne et la Compagnie du Mont Blanc pour avoir facilité l'accès aux sites d'étude. L'instrumentation présentée constitue une action du projet Interreg V-A France-Italie ALCOTRA 2014-2020 n°1614 AdaPT Mont-Blanc et a disposé du support du projet Interreg V-A France-Italie ALCOTRA 2014-2020 n°342 PrévRisk Haute Montagne.

BIBLIOGRAPHIE

- ALPES INGÉ., 2012. Couloir du Goûter - Suivi et analyse des chutes de blocs et de la fréquentation pendant l'été 2011. Rapport final, Fondation Petztl, 37 p.
- ASTERS, 2015. Etude de fréquentation - Réserves naturelles nationales du massif des Aiguilles Rouges : Aiguilles Rouges, Carlaveyron et Vallon de Bérard. ASTERS. Rapport Annuel, 9 p.
- DELINÉ P., GRUBER S., DELALOYE R., FISCHER L., GEERTSEMA M., GIARDINO M., HASLER A., KIRKBRIDE M., KRAUTBLATTER M., MAGNIN F., MCCOLL S., RAVANEL L., SCHOENEICH P., 2015. Ice loss and slope stability in high-mountain regions. In Haeberli W., Whiteman C., Shroder J.F., Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters, Elsevier Science, Saint-Louis, 521-561.
- IPCC, 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, 169 p.
- MOUREY J., RAVANEL L., 2017. 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. *Journal of Alpine Research - Revue de Géographie Alpine*, 105-4. <http://rga.revues.org/3780>.
- MUHAR A., ARNBERGER A., BRANDENBURG C., 2002. Methods for Visitor Monitoring in Recreational and Protected Areas: An Overview. Monitoring and Management of Visitor Flows in Recreational and Protected Areas. Conference Proceedings, Vienna, 6 p.
- PGHM, 2012. Accidentologie dans le couloir du Goûter et sur la voie normale au Mont-Blanc, Étude des secours organisés sur l'itinéraire du glacier de Tête Rousse au refuge du Goûter, entre 1990 et 2011. Fondation Petztl, 28 p.
- PNE, 2011. Restitution des résultats d'enquête. Décembre 2011. Note de Synthèse. Parc National des Ecrins, 166 p.
- RITTER F., FIEBIG M., MUHAR A., 2011. Impacts of global warming on mountaineering : a classification of phenomena affecting the alpine trail network. *Mountain Research and Development*, 32, 4-15.
- TEMME A., 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.
- WATSON A.E., COLE D.N., TURNER D.L., REYNOLDS P.S., 2000. Wilderness recreation use estimation: a handbook of methods and systems. USDA, General Technical Report RMRS-GTR-56, 208 p.
- ZEMP M., HOLGER F., GÄRTNER-ROER I., NUSSBAUMER S., HOELZLE M., PAUL F., HAEBERLI W., DENZINGER F., AHLSTRØM A.P., ANDERSON B., BAJRACHARYA S., BARONI C., BRAUN L.N., CÁCERES B.E., CASASSA G., COBOS G., DÁVILA L.R., DELGADO GRANADOS H., DEMUTH M., ESPIZUA L., FISCHER A., FUJITA K., GADEK B., GHAZANFAR A., HAGEN J.O., HOLMLUND P., KARIMI N., LI Z., PELTO M., PITTE P., POPOVNIK V., PORTOCARRERO C.A., PRINZ R., SANGEWAR C.V., SEVERSKIY I., SIGURÐSSON O., SORUCO A., USUBALIEV R., VINCENT C., 2015. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61 (228): 745-762.

8.2. Résultats pour la Mer de Glace et l'aiguille du midi

Malgré des erreurs de mesures importantes et aléatoires pour les capteurs de la Mer de Glace et de l'aiguille du Midi, cette section présente les résultats obtenus sur ces deux sites. Ils sont difficilement utilisables mais offrent toutefois une expérience de terrain intéressante et une première estimation de la fréquentation notamment pour le cas de la Mer de Glace. Les résultats du capteur du Goûter, de bonne qualité, seront présentés dans la Partie IV. Il est important de préciser que les capteurs mesurent un nombre de passages (*i.e.* le nombre de fois qu'une personne passe devant le capteur) et non un nombre d'individus.

8.2.1. Fréquentation du bassin de la Mer de Glace en 2017 et 2018

Sur l'itinéraire d'accès à la Mer de Glace depuis la gare supérieure du train du Montenvers (*cf.* : Encadré dans l'Article 6), un capteur pyroélectrique a été installé lors des étés 2017 et 2018. Cet itinéraire est notamment emprunté par les alpinistes qui se rendent dans les 5 refuges du bassin de la Mer de Glace (*cf.* : Article 2) qui donnent accès à des sommets emblématiques de l'alpinisme tel que la face nord des Grandes Jorasses (4208 m) et l'aiguille Verte (4122 m). Les paramètres et chiffres de mesures clés sont présentés dans le Tableau 8.1.

	2017				2018		
Période de comptage	20/06 – 30/09				27/06 – 24/09		
Réglage du capteur	Comptage unitaire tempo. 700ms				Comptage unitaire tempo. 700 ms		
					Sens de passage		
Erreur (en %)	30/06	12/07	02/08	RMSE	04/08	29/08	RMSE
	+10	+74	+24	+45	+17	+35	+27
Nbre de passages sur l'ensemble de la période	22 675 ± 10 203				27 541 ± 7 436		
					Montée : 12 668 ± 3 420		
					Descente : 14 873 ± 4 015		
Moyenne journalière	220 ± 99				306 ± 82		
Nbre de passages par mois	Juil.	Août	Sept.		Juil.	Août	Sept.
	8 480	8 282	3 096		10 626	9 857	5 894
	± 3 816	± 3 726	± 1 393		± 2 869	± 2 661	± 1 590
Jours de plus haute fréquentation	Sam. 24 Juin : 628 ± 282				Mer. 11 juillet : 601 ± 54		
	Mer. 21 Juin : 492 ± 221				Dim. 12 août : 549 ± 49		
	Dim. 16 Juillet : 467 ± 210				Dim. 08 juillet : 531 ± 47		

Tableau 8.1. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteurs pyroélectrique sur l'accès à la Mer de Glace lors des étés 2017 et 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors des contre-comptages manuels.

La variabilité des erreurs de mesure au sein d'une même année est liée aux modalités de déplacement des alpinistes (cf. : Article 6 ; Fig. 8.1) et d'une année sur l'autre, à la position du capteur qui n'est pas exactement la même : le capteur ayant été démonté, il n'a pas été repositionné de façon strictement identique et présente donc de légères mais déterminantes variations de hauteur et d'orientation qui font varier les mesures. Les incertitudes associées aux mesures de 2017 et 2018 sont donc très variables (Tab. 8.1) et rendent l'analyse et l'interprétation des résultats difficiles et limitées.



Figure 8.1. Alpinistes faisant une pause au niveau du capteur. Leurs déplacements/stationnements devant le capteur engendrent un surcomptage important.

Si l'on considère que les facteurs qui impliquent ces erreurs restent stables sur l'ensemble de l'été (modalités de déplacement des alpinistes notamment), ces chiffres offrent tout de même, sinon une première estimation, au moins un ordre de grandeur de la fréquentation du secteur. (Fig. 8.2-A). De plus, le nombre de passages peut être converti en un nombre de personnes. En effet, la fréquentation du secteur étant mesurée à son point d'entrée qui correspond également à son point de sortie principal, le nombre de personnes correspond approximativement au nombre de passages divisé par deux, soit $11\,337 \pm 5\,101$ personnes en 2017 et $13\,770 \pm 3\,717$ personnes en 2018. À titre de comparaison, en 2017, les 5 refuges du bassin de la Mer de Glace ont totalisé 5 185 nuitées. Bien que les données de fréquentation des refuges présentent elles aussi de nombreux biais (cf. : Chapitre 7), ces données suggèrent que la moitié des alpinistes fréquentant le secteur sont présents à la journée, principalement pour faire des écoles de glace. L'autre moitié se rendrait donc dans les refuges pour réaliser des courses d'alpinisme classique. Ce constat illustre la nécessité d'obtenir des données de fréquentation des refuges plus précises avec notamment des nombres mensuels ou idéalement journaliers de nuitées permettant une comparaison beaucoup plus précise avec les chiffres de passages pour une meilleure compréhension de la fréquentation sur l'ensemble du secteur (fréquentation moyenne journalière des écoles de glace, réorganisation spatiale de la pratique en fonction des conditions, etc.)

De plus, la distribution des passages au cours d'une journée permet d'identifier un schéma de fréquentation de type pendulaire, qui est le même pour les deux étés (Fig. 8.2-B), avec deux pics de fréquentation : un premier le matin entre 9 et 11 h qui correspond aux alpinistes qui se rendent dans le bassin et un second, entre 15h et 17 h qui correspond aux alpinistes qui remontent du glacier en

direction du Montenvers. Ce résultat est cohérent avec l'organisation de la pratique dans ce secteur, basée sur deux activités principales : (i) les écoles de glace réalisées à la journée depuis le Montenvers avec un premier passage le matin à la descente et un second passage en fin d'après-midi à la montée et, (ii) les courses d'alpinisme classique réalisées en dormant en refuge avec par conséquent un premier passage devant le capteur en matinée pour rejoindre le refuge et un second passage le lendemain, en général dans l'après-midi, après avoir fait une ascension.

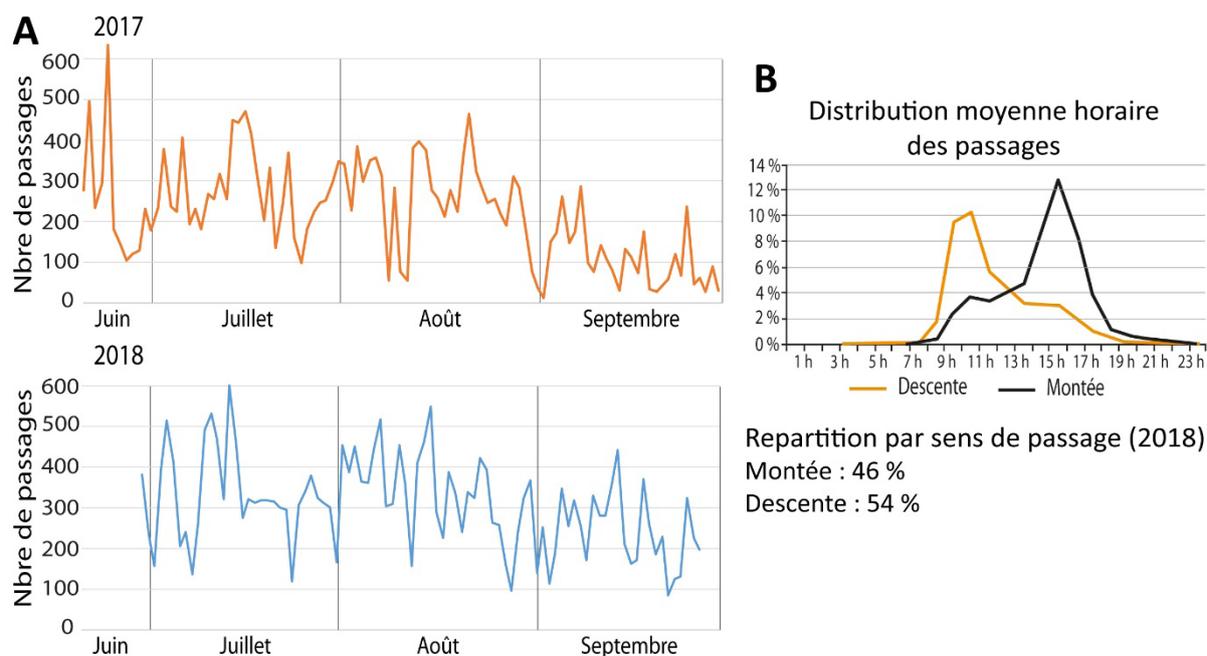


Figure 8.2. Fréquentation de l'itinéraire d'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers. A. Fréquentation journalière au cours des étés 2017 et 2018. B. Distribution moyenne horaire de la fréquentation au cours de l'été 2018.

La répartition par sens de passage, avec 4 % de passages en plus à la descente qu'à la montée est difficile à expliquer notamment parce que cette différence est largement inférieure à l'incertitude de mesure.

Les résultats obtenus au cours des étés 2017 et 2018 offrent une première estimation de la fréquentation qui pourra éventuellement être utile à certains acteurs touristiques de la vallée de Chamonix et notamment au Service des Pistes et Sentiers de la CCVCMB car aucun chiffre n'était disponible jusqu'ici. Cependant, leur précision reste largement insuffisante pour remplir l'objectif poursuivi dans ce travail.

8.2.2. La fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi

L'arête est de l'aiguille du Midi est l'un des points d'accès majeur à la haute montagne pour les alpinistes. Elle permet de réaliser de nombreuses courses emblématiques, classiques et très fréquentées du massif. On peut notamment citer l'ascension du mont Blanc par les trois Monts, de l'arête des Cosmiques et de la voie Rébuffat-Bacquet en face sud de l'aiguille du Midi. Toutefois, les

difficultés d'installation et la nécessité de se rendre sur site très fréquemment ont conduit à n'installer le capteur que durant le seul été 2017 (Tab. 8.2).

		2017			
Période de comptage		20/06 – 15/09			
Réglage du capteur		Comptage unitaire tempo. 700 ms			
Erreur (en %)	30/06	13/07	22/07	RMSE	
		+22	-36	-10	25
Nbre de passages sur l'ensemble de la période		33 847 ± 8 461			
Moyenne journalière		385 ± 96			
Nbre de passages par mois	Juil.	Août	Sept.		
	11 688 ± 2 922	12 875 ± 3 218	2 209 ± 552		
Jours les plus fréquentés de la saison	Jeu. 22 Juin : 1 084 ± 271				
	Ven. 23 Juin : 948 ± 246				
	Jeu. 13 Juillet : 941 ± 235				

Tableau 8.2. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteur pyroélectrique sur l'arête de l'aiguille du Midi lors de l'été 2017. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors des contre-comptages manuels.

Dans le cas de l'aiguille du Midi, les erreurs de mesure sont également très variables, principalement en raison des variations rapides et souvent importantes du niveau de l'arête de neige. Ces variations ont été appréciées en utilisant le poteau sur lequel était fixé le capteur, à la manière d'une sonde d'ablation. Entre le 20 juin et le 22 juillet, l'arête a ainsi perdu 3,10 m d'épaisseur, avant de remonter de 1,70 m entre le 22 et le 29 juillet à l'occasion d'une période de mauvais temps. Aussi, le capteur a-t-il été retrouvé à plusieurs reprises soit complètement enseveli sous la neige (Fig. 8.3) soit beaucoup trop haut, suite à l'abaissement du fil de l'arête par fonte, soit du mauvais côté de la trace. Par conséquent, plusieurs périodes de fréquentations très faibles voire nulles comme fin juillet (Fig. 8.4) ne sont pas liées à une absence d'alpinistes mais à un mauvais positionnement du capteur.

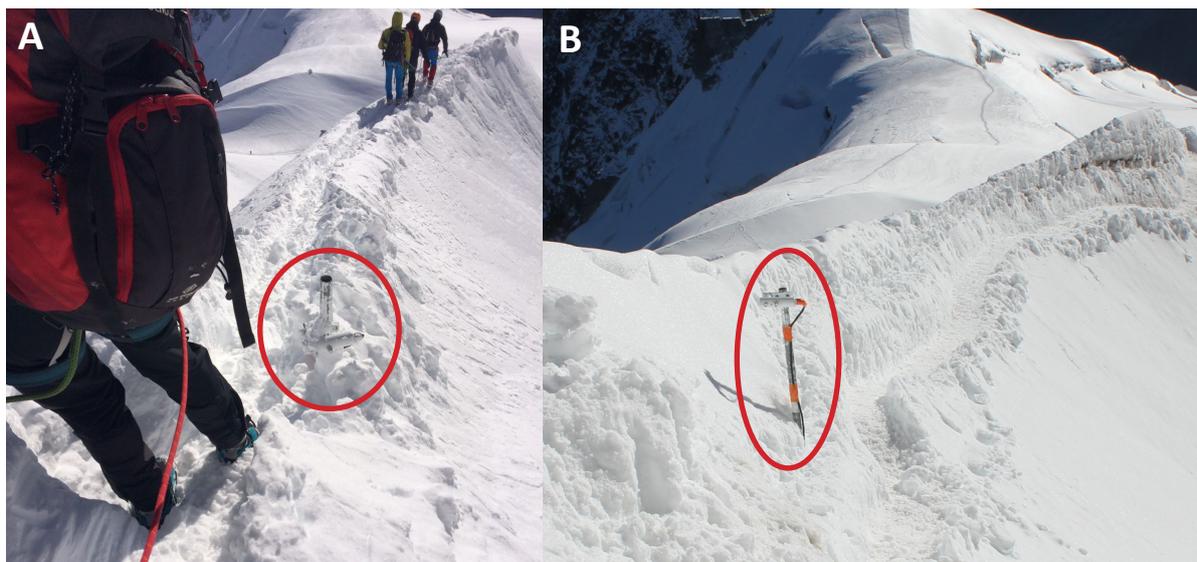


Figure 8.3. Suite à une chute de neige importante, le capteur a été retrouvé (A) presque complètement enseveli sous la neige (12/08/2017) – outre le fait qu’il risque d’être endommagé par les alpinistes, il est loin d’être à la hauteur requise (70 – 80 cm) pour effectuer une mesure de qualité – soit (B) du mauvais côté de la trace .

Inversement, la position du capteur peut aussi entraîner de très nombreux sur-comptages. Si le capteur est mal positionné en hauteur, il peut compter jusqu’à 6 passages (détection des bras, des mains, des jambes, du torse, etc.) pour une seule personne. Une autre possibilité, identifiée au cours de l’été, tient au fait que le poteau sur lequel est fixé le capteur peut ne pas être bien maintenu dans la neige et bouger, notamment à cause du vent. Dans ce cas, pour chaque mouvement du poteau, le capteur va enregistrer un à deux passages. On peut d’ailleurs présumer que le pic de fréquentation de fin juin soit lié à un tel phénomène (Fig. 8.4), le poteau ayant été retrouvé le 25 juin presque complètement hors de la neige, et donc très instable (cf. : Fig. 3, Article 6). De plus, une erreur de notre part a été de réaliser les contre-comptages manuels après le repositionnement du capteur, ce dernier n’étant souvent plus du tout dans la bonne position à notre arrivée sur place. On peut donc estimer que les erreurs de mesures présentées ci-avant ne sont pas représentatives de l’ensemble de la période de mesure et sont sous-estimées, ne représentant que les erreurs de mesure lors des périodes où le capteur est bien positionné. Ainsi, les résultats obtenus au cours de l’été 2017 présentent une incertitude de mesure beaucoup trop importante et variable pour réaliser une analyse pertinente des données.

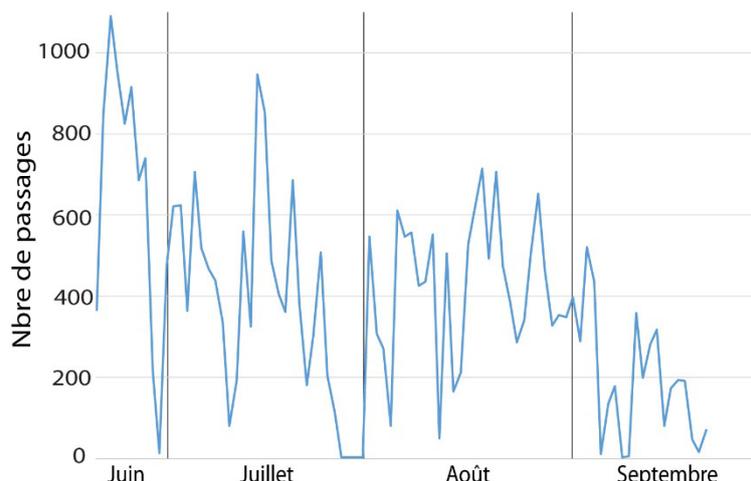
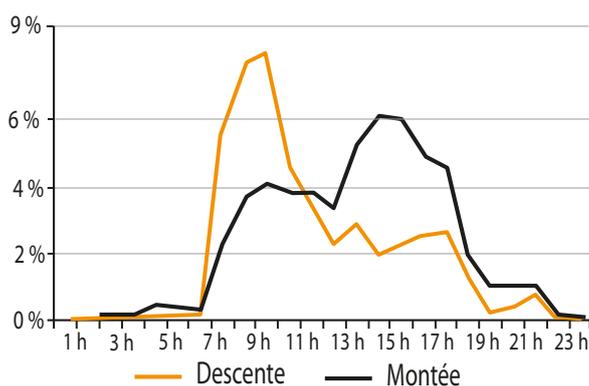


Figure 8.4. Fréquentation moyenne journalière de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017.

Il est tout de même intéressant de noter que la distribution horaire des passages (Fig. 8.5) permet d'identifier un schéma de fréquentation de type pendulaire, similaire à celui de la Mer de Glace, et qui correspond à l'organisation de la pratique au départ de l'aiguille du Midi. Il se caractérise par deux pics de fréquentation. Le premier, le matin de 7h à 11 h, correspond aux alpinistes qui se rendent sur le glacier du Géant et un second, moins marqué mais étalé sur l'ensemble de l'après-midi, correspond quant à lui aux alpinistes qui remontent l'arête pour reprendre le téléphérique de l'aiguille du Midi. Cet étalement s'explique par le fait que les alpinistes proviennent de nombreux secteurs différents : traversée de la vallée Blanche depuis la pointe Helbronner, courses rocheuses, descente du mont Blanc, etc. Pour cette raison, il est impossible de convertir le nombre de passages en un nombre de personnes ou de comparer la fréquentation de l'arête avec le nombre de nuitées dans les refuges du secteur. Tous les alpinistes ne réalisent pas obligatoirement un aller-retour sur l'arête et arrivent ou partent de l'aiguille du Midi depuis ou vers de nombreuses destinations différentes.



Repartition par sens de passage

Montée : 53%

Descente : 47%

Figure 8.5. Distribution moyenne horaire de la fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017

8.2.3. Fréquentation de la voie normale d'ascension du mont blanc

A. Résultats des étés 2017 et 2018

Sur la voie normale d'ascension du mont Blanc, un capteur pyroélectrique (*cf.* : Chapitre 8) a été installé pendant les été 2017 et 2018. Les paramètres et chiffres de mesures clés sont présentés dans le tableau 8.3.

	2017				2018			
Période de comptage	23/06 – 30/09				20/06 – 30/09			
Réglage du capteur	Très courte portée Tempo de 400 ms				Très courte portée Tempo de 400 ms			
Erreur (en %)	27/06 +4	03/07 -17	11/07 +5	RMSE +10	02/07 +15	03/08 +15,8	28/08 +14,8	RMSE +15
Nbre de passages sur l'ensemble de la période	23 600 ± 2 360				31 723 ± 4 758			
Moyenne journalière	236 ± 23				308 ± 46			
Nbre de passages par mois	Juillet 7 775 ± 777	Août 10 697 ± 1 069	Sept. 5 128 ± 512		Juillet 10 026 ± 1 503	Août 9 154 ± 1 373	Sept. 8 670 ± 1 300	
Jours de plus haute fréquentation	Dimanche 13 août : 638 ± 63 Lundi 03 juillet : 584 ± 58 Vendredi 08 sept. : 567 ± 57				Jeudi 23 août : 570 ± 85 Dimanche 08 juillet : 536 ± 80 Lundi 07 août : 521 ± 78			

Tableau 8.3. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteurs pyroélectriques sur la voie normale d'ascension du mont Blanc, lors des été 2017 et 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mises en évidence lors des contre-comptages manuels.

Les marges d'erreur sont relativement faibles (RMSE de 10 % en 2017 et 15 % en 2018) mais surtout sont peu variables d'une mesure à une autre (Tab. 8.3), contrairement aux capteurs installés dans le bassin de la Mer de Glace et sur l'arête de l'aiguille du Midi. Cette différence est liée au fait que le capteur du Goûter a été installé à un endroit où le sentier s'apparente à un sentier de randonnée classique, ce qui permet de s'affranchir des principales limites rencontrées pour les deux autres capteurs (*cf.* : Article 6). Les alpinistes ont une vitesse de déplacement constante, ils ne marquent pas d'arrêt dans ce secteur et, le capteur est très bien camouflé entre deux blocs et n'attire donc pas l'attention. Malgré la taille des blocs entre lesquels le capteur était installé, l'un des deux a basculé dans le couloir à la fin de l'été 2018 (Fig. 8.6). Un nouveau site d'installation devra être trouvé pour l'été 2019.



Figure 8.6. Site d'installation du capteur pyroélectrique en 2017 et 2018. Le bloc qui a basculé est surligné en rouge.

Le nombre de passages pour l'ensemble du mois de juin 2017 a été estimé à partir des données de fréquentation mensuelle du refuge du Goûter, en partant du postulat que la part du nombre de passages mesuré par le capteur liée au nombre de nuitées dans le refuge du Goûter, est la même pour l'ensemble de la saison. Ainsi, pour la période 1^{er} juin – 30 septembre, le nombre total de passages dans le couloir du Goûter est estimé à $24\,698 \pm 2\,469$, dont $5\,606 \pm 560$ passage pour le seul mois de juin. Cette même estimation n'a pas été possible pour 2018, nous n'avons pas eu accès au nombre de nuitées par mois, ce qui souligne à nouveau la difficultés d'accès aux données de fréquentation des refuges. La fréquentation est toutefois plus importante en 2018 avec $31\,723 \pm 4\,758$ passages pour la seule période du 20 juin au 30 septembre.

En 2017, bien que la fréquentation soit plus faible qu'en 2018, les pics de fréquentation sont plus fréquents, plus importants et durent plus longtemps (Fig. 8.7). Il y a 5 pics à plus de 500 passages par jour avec un maximum à 638 passages (13 août). Au total, la fréquentation excède les 500 passages pendant 8 jours. En 2018, la fréquentation est dans l'ensemble plus importante mais les pics de fréquentation sont moins importants – leur fréquence, le nombre de passage et leur durée sont plus faibles. Il n'y a que 3 jours où le nombre de passage est supérieur à 500 avec un maximum à 570.

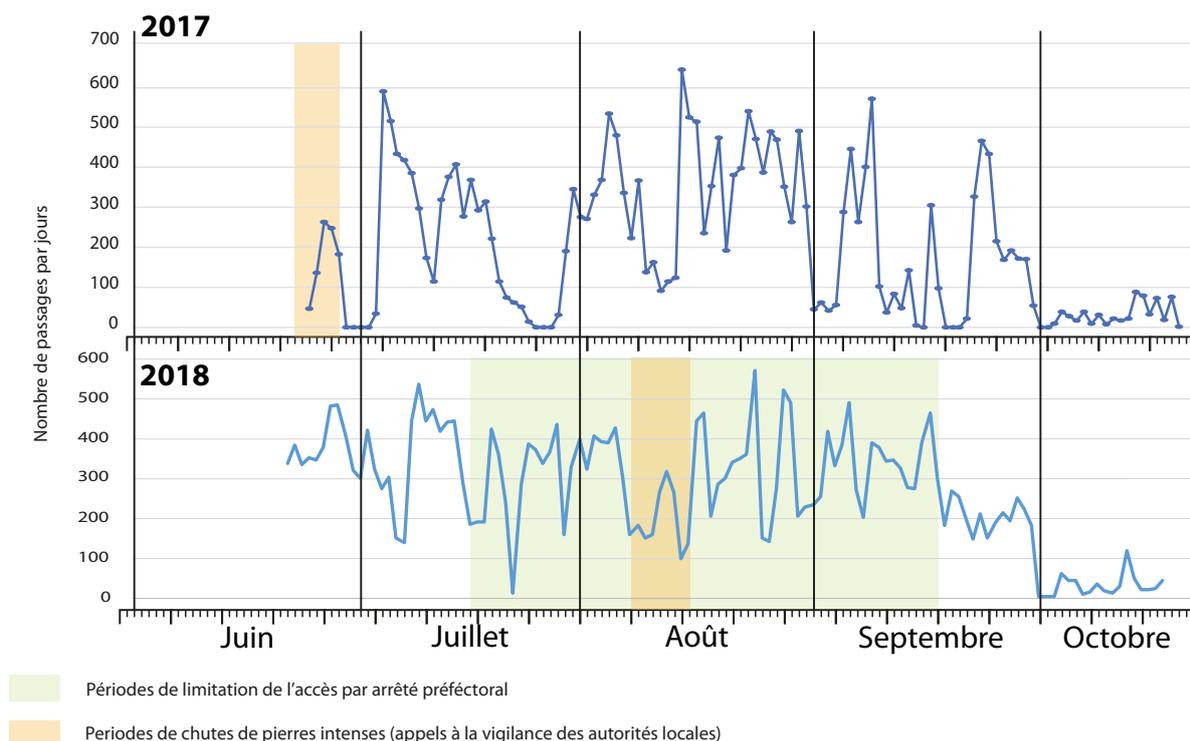


Figure 8.7. Fréquentation du couloir du Goûter en 2017 et 2018, en nombre de passages par jour.

On peut estimer que les pics de fréquentation sont plus faibles en 2018 qu'en 2017 en raison du dispositif de régulation de la fréquentation mis en place en 2018. En effet, principalement en raison d'une sur fréquentation du refuge du Goûter, dont la capacité d'accueil a été dépassée à plusieurs reprises, et des problèmes de sécurité liés (voir Arrêté Préfectoral du 13/06/2018, n° 2018/070, Annexe 8.1), l'accès au sommet du mont Blanc par la voie normale a été limité aux seules personnes justifiant d'une réservation au refuge du Goûter. Le respect de l'arrêté était assuré par des gendarmes, positionnés au refuge de Tête Rousse sur l'ensemble de la période 22 juillet – 30 septembre. Les chiffres issus du capteur confirment donc l'efficacité de la régulation de la fréquentation avec un écrêtement des pics. On peut aussi argumenter, en prenant les chiffres de l'été 2017 en comparaison, que la fréquentation du site est rarement supérieure au maximum permis par l'arrêté.

Inversement, en 2017, il y a 4 périodes de 4, 3, 1 et 3 jours où la fréquentation est nulle (Fig. 8.7), ce qui n'arrive jamais en 2018. Cette différence peut être attribuée aux conditions météorologiques, plus instable en 2017 avec des périodes de plusieurs jours de mauvais temps, comparé à 2018 où la météorologie était plus clémente.

La fermeture des refuges du Goûter et de Tête Rousse fin septembre entraîne une chute drastique de la fréquentation, mais qui reste toutefois présente (602 passages entre le 1^{er} et le 20 octobre 2017 et 500 en 2018).

B. Identification d'un schéma de fréquentation et mise en évidence de comportements non adaptés au risque local de chute de pierre

Qu'en est-il de la relation entre la fréquentation de l'itinéraire et l'activité chute de pierre ? Pour le moment, à l'échelle de la saison, les périodes de chutes de pierres intenses ne sont identifiées qu'en se basant sur les périodes où les compagnies de guides et le SNGM décident de ne plus faire l'ascension avec leurs clients, les chutes de pierres étant considérées comme trop intenses. En 2018, on identifie alors une baisse de la fréquentation moyenne sur cette période (6 au 14 août) de 47 % par rapport à la moyenne des 2 semaines précédentes.

A l'échelle journalière, le profil horaire de la fréquentation établi à partir du capteur, permet de mettre en évidence un manque de prise en compte des périodes de chutes de pierres, identifiées comme les plus fréquentes entre 10h et 16h (AlpeIngé, 2012). En effet, la traversée du Grand Couloir s'organise autour de trois pics de fréquentation (Fig. 8.8). Les deux premiers se situent à 2 heures et à 6 heures du matin. Ils correspondent aux départs du refuge de Tête Rousse en direction du sommet. Le troisième s'étale entre 9 h 30 et 14 heures, avec un pic principal à 11 h 30, et représente la grande majorité de la fréquentation. Il correspond aux ascensionnistes qui descendent du sommet et à ceux qui montent au refuge du Goûter depuis le Nid d'Aigle, où le premier train arrive à 8 h 30. Ainsi, la majorité des ascensionnistes traverse le couloir au mauvais moment lorsque les chutes de pierres sont les plus fréquentes.

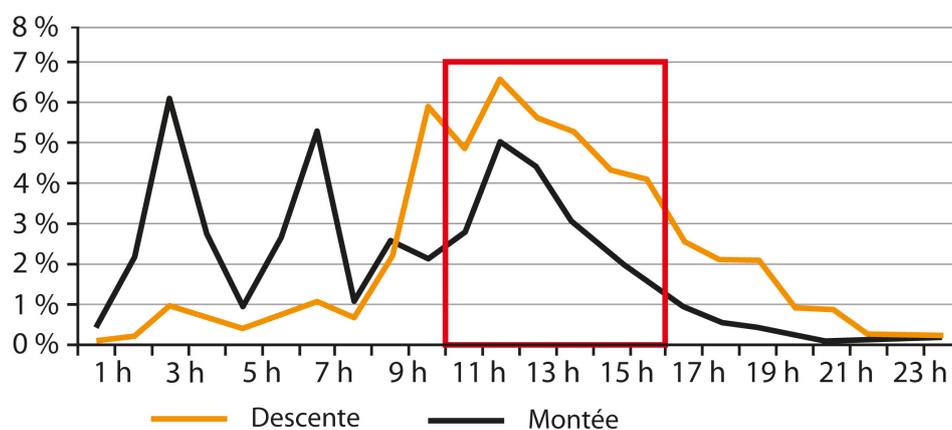


Figure 8.8. Distribution journalière moyenne des passages sur l'ensemble de la saison (identique en 2017 et 2018).

Comment expliquer que la majorité des ascensionnistes traversent le couloir au mauvais moment ? Cette situation est liée au schéma d'ascension du mont Blanc par la voie normale qui laisse peu d'alternatives. En effet, partir du refuge de Tête Rousse le matin (entre 2 heures et 6 heures) permet de traverser le couloir tôt, lorsque la fréquentation et les chutes de pierres sont les plus faibles. En revanche, la descente se fera probablement en fin de matinée/début d'après-midi, soit au moment où les chutes de pierres et la fréquentation sont les plus importantes. Inversement, monter directement

au refuge du Goûter depuis le Nid d'Aigle présente l'inconvénient de traverser le couloir tard dans la matinée (le premier train arrive au Nid d'Aigle à 8h30 ce qui mène les alpinistes au pied du couloir vers 11h) mais permet d'atteindre le sommet tôt dans la matinée du lendemain et de redescendre et traverser le couloir plus tôt qu'en partant de Tête Rousse. Dans les deux cas, une des deux traversés du couloir s'effectue au mauvais moment. Une solution serait de dormir au refuge de Tête Rousse avant l'ascension du mont Blanc et au refuge du Goûter après. Mais cela nécessite une nuitée supplémentaire, qui pose d'autres difficultés notamment logistiques (réservations difficiles, une nuit de plus à passer en refuge etc.) et financières.

L'identification d'un tel schéma de fréquentation où la majorité des alpinistes traverse le couloir au moment où les chutes de pierres sont les plus intenses nous mène maintenant à questionner l'accidentologie dans ce secteur. Un manque de prise en compte et une difficulté à adapter le schéma d'ascension au risque local de chutes de pierres sont-ils des facteurs explicatifs de l'accidentologie dans ce secteur ?

8.3. Mise à jour de l'étude d'accidentologie sur la voie normale d'ascension du mont Blanc

Une connaissance précise de l'accidentologie des sports de montagne est indispensable pour mettre en place des systèmes de prévention adaptés et efficaces. Toutefois, bien que cette dernière soit l'objet d'un nombre grandissant d'études, les données d'accidentologie sur les sports de montagne présentent un certain nombre de limites et de manques. D'après Soulé *et al.*, (2015) les freins à la constitution de bases de données complètes, fiables et détaillées sont de plusieurs ordres : (i) une multiplicité d'acteurs – parfois en compétition – qui produisent de la donnée, (ii) pour répondre à leurs objectifs propres, (iii) en utilisant différentes méthodes de collectes ; (iv) sans compter une difficulté d'accès à la donnée, considérée comme la part sombre du tourisme de montagne. Il en résulte une multiplicité de base de données lacunaires, qui ne se complètent pas, qui sont difficilement comparables et difficilement accessibles. Un des axes de recherches identifiés au début de ce travail doctoral était d'ailleurs d'étudier les impacts du changement climatique sur l'accidentologie de l'alpinisme. Cependant, nous avons fait face à plusieurs des freins identifiés ci-avant, notamment la difficultés d'accès à une base de données précises et une réticence des acteurs concernés à s'exprimer sur le sujet, et nous avons abandonné cet axe de recherche.

En réaction au manque d'une vision d'ensemble de l'accidentologie des sports de montagne en France et à la nécessité de données robustes sur lesquelles baser des campagnes de prévention, une étude publiée en 2014 (Soulé *et al.*, 2014) en propose un état des lieux, hors station de ski. On apprend alors que le massif du Mont Blanc concentre près de 30 % des décès liés à la pratique d'un sport de montagne en France, dont près de la moitié en alpinisme soit 26 morts par an en moyenne sur la période 2003-2012. Plus largement, l'alpinisme est parmi les 3 activités qui génèrent le plus d'accidents en montagne avec la randonnée et le VTT (Lefèvre *et al.*, 2005 ; Julien, 2011 ; Nay, 2013).

L'itinéraire classique d'ascension du mont Blanc (la voie dite « normale ») est l'une des voies d'alpinisme les plus fréquentées du monde. Elle présente cependant des dangers objectifs majeurs, particulièrement au niveau de la traversée du Grand Couloir du Goûter à 3 270 mètres et de la montée par l'arête rocheuse menant à l'aiguille du Goûter (3 863 m). Cette partie de l'itinéraire est rocheuse. Elle nécessite des techniques d'escalade (pose des pieds et des mains) pour franchir certains passages et présente surtout une exposition importante aux chutes de pierres. Il en résulte un nombre important d'accidents, comme l'a montré la première édition de cette étude publiée en 2012 (disponible sur le site de la Fondation Petzl, www.fondation-petzl.org). Entre 1990 et 2011, 291 personnes ont ainsi été secourues entre le refuge de Tête Rousse (3 187 m) et le refuge du Goûter (3 830 m), avec un taux de gravité très important : 74 personnes sont décédées et 180 blessées (Descamps et Estachy, 2012). Dans ce cadre, les résultats suivants présentent une mise à jour de l'étude publiée en 2012 qu'ils prolongent jusqu'en 2017 et constitue une étude de cas détaillée qui contribue à mieux mesurer et comprendre l'accidentologie liée à la pratique de l'alpinisme.

Cette mise à jour a une vocation avant tout opérationnelle comme un outil d'aide à la décision pour les pouvoirs publics et plus largement la communauté montagnarde avec l'objectif principal de mieux comprendre les origines des accidents de type traumatique survenant dans ce secteur. Cette étude est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire de recherche Environnement dynamiques et Territoires de montagne (EDYTEM, université Savoie Mont-Blanc), la *Fondation Petzl* et le Peloton de gendarmerie de haute montagne (PGHM) de Chamonix. Elle est disponible gratuitement en français et en anglais sur le site de la *Fondation Petzl*.

8.3.1. Rapport d'étude d'accidentologie - Fiche synoptique

Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017

Accidentology of the normal route up Mont Blanc between 1990 and 2017

(full english version available in the *Fondation Petzl* website)

Mourey J.¹, Moret O.², Descamps P.², Bozon S³. 2018

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

² *Fondation Petzl*, Grenoble, France

³ Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne, Chamonix Mont-Blanc, France.

Objectifs de l'étude

- Mieux comprendre les origines des accidents de type traumatique survenant dans le secteur du couloir du Goûter.
- Apporter des outils d'aide à la décision aux pouvoirs publics, aux professionnels de la montagne et aux alpinistes amateurs.

Problématique

- Quelle est l'accidentologie dans le secteur du couloir du Goûter sur la voie normale d'ascension du mont Blanc ?

Méthodologie

- Inventaire exhaustif et étude détaillée des procès-verbaux rédigés par les secouristes à la suite de chaque intervention.

Principaux résultats

- De 1990 à 2017, on comptabilise 102 personnes décédées (26 %), 230 blessées (59 %) et 55 indemnes (14 %) sur un total de 387 personnes secourues (347 opérations de secours).
- La seule ascension du couloir et de l'arête du Goûter génère en moyenne près de quatre décès par an.
- Les victimes représentent 37 nationalités différentes et on note une tendance à l'internationalisation.
- On relève peu d'alpinistes encadrés par un professionnel dans les accidentés.
- On compte peu d'alpinistes encordés dans les accidentés.
- Le nombre d'accidents a tendance à diminuer dans la traversée du couloir alors qu'il augmente fortement sur l'arête.

- Les accidents par chutes de pierres se produisent surtout dans les 100 mètres de la traversée du couloir.
- L'augmentation du nombre d'accidents est corrélée à l'augmentation de la fréquentation.
- Les risques liés à la traversée du Grand Couloir et à l'ascension de l'arête jusqu'au refuge du Goûter font de ces passages un véritable point noir de l'alpinisme en France.

Rôle des auteurs

- J. Mourey : réalisation de l'étude dans son ensemble, analyse des données et rédaction du rapport.
- O. Moret : est à l'initiative de la réalisation de l'étude, prise de contact avec le PGHM, participation à la réalisation de l'étude et à la rédaction du rapport.
- P. Descamps : auteur de la première version de l'étude de 2012, participation à la réalisation de l'étude et à la rédaction du rapport.
- S. Bozon : mise à disposition des procès-verbaux d'accidentologie et contribution à la rédaction du rapport.

Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017

Jacques Mourey
Olivier Moret
Philippe Descamps
Stéphane Bozon



Mai 2018



Sommaire

Introduction	3
1. Méthodologie et champ d'application de l'étude	4
2. Évolution du nombre d'accidents par été entre 1990 et 2017	6
3. Gravité des accidents	6
4. Profil des personnes secourues	7
• Nationalité des personnes secourues	7
• Encadrement par un professionnel	8
• Encordement	9
5. Caractéristiques des accidents	10
• La localisation des accidents et leurs conséquences	10
• Causes des accidents	11
• Horaires	12
• Sens de progression	13
6. Des types d'accidents partiellement conditionnés par leur lieu d'occurrence	14
Les chutes de pierres, une double origine	15
7. Une augmentation du nombre d'accidents qui peut s'expliquer par une augmentation de la fréquentation de l'itinéraire	16
8. 2017, un été particulièrement meurtrier : étude détaillée de la fréquentation et de l'accidentologie	17
• Accidentologie et fréquentation moyenne à la journée	17
Comment optimiser les horaires	18
Conclusion	19
Pour résumer	20



L'aiguille du Gôûter (3 863 m). Au centre, le Grand Couloir. (© J. Mourey)

Introduction

Cette étude est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire de recherche Environnement dynamiques et Territoires de montagne (EDYTEM, université Savoie Mont-Blanc), la Fondation Petzl et le Peloton de gendarmerie de haute montagne (PGHM) de Chamonix. Son objectif principal est de mieux comprendre l'accidentologie sur la voie normale d'ascension du mont Blanc (4 809 m), point culminant des Alpes.

L'itinéraire classique d'ascension du mont Blanc (la voie dite « normale ») est l'une des voies d'alpinisme les plus fréquentées du monde avec environ 17 000 personnes par an. Elle présente cependant des dangers objectifs majeurs, particulièrement au niveau de la traversée du Grand Couloir du Goûter à 3 270 mètres — aussi rebaptisé « le couloir de la mort » — et de la montée par l'arête rocheuse menant à l'aiguille du Goûter (3 863 m). Cette partie de l'itinéraire est rocheuse. Elle nécessite des techniques d'escalade (pose des pieds et des mains) pour franchir certains passages et présente surtout une exposition importante aux chutes de pierres. Il en résulte un nombre important d'accidents, comme l'a montré la première édition de cette étude publiée en 2012 (disponible sur le site de la Fondation Petzl, www.fondation-petzl.org). Entre 1990 et 2011, 291 personnes ont ainsi été secourues entre le refuge de Tête Rousse (3 187 m) et le refuge du Goûter (3 830 m), avec un taux de gravité très important : 74 personnes sont décédées et 180 blessées.



*La voie normale d'ascension du mont Blanc au niveau de la traversée du Grand Couloir du Goûter.
(17/06/2017, © J. Mourey)*

Cette mise à jour de l'étude publiée en 2012 prolonge cet état des lieux jusqu'en 2017. L'objectif est de mieux comprendre les origines des accidents de type traumatique survenant dans ce secteur, afin d'apporter des outils d'aide à la décision aux pouvoirs publics, aux professionnels de la montagne et aux alpinistes amateurs.

1. Méthodologie et champ d'application de l'étude

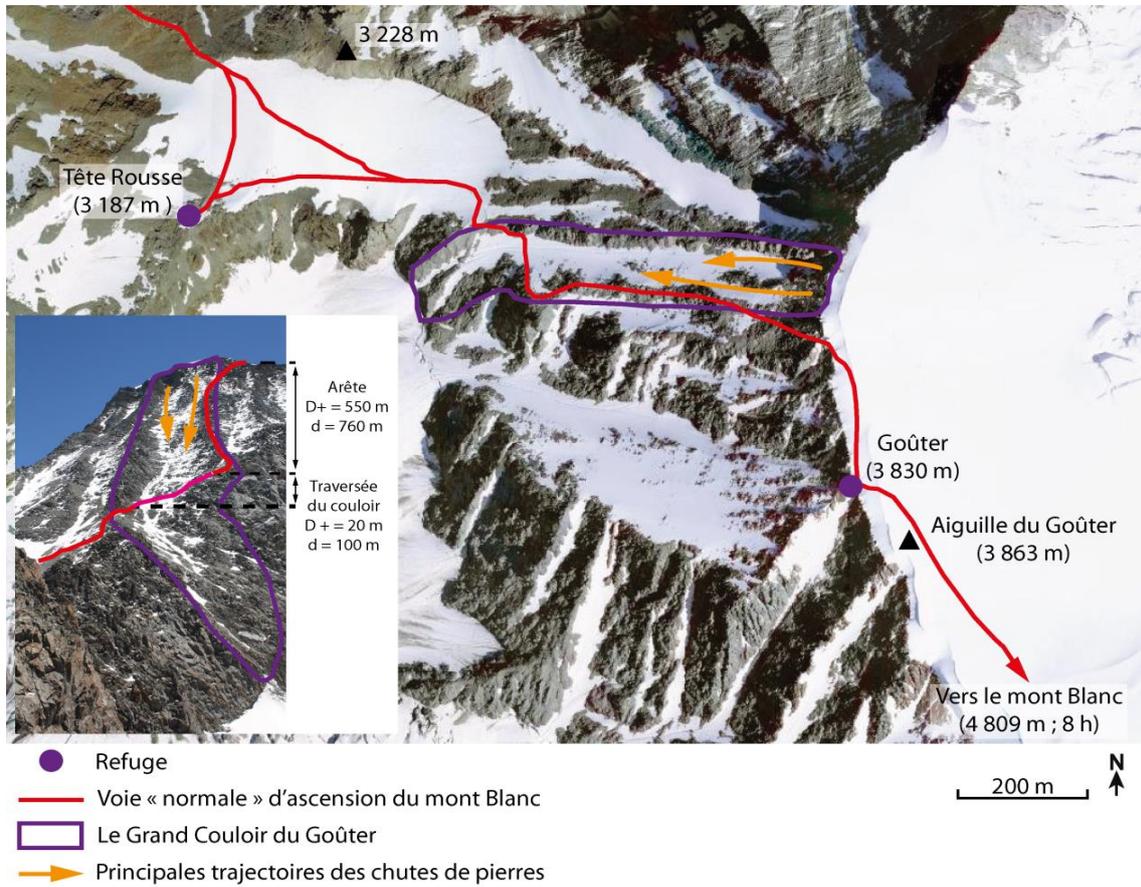
La méthodologie de ce travail est exactement la même que celle mise en œuvre pour l'étude publiée en 2012. Elle consiste à faire l'inventaire exhaustif du nombre d'accidents de type traumatique, sur le tronçon strictement compris entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter, à travers l'examen manuel des procès-verbaux rédigés par les secouristes à la suite de chaque intervention.

Les interventions des secours en aval du refuge de Tête Rousse, en amont du refuge du Goûter, ainsi que celles ayant été menées directement sur la zone d'atterrissage des refuges n'ont pas été prises en compte. Ces dernières, bien que nombreuses, sont généralement d'une moindre gravité (mal aigu des montagnes, ophtalmies, gelures, etc.) et elles ne sont pas directement conditionnées par la difficulté technique et le danger que représente le Grand Couloir et la montée jusqu'au refuge du Goûter.

Les principales informations recherchées dans les procès-verbaux étaient le lieu (traversée du couloir ou arête) et l'horaire de l'accident, ses causes (chutes de pierres, dévissages, blocage technique, maladie, épuisement), ses conséquences pour la ou les victimes (décédées, blessées, indemnes) et leur profil (genre, âge, origine).

Il est toutefois important de préciser que ces informations ne sont pas toujours présentes dans les PV ou elles peuvent l'être avec une précision variable. Les informations ont été collectées par un nombre important de secouristes dont la mission première n'est pas de réaliser des études d'accidentologie, mais de porter secours aux victimes et de procéder à des constatations en vue d'une enquête administrative et éventuellement judiciaire. La difficulté de localisation de certains accidents peut être liée à l'incapacité des victimes ou des témoins à donner des détails précis sur les circonstances des accidents. En outre, certains accidents sont le fait d'alpinistes évoluant seuls et sans témoins. Cela doit conduire à une certaine prudence dans l'interprétation des résultats. Si le nombre de décès est fiable, l'enchaînement des circonstances et la localisation des accidents ne peuvent pas toujours être renseignés avec précision. Le niveau de fiabilité des résultats est spécifié dans certaines sections de l'étude.

Cette étude mobilise aussi les données issues d'un capteur de fréquentation installé quelques mètres avant la traversée du couloir. Ce dernier a permis de quantifier et de qualifier (sens de progression) la fréquentation de l'itinéraire en nombre de passages de juin à septembre 2017 avec une précision de $\pm 4\%$. Il est important de préciser que les résultats issus de cette instrumentation présentent un nombre de passages et non un nombre de personnes.



Carte de localisation du couloir, de sa traversée, de l'arête et des refuges (IGN, 2018).

2. Évolution du nombre d'accidents par été entre 1990 et 2017

Entre 1990 et 2017, il y a eu 347 interventions du PGHM pour des accidents survenus entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter, soit en moyenne près de 13 interventions par saison estivale. On note une légère tendance à la hausse entre 2015 et 2017, avec en moyenne 18 interventions par an (Fig. 1).

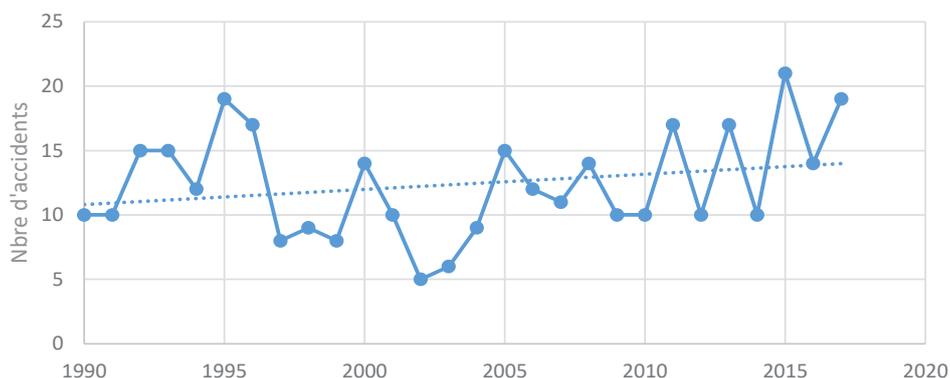
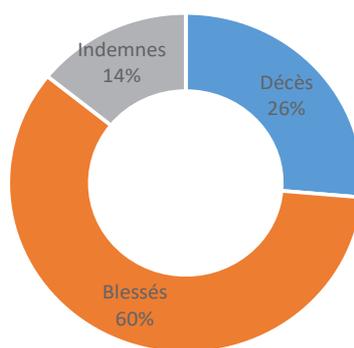


Figure 1. Évolution du nombre d'interventions pour des accidents de type traumatique entre 1990 et 2017 entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter.

3. Gravité des accidents

Le taux de gravité des accidents est très important : 102 (26 %) personnes sont décédées, soit en moyenne près de quatre décès (3,7) par an, 230 (59 %) étaient blessés et seulement 55 (14 %) étaient indemnes.



En lien avec l'augmentation du nombre d'interventions (Fig. 1), le nombre de décès, de blessés et d'indemnes augmente dans les mêmes proportions (Fig. 2) sur l'ensemble de la période. Il y a une forte variabilité interannuelle des décès, entre 0 (1999, 2016) et 11 (2017) pour une moyenne de 3,7 par an. Le nombre de blessés par an varie de 1 (2003) à 14 (1999) pour une moyenne de 8,5 par an.

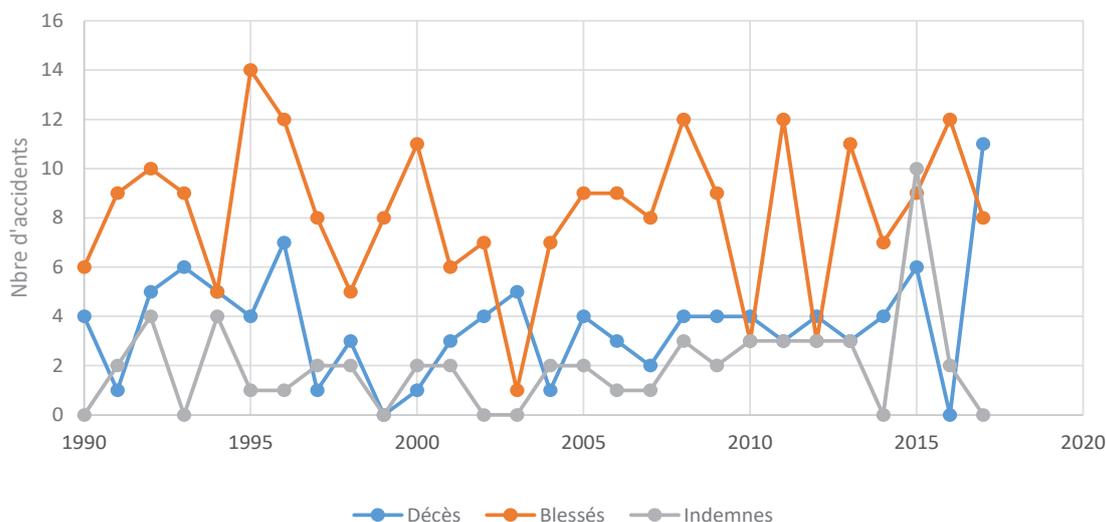


Figure 2. Évolution du nombre de personnes décédées, blessées et indemnes entre 1990 et 2017.

4. Profil des personnes secourues

Âge moyen : 40 ans

Genre : 82 % d'hommes, 18 % de femmes

On note une élévation de l'âge moyen des personnes secourues sur l'ensemble de la période. L'âge moyen des victimes était de 36 ans entre 1990 et 1999 et de 44 ans entre 2008 et 2017. Cette élévation est comparable à l'évolution de l'âge moyen de la population européenne (EUROSTAT, 2017). La surreprésentation des hommes reste constante sur l'ensemble de la période. Elle doit être rapprochée de la surreprésentation des hommes dans les pratiquants de l'alpinisme.

- **Nationalité des personnes secourues**

Des victimes de 37 nationalités différentes

Entre 1990 et 1999, les interventions concernent des personnes de 22 nationalités différentes. Les Français représentent 28 % des victimes. Les ressortissants des pays frontaliers à la France (Italie, Espagne, Belgique, Royaume-Uni, Allemagne) constituent 45 % des personnes secourues. Les 27 % restants sont des victimes originaires de 14 pays européens, tels que la République tchèque (6 %), la Pologne (3 %) ou le Danemark (2 %).

Entre 2000 et 2008, les interventions concernent des personnes de 26 nationalités différentes. Les Français ne représentent plus que 18 % des victimes. Les ressortissants des pays frontaliers à la France en représentent 35 %. Les 47 % restants sont des victimes originaires principalement d'Europe de l'Est (notamment la Pologne, 9 %).

Enfin, entre 2009 et 2017, les interventions concernent des personnes de 25 nationalités différentes (Fig. 3). Les Français représentent 25 % des victimes (soit une augmentation de 7 % par rapport à la période précédente) alors que les ressortissants des pays frontaliers à la France sont légèrement moins présents (27 % des victimes). En revanche, la part des victimes originaires d'Europe de l'Est est en augmentation (République tchèque, 7 % ; Pologne, 10 % ; Lituanie, 3 %), tandis que les Russes apparaissent pour la première fois et représentent 4 % du total. Il y a aussi de plus en plus de victimes originaires d'Asie du Nord (Japon, 4 % ; Corée, 4 %).

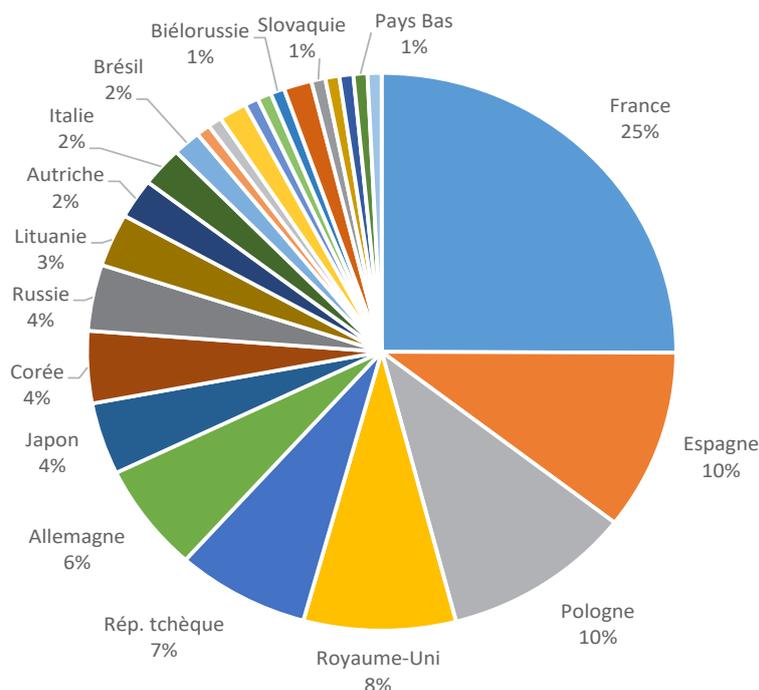


Figure 3. Pays d'origine des victimes d'accidents sur la période 2009 – 2017.

Ainsi, l'évolution de la nationalité des personnes secourues suggère **une internationalisation de l'ascension**, avec notamment les pays d'Europe de l'Est et la Russie qui sont de plus en plus représentés. Les Français représentent en moyenne sur l'ensemble de la période un quart des interventions.

Sur l'ensemble de la période, les décès concernent des personnes de 24 nationalités différentes. **17 % des décédés sont de nationalité française**, 12 % sont originaires de la République tchèque et 10 % sont allemands.

- **Encadrement par un professionnel**

84 % des personnes victimes d'un accident sont des amateurs non encadrés par un professionnel. 9 % sont des clients de guides (dont un décès par dévissage) et les 7 % restants sont des professionnels (guides de haute montagne, CRS, militaires à l'entraînement).

Ces chiffres laissent supposer que l'encadrement d'une cordée par un professionnel limite la probabilité d'être victime d'un accident. Cette interprétation mérite toutefois d'être maniée avec prudence dans la mesure où on ne connaît pas avec précision le taux d'encadrement des candidats au mont Blanc.

- **Encordement**

Les informations concernant l'encordement lors d'un accident sont présentes dans 38 % des PV. Pour la période 2012-2017, dans les cas où cette information est disponible, on constate toutefois que les victimes d'accidents ne sont pas encordées dans 83 % des cas. En outre, 47 % de ces victimes non encordées sont décédées, principalement sur l'arête.

Sur l'ensemble de la période, on n'enregistre que cinq personnes décédées parmi les victimes encordées.

Bien que l'on ne connaisse pas exactement le taux d'encordement des candidats, on peut formuler l'hypothèse qu'être encordé est un facteur limitant la gravité des accidents si les pratiquants maîtrisent les techniques de progression encordée. En revanche, la corde mal utilisée peut être un facteur aggravant (dévissage de l'ensemble de la cordée, chute de pierres provoquée par la corde, etc.).



Alpinistes non encordés (en haut) et encordés sur le câble (en bas), dans la traversée du Couloir du Goûter (2011 © S. Lozac’hmeur)

5. Caractéristiques des accidents

- **La localisation des accidents et leurs conséquences**

La localisation d'un accident correspond au lieu où l'accident s'est produit et non à l'endroit où la victime a été secourue. Dans de nombreux cas, les secouristes n'obtiennent pas d'informations précises sur le lieu du départ de la chute (absence de témoins, victimes choquées ou perte de mémoire liée au traumatisme). Dans cette étude, nous distinguerons les accidents qui se sont produits strictement dans les 100 mètres de la traversée, de ceux qui se sont produits sur l'arête. 28 % (114) des accidents, soit 21 décès et 73 blessés, ne sont pas localisables ; ils sont renseignés dans « Inconnu ». Les accidents (plus rares) qui se sont produits entre la traversée du couloir et le refuge de Tête Rousse ou sur l'arête Payot ont été renseignés dans « Autre ». Dans l'ensemble, la localisation a pu être déterminée avec une bonne précision : 71 % des accidents se produisent dans la traversée (35 %) ou sur l'arête (36 %).

Sur les 347 interventions (1990 – 2017), 35 % (122) des interventions concernent des accidents qui se sont produits dans la traversée du couloir pour 31 décès et 85 blessés et 36 % (132) pour des accidents qui se sont produits sur l'arête pour 50 décès et 73 blessés (Fig. 4). Il y a donc presque autant d'accidents qui se produisent sur l'arête que dans la traversée du couloir. **En revanche, la gravité des accidents (décès) est plus importante sur l'arête.**

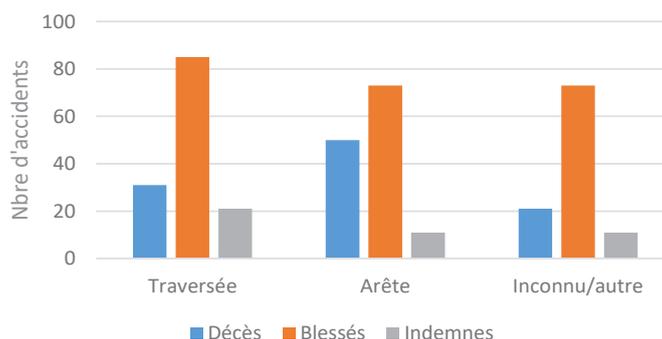


Figure 4. Conséquences des accidents en fonction de leur lieu d'occurrence.

En outre, bien qu'il y ait une forte variabilité annuelle, **le nombre d'accidents a tendance à diminuer dans la traversée du couloir alors qu'il a plus que triplé sur l'arête** (Fig. 5) sur l'ensemble de la période. L'attention portée ces dernières années sur les dangers de la traversée du couloir explique probablement cette baisse des accidents dans ce passage. Les dangers et les difficultés techniques de l'ascension de l'arête sont sans doute sous-estimés ou ignorés par les ascensionnistes.

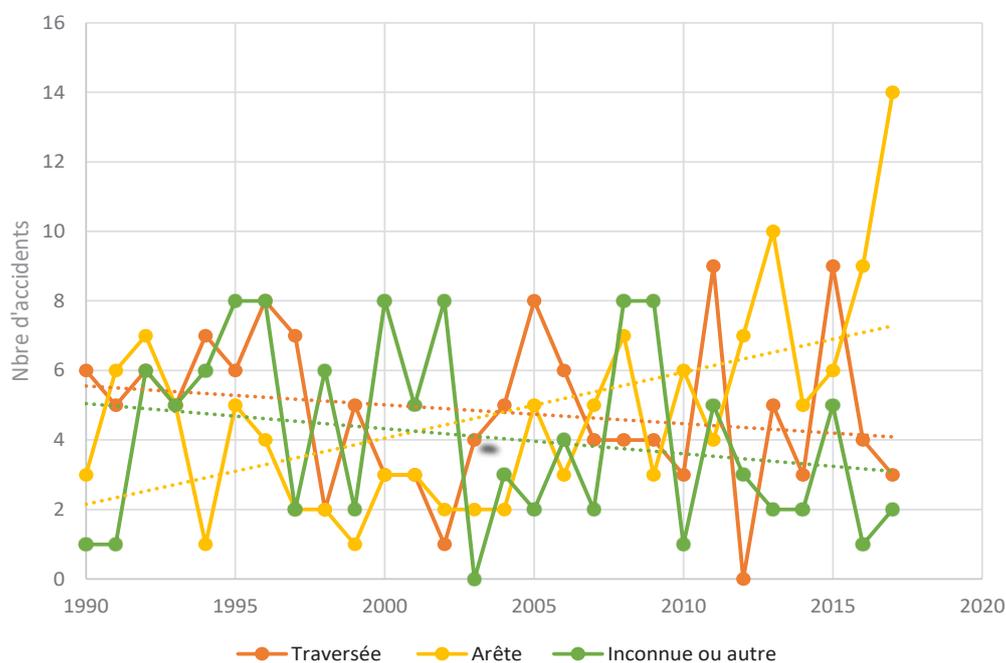


Fig. 5. Évolution de la localisation des accidents — traversée du couloir, arête ou inconnue/autre.

- **Causes des accidents**

La cause des accidents n’est pas facile à déterminer sur la seule foi des procès-verbaux des secours. Il s’agit souvent d’un enchaînement d’événements et il n’y a pas toujours de témoins. Un dévissage, par exemple, peut avoir des causes multiples : faute technique, chute de pierres, fatigue, équipement inadapté, absence de corde, erreur d’itinéraire. En outre, quand la cause renseignée est une chute de pierres, il est possible que la victime ait ensuite dévissé dans le couloir. Inversement, il se peut qu’un dévissage soit le résultat d’une menace de chute de pierres sans que celle-ci soit enregistrée par les secouristes.

Par ailleurs, dans le cas où une chute de pierres est clairement identifiée comme la cause de l’accident, il est difficile de déterminer si son déclenchement est naturel ou s’il est lié à des cordées situées en amont. Il y a toujours une part d’inconnue dans les données sur les causes des accidents.

Toutefois, **les chutes de pierres sont un facteur important, car elles expliquent directement au moins 29 % des accidents** (Fig. 6) et sont impliquées pour partie dans **les dévissages qui sont à l’origine de 50 % des accidents**.

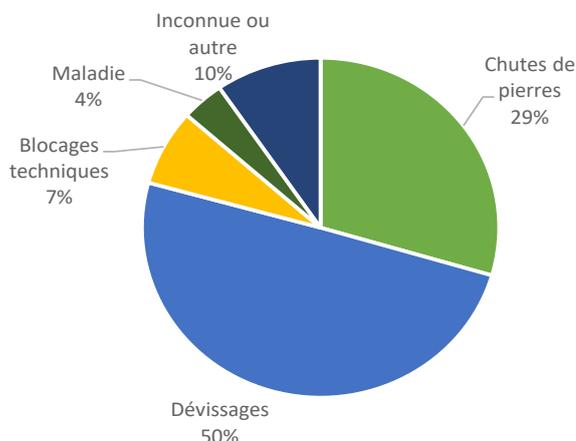


Figure 6. La cause des accidents.

Sur l'ensemble de la période étudiée, les origines des accidents apparaissent dans les mêmes proportions et le dévissage reste la cause principale (Fig. 7). **Il est toutefois intéressant de noter une tendance à l'augmentation du nombre de blocages techniques liés à la difficulté de l'itinéraire à partir de 2007.** En 2015, cinq secours ont été nécessaires pour des blocages techniques.

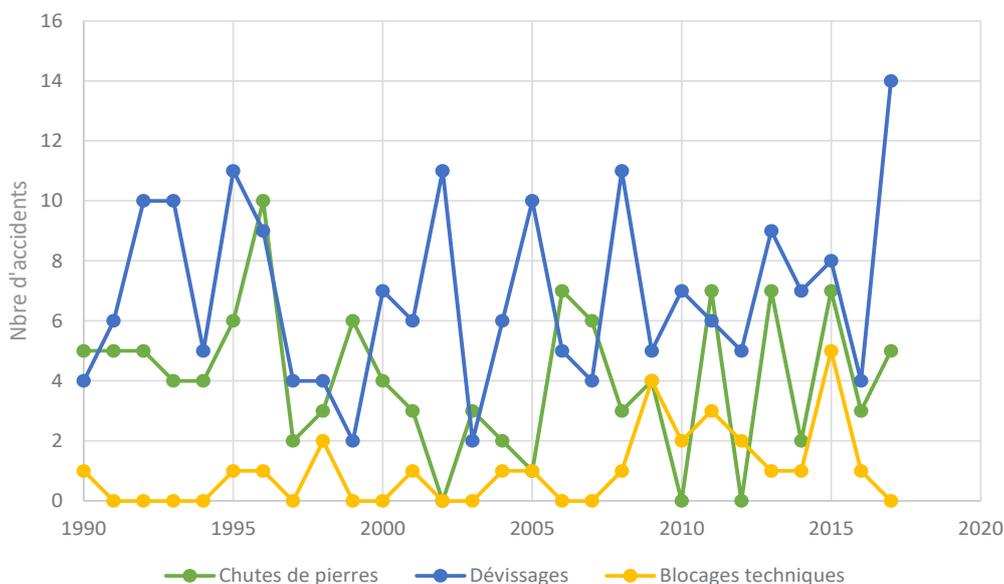


Figure 7. Évolution du nombre d'accidents par dévissages, par chutes de pierres et par blocages techniques entre 1990 et 2017.

• **Horaires**

En moyenne, l'intervention des secours est demandée à 13 h 10 et ils se produisent à la même heure sur l'arête (13 h) et dans la traversée du couloir (12 h 58). Les accidents dont la localisation est inconnue se produisent plus tard, à 14 h 15 en moyenne.

- **Sens de progression**

60 % des accidents se produisent à la descente et 40 % à la montée. D'après l'étude d'Alpe Ingé (2012), disponible sur le site de la Fondation Petzl, confirmée par les données issues du capteur de fréquentation, la voie normale du Goûter est plus fréquentée à la descente (53 %) qu'à la montée (47 %). En effet, des cordées descendent par cet itinéraire après être montées par d'autres voies, les Trois Mont Blanc, l'aiguille de Bionnassay et les itinéraires engagés du versant italien.

Dans la traversée du couloir, les accidents se produisent autant à la montée qu'à la descente. En revanche, **sur l'arête, 70 % se produisent à la descente.** Il est intéressant de noter que ce constat est valable sur l'ensemble de la période étudiée.



Alpinistes dans la traversée du couloir. (11/07/2017, © J. Mourey)

6. Des types d'accidents partiellement conditionnés par leur lieu d'occurrence

**61 % des accidents par chutes de pierres se produisent dans la traversée du couloir.
45 % des accidents par dévissages se produisent sur l'arête.**

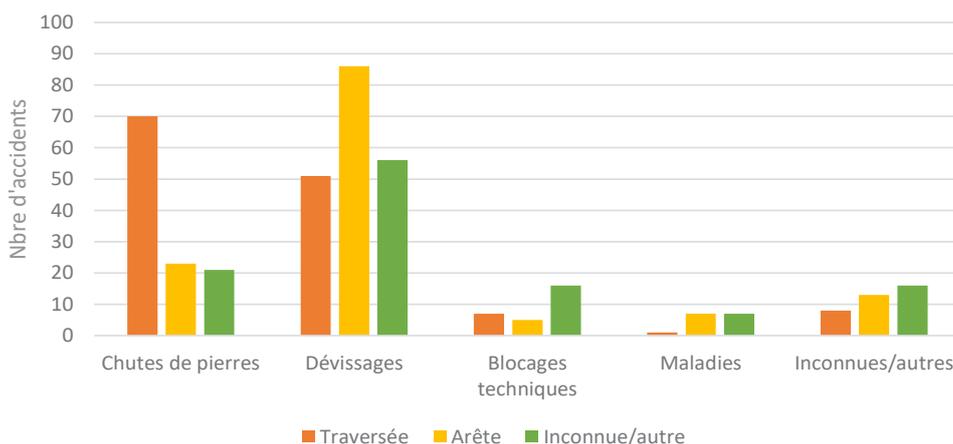


Figure 8. Cause des accidents en fonction de leur localisation.

On peut estimer que le pourcentage d'accidents liés à des chutes de pierres **dans la traversée du couloir est sous-estimé**, tout d'abord parce que certains accidents référencés en dévissage sont directement liés à des chutes de pierres qui frappent les alpinistes, mais aussi parce que, de manière indirecte, le risque de chutes de pierres pousse les ascensionnistes à traverser le couloir le plus vite possible — voire à essayer de les éviter en courant —, ce qui les conduit à commettre des fautes techniques qui entraînent leur dévissage.

Dans la traversée du couloir, on note une diminution de moitié des accidents par chutes de pierres sur l'ensemble de la période (Fig. 9), pour une légère augmentation du nombre d'accidents par dévissages et blocages techniques.

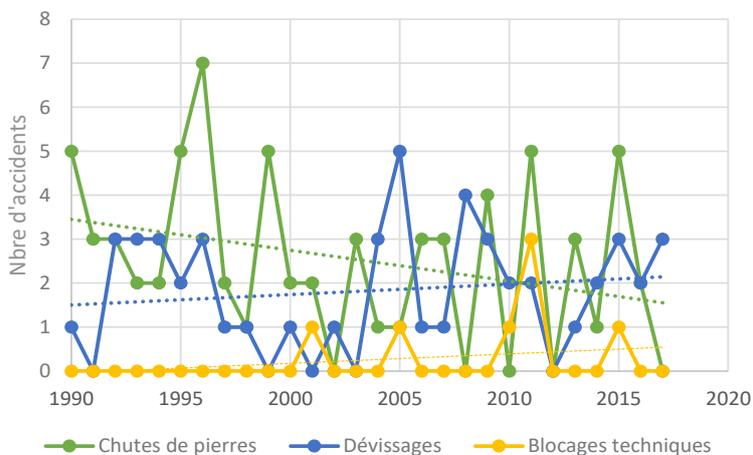


Figure 9. Évolution du nombre et de la cause des accidents dans la traversée du couloir.

Sur l'arête, le nombre d'accidents par dévissages a doublé sur l'ensemble de la période (Fig. 10), pour une moyenne de 3,8 par an. Le nombre d'accidents par chutes de pierres est plus faible (en moyenne 0,8 par an), surtout en comparaison avec la traversée du couloir.

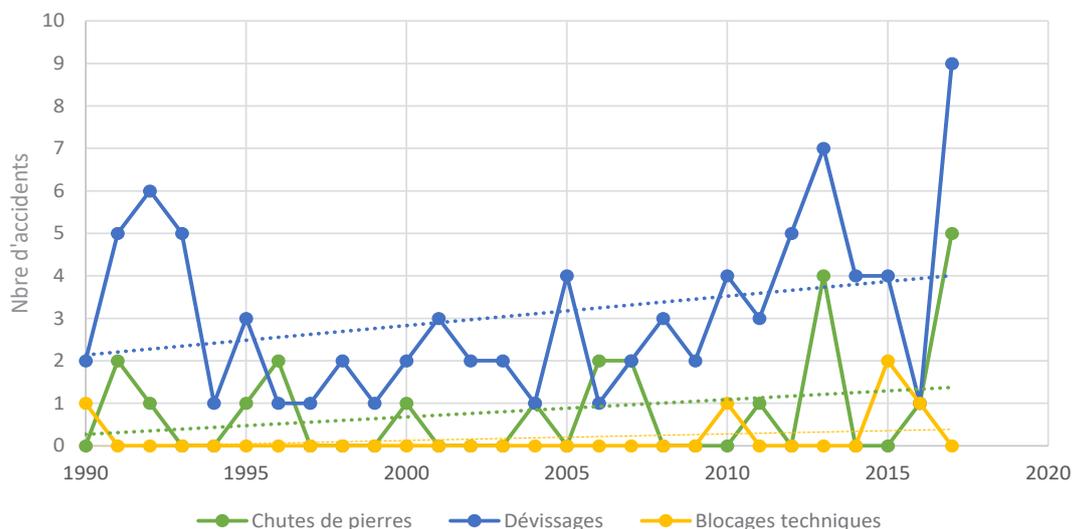


Figure 10. Évolution du nombre et de la cause des accidents qui se sont produits sur l'arête.

Les chutes de pierres, une double origine

La cause première des chutes de pierres est liée aux conditions géomorphologiques de l'ensemble de la face, constituée de gneiss très fracturé, qui favorise l'occurrence de chutes de pierres et de blocs, d'autant plus que l'appel au vide lié à la pente est fort (pente moyenne d'environ 40°). De plus, la dégradation du pergélisol (terrains gelés en permanence pendant au moins deux années consécutives, qui ont un rôle stabilisateur) et le déenneigement de plus en plus rapide du couloir, deux processus géomorphologiques liés au réchauffement climatique, favorisent les chutes de pierres. Celles-ci sont par conséquent probablement plus fréquentes et mobilisent des volumes parfois importants. Une étude scientifique est en cours afin de mieux comprendre ces processus et leur impact sur les chutes de pierres.

Le second facteur à l'origine des chutes de pierres est le cheminement des alpinistes, qui peuvent déclencher des chutes de pierres dont certaines affectent les cordées situées en aval et dans la traversée du couloir.

L'étude d'Alpes Ingé (2012) a montré que 75 % des chutes de pierres se produisent entre 10 heures et 16 h 30 et que la période la plus critique se situe entre 11 heures et 13 h 30 (34 % des événements observés) avec, en moyenne, une chute de pierres toutes les 17 minutes. Cependant, cette étude ne fait pas la distinction entre les chutes d'origine naturelle et celles qui sont déclenchées par le passage des alpinistes.

7. Une augmentation du nombre d'accidents qui peut s'expliquer par une augmentation de la fréquentation de l'itinéraire

Comme cela a été montré dans la première partie de cette étude, le nombre d'accidents a tendance à augmenter entre 1990 et 2017. Cette augmentation peut être mise en lien avec la croissance de la fréquentation de l'itinéraire.

La donnée la plus précise pour estimer une éventuelle évolution de la fréquentation de l'itinéraire est le nombre de nuitées dans les refuges de Tête Rousse et du Goûter. Il faut cependant noter quelques limites de cette donnée : ce nombre de nuitées n'inclut pas les campeurs, les ascensions à la journée et ceux qui gravissent le mont Blanc par un autre itinéraire, mais peuvent redescendre par la voie normale. Par ailleurs, certains ascensionnistes dorment dans les deux refuges et peuvent donc être comptés deux fois. Cette information reste néanmoins un indicateur éclairant.

On constate que **le taux d'accroissement moyen du nombre de nuitées dans les refuges entre 1995 et 2017 (0,5 %) est exactement le même que le taux d'accroissement du nombre d'accidents entre 1990 et 2017 (0,5 %) (Fig. 11)**. Cette corrélation suggère que **l'augmentation du nombre d'accidents est liée à l'augmentation de la fréquentation de l'itinéraire**.

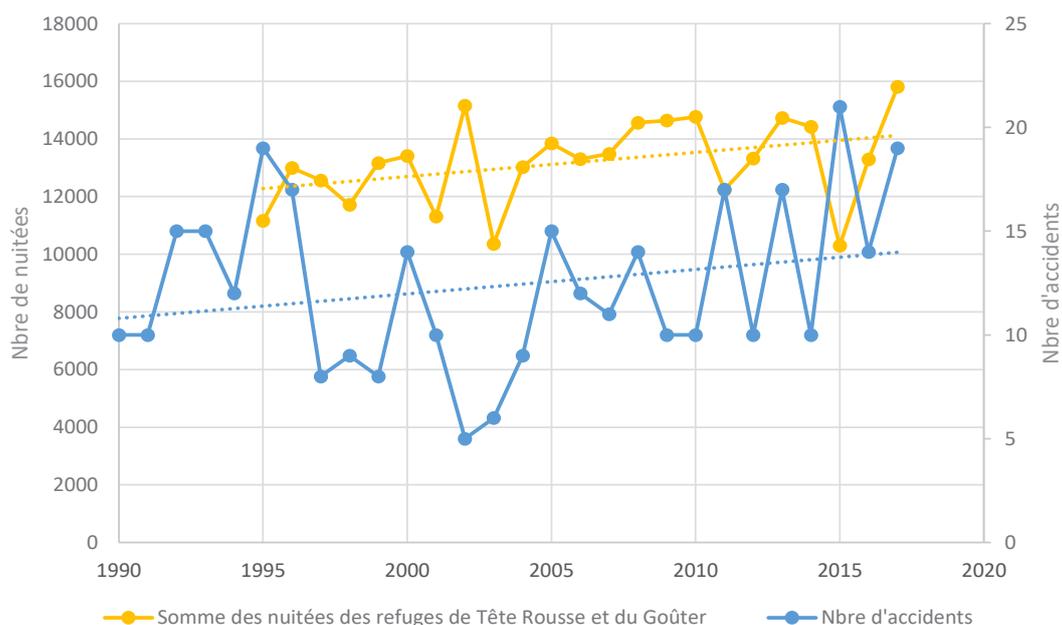


Figure 11. Évolution de la somme des nuitées dans les refuges de Tête Rousse et du Goûter entre 1995 et 2017 (à gauche) et évolution du nombre d'accidents entre 1990 et 2017 (à droite).

Sur l'ensemble de la période, on constate :

- un décès pour 4 952 nuitées (refuge du Goûter plus refuge de Tête Rousse).
- un accident pour 1 219 nuitées.

8. 2017, un été particulièrement meurtrier : étude détaillée de la fréquentation et de l'accidentologie

L'été 2017 a été particulièrement accidentogène avec 20 accidents (contre 12 en moyenne) et un taux de gravité très important : 11 personnes sont décédées et 8 blessées.

Du 1^{er} juin au 30 septembre 2017, il y a eu 29 182 passages dans le couloir. La fréquence moyenne est d'un accident pour 1 535 passages et d'un décès pour 2 652 passages.

Il y a en moyenne 35 décès d'origine traumatique par an dans la pratique de l'alpinisme estivale en France (source SNOSM). En 2017, le nombre de décès entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter représente le tiers (31,4 %) des décédés en alpinisme en France.

Comment expliquer un nombre aussi élevé d'accidents ? Tient-il aux chutes de pierres, à la météo, à un manque de compétence des ascensionnistes, à un manque d'équipement et d'information, à l'importance de la fréquentation, ou bien à d'autres facteurs encore ?

Dans la limite des informations disponibles, on sait que cinq accidents dont deux décès seraient directement liés à des chutes de pierres, treize dont huit décès seraient liés à des dévissages dans le couloir, soit dans la traversée soit depuis l'arête, sans que l'on sache si une chute de pierres est à l'origine de ces dévissages. Toutefois, on note qu'ils ne se sont pas produits de manière plus significative quand le couloir était sec ou pendant les périodes de chutes de pierres intenses. En revanche, on remarque un lien fort entre pic de fréquentation et occurrence des accidents. Il y a eu en moyenne 202 passages ($\pm 4\%$) par jour dans le couloir pendant la saison estivale 2017.

• Accidentologie et fréquentation moyenne à la journée

À l'échelle journalière, la traversée du Grand Couloir s'organise autour de trois pics de fréquentation (Fig. 12). Les deux premiers se situent à 2 heures et à 6 heures du matin. Ils correspondent aux départs du refuge de Tête Rousse en direction du sommet. Le troisième s'étale entre 9 h 30 et 14 heures, avec un pic principal à 11 h 30, et représente la grande majorité de la fréquentation. Il correspond aux ascensionnistes qui descendent du sommet et à ceux qui montent au refuge du Goûter depuis le Nid d'Aigle, où le premier train arrive à 8 h 30.

Moyenne journalière : 202
Moyenne mensuelle : 6 139

Jours les plus fréquentés :
- dimanche 13 août, 638 ;
- lundi 03 juillet, 584 ;
- vendredi 08 septembre, 567.

Répartition par sens de passage :
- descente, 53 % ;
- montée, 47 %.

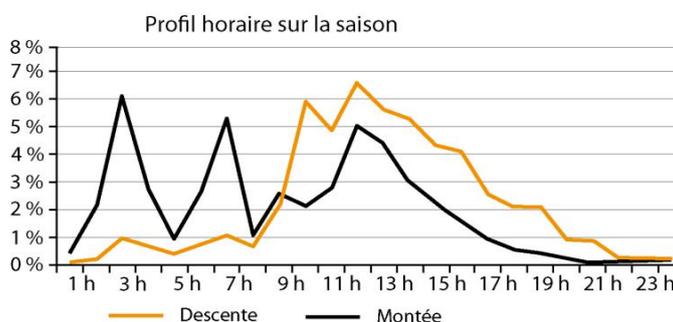


Figure 12. Fréquentation du Grand Couloir du Goûter et chiffres clés en nombre de passages, entre mai et octobre 2017. L'ensemble des données présente une précision de $\pm 4\%$.

La figure 12 montre qu'une majorité d'ascensionnistes traversent le couloir au mauvais moment lorsque les chutes de pierres sont les plus fréquentes (entre 11 heures et 13 h 30).

En 2017, les accidents se sont produits en majorité à la descente et dans l'après-midi (14 h 41 en moyenne), c'est-à-dire quand les ascensionnistes sont le plus fatigués, lors du pic de fréquentation et lorsque les chutes de pierres sont les plus intenses. Seuls trois accidents se sont produits lors des deux premiers pics de fréquentation de la nuit et du matin, quand les chutes de pierres et la fréquentation sont les plus faibles.

Comment optimiser les horaires

À la lumière de ces résultats, partir du refuge de Tête Rousse le matin (entre 2 heures et 6 heures) permet de traverser le couloir tôt, lorsque la fréquentation et les chutes de pierres sont les plus faibles. En revanche, la descente se fera probablement en fin de matinée/début d'après-midi, soit au moment où les chutes de pierres et la fréquentation sont les plus importantes.

Monter directement au refuge du Goûter depuis le Nid d'Aigle présente l'inconvénient de traverser le couloir tard dans la matinée. Toutefois, ce schéma d'ascension permet d'atteindre le sommet tôt dans la matinée et de redescendre le couloir plus tôt qu'en partant de Tête Rousse.

Les alpinistes peuvent réduire leur exposition au danger en dormant au refuge de Tête Rousse avant l'ascension du mont Blanc et au refuge du Goûter après. Mais cela nécessite une nuitée supplémentaire, qui pose d'autres difficultés notamment logistiques et financières.

Conclusion

Les données et les résultats présentés dans cette étude permettent d'identifier deux causes principales d'accident : les dévissages et les chutes de pierres. Cette étude souligne toutefois une **situation complexe au sein de laquelle les conditions géomorphologiques du secteur, les modalités de fréquentation de l'itinéraire et le profil des ascensionnistes sont intimement liés**. L'accidentologie qui en découle est particulièrement importante et meurtrière.

Quelques conclusions clés peuvent être formulées à partir de ce travail :

- L'augmentation apparente du nombre d'accidents semble liée sur la durée à une augmentation de la fréquentation de l'itinéraire.
- Il y a une évolution de la cause des accidents : la part des accidents liés à des chutes de pierres, bien que toujours importante, diminue pour laisser place à des accidents causés par des dévissages et des blocages techniques.
- Tout effort d'information et de prévention des accidents doit tenir compte du profil particulier des ascensionnistes sur cet itinéraire (nombreux étrangers, alpinistes de compétences variables), comme le fait la campagne « Le mont Blanc une affaire d'alpiniste » (brochures disponibles sur le site de La Chamoniarde et de la Fondation Petzl). Certains messages de cette campagne ne semblent pas encore suivis majoritairement, notamment les consignes d'encordement et d'assurance ainsi que les modalités d'utilisation particulières du câble de la traversée.
- La traversée du couloir a lieu en majorité au moment de la journée où les chutes de pierres sont les plus importantes.
- On note que le nombre d'accidents sur l'arête augmente de manière significative, au point de dépasser certaines années le nombre d'accidents dans la traversée du couloir.
- Les chutes de pierres ne sont pas le seul facteur qui explique l'importante accidentologie de ce secteur. Les modalités de fréquentation et les schémas d'ascension (nuits en refuge, arrivées par le train) doivent aussi être pris en compte.

Pour résumer

- Près de 13 interventions des secours en moyenne par saison estivale.
- De 1990 à 2017, on comptabilise 102 personnes décédées (26 %), 230 blessées (59 %) et 55 indemnes (14 %) sur un total de 387 personnes secourues (347 opérations de secours).
- La seule ascension du couloir et de l'arête du Goûter génère en moyenne près de quatre décès par an.
- Les victimes représentent 37 nationalités différentes et on note une tendance à l'internationalisation.
- On relève peu d'alpinistes encadrés par un professionnel dans les accidentés.
- On compte peu d'alpinistes encordés dans les accidentés.
- Le nombre d'accidents a tendance à diminuer dans la traversée du couloir alors qu'il augmente fortement sur l'arête.
- Les accidents par chutes de pierres se produisent surtout dans les 100 mètres de la traversée du couloir.
- L'augmentation du nombre d'accidents est corrélée à l'augmentation de la fréquentation.
- Les risques liés à la traversée du Grand Couloir et à l'ascension de l'arête jusqu'au refuge du Goûter font de ces passages un véritable point noir de l'alpinisme en France.

Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017

Cette étude est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire de recherche Environnement dynamiques et Territoires de montagne (EDYTEM, université Savoie Mont-Blanc), la Fondation Petzl et le Peloton de gendarmerie de haute montagne (PGHM) de Chamonix.

Son objectif principal est de mieux comprendre l'accidentologie sur la voie normale d'ascension du mont Blanc (4 809 m), point culminant des Alpes.



© O. Moret

Contacts :



Laboratoire EDYTEM

Jacques Mourey
jacques.mourey@univ-smb.fr

Université Savoie Mont-Blanc
Bâtiment Pôle Montagne
5 bd de la Mer-Caspienne
73 376 Le Bourget-du-Lac Cedex



Fondation Petzl

Olivier Moret
Secrétaire général
omoret@fondation-petzl.org

Cidex 105 A – ZI Crolles
38 920 Crolles



Peloton de gendarmerie de haute montagne

Lieutenant-Colonel Stéphane Bozon
stephane.bozon@gendarmerie.interieur.gouv.fr

Caserne Anselme
69 route de La Mollard
74 403 Chamonix-Mont-Blanc

8.4. Mesure de la fréquentation par caméra semi-automatique

Face aux difficultés rencontrées avec les capteurs pyroélectriques à l'aiguille du midi et sur l'accès à la Mer de Glace, une méthode de comptage automatique des alpinistes par caméra a commencé à être développée à l'aiguille du Midi. Les premiers résultats obtenus au cours de l'été 2018 permettent une meilleure évaluation de la qualité des mesures effectuées par capteur pyroélectrique. Le comptage automatique par caméra est une méthode de plus en plus utilisée pour mesurer des flux de personnes (Yahiaoui, 2007) ou compter le nombre de personnes qui utilisent un espace à un moment donné (Osario *et al.*, 2008). Cette méthode permet de s'affranchir des difficultés liées à l'installation des capteurs pyroélectriques et aux variations du terrain au cours d'un même été. Plusieurs entreprises privées (dont *Eco-compteur*) proposent des solutions clé en main de comptage de personnes par caméra, mais elles sont soit très onéreuses, soit inadaptées à une installation en haute montagne. Aussi, en partenariat avec l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), et avec le support du projet ANR-11-EQPX-0002 *Amiqua4Home*, nous avons démarré le développement d'un dispositif et d'un logiciel pour le comptage automatique des alpinistes sur l'arête de l'aiguille du Midi, adaptés aux conditions de mesure spécifiques rencontrées en haute montagne.

8.4.1. Présentation du dispositif

Sur le terrain, le dispositif consiste en une caméra AXIS P1357 (Fig. 8.9) installée sur l'un des murs de la gare du télécabine *Panoramic Mont Blanc*, sur la face est de l'aiguille du Midi et orientée plus ou moins perpendiculairement au cheminement des alpinistes sur l'arête. Les alpinistes sont par conséquent très bien visibles et dissociables les uns des autres. Leur sens de passage est aussi aisé à déterminer par un logiciel de comptage automatique. Ce dernier est basé sur la détection de formes, renforcée par un processus de *DeepLearning* (méthode d'apprentissage automatique basé notamment sur l'entraînement d'un algorithme à partir d'un échantillon de référence ; Schmidhuber, 2015). L'utilisation d'une caméra induit deux exigences qui peuvent être difficiles à gérer en milieux naturels : l'approvisionnement en électricité, rendue ici facile grâce à la proximité immédiate des installations de la *Compagnie du Mont-Blanc*, et le stockage des données. Dans notre cas, la caméra filme en 5 mégapixels. Par conséquent, s'il faut filmer en continu et enregistrer l'ensemble des vidéos, 51 Go de données sont générés en 12h soit 4,5 To en 3 mois. De plus, une telle quantité de données serait difficile à traiter par la suite. Afin de limiter le volume de données enregistrées, nous avons intégré le *plug-in Video Motion Detection* dans la caméra : il permet de détecter les mouvements dans une fenêtre prédéterminée et nous avons paramétré la caméra pour qu'elle enregistre une vidéo de 10 secondes uniquement lorsqu'un mouvement est détecté (Fig. 8.9). Le volume de données alors enregistré est beaucoup plus faible - 2,5 Go par jour en moyenne – et peut être stocké directement sur une carte SD intégrée à la caméra. La durée de 10 secondes a été choisie sur la base d'une estimation du temps moyen nécessaire pour un alpiniste pour traverser la zone de prise de vue. La fenêtre de déclenchement est alors localisée au milieu de la prise de vue, à l'endroit atteint par les alpinistes en 5 secondes environ depuis les extrémités de la zone, qu'ils montent ou qu'ils descendent l'arête (Fig. 8.9).

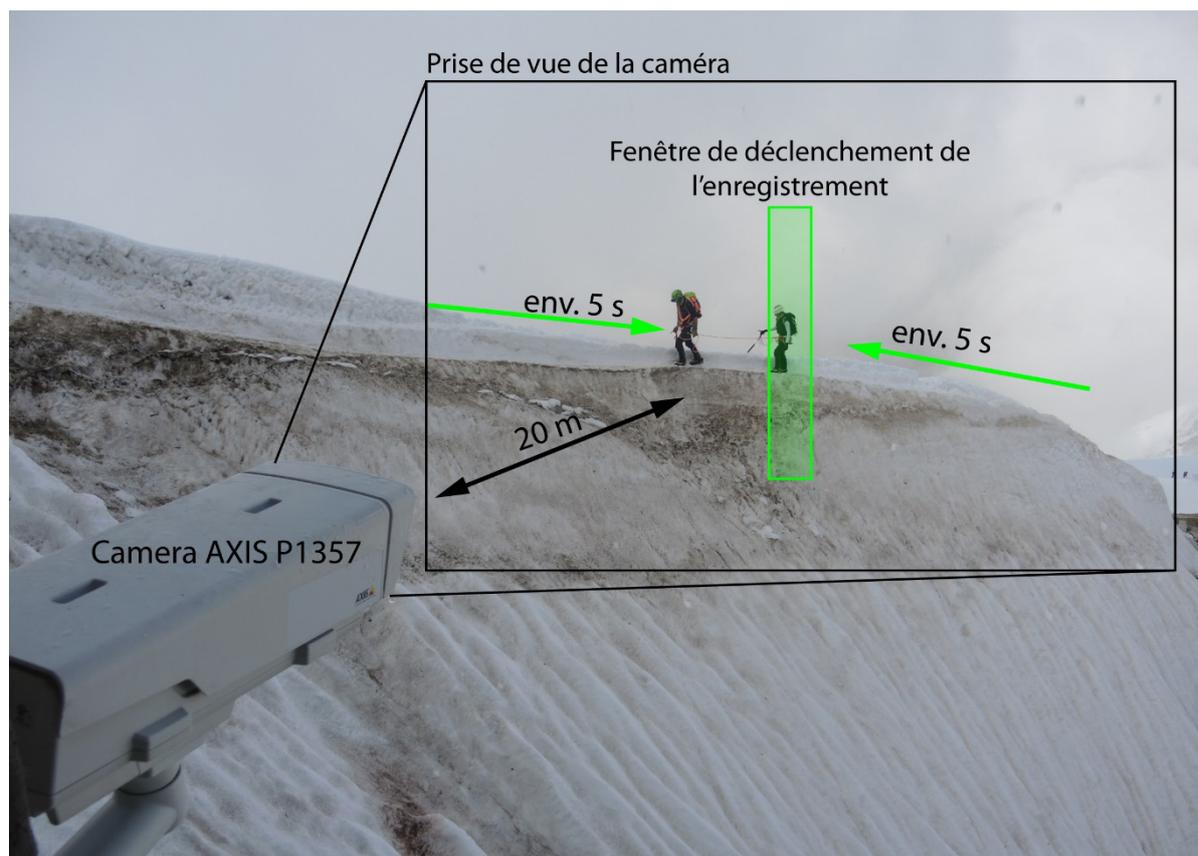


Figure 8.9. Dispositif – caméra AXIS P1357 – installé sur le terrain et position de la fenêtre de déclenchement de l'enregistrement. Cette dernière est positionnée au centre de la prise de vue de la caméra.

Le téléphérique de l'aiguille du Midi ayant été fermé du 17 mai au 4 juillet 2018 pour travaux, il ne nous a été possible d'installer ce dispositif que le 26 juillet 2018. De plus, un problème dans l'enregistrement des données est survenu et une chute de glace depuis le toit du bâtiment a bouleversé l'orientation de la caméra. En conséquence, seules les données du 28 juillet et du 1^{er} au 04 août sont utilisables. Malgré tout, ces données sont suffisantes pour développer et tester une première version du logiciel de comptage automatique.

8.4.2. Erreurs de mesure et résultats

D'après les premiers résultats obtenus, le logiciel fonctionne bien, y compris lorsque 2 ou 3 personnes traversent la zone de prise de vue en même temps, en ne déclenchant la caméra qu'une seule fois - *i.e.* s'il y a moins de 10 secondes séparant le moment où le premier de cordée déclenche la caméra et le moment où le dernier de cordée entre dans la fenêtre de déclenchement - et ce, indépendamment de la météo. En revanche, si les alpinistes traversent la prise de vue sur un laps de temps plus long, la caméra va enregistrer plusieurs vidéos pour les mêmes personnes. Le logiciel comptabiliserait donc plusieurs fois les mêmes personnes. Ce problème se pose en particulier pour les cordées qui avancent très lentement, donc généralement à la montée, ou lorsque les alpinistes sont encordés loin les uns des autres (Fig. 8.10).



Figure 8.10. Une cordée de 3 personnes remonte très lentement l'arête de l'aiguille du Midi et déclenche trois fois de suite l'enregistrement d'une vidéo, à 12 secondes d'intervalle. Au total, le logiciel comptabilise 7 passages différents au lieu de 3.

Ce problème concerne 27 % des vidéos (177 sur 657) et est identifiable si l'intervalle entre deux vidéos est inférieur à 22 secondes. Un premier contre-comptage manuel à partir de ces 177 vidéos a été réalisé. Il indique que ce problème implique une erreur de mesure de 19 % sur le nombre total de passages (Tab. 8.4). Pour réduire cette erreur, la durée des enregistrements aurait dû être plus longue, aux alentours de 20 secondes, afin de limiter le nombre de vidéos sur lesquelles ce sont les mêmes personnes qui sont filmées. Cependant, cela aurait doublé le volume de données enregistrées et demandé un système de stockage additionnel.

Période considérée et sens de passage		Comptage automatique (nbre de passages)	1 ^{er} contre-comptage manuel (nbre de passages)	Erreur (en %)
01/08 au 04/08	Montée	569	472	20
	Descente	1011	855	18
	Total	1580	1327	19

Tableau 8.4. Erreurs de mesure liées à la multiplication des vidéos sur un laps de temps très court.

Une autre limite est liée au fait que tant que des alpinistes sont présents dans la fenêtre de déclenchement, la caméra n'enregistre pas de nouvelle vidéo. Par conséquent, lorsque des alpinistes restent stationnés dans la fenêtre de déclenchement, en général pour laisser passer d'autres cordées, prendre une photo ou ajuster leur matériel, etc., il est possible que d'autres cordées passent sans que de nouvelles vidéos soient enregistrées.

Ensuite, d'autres erreurs de mesure, plus difficiles à identifier car liées aux paramètres internes du logiciel étant possibles - détection du sens de passages, distinction entre des alpinistes qui se croisent ou qui sont très proches les uns des autres, avec un gros sac à dos etc. - un deuxième contre-comptage manuel a été réalisé pour l'ensemble des vidéos sur deux périodes : le 02/08 entre 06 et 09 h et le même jour entre 15 et 16 h. Les erreurs de mesures restent relativement importantes (Tab. 8.5) et variables en fonction des situations à l'origine de l'enregistrement des vidéos.

Période considérées et sens de passage		1 ^{er} contre-comptage manuel (nbre de passages)	2 ^e contre-comptage manuel (nbre de passages)	Erreur (en %)
02/08 06 – 9 h	Montée	4	10	-60
	Descente	147	140	+5
	Total	151	150	+0,6
02/08 15 – 16 h	Montée	30	25	+20
	Descente	40	34	-12
	Total	70	59	+18
			<i>RMSE</i> sur le total	12

Tableau 8.5. Résultats issus des deux contre-comptages manuels.

Au même titre que pour les résultats issus des capteurs pyroélectriques, les chiffres issus de la caméra offrent, malgré les limites de mesure, une première estimation de la fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi (Tab. 8.6). Les chiffres présentés ci-après sont issus du premier contre-comptage manuel. Les erreurs de mesures liées au sur-comptage présentés dans la figure 8.10 ont donc été corrigées. Le 1^{er} août, jour de mauvais temps, 134 ± 16 passages ont été enregistrés sur l'ensemble de la journée. Les 02 et 03 août, la météo ayant été très favorable, 671 ± 81 et 404 ± 48 passages ont respectivement été enregistrés. Pour le 04 août, nous ne possédons des données que jusqu'à 13 h ; elles ne seront donc pas présentées.

Date	Montée	Descente	Total
1 ^{er} août 2018	52 ± 6	82 ± 10	134 ± 16
2 août 2018	165 ± 20	506 ± 61	671 ± 81
3 août 2018	165 ± 20	239 ± 29	404 ± 48
Total	382 ± 46	827 ± 99	1209 ± 145

Tableau 8.6. Nombre de passages sur l'arête est de l'aiguille du Midi, comptabilisés à partir des vidéos acquises par la caméra les 1^{er}, 2 et 3 août 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors du deuxième contre-comptage manuel (Tab. 8.5).

Bien que la comparaison entre les données issues du capteur pyroélectrique en 2017 et de la caméra en 2018 ait une portée très limitée - 3 jours seulement de données disponibles pour le comptage par caméra -, il est intéressant de noter que les chiffres sont du même ordre de grandeur. De plus, la distribution moyenne journalière des passages dénombrés par caméra les 2 et 3 août confirme aussi qu'il existe un pic de fréquentation principal à la descente entre 07 et 09 h. Cependant, une grosse différence apparaît quant au sens de passage. En effet, d'après le capteur pyroélectrique, il y a plus de passages à la montée (53 %) qu'à la descente (47 %). À l'inverse, d'après les comptages par caméra, il y a beaucoup plus de passages à la descente (68 %) qu'à la montée (32 %). Au regard de l'organisation

connue de la pratique de l'alpinisme à partir de l'aiguille du Midi, les chiffres issus du comptage par caméra semblent les plus plausibles, le retour de nombreuses voies rocheuses et notamment de la très fréquentée arête des Cosmiques se faisant sans passage par l'arête est.

Malheureusement, les lacunes relatives au comptage pyroélectrique et la très courte période couverte par les données issues de la caméra ne permettent pas d'affiner cette comparaison ni de mieux comprendre précisément comment s'organise la fréquentation de la haute montagne au départ du téléphérique de l'aiguille du Midi.

8.4.3. Limites du dispositif et futurs développements

Face aux limites et erreurs de mesures du dispositif mis en place en 2018, une nouvelle version du logiciel de comptage devrait être développée pendant l'été 2019. Afin de ne pas être confronté au même problème de sur-comptage dû à l'enregistrement de plusieurs vidéos pour des mêmes personnes, le logiciel serait intégré à la caméra et compterait directement le nombre de passages dans une fenêtre prédéterminée, sans enregistrer de vidéos. Cette méthode présente de nombreux avantages. Le comptage étant effectué en direct, aucune vidéo ne sera stockée et une même personne ne devrait pas être comptée à deux reprises. De plus, le nombre de passages mesuré pourra être consulté en temps réel, ce qui peut être intéressant pour certaines applications de gestion (gestion des sites touristiques, des transports, etc.). En revanche, le problème lié à des alpinistes restant immobiles ou se croisant exactement au niveau de la fenêtre de mesure devrait être toujours présent, mais on peut considérer que cette limite sera minime. De plus, il sera impossible de contre-compter le nombre de passages sur les vidéos ; des contre-comptages sur le terrain devront donc être réalisés pour calculer les erreurs de mesures.

Plus généralement, une limite de la méthode de comptage de personnes par caméra en milieu naturels est le fait que le logiciel de comptage doit être adapté à chaque configuration et donc à chaque site, les formes à détecter étant à chaque fois différentes en fonction de l'orientation et de la distance caméra-personnes. De plus, le dispositif a besoin d'une alimentation électrique qui peut être problématique en fonction des sites d'installation (panneaux solaires ou batteries nécessaires). Enfin, la caméra est particulièrement volumineuse et peut être sujette à du vandalisme si elle est accessible facilement.

Conclusion du Chapitre 8

Les résultats issus des capteurs pyroélectriques installés sur l'accès à la Mer de Glace et sur l'arête est de l'aiguille du Midi sont entachés d'importantes erreurs de mesures en raison des conditions de terrain dans lesquelles ils ont été installés et du mode de déplacement des alpinistes. Par conséquent, les résultats acquis sont très parcellaires et restent au niveau exploratoire. Ils n'ont pas permis de répondre aux questions initialement posées et notamment d'évaluer si les impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme concernés impliquent une variation de la fréquentation de la haute montagne au cours d'une saison estivale, comme conséquence de la prise en compte et de l'adaptation des alpinistes à l'évolution des conditions. Ils offrent toutefois pour la Mer de Glace une estimation de la fréquentation du secteur par les alpinistes.

Dans le cas du couloir du Goûter, les résultats sont beaucoup plus satisfaisants, le site d'installation s'apparentant à un sentier de randonnée classique. L'identification d'un schéma de fréquentation où la majorité des ascensionnites travers le couloir au moment où les chutes de pierres sont les plus fréquentes confirme l'intérêt des mesures de fréquentation et montre qu'il y a un manque de prise en compte et d'adaptation des alpinistes au risque local de chute de pierre. Ce constat est confirmé par l'étude de l'accidentologie qui met en évidence une situation où les conditions géomorphologiques sont un des principaux facteurs qui expliquent le nombre et la gravité des accidents dans ce secteur, en parallèle des modalités de fréquentation et du profil des ascensionnistes. L'intérêt de l'étude d'accidentologie et des données de fréquentation comme un outil d'aide à la décision pour les acteurs locaux a été confirmé à plusieurs reprises. Elles ont notamment été mobilisée lors des débats pour la mise en place des systèmes de régulation de la fréquentation pour l'été 2018 et 2019. De plus, la mobilisation très régulière de ces données par la presse locale (*Le Dauphiné Libéré*), nationale (*Le Monde*) et la presse spécialisée (*Alpine Mag.*, *Montagnes Magazine*) est aussi un marqueur de son intérêt pour la communauté montagnarde en général. Un dispositif permettant d'identifier les périodes d'occurrence des chutes de pierres en continu (cf. : Chapitre 5), installé en 2018 et en 2019, permettra aussi de mieux étudier les liens entre fréquentation, accidentologie et chutes de pierres.

À l'aiguille du Midi, les premières données acquises grâce au dispositif de comptage automatique par caméra, en développement au cours de l'été 2018, sont encourageantes mais les erreurs de mesures restent importantes. Le nouveau logiciel de comptage développé et testé pendant l'été 2019 devrait permettre de réduire considérablement les erreurs de mesures et d'obtenir des résultats plus fiables.

Pour réaliser une mesure de la fréquentation globale de la haute montagne sur le versant français du massif du Mont Blanc, 8 stations de comptages seraient nécessaire. En comparaison, le PNE compte 17 stations. Elles permettent une analyse relativement fine de la fréquentation (Bourdeau, 2014).

Conclusion de la Partie III

Les impacts du changement climatique poussent les alpinistes à adapter leur pratique. Concernant les guides de haute montagne, il apparaît que leur sensibilité aux impacts du changement climatique est variable notamment en fonction du type de clientèle avec laquelle ils travaillent et des activités qu'ils pratiquent. À l'échelle des guides français, le changement climatique est un facteur qui contribue à l'évolution en cours de la profession. Les guides s'adaptent notamment en se tournant vers des activités qui se pratiquent hors de la haute montagne. Ceux qui essaient de maintenir un maximum de leur activité sur l'alpinisme, malgré l'évolution de la haute montagne, cumulent le plus de difficultés en lien avec le changement climatique.

Plus globalement, si on considère l'ensemble des alpinistes amateurs et professionnels, à travers le nombre de nuitées enregistrées dans les refuges, nous avons mis en évidence que les impacts du changement climatique sur les itinéraires peuvent entraîner une diminution de la fréquentation des refuges de haute montagne. C'est un constat qui ne peut toutefois pas être généralisé. Dans certains cas, des refuges dont les itinéraires à proximité sont très affectés voient leur fréquentation augmenter, notamment dans le cas de la voie normale d'ascension du mont Blanc. D'autre part, cette diminution de la fréquentation des refuges lorsque les conditions des itinéraires à proximité sont très défavorables à la pratique de l'alpinisme (notamment en périodes caniculaires) est aussi un marqueur de la prise en compte et de l'adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique.

L'étude des flux d'alpinistes sur l'accès à la Mer de Glace et l'arête de l'aiguille du Midi n'a cependant pas permis d'étudier les variations de la fréquentation à l'échelle de la période estivale et de faire le lien avec les conditions en haute montagne pour la pratique de l'alpinisme. Les erreurs de mesures liés aux capteurs pyroélectriques utilisés pour quantifier les flux se sont révélées trop importantes. Toutefois, au niveau du couloir du Goûter, sur la voie normale d'ascension du mont Blanc, les mesures de fréquentation se sont avérées beaucoup plus fiables, les conditions d'installation du capteur étant beaucoup plus adaptées. L'acquisition de connaissances sur la fréquentation et l'accidentologie a permis d'identifier un schéma d'ascension non adapté au risque local associés aux chutes de pierres et les principales causes des accidents. Ce constat confirme la nécessité de mieux comprendre les facteurs qui conditionnent l'occurrence de ces déstabilisations rocheuses pour mieux identifier les périodes où le risque est le plus important mais aussi pour adapter la prévention menée à destination des ascensionnistes. La poursuite de notre étude et l'analyse complète des données acquises jusqu'à la fin de l'été 2019 permettra d'affiner encore nos connaissances et de répondre à des enjeux autant scientifiques quant à la connaissance des processus gravitaires en haute montagne et l'organisation d'une pratique socio-sportive sur un espace donné, qu'opérationnels par une meilleure compréhension de la fréquentation du site et de la vulnérabilité des alpinistes.

Conclusion générale

Ce travail de recherche a permis d'améliorer notre compréhension des impacts du changement climatique sur la pratique de l'alpinisme. Deux thématiques ont été plus particulièrement traitées : (i) l'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation, et (ii) la perception et l'adaptation des alpinistes face à l'évolution des itinéraires préalablement mise en évidence. Cette conclusion générale synthétise d'abord les principaux résultats obtenus et les remet en perspective vis-à-vis de la définition de l'alpinisme et de son évolution présentées dans le Chapitre 1 et de l'état des connaissances exposé dans le Chapitre 3. Enfin, des perspectives de travail sont proposées.

Principaux résultats

Les principaux résultats de ce travail doctoral ont confirmé le fait que l'alpinisme ne bénéficie pas d'effets positifs du changement climatique sur les activités touristiques de pleine nature dans les Alpes (*cf.* : Chapitre 3). L'évolution particulièrement rapide et intense des milieux de haute montagne entraîne à l'inverse une augmentation de la dangerosité et de la difficulté technique des itinéraires et une réduction de la durée des périodes propices à la pratique. Nos résultats, résumés ci-après, contribuent également à compléter et approfondir les études précédemment réalisées sur cette thématique (*cf.* : Chapitre 3).

1. L'évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation

Notre travail sur les itinéraires d'alpinisme a principalement consisté à retracer leurs évolutions afin d'identifier celles qui sont liées aux impacts du changement climatique. De cette manière, les phénomènes géomorphologiques qui les affectent, et leurs effets sur les conditions de pratique de l'alpinisme, ont été identifiés avec précision. Cela contribue à combler une des principales lacunes de la littérature scientifique sur le sujet.

Les accès aux refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales

- Les phénomènes géomorphologiques qui affectent les itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne dans les Alpes occidentales ont été identifiés et classifiés. La perte d'épaisseur et le retrait du front des langues glaciaires sont les deux principaux (80 % des cas étudiés).
- Ces phénomènes impliquent une augmentation de la dangerosité et de la difficulté technique des itinéraires. Les différentes entités en charge de leur gestion les adaptent en conséquence, ce qui implique une forte augmentation des coûts d'aménagement.
- Dans certains cas, malgré l'adaptation des itinéraires, la fréquentation du refuge diminue, l'accès devenant tout de même trop long et/ou trop difficile techniquement pour une part de la clientèle.

D'après l'étude de cas menée pour le bassin de la Mer de Glace, la détérioration des accès aux refuges est de plus en plus rapide, en lien avec l'accélération de la perte d'épaisseur des glaciers. À la fin de l'été 2016 il y avait ainsi un total de 633 m de dénivelé d'échelles pour un ajout de 411 m depuis 2001.

Les voies d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc

L'étude de l'évolution des itinéraires d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc depuis les années 1970 a permis d'obtenir de nombreux résultats inédits et de répondre aux principales questions posées lors de la revue de littérature quant au nombre et aux caractéristiques des phénomènes en jeu, les types d'itinéraires qui sont les plus affectés et l'évolution de leurs conditions de fréquentation (difficulté, dangerosité et saison pour en faire l'ascension).

- 25 phénomènes géomorphologiques et glaciologiques, liés au changement climatique, affectent les itinéraires d'alpinisme dans le massif du Mont Blanc. Les trois phénomènes qui affectent le plus les itinéraires sont le désenglacement du substratum rocheux, des rimayes et des crevasses plus ouvertes et l'augmentation de l'angle de pente des glaciers. Il en résulte une augmentation généralisée de la difficulté et de la technicité des voies d'ascension.
- En moyenne, chacun des 95 itinéraires étudiés est affecté par neuf de ces phénomènes. Autrement dit, un alpiniste qui souhaite les fréquenter doit prendre en compte et potentiellement adapter sa pratique à neuf phénomènes liés au changement climatique.
- Un quart des itinéraires étudiés a fortement évolué en raison du changement climatique. Cela signifie qu'ils ne sont plus fréquentables pendant la période estivale. Trois ont même disparu.
- Plus globalement, le changement climatique et ses effets sur les itinéraires impliquent un décalage de plusieurs semaines de la période de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme vers le printemps, l'automne et même l'hiver. En été, ces périodes sont beaucoup plus aléatoires et difficiles à prévoir.

Les évolutions considérées dans ce premier axe le sont sur un temps long (40-50 ans *a minima*), à travers les impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne. Toutefois, il est important de préciser qu'elles peuvent être réduites ou au contraire accentuées à l'échelle saisonnière, voire à celle du mois ou de la semaine. Les canicules, dont la fréquence a triplé depuis la fin du XIX^e siècle, sont parmi les phénomènes météorologiques qui vont largement accentuer les impacts du changement climatique sur les conditions de pratique de l'alpinisme.

L'évolution des accès aux refuges de haute montagne est aujourd'hui une difficulté notamment économique, juridique et sécuritaire, nécessitant une prise en compte et une adaptation des façons de faire de la part des gestionnaires. La mobilisation des données acquises dans cet axe de recherche a notamment aidé la CCVCMB et les gardiens de refuges de l'Espace Mont Blanc pour mieux évaluer les travaux nécessaires pour maintenir l'accessibilité des refuges et l'évolution future de la situation. Nos résultats ont aussi un intérêt pour *La Chamoniarde*, notamment pour la réalisation de campagne de prévention quant à l'évolution des itinéraires et la croissance de leur difficulté et dangerosité. Les connaissances inédites acquises dans ce travail doctoral sont en train d'être vulgarisées, en partenariat avec *La Chamoniarde* à travers des fiches thématiques, sur le même schéma que l'annexe 5.1.

Pour conclure sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme, il est légitime de se demander si l'évolution des milieux de haute montagne va permettre d'en ouvrir de nouveaux, notamment dans les secteurs

récemment désenglacés. Ritter *et al.* (2011) émettent d'ailleurs cette hypothèse pour les Alpes orientales. Toutefois, notre travail montre plutôt qu'à de rares exceptions près, les terrains récemment désenglacés ou qui sont apparus suite à un écroulement, sont pour le moment encore très instables et affectés par de nombreux processus dont des chutes de pierres. Il faudra encore certainement attendre quelques décennies pour pouvoir y envisager de nouvelles voies d'alpinisme.

2. Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique

Les guides de haute montagne français et valdotains

Afin de gagner en précision par rapport à certaines études (Behm, 2006 ; Probstl-Haider *et al.*, 2016) dans lesquelles plusieurs types de professionnels et de pratiquants de la montagne étaient considérés en même temps, nous nous sommes concentrés sur les guides de haute montagne français et valdotains (Italie). Nos résultats ont par ailleurs permis de compléter l'approche qualitative de Bourdeau (2014) sur les guides de haute montagne.

- Les résultats de notre enquête par questionnaire montrent que les guides de haute montagne français présentent une sensibilité importante aux impacts du changement climatique et que 99% d'entre eux sont contraints d'adapter leur pratique du métier à ces impacts selon cinq stratégies principales.
- Les guides qui font face au changement climatique avec le plus de facilité (50 % de la population) sont ceux qui se diversifient vers des activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne. Aussi, le changement climatique est-il un facteur qui accentue l'évolution actuelle du métier de guide en France, au sein duquel l'alpinisme tend à être relégué à un second rang, au profit d'activités plus ludiques présentant une prise de risque limitée.
- Bien que travaillant sur un même espace – le massif du Mont Blanc – la sensibilité climatique des guides valdotains semble beaucoup plus faible que celle des guides chamoniards.
- Le type de clientèle, régulière pour les guides valdotains et plutôt une clientèle « d'un jour » pour les chamoniards, ainsi que des structurations très différentes du tourisme entre les deux versants du massif, sont les principales raisons expliquant cette différence.

L'ensemble de ces résultats complète donc la littérature scientifique (*cf.* : Chapitre 3) qui n'avait pas identifié avec autant de précision et spécifiquement pour les guides de haute montagne les modalités d'adaptation les plus mises en place et les différentes catégories de guides en fonction de leur niveau de difficultés à s'adapter. Les connaissances acquises dans cet axe de recherche montrent donc l'évolution des conditions de travail des guides et leur vulnérabilité croissante face au changement climatique. Elles ont permis au SNGM de prendre la mesure des impacts du changement climatique sur la profession de guide dans son ensemble, d'évaluer le niveau de difficultés et la motivation des guides à s'adapter et d'identifier les mesures qu'ils mettent déjà en place. Elles sont donc une base importante dans l'accompagnement des guides dans leur adaptation, par le SNGM et dans la structuration du projet *Horizons Guides*, feuille de route du SNGM jusqu'à fin 2020.

Il est alors intéressant de remettre en perspective la conclusion de l'étude de Behm (2006), qui concluait à l'époque que les conséquences du changement climatique n'étaient pas considérées comme graves par les professionnels de la montagne interrogés. Notre travail montre aujourd'hui que dans les Alpes occidentales, les guides de haute montagne sont particulièrement sensibles aux impacts du changement climatique. Bien que des différences soient identifiées entre la vallée de Chamonix et la vallée d'Aoste, ces derniers sont considérés comme des facteurs ayant un impact relativement fort sur les conditions de pratique du métier et l'évolution de la profession en générale.

3. Adaptation des alpinistes et fréquentation de la haute montagne

Au départ de ce travail doctoral, un des principaux axes de recherche pressentis était l'étude de la fréquentation de la haute montagne à travers le nombre de nuitées dans les refuges afin d'étudier le questionnement suivant : les impacts du changement climatique en impliquent-ils une diminution ? Nous nous attendions au départ que les gardiens et la FFCAM auraient été beaucoup plus intéressés par les résultats d'une telle étude. Cependant, un certains nombres de difficultés imprévues ont été rencontrées, les données s'étant avérées très difficiles d'accès et présentant de nombreuses limites et biais. Aussi, l'ensemble de cet axe de recherche a été beaucoup moins traité que prévu. Toutefois, nous avons réussi à montrer que dans le massif du Mont Blanc, les impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme peuvent entraîner dans certains cas, et notamment en période de canicule, une diminution de la fréquentation des refuges de haute montagne. Cette diminution peut aussi être interprétée comme un indicateur potentiel de la prise en compte et de l'adaptation des alpinistes, dont les amateurs, aux impacts du changement climatique.

4. Développement méthodologique : comptage de personnes par caméra

Les difficultés rencontrées pour l'installation et l'utilisation des capteurs pyroélectriques nous ont apporté une importante expérience de terrain et les limites de la méthode ont été atteintes. Face à celles-ci, une méthode de comptage automatique de personnes par caméra est en cours de développement en partenariat avec l'INRIA. Cette méthode devrait trouver de nombreuses applications, notamment dans l'étude des sports de nature en montagne, où l'utilisation des capteurs pyroélectriques est souvent difficile voire impossible. La Compagnie du Mont Blanc, le programme *Refuges Sentinelles* et le Parc National des Ecrins se sont notamment montrés intéressés par cette méthode.

5. La vulnérabilité des alpinistes sur la voie normale d'ascension du mont Blanc

La voie normale d'ascension du mont Blanc, particulièrement affectée par le changement climatique et très fréquentée, connaît une accidentologie particulièrement importante. La mise à jour de la première étude d'accidentologie sur le couloir et l'arête du Goûter porte le nombre de décès à 102 entre 1990 et 2017 et celui des blessés à 230, soit 3,6 décès et 9 blessés par an. Les principales raisons de cette accidentologie (le tiers des accidents en alpinisme en France en 2011) sont les chutes

de pierres, la fréquentation particulièrement importante et le niveau technique et physique souvent insuffisant des ascensionnistes. D'autre part, la mesure de la fréquentation de cet itinéraire a permis d'identifier un schéma d'ascension non adapté au risque local de chutes de pierres. Il en résulte que la majorité des alpinistes traverse le couloir au moment de la journée où les chutes de pierres sont les plus intenses. Pour les acteurs locaux responsables de la gestion de cet itinéraire, l'ensemble des connaissances acquises leurs a permis de mieux comprendre comment s'organise la fréquentation de ce secteur et les raisons qui expliquent l'accidentologie particulièrement élevée. Aussi, elles ont été mobilisées à de nombreuses reprises, notamment pour la mise en place du dispositif de régulation de la fréquentation de l'itinéraire.

Le changement climatique et l'évolution de la pratique de l'alpinisme

A partir des années 1990, l'alpinisme entre dans une phase qualifiée de déclin. Le niveau technique et l'investissement dans la pratique diminue pour une majorité d'alpiniste et les courses les plus faciles, les plus emblématiques, les plus rapidement accessibles et les mieux équipées sont fréquentées en priorité. Plus globalement, les pratiques de la montagne se diversifient et se tournent vers des activités accessibles et ludiques. Il en résulte une diminution de la fréquentation de la haute montagne par les alpinistes (cf. : Chapitre 1). Cette évolution de la pratique de l'alpinisme n'est pas directement liée aux impacts du changement climatique, mais à des facteurs socio-culturels et économiques propres à cette époque.

Cependant, les résultats de ce travail doctoral montrent que les impacts du changement climatique agissent comme des révélateurs et des accélérateurs de cette évolution. En effet, ils impliquent une augmentation de la dangerosité et de la technicité des itinéraires, alors que le niveau technique des pratiquants diminue et que le contexte social se caractérise par une réticence à la prise de risque et par la judiciaireisation des sports de montagne. De plus, il implique une nécessité d'investissement accrue dans la pratique par un besoin de se maintenir régulièrement au courant des conditions et de se déplacer pour aller chercher les massifs où les conditions sont les plus favorables. Les courses d'initiation (notamment courses de neige et écoles de glace) sont parmi les plus affectées et les plus rapidement en mauvaises conditions, ce qui complique d'autant plus l'entrée dans la pratique. En outre, les conditions de pratique étant plus aléatoires et les topo-guides étant rendus parfois inexacts par l'évolution des itinéraires, la nécessité d'avoir de bonnes connaissances des techniques d'alpinisme est rendue d'autant plus prégnante. Il pousse aussi les guides de haute montagne à se détourner de l'alpinisme pour proposer des activités plus ludiques et qui ne se pratiquent pas en haute montagne (canyon, *via ferrata*, école d'escalade etc.). Plus globalement, les impacts du changement climatique, notamment en faveur de périodes caniculaires, entraînent la diminution de la fréquentation de la haute montagne, d'autant plus accentuée par une désynchronisation entre les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme et les flux touristiques majoritaires, de plus en plus concentrés sur la période 20 juillet-15 août.

Face à ce constat, si on se réfère à la définition systémique de l'alpinisme donnée dans le premier chapitre de ce manuscrit, nos résultats confirment qu'à partir des années 1990 le sous-système « milieux de haute montagne » affecte les deux autres sous-système « état d'esprit » et « connaissances et savoir-faire » et contribue à leur évolution. Aussi la pratique de l'alpinisme et son évolution ne peuvent plus être considérées uniquement par une approche socio-centrée et les impacts du changement climatique sur l'ensemble du système doivent d'être considérés.

Les impacts du changement climatique sur l'alpinisme : un enjeu de société

La forte mobilisation de l'ensemble de nos résultats par la presse locale (*Dauphiné Libéré*), nationale (*Le Monde, Montagne Magazine, Alpine Mag., La Montagne et l'Alpinisme, Arte, France Inter, France 3, M6, La Croix*) et internationale (*The Guardian, France 24, Vertex, Royal Dutch Climbing and Mountaineering Association, Rai Radio 1, El País*) et les régulières demandes de conférences grand public sont un marqueur de l'intensité du bouleversement que les impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne et l'alpinisme représentent, notamment pour la communauté montagnarde. Cela montre aussi que notre travail de recherche traite d'enjeux sociétaux et rejoint les intérêts des acteurs de la montagne. Ces enjeux concernent notamment la dégradation des paysages, la diminution de la fréquentation de la haute montagne, la détérioration des conditions de travail en alpinisme pour les guides, l'augmentation des aménagements nécessaires, le besoin d'adapter la prévention et l'accidentologie particulièrement importante sur certains secteurs.

Ces enjeux sont mobilisés de manière différentes entre la presse spécialisée et la presse internationale non spécialisée. Les enjeux abordés par les articles et émissions, notamment issus de la presse internationale et non spécialisée, sont l'évolution paysagère et esthétique des milieux de haute montagne, comme l'altération du symbole d'une pratique et d'une région aujourd'hui menacée par le changement climatique. L'utilisation de cette thématique est facilitée par le caractère visuel et facilement identifiable des évolutions et par l'ensemble des dangers qu'elles représentent, notamment pour les alpinistes. Les données sur l'accidentologie sont alors particulièrement mobilisées, d'autant plus qu'elles touchent la voie normale d'ascension du mont Blanc, symbole mondialement connu de l'alpinisme et de la haute montagne. De plus, l'évolution des milieux de haute montagne étant rapide et facilement visible, et la pratique de l'alpinisme étant symbolique et connue du grand public, cette thématique est un bon exemple - accessible, parlant et complet avec des implications économiques, symboliques et sécuritaires - des impacts du changement climatique sur les activités humaines qui est alors utilisé comme un outil de sensibilisation. Ces articles reflètent donc aussi la préoccupation générale face au changement climatique.

Dans la presse spécialisée l'approche est souvent différente. Les impacts du changement climatique sont principalement présentés par leurs implications concrètes pour la pratique de l'alpinisme et notamment les dangers qu'ils représentent pour les pratiquants et l'évolution des itinéraires. Les articles se donnent aussi un rôle de prévention. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous avons favorisé l'utilisation de nos résultats par la presse. Elle contribue à remplir notre objectif de partage

et de diffusion de connaissances pour favoriser des actions d'adaptation et de résilience des acteurs concernés. Enfin, les articles de la presse spécialisée affichent aussi une volonté de contribuer à la prise de conscience, par la communauté montagnarde, de l'urgence climatique.

Perspectives

Les résultats de ce travail permettent d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherches notamment par l'étude de nouveaux terrains, l'apport de solution quant aux difficultés d'accès à certaines données et l'extension de certaines thématiques de recherche.

Tout d'abord, il nous semble intéressant de questionner l'évolution des itinéraires d'alpinisme dans d'autres massif des Alpes que le massif du Mont Blanc. Aussi, une étude similaire à celle réalisée sur les itinéraires d'alpinisme du massif du Mont Blanc est en cours pour le massif des Écrins, en se basant sur le topo-guide *Le massif des Écrins, Les 100 plus belles courses et randonnées* de G. Rebuffat (1974). Sa situation, 130 km plus au sud, ces conditions d'englacement et d'altitude, l'organisation de la pratique de l'alpinisme, très différentes du massif du Mont Blanc et le cadre réglementaire lié à la présence du Parc National (PN) justifient d'autant plus de réaliser une étude comparative avec les Ecrins. Ayant construit la méthodologie et conduit l'ensemble de l'étude, l'expérience que nous avons acquise au cours de ce travail doctoral est une base indispensable pour la conduite de cette étude comparative. Notre objectif sera aussi de localiser les processus identifiés et produire des rendus cartographiques.

Ensuite, la difficulté d'accès aux données de fréquentation des refuges et l'ensemble des limites et biais qu'elles présentent nous ont mené à travailler en collaboration avec le programme *Refuges Sentinelles*. Outre l'intérêt du programme dans son ensemble, notre objectif sera l'acquisition de données précises de fréquentation des refuges telles que le nombre de nuitées par jour, le profil sociodémographique des personnes fréquentant les refuges, les principaux sommets fréquentés à partir de chaque refuge, etc. A nouveau l'expérience et les contacts acquis au cours de ce travail doctoral nous aideront dans la mise en place des protocoles d'acquisition des données avec les gardiens de refuges. De plus, le programme *Refuges Sentinelles* s'est aussi penché sur la mise en place d'un observatoire des refuges structuré autour d'une base de données centralisée sur les refuges. Ces données seront une source importante de connaissances pour l'études des pratiques sportives et récréatives de montagne, qui seront intéressantes pour de nombreux acteurs autant en recherche qu'opérationnels. Les premiers traitements réalisés dans ce travail doctoral ont permis d'acquérir des connaissances utiles à la structuration de la base et au tri des informations à collecter. D'ailleurs, l'ensemble des données de fréquentation acquises ces trois dernières années ont déjà contribué à la remplir.

D'autre part, les données acquises depuis l'été 2016 dans le secteur du couloir du Goûter vont être traitées et analysées en détail. L'initiative de lancer cette étude en parallèle des axes de recherches principaux de cette thèse et notre rôle de coordinateur de l'ensemble des chercheurs impliqué

nous donnent une position idéale pour poursuivre cette étude lors d'un projet post-doctoral de 6 mois au laboratoire EDYTEM, grâce à un financement de la *Fondation Petzl*. Les principaux objectifs sont de mettre en évidence les facteurs géomorphologiques, météorologiques et nivologiques qui conditionnent l'occurrence des chutes de pierres et de mieux expliquer l'accidentologie en comparant les occurrences des accidents avec les conditions du moment dans le couloir (chutes de pierres, enneigement) et la fréquentation. Des connaissances inédites et particulièrement précises devraient être produites avec des perspectives autant scientifiques qu'opérationnelles. Les résultats seront valorisés et diffusés, en les rendant disponibles pour la communauté montagnarde à travers des articles scientifiques dans des revues internationales (garantes de la qualité de la recherche effectuée), des conférences (4 ont déjà été réalisées sur ce sujet), un rapport de recherche, et des articles de médiation dans des magazines de montagne.

D'après les entretiens réalisés avec les commandants du PGHM de Chamonix et de Briançon, les impacts du changement climatique n'impliquent jusqu'à présent pas une évolution du nombre et du type d'accident en alpinisme. Cependant, une série d'accidents manifestement liés aux impacts du changement climatique s'est produite au cours de l'été 2018 dans le massif du Mont Blanc. On peut donner l'exemple de l'accident du 03 août 2018 où un montagnard aguerri et accompagné d'un guide est décédé suite au basculement d'un bloc au pied de la Dent du Géant (4013 m). Le jour de l'accident, le secteur était complétement sec alors qu'il y a encore quelques années, les blocs étaient à cet endroit enchâssés dans une assise de neige et de glace stabilisatrice. Aussi, un travail plus approfondi serait nécessaire pour évaluer les impacts du changement climatique sur l'accidentologie en alpinisme. L'expérience acquise lors de la réalisation de l'étude d'accidentologie sur le couloir du Goûter nous offre le recul indispensable quant à la réalisation d'une telle étude qui devra porter sur l'analyse précise des PV d'accidentologie rédigés par le PGHM, des entretiens avec ses membres et avec des personnes accidentées afin d'être en mesure d'identifier la part climatique de l'accident. Cette part est difficile à mettre en évidence, d'autant plus que les acteurs liés sont souvent réticents à admettre que le changement climatique est un facteur à l'origine de l'accident. Par exemple, dans une interview avec *Montagnes Magazine* le 20 juin 2019, le capitaine Pelisson (PGHM de Chamonix) réfute catégoriquement que les impacts du changement climatique puissent avoir des conséquences sur l'alpinisme.

Enfin, dans la continuité de ce travail sur l'alpinisme, E. Salim (doctorant, EDYTEM) a débuté une thèse (2018) qui propose un nouvel éclairage sur les impacts du changement climatique dans les Alpes en questionnant les impacts sur le tourisme de l'évolution paysagère des milieux de haute montagne. La perception de ces changements et l'adaptation en conséquence des touristes et des gestionnaires de sites tel que le Montenvers ou l'aiguille du Midi seront étudiés.

Bibliographie

A

AdaPt Mont-Blanc (2017). Adaptation de la planification territoriale aux changements climatiques dans l'Esapce Mont-Blanc. Description Technique Détaillée. Interreg ALCOTRA, 46.

Alpes Ingé. (2012). Couloir du Goûter, Suivi et analyse des chutes de blocs et de la fréquentation pendant l'été 2011. Rapport final. Fondation Petzl, 37.

Amy B. (2011). Quelques raisons de défendre les pratiques de l'alpinisme ? La lettre de l'OPMA n°29, Observatoire des pratiques de la montagne et de l'alpinisme, 2.

Apaloo J., Brenning A. et Bodin X. (2012). Interactions between Seasonal Snow Cover, Ground Surface Temperature and Topography (Andes of Santiago, Chile, 33.5 S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 23-4, 277–291. doi: 10.1002/ ppp.1753.

Arent D. J., Tol R., Faust E., Hella J.P., Kumar S., Strzepek Kenneth M., Tóth F.L., Yan D., Abdulla A., Kheshgi H., Xu H., Ngeh J. (2015). Key economic sectors and services. *Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*, (Chapter 10), 659-708. doi:10.1017/CBO9781107415379.015

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones PD., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J-M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Nieplova E. (2007). HISTALP-Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology*, 27, 17–46. doi:10.1002/joc.1377

B

Ballantyne C.K. (2002a). Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews* 21 (18-19): 1935-2017. doi:10.1016/S0277-3791(02)00005-7.

Ballantyne C.K. (2002b). A general model of paraglacial landscape response. *The Holocene*, 12, 371-376. doi: 10.1191/0959683602hl553fa.

Ballantyne C.K. (2003a). Paraglacial landsystems. Dans Evans, D.J. (eds), *Glacial landsystems*, E. Arnold, London, 432-461.

Ballantyne C.K. (2003b). Paraglacial landform succession and sediment storage. Dans *Deglaciated mountain valleys: theory and approaches to calibration*, Zeitschrift für Geomorphologie, 32, 1-18.

Beeco J. A., Brown G. (2013). Integrating space, spatial tools, and spatial analysis into the human dimensions of parks and outdoor recreation. *Applied Geography*, 38, 76–85. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.11.013.

Behm M., Raffener, G. et Schöner, W. (2006). Auswirkungen der Klima-und Gletscheränderung auf den Alpinismus. Vienna, Umweltdachverband.

Behringer J., Buerki R., Fuhrer J. (2000). Participatory integrated assessment of adaptation to climate change in alpine tourism and mountain agriculture. *Integrated Assessment*, 1, 331-338. doi. org/10.1023/A:1018940901744

Belien D. (1988). Etude sur les refuges. Bilan statistique du par cet de la fréquentation. Syndicat National des Guides, APRIAM.

- Bellefon R.** (2003). Histoire des guides de montagne : Alpes et Pyrénées (1760 -1980). Bayonne – Toulouse, Cairn – Milan.
- Beniston M.** (2005). Mountain Climates and Climatic Change: An Overview of Processes Focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 8-9, 1587-1606. doi:10.1007/s00024-005-2684-9.
- Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L.M., Coppola E., Eckert N., Fantini A., Giacona F., Hauck C., Huss M., et al.** (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12, 759-794. doi:10.5194/tc-12-759-2018
- Berthier E.** (2005). Dynamique et bilan de masse des glaciers de montagne (Alpes, Islande, Himalaya): contribution de l'imagerie satellitaire. Thèse de doctorat, Laboratoire d'étude en Géophysique et océanographie spatiales, Université de Toulouse, France, 251.
- Berthier E., Vincent C., Magnússon E., Gunnlaugsson A.P., Pitte P., Le Meur E., Masiokas M., Ruiz L., Pálsson F., Belart J.M.C., Wagnon P.** (2014). Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images. *The Cryosphere*, 8, 2275–2291, doi:10.5194/tc-8-2275-2014
- Bielański M., Taczanowskab K., Muharb A., Adamskic P., Gonzálezd M-L., Witkowskie Z.** (2018). Application of GPS tracking for monitoring spatially unconstrained outdoor recreational activities in protected areas – A case study of ski touring in the Tatra National Park, Poland. *Applied Geography*, 96, 51-56. doi:10.1016/j.apgeog.2018.05.008
- Biskaborn B., Smith S., Noetzli J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D., Schoeneich P., Romanovsky V., Lewkowicz A., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W., Christiansen A., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Eitzelmüller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel C., Lanckman J-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H.** (2019). Permafrost is warming at a globale scale. *Nature Communications*, 10-1. doi: 10.1038/s41467-018-08240-4
- Bockheim J. G. et Munroe J.S.** (2014). Organic carbon pools and genesis of alpine soils with permafrost: a review. *Arctic and Alpine Research* 46.4, 987–1006. doi:10.1657/1938-4246-46.4.987.
- Bodin X.** (2007). Géodynamique du pergélisol de montagne : fonctionnement, distribution et évolution récente. L'exemple du massif de Combeynot. Thèse de Doctorat, Université Paris Diderot. 273.
- Bodin X., Desvarreux P., Fabre D., Krysiecki J.M., Gay M., Marie R., Lorier L., Schoeneich P., Vallon M.** (2010). Analyse des risques induits par la dégradation du permafrost alpin. Projet Fondation MAIF, Rapport final.
- Böhm R., Jones P.D., Hiebl J., Frank D., Brunetti M., Maugeri M.** (2009). The early instrumental warm-bias : a solution for long central European temperature series 1760-2007. *Climatic Change*, 101, 41-67. doi:10.1007/s10584-009-9649-4
- Bonnemaison F.** (2018). Au pied des sommets. Modes d'engagement et rapports au métier des accompagnateurs et accompagnatrices en moyenne montagne. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 356.
- Bourdeau P.** (1991). Territoire et identité ; recherches sur la territorialité d'un groupe professionnel, les guides de haute montagne en France. *Revue de géographie Alpine*. Collection Ascendance.
- Bourdeau P.** (dir.) (2006). La montagne terrain de jeu et d'enjeux. Débats pour l'avenir de l'alpinisme et des sports de nature. Editions du Fournel, 206.

Bourdeau P. (2009). Mountain Tourism in a Climate of Change, dans Jandl R., Borsdorf A., Van Miegroet H., Lackner R., Psenner R. (dir.), *Global Change and Sustainable Development in Mountain Region, Alpine space-man and environnement*, 7, Innsbruck University Press: Innsbruck, 39-52.

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.

Bourdeau P., Corneloup J., Mao P., Boutroy E. (2004). Les interactions entre cultures sportives de montagne et territoires : un état des lieux de la recherche française depuis 1990. *Cahiers de Géographie du Québec*, 48 - 133, 33-46. doi:10.7202/009761ar

Bourdeau P., Corneloup J., Mao P. (2006). Cultures, espaces et métiers sportifs de la montagne : changements et enjeux d'avenir. Dans, Bourdeau P. (dir.). *La montagne terrain de jeu et d'enjeux. Débats pour l'avenir de l'alpinisme et des sports de nature*. Ed. du Fournel, Coll. Sportsnature.org, 29-44.

Briffaud S. (2010). Une montagne de paradis. Dans Brochot A. et Soudière M. (dir.). *Autour du lieu. Communications*, 87, 129-135.

Brown R. J. E. (1960). The distribution of permafrost and its relation to air temperature in Canada and the U.S.S.R. *Arctic* 13.3, 163-177. doi:10.14430/arctic3697.

Brown R.J.E., Péwé T.L. (1973). Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment, a review 1963-1973. Dans Sanger F.J. et Hyde P.J. (Eds.). *Proceedings of the Second International Conference on Permafrost*. National Academy of Sciences, Washington D.C., Yakutsk, URSS, 71-100.

Brown R. J. E., Ferrians O.J., Heginbottom J. A., et Melnikov E.S. (1997). Circum- Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Tech. rep. Washington, DC: U.S. Geological Survey in Cooperation with the Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resource. Circum-Pacific Map Series CP-45, scale 1:10,000,000.

C

Carrel J.G. (1855). Les Alpes Pennines dans un jour soit panorama Boréal de la Becca de la Nona. Depuis le Mont-Blanc jusqu'au Mont-Rose. D.Lyboz, Aoste, 46.

Church M., Ryder J.M.M. (1972). Paraglacial sedimentation : consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, 83 : 3059-3072.

Corneloup J. (1999). Le communicationnel, un référentiel d'analyse des pratiques d'escalade durant la modernité. Dans Terret t. (dir.). *Histoire du sport, histoire des sportifs*. Paris : L'Harmattan, 351-373.

Corneloup J. (2011). Pourquoi les Assises de l'Alpinisme ? Dans Durand E. et Martin N. (dir.). *Les Actes des Assises de l'Alpinisme et des Activités de Montagne*, 140.

Corneloup J., Bourdeau Ph., Mao P. (2007). La recherche française en sciences sociales sur les pratiques de l'escalade et de l'alpinisme. Dans Corneloup J. (Dir.). *Sciences sociales et loisirs sportifs de nature. Contribution à la diffusion et au partage de la connaissance*. Coll. SportsNature.org, 390.

Cossart E. (2005). Evolution géomorphologique du haut bassin durancien (Alpes du Sud, France) depuis la dernière glaciation - Contribution à la compréhension du fonctionnement du système paraglaciale. Thèse de doctorat, Université Paris 7,436.

Cox M. et Fulsas K. (dir.) (2006). Le guide de la montagne. Randonnée, Escalade, Alpinisme, Trekking, Expédition. Edition Guérin, 553.

D

- Dalloz P.** (1978). Zénith, Rochers, Neige et Sables, Paris, F. Lanore, 250.
- D'Amato J., Hantz D., Guerin A., Jaboyedoff M., Baillet L., Mariscal A.** (2016). Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16: 719-735. doi: 10.5194/nhess-16-719-2016.
- Davies M. C. R., Hamza O. et Harris C.** (2001). The Effect of Rise in Mean Annual Temperature on the Stability of Rock Slopes Containing Ice-Filled Discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 137–144. doi: 10.1002/ppp.378.
- Dawson J., Scott D.** (2013). Managing for climate change in the alpine ski sector. *Tourism Management*, 35, 244-254. doi: 10.1016/j.tourman.2012.07.009
- Dawson J., Scott D., Havitz M.** (2013). Skier demand and behavioural adaptation to climate change in the US Northeast. *Leisure*, 37, 2, 127-143. doi:10.1080/14927713.2013.805037
- Debarbieux B. et S.** (2015). Un patrimoine immatériel de l'humanité ? *L'Alpe*, 69, 8-13.
- Debarbieux B.** (1990). Chamonix Mont-Blanc : les coulisses de l'aménagement. Collection Montagne. Grenoble : Presse Universitaires de Grenoble.
- Delaloye R.** (2005). Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. PhD thesis. Faculté des Sciences, Université de Fribourg, Suisse, 244.
- Deline P.** (2008). Les changements climatiques et la dynamique paraglaciale dans le massif du Mont-Blanc. *Bulletin de l'Association de géographes français*, 85 (2) : 150-160.
- Deline P., Gardent M., Magnin F., Ravanel 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. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x
- Della-Marta P.M., Haylock M. R., Luterbacher J., Wanner H.** (2007). Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research*, 112. doi:10.1029/2007JD008510
- De Rosnay J.** (2000). L'homme symbiotique, Le Seuil, Paris, 408 p.
- Descamps P., Estachy J.B.** (2012). Accidentologie dans le couloir du Gouter et sur la voie normale au Mont-Blanc, Étude des secours organisés sur l'itinéraire du glacier de Tête Rousse au refuge du Goûter, entre 1990 et 2011. Peloton de gendarmerie de haute montagne, Fondation Petzl, 28.
- Dietze M., Mohadjer S., Turowski J., Ehlers T., Hovius N.** (2017). Seismic monitoring of small alpine rockfalls - validity, precision and limitations. *Earth Surface Dynamics*, 5, 653-668. doi: 10.5194/esurf-5-653-2017.
- DTMP.** (2012). Etude prospective sur les refuges de Rhône Alpes. Restitution des éléments d'état des lieux et de diagnostic. DTMP – Service tourisme durable.
- Durand E. et Martin N.** (dir., 2011). Les Actes des Assises de l'Alpinisme et des Activités de Montagne. Observatoire des pratiques de la montagne et de l'alpinisme, 140.
- Duvillard P.A., Ravanel L., Deline P., Dubois L.** (2018). Paraglacial rock slope adjustment beneath a high mountain infrastructure. The Pilatte hut case study (Ecrins mountain range, France). *Front. Earth Sci.* 6:94. doi: 10.3389/feart.2018.00094.

E

Eichel J., Draebing D., Meyer N. (2018). From active to stable: Paraglacial transition of Alpine lateral moraine slopes. *Land Degradation & Development*, 29-11, 4158-4172. doi: 10.1002/ldr.3140

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. *Journal of Alpine Research / Revue de géographie Alpine*, 103-2. doi: 10.4000/rga.2829

Etzelmüller B., Hoelzle M., Heggem E.S.F., Isaksen K., Mittaz C., Vonder Mühl D., Ødegård R.S., Haerberli W., Sollid J.L. (2001). Mapping and modelling the occurrence and distribution of mountain permafrost. *Norwegian Journal of Geography*, 55, 186-194.

F

Failetta J., Funk M., Vincent C. (2015). Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Review of Geophysics*, 53,203–224. doi:10.1002/2014RG000466.

Fedorov R., Camerada A., Fraternali P., Tagliasacchi M. (2016). Estimating snow cover from publicly available images. *IEEE Transactions on Multimedia*, 18(6): 1187-1200.

Fischer L., Kaab A., Huggel C., Noetzlieology J. (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.

Fischer M., Huss M., Barboux C., Hoelzle M. (2014). The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers, *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 46, 933–945. doi:10.1657/1938-4246-46.4.933

Forbes J.D. (1843). Travels through the Alps of Savoy and the others parts of the Peninne Chain: with observations on the phenomena of glaciers. Black Adam and Charles, London, 456.

Formayer H. (2011). Meteorologische Ausgangssituation Österreichs für den Tourismus In: F. Pretenthaler, & H. Formayer (Eds.), *Tourismus im Klimawandel: Zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen Tourismusgemeinden*, 6, 17–20. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Frontier S., Pichod-Viale D., Leprête A., Davoult D., Luczak C. (2004). *Écosystèmes. Structure, Fonctionnement, Évolution*. Dunod, Paris, 3e édition, 549.

G

Gallach X., Ravanel L., Egli M., Brandova D., Schaepman M., Christl M., Gruber S., Deline P., Carcaillet J., Pallandre F. (2018). Timing of rockfalls in the Mont Blanc massif (Western Alps): evidence from surface exposure dating with cosmogenic ¹⁰Be. *Landslides*. doi: 10.1007/s10346-018-0999-8.

Gardent M. (2014). Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. Thèse de doctorat en Géographie, Université de Savoie, 444.

Gardent M., Rabatel A., Dedieu J.P., Deline P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*. 120:24–37. doi: 10.1016/j.gloplacha.2014.05.004

Gardien C. (2008). Les nouveaux alpinistes. Glénat, Hommes et Montagne, 263.

Giard D. (1997). Les refuges de Montagne des Alpes du Nord : Caractéristiques du parc, analyse de la fréquentation et travaux de modernisation. Les cahiers de l'AFIT, SEATM, 110p.

Gilbert A., Vincent C. (2013). Atmospheric temperatures changes over the 20th century at very high elevations in the European Alps from englacial temperatures. *Geophysical Research Letters*, 40-10, 2102-2108. doi: 10.1002/grl.50401

Graff E. (2015). Evolution des itinéraires de haute montagne en lien avec le changement climatique. Exemple des accès aux refuges et des itinéraires d'alpinisme du secteur de la Meije et du Glacier Blanc (Massif des Ecrins). Rapport de stage de M1, Université de Savoie- Mont-Blanc, 44.

Gruber S. (2007). A mass-conserving fast algorithm to parameterize gravitational transport and deposition using digital elevation models. *Water Resources Research*, 43.6, 1–8. doi: 10.1029/2006WR004868

Gruber S. (2012). Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere*, 6, 221–233. doi:10.5194/tc-6-221-2012.

Gruber S., Haeberli W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of geophysical research*. 112. Doi: 10.1029/2006JF000547.

Grünewald T., Wolfsperger F., Lehning M. (2018). Snow farming: conserving snow over the summer season. *The Cryosphere*, 12, 385-400. doi: 10.5194/tc-12-385-2018

Guibal J. (2015). Le patrimoine mondial par la voie normale. L'Alpe, 69, 14-17.

Guerin A., Abellan A., Matasci B., Jaboyedoff M., Derron M-H., Ravanel L. (2017). 3D reconstruction of a collapsed rock pillar from web-retrieved images and terrestrial lidar data – the 2005 event of the west face of the Drus (Mont Blanc massif). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1207-1220. doi: 10.5194/nhess-17-1207-2017

Guillet G. (2016). Evolution des petits appareils glaciaires suspendus et des couvertures glacio-nivales du massif du Mont Blanc. Mémoire master, Univ. Savoie Mont Blanc, *La Chamoniarde*. 37.

H

Haeberli W. (1985). Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie ETH-Zurich*, 77: 142.

Harris C., Vonder Mühl D. (2001a). Permafrost and climate in Europe. Climate change, mountain permafrost degradation and geotechnical hazard advances. *Global Change research*, 9: 71-82.

Harris C., Davies M.C.R., Etzelmüller B. (2001b). The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12(1): 145-156.

Harris C., Vonder-Mühl D., Isaksen K., Haeberli W., Sollid J.L., King L., Holmlund P., Dramis F., Guglielmin M., Palacios D. (2003). Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change* 39, 215–225. doi: 10.1016/j.gloplacha.2003.04.001.

Hartley R. et Zisserman A. (2003). Multiple view geometry in computer vision. Cambridge university press, 48.

Helmstetter A., Garambois S. (2010). Seismic monitoring of Séchilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. *Journal of geophysical research*, 115, F3. doi: 10.1029/2009JF001532.

Hoelzle M., Paul F., Gruber S., Frauenfelder R. (2005). Glacier and Permafrost in Mountain areas: different modelling approaches. Projecting Global Change Impact and Sustainable Land use and Natural Resource Management in Mountain Biosphere Reserves (GLOCHAMORE). *Global Change Impacts in Mountain Biosphere Reserves*, 28-39.

Hoibian O. (2000). Les alpinistes en France 1870 – 1950. Une histoire culturelle. Espace et temps du sport. L'Harmattan, 342.

Hoibian O. (2006). La montagne entre passé et avenir. Essai de mise en perspective historique. Dans Bourdeau P. (dir.). La montagne terrain de jeu et d'enjeux. Débats pour l'avenir de l'alpinisme et des sports de nature. Ed. du Fournel, Coll. Sportsnature.org, 29-44.

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, 2-7.

Hopkins D., Maclean K. (2014). Climate change perceptions and responses in Scotland's ski industry. *Tourism Geographies*, 16 (3): 400-414.

Hudson C., Kennedy E.S. (2000). Où il y a une volonté, il y a un chemin. Une ascension du Mont Blanc par un nouvel itinéraire et sans guides en 1855. Ed. de Belledonne, Grenoble, 123.

Huggel C., Salzmann N., Allen S., Caplan-Auerbach J., Fischer L., Haeblerli W., Larsen C., Schneider D., Wessels R. (2010). Recent and future warm extreme events and high mountain slope stability. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 368: 2435– 2459. doi: 10.1098/rsta.2010.0078.

Huggel C., Clague J.J., Korup O. (2012). Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains?. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1): 77–91. doi: 10.1002/esp.2223.

Huss M. (2012). Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere*, 6: 713– 727. doi:10.5194/tc-6-713-2012.

I

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.

IPCC. [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R, Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., Waterfield T. (eds)] (2018). SR1.5 : Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In press, 24.

J

Jaboyedoff M., Abellan A., Carrea D., Derron M-H., Matasci B., Michoud C. (2014). Principe de la mesure du relief par Laser scanner. Module 2a-Université Européenne d'Été sur les Risques Naturels, 18.

Jones B., Scott D. (2006). Climate change, seasonality and visitation to Canada's National Park. *Journal of Park and Recreation Administration*, 24(2): 42-62.

Julien B. (2011). Un éclairage des problématiques de l'alpinisme par l'accidentologie. Durand E. et Martin N. (dir.). Actes des Assises de l'alpinisme et des activités de montagne, Chamonix, Observatoire des Pratiques de la Montagne et de l'Alpinisme, 17-26.

K

Kenner R., Phillips M., Danioth C., Denier C., Thee P., Zraggen A. (2011). Investigation of rock and ice loss in a recently deglaciated mountain rock wall using terrestrial laser scanning: Gemsstock, Swiss Alps. *Cold Reg. Sci. Technol.* 67: 157–164. doi:10.1016/j.coldregions.

Klein G., Vitasse Y., Rixen C., Marty C., Rebetez M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139, 637-649. Doi: 10.1007/s10584-016-1806-y.

Knafou R. (1991). La crise du tourisme dans les montagnes françaises. Un système qui a fait ses preuves et son temps. Dossier de la *Revue de Géographie Alpine*, 6, 13-21.

Koenig U. et Abegg B. (2010). Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5, 46–58. doi:10.1080/09669589708667275.

König U., (1998). Tourism in a warmer world : Implications of climate change due to enhanced greenhouse effects for ski industry in the Australian Alps. *Wirtschaftsgeographie und Raumplanung*, 28.

Krautblatter M., Funk M., Günzel F. (2013). Why permafrost rocks become unstable: a rock – ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(8): 876–887. doi: 10.1002/esp.3374.

L

La Chamoniarde. (2013). Bilans des actions réalisées l'été 2013. Dispositif Mont-Blanc, Chamonix Mont Blanc, 16.

Lambiel C. et Reynard E. (2001). Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes Hérémence area (Western Swiss Alps). *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55(4): 219–223. doi: 10.1080/00291950152746559.

Laveleye E. (1865). Le Mont-Rose et les Alpes Pennines : souvenirs de voyage. *Revue des Deux Mondes*, 57(4): 819-857.

Lefèvre B., Fleury B., Monnier A. (2005). Accidents de montagne sur la période estivale, France, 2000-2003 : éléments descriptifs statistiques. *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, 3, 11-12.

Lejeune D. (1988). Les « alpinistes » en France (1875-1919). Comité des travaux historiques et scientifiques. 272.

Lemarchal D. (EURL Meije) (2011). Massif du Mont-Blanc. Traversée du Grand Couloir. Etude de faisabilité et avant-projet de sécurisation. *Fondation Petzl*, 87.

Lourens T. (2005). Le guide complet de l'escalade. De Vecchi, 192.

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. Doi: 10.1016/j.quascirev.2012.01.022.

M

- Magnin F.** (2015). Distribution et caractérisation du permafrost des parois du massif du Mont Blanc : une approche combinant monitoring, modélisation et géophysique. PhD thesis, Université Savoie Mont Blanc, EDYTEM, 298.
- Magnin F., Brenning A., Bodin X., Deline P., Ravanel L.** (2015). Statistical modelling of rock wall permafrost distribution: application to the Mont Blanc massif. *Geomorphologie*. 21:145–162. doi:10.4000/geomorphologie.10965.
- Magnin F., Josnin J-Y., Ravanel L., Pergaud J., Pohl B., Deline P.** (2017). Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century. *The Cryosphere*, 11: 1813-1834. doi: 10.5194/tc-11-1813-2017
- Marcel J.** (1975). Les sociétés sportives d'alpinistes et les refuges de montagne dans les Alpes françaises depuis 1874. *Revue de géographie alpine*, 63(1):5-50. doi: 10.3406/rga.1975.1402
- Marcer M.** (2018). Rock glacier destabilization in the French Alps: insights from regional and local scale assessments. Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes, 191.
- Marcer M., Bodin X., Brenning A., Schoeneich P., Charvet R., Gottardi F.** (2018). Permafrost Favorability Index: Spatial Modeling in the French Alps Using a Rock Glacier Inventory. *Frontiers in Earth Science*, 5(105): 1–17. doi:10.3389/feart.2017.00105
- Marchenko S.S., Gorbunov A.P., Romanovsky V.E.** (2007). Permafrost warming in the Tien Shan mountains, Central Asia. *Global and Planetary Change*, 56: 311-327. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.023
- Martinez M.** (2015). La formation des guides de haute montagne depuis 1948 ; À la croisée des évolutions montagne sur les voies de l'excellence. Dans, Attali M.(dir.), L'ENSA à la conquête des sommets, la montagne sur les voies de l'excellence. Grenoble, PUG, 149-169.
- McColl S.T.** (2012). Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology*, 153-154, 1-16.
- Ménard G.** (2019). Le gang des petites cuillères, accaparement conflictuel d'une ressource collective. *Ethnologie Edytemienne*, Numéro Spécial: Doctorants et permanents (retraités), usages et conflualités de la salle thé. doi: 02061952.
- Mercier D.**, (2001). Les piémonts des hautes latitudes : rythmes et crises morphogéniques. *Sud-Ouest Européen, Revue de géographie des Pyrénées et de Sud-Ouest*, 10, 3-21.
- Mercier D.** (2005). Changements climatiques et métamorphoses des paysages polaires. Dans André M.-F. (dir.), *Le monde polaire : mutations et transitions*, Ellipses, Paris, 25-38.
- Mercier D.** (2008). Le géosystème paraglaciale face aux changements climatiques. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 2, 131-140. doi: 10.3406/bagf.2008.2606.
- Mercier D.** (2010). La géomorphologie paraglaciale : analyse de crises érosives d'origine climatique dans les environnements englacés et sur leurs marges. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches mention géomorphologie, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 265.
- Messner R.** (1973). Der 7. Grad. Extremstes Bergsteigen. Technik, Trainnig, Erlebnis. BLV, Munich, 156.
- Mestre M.** (1996). Histoire de l'alpinisme. Les Alpes. Edisud. 191.
- Mestre M.** (1998). La montagne et l'alpinisme vecteurs de l'idéologie nationaliste dans les Etats alpins aux XIXe et XXe siècles (1850-1950). Thèse de doctorat, Université de Provence, Faculté des lettres et sciences humaines, 440.
- Modica G.** (2014). Alpinisme. La saga des inventions. Les Editions du Mont-Blanc, 253.

Modica G. (2015). 1865 L'âge d'or de l'alpinisme. Chamonix Mont-Blanc, Guérin, 400.

N

Nay C. (2013). Observatoire d'accidentologie en montagne dans le massif du Mont-Blanc : données épidémiologiques 2012-2013 dans le cadre du programme européen transfrontalier Alcotra Resamont 2. Médecine humaine et pathologie.

Nicollet J.P. (2015). Compte rendu de la journée thématique du 12 novembre 2015. Observer les pratiques de la montagne et de l'alpinisme : objets, enjeux, méthodes. Observatoire des pratiques de la montagne et de l'alpinisme, 7.

NRCC (Permafrost Subcommittee). (1988). Glossary of permafrost and related ground-ice terms. Technical Memorandum, 142. National Research Council of Canada, 156.

Nyaupane G. et Chhetri N. (2009). Vulnerability to climate change of nature-based tourism in the Nepalese Himalayas. *Tourism Geographies*, 11-1, 95-119. doi: 10.1080/14616680802643359.

O

Oppikofer T., Jaboyedoff M., Keusen H.R. (2008). Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps. *Nature Geoscience*, 1: 531-535.

Osorio A., Medina R., Garcia N., Labégorre M. (2008). Utilisation de l'imagerie vidéo pour la gestion touristique du littoral. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2:1-2, 117-131. doi: 10.1080/19648189.2008.9692999.

P

Perrin-Malterre C. (2016). Processus de diversification touristique autour des sports de nature dans une station de moyenne montagne. *Mondes du Tourisme*, 11. doi: 10.4000/tourisme.1012.

Piccardi M., Tonetti R., Théodule A., Curtaz M., Spitz C., Huguet N., Louvier D. (2014). Fiches techniques opérationnelles. *Projet Eco-Innovation en Altitude*, Espace Mont-Blanc, 87.

Pickering C.M., Castley J.G., Burt M. (2010). Skiing less often in a warmer world: attitudes of tourists to climate change in an Australian ski resort. *Geographical research*, 48(2), 137-147. doi:10.1111/j.1745-5871.2009.00614.x.

Pohl B. et Pergaud J. (2019). Huge decrease of frost frequency in the Mont-Blanc massif under climate change. *Scientific Report*, 9(1). doi: 10.1038/s41598-019-41398-5.

Poncelin D. (1997). Grandes tendances dans l'histoire de l'alpinisme. Ecole Nationale de Ski et d'Alpinisme, Chamonix, 70.

Pröbstl U., Damm B. (2008). Startclim 2008: Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation in Tourismus Destinationen am Beispiel des Tuxer Tals (Zillertaler Alpen/Österreich). Wien: Endbericht. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Pröbstl U., Haider W., Hägeli P., Rupp R. (2011). Klimawandel und Bergtourismus-Wahrnehmung und Bewertung von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation In: T. Bieger, P. Beritelli, & C. Laesser (Eds.), (Hrsg.), Wandel als Chance für den alpinen Tourismus. Schweizer Jahrbuch für Tourismus 2011. St. Galler Schriften für Tourismus und Verkehr, 3, 83–91.

Pröbstl-Haider U., Haider W., Wirth V. Beardmore B. (2015). Will climate change increase attractiveness of summer destinations in the European Alps? A survey of German tourists. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 11: 44-57. doi: 10/1016/j.jort.2015.07.003.

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. doi: 10.1016/j.jort.2016.02.002.

Purdie H., Gomez C., Espiner S. (2015). Glacier recession and the changing rockfall hazard: Implications for glacier tourism. *New Zealand Geographer*, 71(3). doi: 10.1111/nzg.12091.

Purdie H. et Kerr T. (2018). Aoraki Mont Cook : Environmental change on an iconic mountaineering route. *Mountain Research and Development*, 38(4): 364-379. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00042.1.

R

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. doi:10.5194/tc-7-1455-2013.

Ravanel L. (2010). Caractérisation, facteurs et dynamiques des écoulements rocheux dans les parois à permafrost du Massif du Mont Blanc. Thèse de Doctorat, Université de Savoie. 326.

Ravanel L., Deline P. (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*, 14(4): 261-272.

Ravanel L., Deline P. (2010). 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(2): 357–365. doi: 10.1177/0959683610374887.

Ravanel 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. doi: 10.1007/978-3-319-09300-0_81.

Ravanel L., Lambiel C. (2013). Evolution récente de la moraine des Gentianes (2894 m, Valais, Suisse) un cas de réajustement paraglaciale ? *Environnements Périglaciaires*, 18, 5-14.

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. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 95:51–66. doi: 10.1111/geoa.12000.

Ravanel L., Magnin F., Deline P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment*. 609:132–143. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.055.

Ravanel L., Duvillard P.-A., Jaboyedoff M., Lambiel C. (2018a). Recent evolution of an ice-cored moraine at the Gentianes Pass, Valais Alps, Switzerland. *Land Degradation & Development*. 29(10):3693–3708. doi: 10.1002/ldr.3088

Ravanel L., Troilo F., Pogliotti P., Paro L., Morra di Cella U., Duvillard P.-A., Motta E. (2018b). Risques naturels émergents en haute montagne. Rapport de synthèse du WP3 du projet ALCOTRA *PrévRisk Haute Montagne*, 28.

Rébuffat G. (1973). Le massif du Mont-Blanc. Les 100 plus belles courses. Ed. Denoël, Paris, 240.

Rébuffat G. (1974). Le massif des Ecrins. Les 100 plus belles courses et randonnées. Ed. Denoël, Paris, 237.

Ridler T. W. et Calvard S. (1978). Picture thresholding using an iterative selection method. *IEEE trans syst Man Cybern*, 8(8): 630-632.

Ritter F., Fiebig M., Muhar A. (2011). Impacts of Global Warming on Mountaineering: A Classification of Phenomena Affecting the Alpine Trail Network. *Mountain Research and Development*, 32:4–15. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00036.1.

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(3): 229–236. doi: 10.1659/Mrd-Journal-D-10-00112.1.

Rutty M., Scott D., Johnson P., Jover E., Pons M., Steiger R. (2015). Behavioural adaptation of skiers to climatic variability and change in Ontario, Canada. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 11: 13–21. doi: 10.1016/j.jort.2015.07.002.

S

Scherler M., Hauck C., Hoelzle M., Salzmann N. (2013). Modeled sensitivity of two alpine permafrost sites to RCM-based climate scenarios. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2):780–794. doi: 10.1002/jgrf.20069.

Schmidhuber J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*, 61, 85-117.

Schumtz E. (1994). Histoire de l'Alpinisme. Cahier de connaissances générales n°3. Département alpinisme, Ecole National de Ski et d'Alpinisme, 110.

Scott D. (2011). Why sustainable tourism must address climate change. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(1): 17–34.

Scott D., McBoyle G. (2007). Climate change adaptation in the ski industry. *Mitigation and Adaptation Strategies to Global Change*, 12(8): 1411–1431. doi: 10.1007/s11027-006-9071-4.

Scott D., Gössling S., Hall C.M. (2012). International tourism and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews – Climate Change*, 3(3): 213-232. doi: 10.1002/wcc.165.

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. Doi: 10.1007/s10584-010-0012-6.

SNGM (2016). Rapport d'étude. Enquête métier 2016. Syndicat National des Guides de Montagne, Projet ALCOTRA ProGuides, APRIAM, 87p.

SNGM (2017). Projet Horizons Guides. Pour l'avenir d'une profession humaine et solidaire. Syndicat National des Guides de Montagne, 33p

Soulé B., Lefèvre B., Boutroy E., Reynier V., Roux F., Corneloup J. (2014). Accidentologie des sports de montagne. État des lieux et diagnostic. *Fondation Petzl*, 48.

Spandre P., Hugues F., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M., George E., Morin S. (2019). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13: 1325-1347. doi: 10.5194/tc-13-1325-2019.

Spilmont J.P. (2014). Jacques Balmat, héros du mont Blanc. Nouvelle éd. Texte & Images. Chamonix Mont-Blanc, Éditions Guérin 304.

Steen M., Brunet P., Reveret C. (2001). Etude qualitative sur les attentes des clientèles actuelles et potentielles des refuges des Alpes Françaises. AFIT, SEATM, altiMAX, Versant Sud, 68.

Steiger R., Scott D., Abegg B., Pons M., Aall C. (2017). A critical review of climate change risk for ski tourism. *Current Issues in Tourism*. 5 (5): 1-37. doi:10.1080/13683500.2017.1410110.

Strozzi T., Delaloye R., Kääh A., Ambrosi C., Perruchoud E., Wegmüller U. (2010). Combined observations of rock mass movements using satellite SAR interferometry, differential GPS, airborne digital photogrammetry, and airborne photography interpretation, *J. Geophys. Res.*, 115. Doi:10.1029/2009JF001311.

T

Taillan M. (2000). L'Alpine Club, l'émergence d'un modèle institutionnel. Dans, Hoibian O. et Defrance J. (dir.). Deux siècles d'alpinisme européens. Origines et mutations des activités de grimpe. Actes de colloque, Université Paris X – Nanterre, 385.

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. doi: 10.1111/geoa.12116.

V

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(66): 15-24. doi: 10.3189/2014AoG66A050.

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

W

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.

Y

Yahiaoui T. (2007). Une approche de stéréovision dense intégrant des contraintes de similarité : application au comptage des passagers entrant et sortant d'un autobus. Thèse de doctorat, Université Lille 1, 157.

Z

Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S. U., Hoelzle M., Paul F., Haeberli W., Denzinger F., Ahlstrøm A. P., Anderson B., Bajracharya S., Baroni C., Braun L. N., Cáceres B. E., Casassa G., Cobos G., Dávila L. R., Delgado Granados H., Demuth M. N., Espizua L., Fischer A., Fujita K., Gadek B., Ghazanfar A., Hagen J. O., Holmlund P., Karimi N., Li Z., Pelto M., Pitte P., Popovnin V. V., Portocarrero C. A., Prinz R., Sangewar C. V., Severskiy I., Sigurðsson O., Soruco A., Usabaliev R., Vincent C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *J. Glaciol.*, 61: 745–762. doi: 10.3189/2015JoG15J017.

Bibliographie personnelle

Articles avec comité de lecture

- **Mourey J.**, Ravanel L. (2017). Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France). *Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research*, 105-4. Doi : 10.4000/rga.3780.
- **Mourey J.**, Marcuzzi M., Ravanel L., Pallandre F. (2019). Effects of climate change on high Alpine 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.
- **Mourey J.**, Ravanel L., Lambiel C., Strecker L., Piccardi M. (2019). Access routes to high mountain huts facing climate change. Environmental changes and adaptive strategies in the western Alps since the 1990s. *Norwegian Journal of Geography*. Doi : 10.1080/00291951.2019.1689163.
- Salim E., **Mourey J.**, Ravanel L. (2019). Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Quelles perceptions et stratégies d'adaptation au pied du mont Blanc ? *Revue de Géographie Alpine/Journal of Alpine Research*.
- **Mourey J.**, Perrin-Malterre C., Ravanel L. (2020). Adaptation strategies for the French Alpine guides facing climate change effects. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 20. Doi : 10.1016/j.jort.2020.100278.

Chapitres d'ouvrages

- **Mourey J.**, Ravanel L. (2017). 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 SI Monitoring en milieux naturels, retours d'expériences en terrains difficiles*, 263 – 270.
- Bourdeau P., **Mourey J.**, Ravanel L. (en cours d'édition). Le changement climatique comme facteur de transformation des pratiques de l'alpinisme. Etude de cas dans le massif du Mont Blanc et des Ecrins (France) sur la période 2000 – 2015. Dans *Gravir les Alpes du XIXe siècle à nos jours. Pratiques, émotions, imaginaires*. Institut des sciences du sport de l'Université de Lausanne, Société d'histoire de la Suisse romande. Salvan les Marécottes, Suisse.

Actes de conférences

- **Mourey J.**, Duvillard PA., Marcer M., Marsy G., Ravanel L., Rabatel A. (2018). Rockfalls in the *Grand Couloir du Goûter* (Mont-Blanc massif). An interdisciplinary monitoring system. Dans Deline P., Bodin X. et Ravanel L. (Eds) (2018) : *5th European Conference on Permafrost – Book of abstracts. 23 juin – 1^{er} juillet, Chamonix, France*.

Colloques internationaux (premiers auteur seulement)

- **Mourey J.**, Ravanel L. (2016). Evolution of hut access facing glacier shrinkage in the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif, France). *European Geosciences Union*, Vienne, Autriche.
- **Mourey J.**, Marcuzzi M., Ravanel L. (2018). Effects of climate change on high mountain environments : evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif over half a century. *Alpine Glaciology Meeting*, Chamonix, France.
- **Mourey J.**, Duvillard PA., Marcer M., Marsy G., Ravanel L., Rabatel A. (2018). Rockfalls in the *Grand Couloir du Goûter* (Mont-Blanc massif). An interdisciplinary monitoring system. *5th European Conference on Permafrost*, Chamonix, France. 284

Colloques nationaux (premier auteur seulement)

- **Mourey J.**, Ravanel L. (2015). Evolution of hut access facing glacier shrinkage in the Mer de Glace basin (Mont Blanc massif, France). Journée des Jeunes Géomorphologues, Chambéry, France.
- **Mourey J.**, Ravanel L. (2016). Impacts du réchauffement climatique sur les milieux de haute montagne : exemple de l'évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont-Blanc). Journées Glacio-hydro-nivo, Société Hydrologique de France, Grenoble, France.
- Mourey J.**, Marcuzzi M., Ravanel L. (2018). Effects of climate change on high mountain environments: evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif over half a century. Journée des Jeunes Géomorphologues, Lyon, France
- **Mourey J.** (2018). Mountaineering facing climate change. Routes evolution and high mountain guides adaptability. 3rd International Winter School Labex Item, Monte Carasso, Switzerland.

Congrès nationaux et internationaux (premier auteur seulement)

- **Mourey J.**, Duvillard PA., Marcer M., Marsy G., Ravanel L., Rabatel A. (2018). Mountaineers exposed to rockfalls in the *Grand Couloir du Goûter* (Mont-Blanc massif). A monitoring system for a better assessment of their vulnerability. *Sustainable Summit Conference*, Chamonix, France.
- **Mourey J.** (2018). L'alpinisme face au changement climatique. Evolution des itinéraires et adaptabilité des guides de haute montagne. Observatoire des Pratiques de la Montagne et de l'Alpinisme, Grenoble, France.
- **Mourey J.**, Duvillard PA., Marcer M., Marsy G., Ravanel L., Rabatel A. (2018). L'alpinisme à l'épreuve du climat dans le massif du Mont Blanc. Le cas du couloir du Goûter, voie classique d'ascension du mont Blanc. Journée scientifique, Parc National des Ecrins, Château de Charance, France.
- **Mourey J.** (2019). Impacts du changement climatique et enjeux pour les pratiques sportives de nature dans les Alpes. Congrès annuel de l'Association National des Elus au Sport, Chamonix, France.

Rapports d'études

- **Mourey J.**, Moret O., Descamps P., Bozon S. (2018). Accidentologie sur la voie classique d'ascension du mont Blanc de 1990 à 2017. Fondation Petzl, 20p. <https://www.petzl.com/fondation/projets/accidents-couloir-gouter?language=fr>.
- **Mourey J.** (2018). Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique. Enquête par questionnaire. Rapports de synthèse de l'étude. Syndicat National des Guides de Montagne, 10p.
- Ravanel L. et **Mourey J.** (2018). Accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace. Transitions glacier-versant. Synthèse préliminaire des observations et mesures 2018. Comité Montagne – Mairie de Chamonix, 24p.

Articles de vulgarisation

- **Mourey J.**, Ravanel L. (2017). Accessibilité des refuges de haute montagne et réchauffement climatique. *La Montagne et Alpinisme*. FFCAM, 2 – 2017, pp. 24 – 26.
- **Mourey J.** (2018). Le risque de chutes de pierres dans le Grand Couloir du Goûter (massif du Mont Blanc). Un système de suivi pour une meilleure évaluation de la vulnérabilité des alpinistes. *Montagne Magazine*, 458, pp. 20–21.

- Gallach X., Magnin F., Duillard P-A., **Mourey J.**, Berthet J. (2018). Escola de doctors. Massis del Mont Blanc. Vertex, *FEEC* (Fédération Catalane d'Alpinisme), 278, pp. 62-74.
- **Mourey J.**, Marcuzzi M. (2019). Le changement climatique : une sombre réalité pour les alpinistes. Une adaptation forcée par l'évolution des itinéraires de haute montagne. *Montagnes Magazine*, 469, Num. Spéc. Changement climatique. pp. 35 - 49.

Conférences grands publics (premier auteur seulement)

- **Mourey J.** (2018). L'alpinisme à l'épreuve du climat dans le massif du Mont Blanc. Evolution des itinéraires d'alpinisme, impacts pour les guides de haute montagne et les gardiens de refuges et outils d'aide à la décision. Refuge du Nid d'Aigle, France, ASTERS, 03/08/2018.
- **Mourey J.** (2018). L'alpinisme à l'épreuve du climat dans le massif du Mont Blanc. Evolution des itinéraires d'alpinisme, impacts pour les pratiquants et outils d'aide à la décision. Maison Forte de Hautetour – Saint Gervais, 29/08/2018.
- **Mourey J.** (2019). L'alpinisme à l'épreuve du climat dans le massif du Mont Blanc. Evolution des itinéraires d'alpinisme, impacts pour les pratiquants et outils d'aide à la décision. Les Cafés Géographiques de Lyon, France.
- **Mourey J.** (2019). Les milieux de haute montagne face au changement climatique. Quels impacts pour la pratique de l'alpinisme d'aujourd'hui et de demain ? Le Grand Parcours Isère, FFCAM, Refuge de Temple Ecrins, France.
- **Mourey J.** (2019). Les milieux de haute montagne face au changement climatique. Quels impacts pour la pratique de l'alpinisme d'aujourd'hui et de demain ? Le Grand Parcours Haute Savoie, FFCAM, Chamonix, France.

Principaux articles de presse qui mobilisent nos résultats

- **Birch S.** (24 août 2018). Climate change is melting the French Alps, says mountaineers. *The Guardian*.
- **Chandellier A.** (28 mars 2019). Les 100 plus belles courses du Mont-Blanc défigurées. *Le Dauphiné Libéré*.
- **Dominguez N.** (26 juin 2019). Las montañas se desmoronan por el calentamiento global y borran rutas míticas del alpinismo. *El País*.
- **Gerard S.** (2018). Comprendre les glaciers des Alpes. Principaux témoins du changement climatique. *Montagnes Magazine*, 457, 10.
- **Jolly P.** (26. nov. 2018). Ciment du mont Blanc, les glaces fondent. La disparition des glaces multiplie les risques d'accident lors des innombrables ascensions. *Le Monde, Planète*, 2p.
- **Lachat A.** (10 avril 2019). Quel futur pour l'alpinisme (1/3) ? Les 100 plus belles de Rébuffat à l'épreuve du climat. *Alpine Mag*.
- **Lachat A.** (10 avril 2019). Quel futur pour l'alpinisme (2/3) ? S'adapter ou renoncer : dilemme montagnard. *Alpine Mag*.
- **Lachat A.** (10 avril 2019). Quel futur pour l'alpinisme (3/3) ? Michel Piolat, témoin climatique. *Alpine Mag*.
- **Virilli M.** (21 mai 2019). La montagne interdite (3/4) ? L'expérience mont Blanc au prix de la liberté. *Montagnes Magazine*.
- **Virilli M.** (2019). Le mont Blanc est-il encore une affaire d'alpinistes? *Montagnes Magazine*, 462, 8.

Table des figures, des tableaux et des encadrés

Figure 1.1. 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 suspendues et des couvertures glacio-nivales.....	13
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).....	22
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.....	24
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)....	25
Encadré 1.1. Les différents styles d'escalade.....	26
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.....	27
Encadré 1.2. Les échelles de cotation de la difficulté des voies d'alpinisme.....	28
Tableau 1.1. Les 6 niveaux de l'échelle de difficulté globale.....	29
Figure 1.5. Coinceurs mécaniques (à gauche) et coinceurs câblés (à droite).....	31
Figure 1.6. Escalade sportive : A. Petit au Grand Capucin (3838 m, massif du Mont Blanc, Vialletet, 2012) dans une longueur cotée 8a.....	32
Figure 1.7. Ascension de la goulotte Pélissier, pointe Lachenal (3613 m, massif du Mont Blanc), TD- (M. Jourdannay, 2018).....	32
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).....	35
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).....	35
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.....	39
Figure 1.11. Panneaux d'information sur le sentiers d'accès à la Mer de Glace.....	40
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.....	44
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).....	46
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).....	47
Figure 2.4. Durée de vie d'une séquence paraglaciaire (d'après Churchet Ryder, 1972; Mercier, 2010).....	48

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.....	50
Figure 2.6. Modèle conceptuel d'évolution d'une moraine latérale alpine, depuis un état géomorphologique actif à stable (Eichel et al., 2018).....	50
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°) et forme des ravines de profondeur plurimétrique. Ce matériel est redéposé à la base de la moraine et forme un talus continu.....	51
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).....	52
Figure 2.9. Face sud des Grandes Jorasses. Effondrement du front du glacier suspendu en 1998 et 2014 (Failetaz et al., 2015).....	53
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.....	54
Figure 2.11. Profil thermique des terrains à permafrost.....	55
Tableau 2.1. Distribution du permafrost alpin en fonction de l'altitude et de la température moyenne annuelle de l'air (Haeberli, 1985 ; modifié).....	56
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.....	57
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).....	59
Tableau 2.2. Processus géomorphologiques liés à la dégradation du permafrost (Harris et al., 2001a, modifié).....	60
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. Ecroulement dans la face ouest des Drus le 8/08/2003 (J.F. Hagenmuller).	61
Figure 3.1. Effets positifs possibles du changement climatique sur le tourisme d'été dans les Alpes autrichienne (traduit de Pröbstl-Haider et al., 2015).....	65
Figure 3.2. Vers un nouveau retournement des polarités touristiques saisonnières (traduit de Bourdeau, 2009 ; modifié).....	66
Tableau 3.1. Liste des études utilisées pour la production de l'état actuel des connaissances.....	67
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).....	68
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).....	70
Figure 3.5. Structuration du travail doctoral et échelles spatiales d'investigation.....	76

Figure 3.6. Échelles de temps et d'espace traitées dans ce travail doctoral.....	80
Encadré 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles et du calcul des dénivellations à franchir pour atteindre un refuge.....	123
Figure 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles sur les itinéraires d'accès aux refuges dans le bassin de la Mer de Glace.....	123
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.....	124
Figure 4.2. Évolution de la transition glacier-versant pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles. Le secteur glissé/affaîssé 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.....	125
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).....	126
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).....	128
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).....	131
Figure 5.2. Carte de localisation du couloir du Goûter et de l'ensemble des systèmes de suivi ainsi que leur date de première installation (fond. IGN).....	149
Figure 5.3. Traitement des photos de l'appareil automatique pour retracer l'évolution des surfaces enneigées dans le couloir du Goûter.....	150
Tableau 6.1. La dynamique des cultures professionnelles (Bourdeau et al., 2006 ; modifié).....	159
Figure 6.1. Département de résidence des guides du SNGM en 2016 (SNGM, 2016).....	160
Encadré 7.1. Le programme RefLab.....	195
Figure 7.1. Évolution du nombre total de nuitées entre 1999 et 2016 pour l'ensemble des refuges considérés.....	197
Tableau 7.2. Évolution moyenne annuelle du nombre de nuitées dans les refuges étudiés sur la période 1999-2016.....	198
Figure 7.2. Evolution annuelle du nombre de nuitées par rapport à la moyenne des trois années précédentes. On considère la moyenne des trois années précédentes afin de gommer la variabilité interannuelle de la fréquentation.....	200
Figure 7.3. A. Voie normale d'ascension du Mont Tondu (3196 m) le 26/08/2015. La voie est très exposée aux chutes de pierres (flèches oranges) et la surface du glacier est en grande partie en glace (à plat bleu). B. Importante crevasse sur l'arête des Dômes de Miages le 27/08/2015.....	202
Figure 7.4. Vue du secteur de l'Envers des aiguilles de Chamonix le 09/09/2015. Les courses incluses dans l'Article 3 sont indiquées. On remarque que les voies rocheuses (itinéraires numéro 22, 44, 47, 64, 68, 84, 93) présentent les niveaux de modification indiqués entre parenthèses les plus faibles, à l'inverse des voies en neige/glace (48, 78).....	203
Encadré 7.2. Le cas de l'été caniculaire de 2003.....	204
Encadré 7.3. Quand le refuge lui-même est menacé par le changement climatique.....	206
Figure 7.5. A. Cicatrice et dépôt de l'éroulement des Cosmiques du 22 août 1998 (600 m ³) (ph. : A. Sage). B. Dimensions de la cicatrice d'éroulement mesurées sur un modèle 3D à haute résolution acquis par balayage laser terrestre (Ravane et al., 2013).....	206

Figure 7.6. Installation de filets et rénovation des fondations du refuge Carrel (3835 m, Italie ; Vuillemier, 2014).....206

Tableau 8.1. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteurs pyroélectrique sur l'accès à la Mer de Glace lors des étés 2017 et 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors des contre-comptages manuels.....220

Figure 8.1. Alpinistes faisant une pause au niveau du capteur. Leurs déplacements/stationnements devant le capteur engendrent un sur-comptage important.....221

Figure 8.2. Fréquentation de l'itinéraire d'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers. A. Fréquentation journalière au cours des étés 2017 et 2018. B. Distribution moyenne horaire de la fréquentation au cours de l'été 2018.....222

Tableau 8.2. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteur pyroélectrique sur l'arête de l'aiguille du Midi lors de l'été 2017. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors des contre-comptages manuels.....223

Figure 8.3. Suite à une chute de neige importante, le capteur a été retrouvé (A) presque complètement enseveli sous la neige (12/08/2017) – outre le fait qu'il risque d'être endommagé par les alpinistes, il est loin d'être à la hauteur requise (70 – 80 cm) pour effectuer une mesure de qualité – soit (B) du mauvais côté de la trace.....224

Figure 8.4. Fréquentation moyenne journalière de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017.....225

Figure 8.5. Distribution moyenne horaire de la fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017....225

Tableau 8.3. Principaux paramètres et résultats des mesures de fréquentation par capteurs pyroélectriques sur la voie normale d'ascension du mont Blanc, lors des étés 2017 et 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mises en évidence lors des contre-comptages manuels.....226

Figure 8.6. Site d'installation du capteur pyroélectrique en 2017 et 2018. Le bloc qui a basculé est surligné en rouge.....227

Figure 8.7. Fréquentation du couloir du Goûter en 2017 et 2018, en nombre de passages par jour.....228

Figure 8.8. Distribution journalière moyenne des passages sur l'ensemble de la saison (identique en 2017 et 2018).....229

Figure 8.9. Dispositif – caméra AXIS P1357 – installé sur le terrain et position de la fenêtre de déclenchement de l'enregistrement. Cette dernière est positionnée au centre de la prise de vue de la caméra.....257

Figure 8.10. Une cordée de 3 personnes remonte très lentement l'arête de l'aiguille du Midi et déclenche trois fois de suite l'enregistrement d'une vidéo, à 12 secondes d'intervalle. Au total, le logiciel comptabilise 7 passages différents au lieu de 3.....258

Tableau 8.4. Erreurs de mesure liées à la multiplication des vidéos sur un laps de temps très court.....258

Tableau 8.5. Résultats issus des deux contre-comptages manuels.....259

Tableau 8.6. Nombre de passages sur l'arête est de l'aiguille du Midi, comptabilisés à partir des vidéos acquises par la caméra les 1^{er}, 2 et 3 août 2018. L'incertitude donnée pour chaque chiffre correspond à l'erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée à partir des erreurs de mesure mise en évidence lors du deuxième contre-comptage manuel (Tab. 8.5).....259

Liste des Annexes

- **Annexe 4.1** : Rapport d'étude pour un nouvel accès au refuge de la Chapoua
- **Annexe 4.2** : Exemple de Fiche Technique Opérationnelle, dans le cadre du projet ALCOTRA *Eco-Innovation en Altitude*
- **Annexe 5.1** : Détails des 95 courses étudiées dans l'Article 3 et de leur niveau de modification
- **Annexe 5.2** : Article publié dans *Montagnes Magazine* n°458 (octobre 2018)
- **Annexe 5.3** : Exemple de fiche thématique sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme
- **Annexe 6.1** : Questionnaire envoyé aux guides du SNGM
- **Annexe 6.2** : Rapport de synthèse envoyé aux guides du SNGM
- **Annexe 7.1** : Entretiens réalisés avec les gardiens des refuges du massif du Mont Blanc
- **Annexe 7.2** : Nombre de nuitées par années entre 1999 et 2018 dans les refuges du massif du Mont Blanc
- **Annexe 8.1** : Arrêté préfectoral du 13/07/2018 portant à autorisation temporaire l'accès au sommet du mont Blanc *via* le refuge du Goûter.

Annexe 4.1. Rapport d'étude pour un nouvel accès au refuge de la Chapoua

Éléments de réflexion sur un nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua (2841 m)



Ludovic Ravanel - 23 oct. 2014

Géomorphologue au CNRS (laboratoire EDYTEM)
Ancien gardien du refuge de la Charpoua (2000-2004)

Contexte :

Suite aux nombreuses chutes du front du glacier de la Charpoua au cours de l'été 2014, un nouvel itinéraire d'accès au refuge est recherché.

A partir d'une reconnaissance effectuée le 22 septembre 2014 par Jean-Marc Aviolat et Emmanuelle Henry-Amar du service « Pistes et sentiers » de Chamonix, une proposition d'itinéraire a été formulée. Cet itinéraire débiterait en aval de la confluence entre le glacier de Leschaux et celui du Tacul.

Ce document a pour objectif de fournir quelques observations initiales concernant la géomorphologie et la morpho-dynamique du secteur envisagé.

Au préalable, il me semble important de discuter l'origine des événements de 2014 afin d'apprécier l'évolution probable du glacier de la Charpoua et donc la dangerosité de l'itinéraire actuel du point de vue de la dynamique de ce glacier.

Hypothèse sur l'origine des écroulements du front du glacier de la Charpoua :

Dans son retrait général, la position du front du glacier s'est établie vers 2620 m d'altitude depuis une dizaine d'années, 2003 plus précisément. Lors de l'été caniculaire 2003, au moins trois chutes du front ont été observées, entraînant des avalanches de glace qui avaient balayé l'itinéraire d'accès au refuge.

Par la suite, un minimum d'une rupture a été noté en 2007 puis 2009 avant l'exceptionnel été 2014 où 6 à 8 importantes avalanches de glace – c'est-à-dire traversant l'itinéraire – se sont produites.

Outre ces événements, l'observation du glacier indique une déstabilisation de celui au cours de l'été 2014 :

- la pente de la partie médiane du glacier, autrefois homogène, est aujourd'hui marqué par plusieurs ruptures avec des angles qui ont localement pu fortement s'accroître, indiquant une perte d'épaisseur et donc de volume importante sur la période très récente ;
- contrairement aux fins de saison estivale précédentes, la partie supérieure du glacier – qui permet l'accès à la voie normale des Drus – est maintenant extrêmement crevassée et ce, jusqu'au niveau de la rime, indiquant une forte accélération de la glace dans cette zone.

Aussi, il est vraisemblable que le glacier de la Charpoua ait subi au cours de l'été 2014 une « déstabilisation régressive », peut être initiée par les fortes précipitations de juillet. Ces dernières, en

augmentant les pressions hydrauliques sous-glaciaires (cas du glacier du Tour en 1949) auraient pu entraîner l'accélération de la partie frontale du glacier à l'origine des premières ruptures. S'en serait alors suivie une accélération de la partie médiane (d'où la perte de volume) puis de la partie supérieure par traction (sorte de « soutirage ») de la glace (d'où le crevassement), toujours en lien avec l'accélération de la partie basse.

S'il convient d'étudier plus en détail les événements de 2014 ainsi que la dynamique générale du glacier, il est toutefois probable que cet épisode extrême dans l'actuelle phase de retrait glaciaire ne soit que transitoire et que, avec l'inévitable poursuite du retrait glaciaire, la dangerosité du glacier s'amointrisse nettement dans les toutes prochaines années.

Caractéristiques géomorphologiques de l'itinéraire projeté :

En rive droite de la Mer de Glace (figure 1.A), à partir de 2060 m d'altitude, l'itinéraire projeté emprunterait successivement 4 zones (figure 2) en rive droite du couloir SO de l'Aiguille du Moine (3412 m) qui, avant d'aboutir sur la Mer de Glace, se termine par une gorge qui exploite sur près de 300 m une rupture géologique (faille) :

- Au milieu de la Mer de Glace, l'itinéraire quitterait la « veine blanche » pour traverser au plus court la « veine noire » (glacier couvert) avant de remonter non une véritable moraine mais un talus de moraine (figure 1.B), c'est-à-dire le dépôt issu des écroulements successifs de l'ensemble de la moraine du Petit Age Glaciaire.

→ Comparativement aux terrains qui peuvent être rencontrés tout au long de la rive droite de la Mer de Glace, il s'agit de l'une des marges les moins raides, rendant l'itinéraire relativement sûr (moindre remaniement gravitaire). La présence d'un important cône de déjection participe de cette configuration favorable mais il faudra vérifier que l'itinéraire reste à distance de l'imposant cône d'avalanche qui se forme chaque hiver-printemps (figure 1.C) afin d'éviter les avalanches mais également les chutes de pierre que le couloir peut canaliser. Par ailleurs, l'épaisse couche de débris rocheux protège la glace sous-jacente, de telle sorte que le secteur évoluera à l'avenir vraisemblablement moins vite que les accès aux refuges situés en rive gauche de la Mer de Glace par exemple. Enfin, l'absence de moraine en place, causée par la présence de parois relativement raides, tend à renforcer le sentiment de sécurité qu'inspire cette première zone.

- La seconde zone est celle de dalles raides correspondant aux versants de l'auge glaciaire de la Mer de Glace (figure 2).

→ Evitant les dalles situées immédiatement à gauche du couloir et qui ont récemment subi des phénomènes de décompression (présence de surplombs et de cicatrices d'éboulement assez fraîches) en lien avec le retrait du glacier, le projet d'itinéraire emprunte un secteur qui, compte tenu d'un angle de pente assez modéré et d'une structure peu fracturée, semble peu enclin à l'appel au vide et donc aux éboulements/écroulements. En revanche, ces dalles sont sujettes à des écoulements d'eau particulièrement fréquents que l'itinéraire devra au mieux éviter.

- Les zones 3 et 4 correspondent à des dalles d'érosion glaciaires peu inclinées et à des vires couvertes de sédiments d'origine glaciaire végétalisés et stables.

→ En contexte estival, ces secteurs ne semblent pas présenter de problématiques particulières. Le contexte hivernal pose quant à lui de nombreuses questions et en particulier :

- contrairement à l'itinéraire actuel qui apparaît assez sûr du point de vue avalancheux, ce nouvel itinéraire parcourrait des secteurs lisses et assez raides, particulièrement favorables aux avalanches, d'où la question sous-jacente de l'accessibilité en hiver et au printemps ;

- cette même configuration mettra très probablement l'équipement à rude épreuve en raison d'une reptation favorisée de la neige.

Conclusions :

L'activité du glacier de la Charpoua au cours de l'été 2014 pose légitimement la question d'un nouvel itinéraire d'accès au refuge éponyme, évitant la marge proglaciaire où un accident dramatique est survenu en juillet. Se pose toutefois celle de l'évolution du glacier qui, à court terme et après la phase « paroxysmique » de 2014, devrait poursuivre une décrue probablement synonyme de l'arrêt des ruptures de son front. Une étude complémentaire est nécessaire pour statuer sur ce point.

Le nouvel itinéraire proposé semble, en première approche, particulièrement pertinent d'un point de vue géomorphologique. Non seulement il évite la marge proglaciaire de la Charpoua mais il évite également le secteur morainique très instable de l'itinéraire actuel lorsqu'on quitte la Mer de Glace. Enfin, il semble moins propice aux déstabilisations de parois que le présent itinéraire qui a par exemple connu un écoulement en 2005. Des travaux complémentaires devraient toutefois être conduits afin de valider les éléments présentés plus haut (voir, par exemple, le § « Etude historique » ci-dessous). En revanche, la sécurité du secteur en situation hivernale et printanière doit être clairement étudiée et discutée. Un suivi régulier du secteur au cours de l'hiver prochain permettrait peut-être de répondre à quelques interrogations.

Enfin, il ne doit pas être passé sous silence le fait que ce nouvel itinéraire deviendrait très probablement et rapidement non un itinéraire secondaire pour le refuge du Couvercle, mais peut être l'itinéraire le plus fréquentés car évitant la remontée pénible de la veine noire et surtout les longues échelles verticales des Egralets. D'autre part, ce nouvel itinéraire pourrait condamner un peu plus encore le refuge de la Charpoua, son accès devenant plus long et moins logique encore sur l'itinéraire des balcons de la Mer de Glace. Enfin, il est évident que ces balcons perdront un peu de leur superbe en évitant... 2.5 km de balcon, justement !



FIG. 1. Contexte géomorphologique du projet de nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua. A : position générale, en rive droite de la Mer de Glace ; B : géomorphologie simplifiée du secteur de départ ; C : culot d'avalanche au pied du couloir SO de l'Aiguille du Moine (1995).

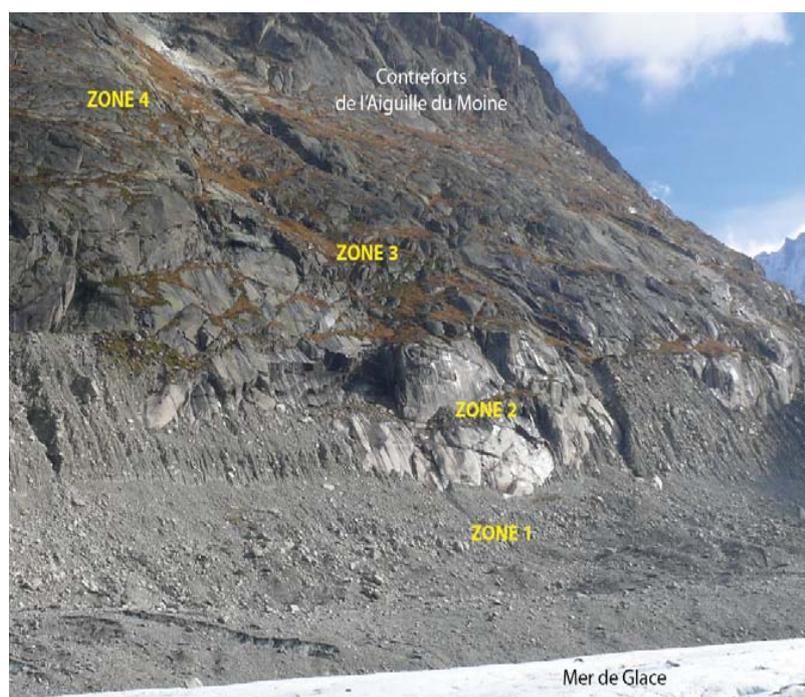


FIG. 2. Les différents secteurs du projet de nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua.

Etude historique et diachronique des accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace :

Avec le réchauffement du climat, les milieux de haute montagne évoluent particulièrement rapidement en raison du retrait des glaciers et/ou de la dégradation du permafrost. Les accès aux refuges de haute montagne deviennent ainsi régulièrement problématiques et des solutions doivent souvent être trouvées pour sécuriser les itinéraires voire même pour les modifier parfois assez profondément (accès au refuge des Conscricts ou à la cabane Panossière par exemple).

Aussi ai-je lancé au printemps 2014 un sujet de recherche de Master sur l'évolution de l'accessibilité aux refuges du bassin de la Mer de Glace. Le projet englobe 1) une étude historique des itinéraires, 2) une étude diachronique à haute résolution par balayage laser terrestre des transitions glacier/versant, 3) un travail d'analyse des processus géomorphologiques qui ont conduits à l'évolution de ces transitions et plus généralement de ces itinéraires et 4) l'identification des évolutions probables à court et moyen terme assorties de propositions pour la gestion des itinéraires en question.

Ainsi ont été scannés dans le cadre de ce travail les itinéraires d'accès aux refuges du Requin, du Couvercle, de l'Envers et de la Charpoua, y compris le projet d'itinéraire (figures 3 à 6). Les modèles 3D obtenus seront analysés et comparés d'une année sur l'autre pour en mesurer les évolutions.

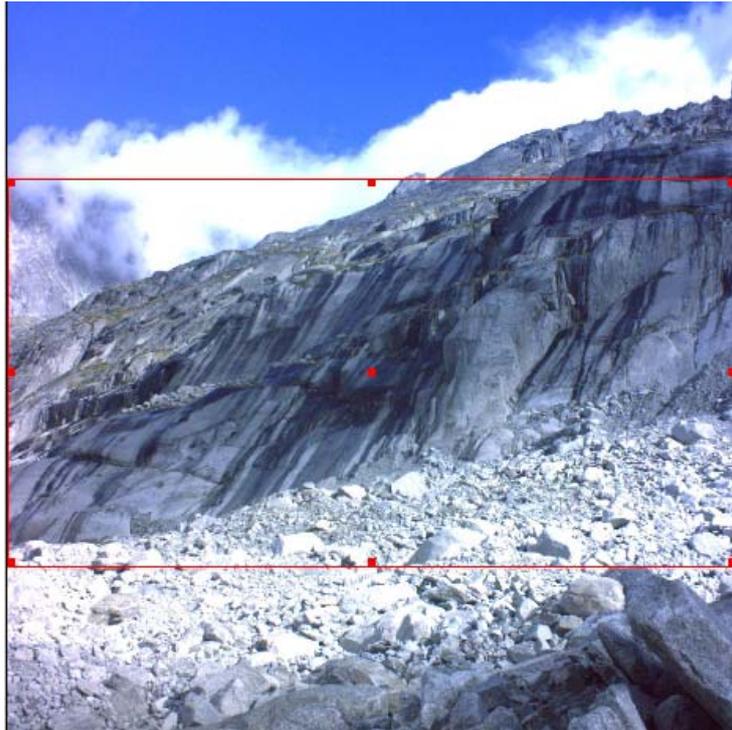


FIG. 3. Fenêtre de scan aval du secteur relatif au nouvel itinéraire d'accès à la Charpoua.
Balayage laser terrestre effectué le 21 octobre 2014.

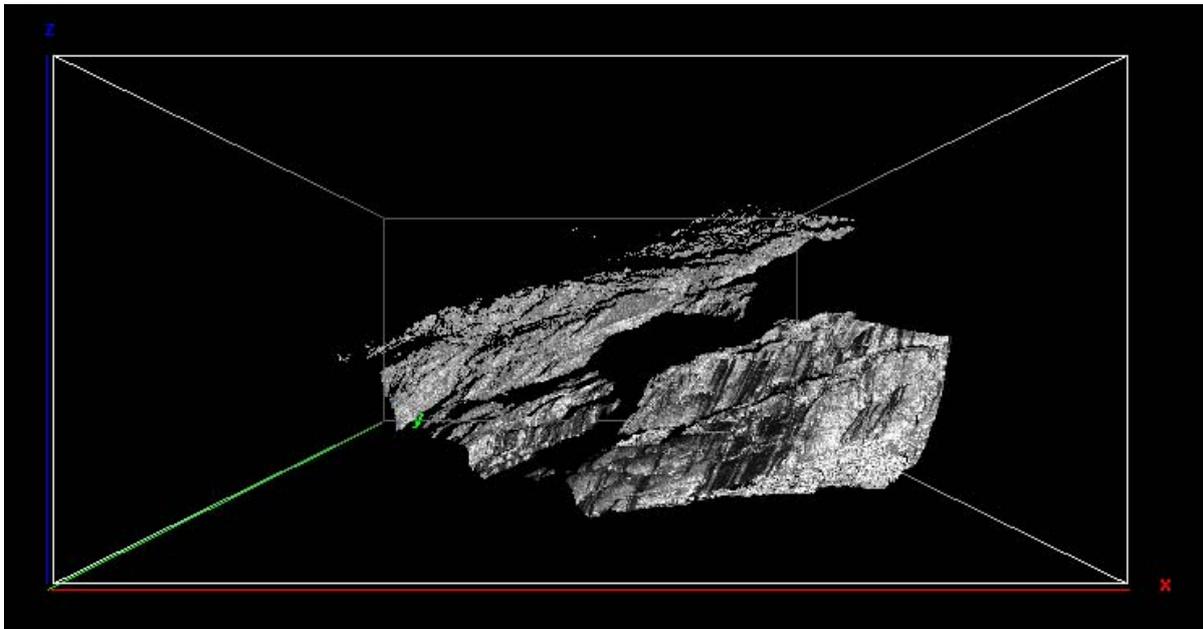


FIG. 4. Modèle numérique aval.

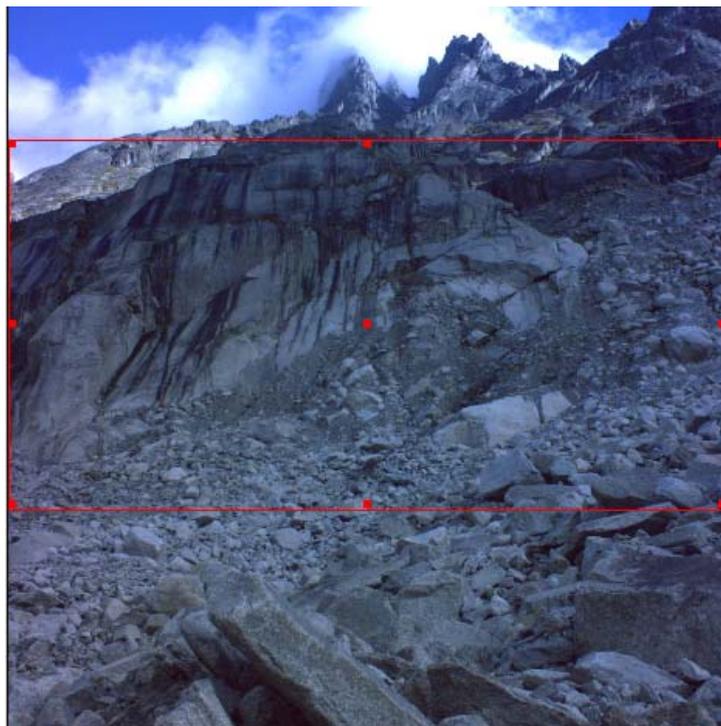


FIG. 5. Fenêtre de scan amont.

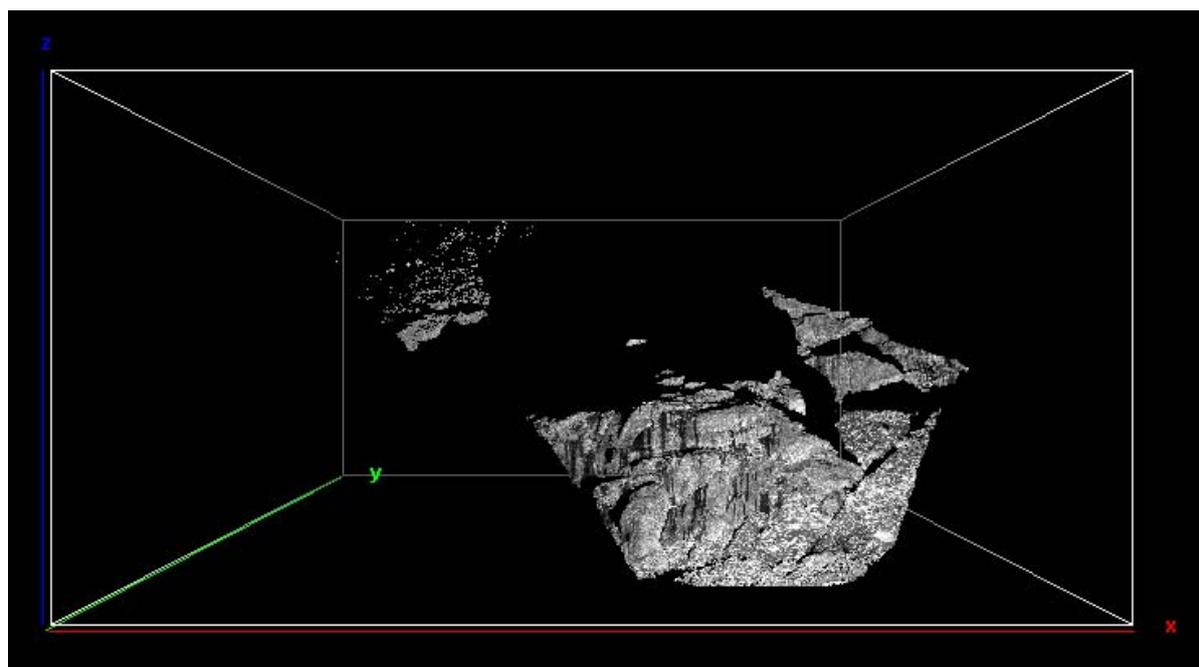


FIG. 4. Modèle numérique aval (sera couplé avec le modèle amont).

Annexe 4.2. Exemple de Fiche Technique Opérationnelle, dans le cadre du projet ALCOTRA *Eco-Innovation en Altitude*



PROJET DE COOPERATION TRANSFRONTALIERE
«ECO INNOVATION EN ALTITUDE»

Fiche technique - Bonnes pratiques

Cabane des Dix



Accessibilité au refuge

Point de départ : Arolla
Temps de marche : 3h30 à 4h30
Dénivelé : + 900m
Type de terrain: prairies, végétation clairsemée, roches nues et glaciers et neiges éternelles.
Typologie du substrat : roche friable (moraine), roche fracturée, roche compacte.
Glaciers à proximité : glacier de Cheilon
Equipements en place : échelles au niveau du « pas de chèvre »

Description du refuge

Altitude : 2 927m
Massif : Valais, Alpes Pennines
Coordonnées : Long : 7°25'04" Lat : 46°00'40"
Exposition : Sud
Statut : CAS, section Monte Rosa
Gardiens : Shelly Salamin et Daniel Egg
Année d'ouverture : construit en 1929, agrandissement en 1976.
Période d'ouverture : de mi-mars à mi-mai et de mi-juin à mi-septembre
Nombre de place : 140
Typologie d'utilisateur : alpinistes, randonneurs et skieurs
Fréquentation : 8 000 nuitées, 10 personnes à la journée
Local d'hiver : 16 places





Problèmes constatés

Le chemin d'accès au refuge va être modifié et refait, car à cause du retrait glaciaire, le sol devient instable et il y a des glissements de terrain.

Solutions adoptées

Les échelles du Pas de chèvre vont également être déplacées, toujours à cause du retrait glaciaire qui a fragilisé la paroi rocheuse sur laquelle les échelles se trouvent. Par contre, comme le glacier est accessible sans équipement puisqu'il est peu crevassé, les gens viennent plus facilement à la journée. De plus, les échelles ne sont pas perçues comme un obstacle, mais elles sont en fait une attraction qui attire du monde.



Photo des échelles du Pas de Chèvre en 2011

Critères d'exemplarité

- ✓ haute niveau de sécurité
- ✓ amélioration de l'accessibilité et changement de typologie d'utilisateurs

Annexe 5.1. Détails des 95 courses étudiées dans l'Article 3 et de leur niveau de modification

Sommet	Courses	N°	Nature de la voie	Difficulté actuelle sur CamptoCamp	Niveau de modification	Nbre de processus qui affectent l'itinéraire
Glacier des Bossons	Ecole de glace	2	Glace		4	14
Petits Charmoz	Trav.	9	Rocher	PD	2	15
Petite Aig. Verte	voie Normale	10	Neige	PD	3	10
Tour Ronde - Vallée Blanche	Ar.SE	11	Neige	PD+	3	9
Pointe de l'Innominata	Ar.S	12	Rocher	AD	2	3
Dômes de Miage	Trav.	13	Neige	PD+	3	20
Tour Noir	Trav.	14	Rocher	PD+	1	15
Aig. Tour	Ar.table de Roc	15	Rocher	AD	2	8
Aig. Moine	Ar.Sud	16	Rocher	D	1	10
Mont Blanc Tacul	Voie Normale	17	Neige	PD	2	10
Aig.Midi	Ar.Cosmiques	17	Mixte	AD	3	10
Aig. De l'M	Ar.NNE	18	Rocher	D	1	10
Aig. Argentière	voie Normale	19	Neige	PD+	2	10
Pyramide Tacul	Ar.E	20	Rocher	D	1	3
Aig. Midi / Aig. Plan	Trav.	21	Mixte	AD	2	14
Dent du Requin	Ar.SE ou Ar.Chapeau à Cornes	22	Rocher	AD+	2	10
Grandes Jorasses	voie Normale	23	Neige	AD	1	12
Mont Blanc	voie Normale	24	Neige	PD	3	18
Aig. Pélerins	Ar. Grüter	25	Rocher	D+	1	0
Aig. Dorées	Trav.	26	Mixte	D	2	7
Les écandies	Trav.	27	Rocher	D	1	4
Aig. Chardonnet	Ar.Forbes	28	Mixte	AD	3	14
Les Courtes	Face NE	29	Neige	AD	3	11
Mont Blanc	Route des Aig.Grises	30	Neige	PD	1	11
Aig.Peigne	voie Normale	31	Rocher	AD	1	1
Aig. Des Pélerins	Voie Carmichaël	31	Rocher	D	1	1
Grand Charmoz / Grépon	Trav.	32	Rocher	D	3	11
Aig. De Rochefort/Dent du Géant	Trav Ar. / Voie Normale	33	Mixte	AD	3	11
Aig.de la Blaitière / Les Ciseaux – Aig.Fou	Trav.	34	Mixte	AD+	2	11
Tour Ronde	Face N	35	Mixte	D	3	9
Aiguilles de Trélatête	Trav.	36	Neige	AD	2	16
Trident du Tacul	Voie Lépiney	37	Rocher	D	4	9
Les Courtes – Aig. Ravanel-Mummery	Trav.	38	Mixte	AD	3	16
Petites Jorasses	Ar.Sud	39	Rocher	D	2	8
Petit Dru - Grand Dru	Trav.	40	Rocher	D	2	9
Aig. Verte	Couloir Whymper SE	41	Neige	AD	3	15
Aig. Croux	Face SE	42	Rocher	TD	1	3
Aig. Chardonnet	Éperon N	43	Mixte	AD+	2	11
Dent du Requin	Face E	44	Rocher	D	2	11
Mont Dolent	Ar.N	45	Mixte	D	3	10
Aig. De l'M	Voies Ménégaux et Couzy	46	Rocher	TD	1	10
Aig. Du Plan	Ar. Ryan	47	Rocher	D	2	9
Pain de Sucre d'Envers du Plan	Face N	48	Neige	TD	3	9
Aig. Bionnassay / Mont Blanc	Face NW / Trav.	49	Neige	TD	1	13
Mont Maudit	Ar. Tour Ronde	50	Mixte	D	3	10
Aig. Moine	Face E	51	Rocher	TD	2	7
Aig. Du Peigne	Papillons, Face W, Pilier NW, Ar. N	52	Rocher	TD	0	0
Pointe Lachenal / Aig. Midi	Face SSE/ Eperon des Cosmiques	53	Rocher	TD	1	8
Aig. Diable / Mont Blanc Tacul	Trav.	54	Rocher	D	1	10
Aig. Midi	Face S	55	Rocher	TD	2	8
Mont Blanc	Eperon de la Brenva	56	Mixte	D	2	12
Dent du Géant	Face S	57	Rocher	ED	1	4
Pic Adolphe Rey	Voie Salluard	58	Rocher	TD	2	8
Mont Blanc du Tacul	Couloir Gervasutti	59	Glace	D	3	9
Le Minaret	Eperon SE et Face S direct	60	Rocher	TD	1	6
Aig. Peigne	Voie Vaucher	61	Rocher	TD	1	2
Aig. Midi	Eperon Frendo	62	Mixte	D	3	15
Petit Clocher du Portalet	Face E et Ar. SE	63	Rocher	TD	0	0
Pic de Roc – Grépon	Trav.	64	Rocher	TD	1	8
Aig. Argentière	Face N	65	Glace	D	3	15
Grandes Jorasses	Ar. des Hironnelles	66	Rocher	D	1	8
Aig. De la Brenva	Face E	67	Rocher	TD	1	5
Dent du crocodile	Ar.E	68	Rocher	TD	2	9
Aig. Du Plan	Face N	69	Glace	TD	2	12
Mont Maudit	Voie Crétier	70	Mixte	TD	1	10
Aig.de la Blaitière	Face W	71	Rocher	TD	2	4
Mont Blanc du Tacul	Pilier Boccalatte	72	Rocher	TD	1	10
Ar. De Rochefort – Grandes Jorasses	Trav.	73	Mixte	D	2	9
Aig. Verte	Ar. Grand Montets	74	Glace	D	2	14
Aig. Noire de Peuterey	Ar. S	75	Rocher	TD	1	2
Les Courtes	Eperon Central NNE	76	Mixte	TD	3	13
Aig. Verte	Ar. Sans Nom	77	Mixte	TD	2	17
Dent du Requin	Face N	78	Mixte	TD	3	13
Aig. Verte	Couloir Couturier	79	Neige	D	2	7
Petit Dru	Face N	80	Rocher	TD	1	14
Mont Blanc	Ar. de l'Innominata	81	Mixte	D	1	10
Les Droites	Eperon N	82	Rocher	TD	2	11
Aig. Noire de Peuterey	Face W	83	Rocher	TD	2	6
Aig. De Chamonix	Traversée Aiguille du Midi - Grépon	84	Rocher	TD	3	10
Petites Jorasses	Face W	85	Rocher	TD	2	13
Mont Blanc du Tacul	Pilier Gervasutti	86	Rocher	TD	2	11
Pointe Gugliermina	Face SW	87	Rocher	TD	1	6
Aig. Du triolet	Face N	88	Glace	D	3	9
Grand Capucin	Face E	89	Rocher	ED	1	9
Mont Blanc	Voie Major	90	Mixte	D	2	9
Aig. Verte	Versant du Nant Blanc	91	Mixte	D	3	13
Petit Dru	Pilier Bonatti	92	Rocher	ED	4	11
Aig. du Fou	Face S	93	Rocher	ED	3	12
Les Courtes	Face N	94	Glace	D	3	7
Mont Blanc	Ar. de Peuterey	95	Mixte	TD	1	10
Grandes Jorasses	Pointe Croz - Eperon Central	96	Rocher	TD	1	12
Grandes Jorasses	Eperon Walker	97	Rocher	ED	2	13
Petit Dru	Face W - Directe Américaine	98	Rocher	ED	2	13
Les Droites	Face N	99	Glace	ED	2	9
Mont Blanc	Pilier Central Frêne	100	Mixte	TD	2	12
Moyenne					2	9

Annexe 5.2. Article publié dans *Montagnes Magazine* n°458 (octobre 2018)

20_étude ▲ mont Blanc

LE RISQUE DE CHUTES DE PIERRES DANS LE GRAND COULOIR DU GOÛTER

UN SYSTÈME DE SUIVI POUR UNE MEILLEURE ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES ALPINISTES

Par Jacques Mourey, doctorant, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, laboratoire EDYTEM

Dans le contexte actuel de changement climatique, la haute montagne alpine est l'objet de profondes modifications dont le retrait glaciaire et la dégradation du permafrost (terrains gelés en permanence pendant au moins deux années consécutives ayant un rôle stabilisateur). Il en résulte des chutes de pierres plus fréquentes et plus volumineuses qui représentent un risque direct pour les alpinistes. Ce risque est important sur la voie classique d'ascension du mont Blanc (4 809 m) dans la traversée du grand couloir du Goûter à 3 270 m et la montée jusqu'à l'Aiguille du Goûter (3 863 m). L'étude d'Alpes Ingé (2012) a montré que 75 % des chutes de pierres se produisent entre 10h et 16h30 et que la période la plus critique se situe entre 11h et 13h30 (34 % des événements observés) avec, en moyenne, une chute de pierres toutes les 17 minutes. Ce risque contribue à expliquer une accidentologie très importante avec 4 accidents mortels et 8 blessés en moyenne par saison estivale depuis 1990 (Mourey et al., 2018).

Ces chutes de pierres ont une double origine. La première est liée aux conditions géomorphologiques de l'ensemble de la face, constituée d'un gneiss très fracturé, qui favorise l'occurrence de chutes de pierres et de blocs, d'autant plus que l'appel au vide lié à la pente est fort (pente moyenne d'environ 40°). De plus, la dégradation du permafrost et le déenneigement de plus en plus rapide du couloir, notamment en faveur de périodes caniculaires plus fréquentes en lien avec le réchauffement climatique, favorisent les chutes de pierres. Celles-ci sont par conséquent probablement plus fréquentes et mobilisent des volumes parfois importants. Le second facteur est le cheminement des alpinistes, qui peuvent déclencher des chutes de pierres dont certaines affectent les cordées situées en aval et dans la traversée du couloir.

UN SYSTÈME DE SUIVI PLURIDISCIPLINAIRE

Malgré l'importance des chutes de pierres et le danger qu'elles représentent pour les alpinistes, peu d'études ont été réalisées. Il y a un manque de connaissances pour :

- caractériser les conditions géomorphologiques qui les contrôlent et ainsi mieux évaluer leurs périodes d'occurrence ;
- évaluer la vulnérabilité des alpinistes en quantifiant et caractérisant la fréquentation de l'itinéraire.

Aussi, un important dispositif de mesures, nécessitant les compétences de 9 chercheurs issus de 4 laboratoires de recherche différents (EDYTEM, LISTIC, PACTE, ISTERRE), a été installé :

- 4 capteurs de température du sol pour caractériser l'état thermique du permafrost – pour partie responsable de l'occurrence des chutes de pierres ;
- des capteurs sismiques pour caractériser l'occurrence des chutes de pierres ;

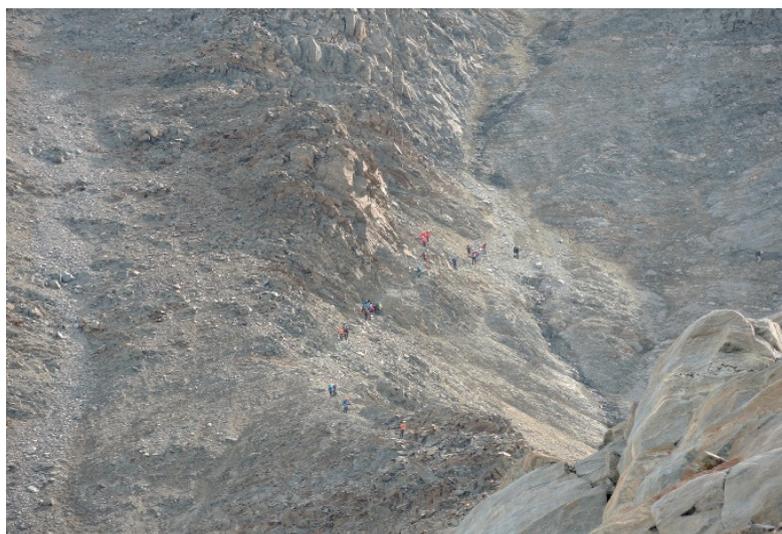
- un appareil photo automatique qui prend 4 photos par jour du couloir pour étudier son enneigement – ayant une forte influence sur l'occurrence des chutes et les volumes mobilisés ;

- un pluviomètre, la pluie et les orages étant des facteurs favorisant les chutes de pierres ;
- un capteur de fréquentation qui mesure le nombre, la direction et l'heure de passage des alpinistes.

Des modélisations 3D de la topographie du couloir pour déterminer les zones de départ et les volumes que représentent les chutes de pierres ont aussi été réalisées.

En parallèle, l'étude de l'accidentologie dans le couloir du Goûter et la remontée de l'arête, publiée en 2012 par la Fondation Petzl, a été mise à jour et prolongée jusqu'à 2017 (Mourey et al., 2018).

Le fameux couloir du Goûter, dans lequel les prétendants au mont Blanc s'exposent aux chutes de pierres. ▼



Un appareil photo automatique et des modalisations 3D de la topographie du couloir par balayage laser terrestre pour l'étude de son enneigement.

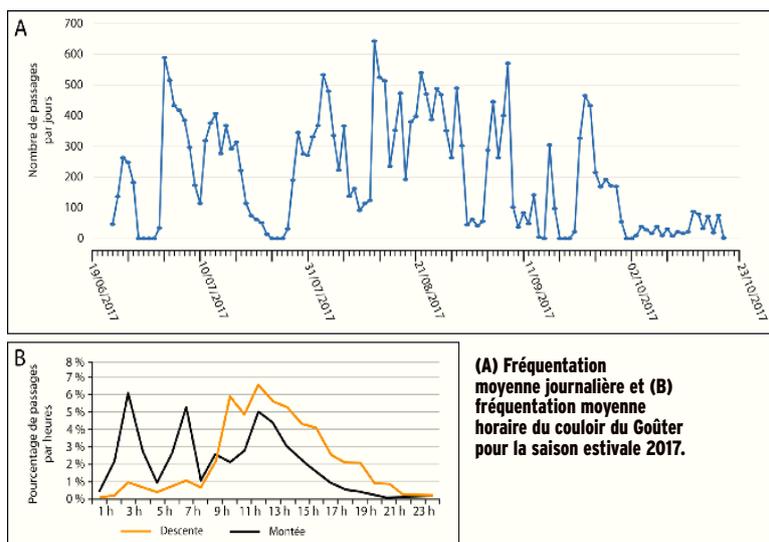


P-A. Duvillard

L'objectif final du dispositif est de confronter et croiser l'ensemble des données afin de mieux comprendre dans quelles conditions les chutes de pierres se produisent et la gestion du risque que les alpinistes adoptent en conséquence. Cependant, les premiers instruments n'étant installés que depuis 2016 et complétés en 2017 puis en 2018, il ne nous est pas encore possible de présenter l'ensemble des résultats escomptés, le traitement et le croisement des données est long et plusieurs années d'acquisition seront nécessaires pour tirer des conclusions.

Certains résultats préliminaires (voir encadré) montrent toutefois que ce système de suivi pluridisciplinaire mène à une meilleure évaluation de la vulnérabilité des alpinistes, par l'identification en l'occurrence de comportements non adaptés au risque local de chutes de pierres.

Les études en cours, réalisées avec le soutien de l'Espace Mont Blanc (projet Européen ALCOTRA AdaPT Mont Blanc) et en collaboration avec la Fondation Petzl ont pour vocation de faire un diagnostic de la situation et de proposer des données scientifiques objectives comme outils d'aide à la décision pour les pouvoirs publics et les professionnels de la montagne en charge de la gestion de l'itinéraire. Les données de fréquentation et d'accidentologie ainsi qu'un poster présentant en détail le système de monitoring en place sont disponibles sur le site de la fondation Petzl.



LA FRÉQUENTATION DU COULOIR DU GOÛTER À L'ÉTÉ 2017

Du 1er juin au 30 septembre 2017, il y a eu 29 182 passages (+ 42 %) dans le couloir, pour en moyenne 202 passages par jour et des pics de fréquentation à plus de 600 passages par jour (il est important de préciser que ces résultats présentent un nombre de passages et non un nombre de personnes).

À l'échelle saisonnière, la fréquentation (Fig. 2.A) de l'itinéraire s'organise en fonction des périodes de beau temps, sans tenir compte des conditions dans le couloir. À l'échelle journalière, la traversée du Grand Couloir s'organise autour de trois pics de fréquentation (Fig. 2). Les deux premiers se situent à 2h et à 6h du matin. Ils correspondent aux départs du refuge de Tête Rousse en direction du sommet. Le troisième s'étale entre 9h30 et 14h, avec un pic principal à 11h30, et représente la grande majorité de la fréquentation. Il correspond aux ascensionnistes qui

descendent du sommet et à ceux qui montent au refuge du Goûter depuis le Nid d'Aigle, où le premier train arrive à 8h30. Ainsi, une majorité d'ascensionnistes traversent le couloir au mauvais moment lorsque les chutes de pierres sont les plus fréquentes (entre 11h et 13h30).

En 2017, les accidents se sont produits en majorité à la descente et dans l'après-midi (14h41 en moyenne), c'est-à-dire quand les ascensionnistes sont le plus fatigués, lors du pic de fréquentation et lorsque les chutes de pierres sont les plus intenses. Seuls trois accidents se sont produits lors des deux premiers pics de fréquentation de la nuit et du matin, quand les chutes de pierres et la fréquentation sont les plus faibles.

Annexe 5.3. Exemple de fiche thématique sur l'évolution des itinéraires d'alpinisme

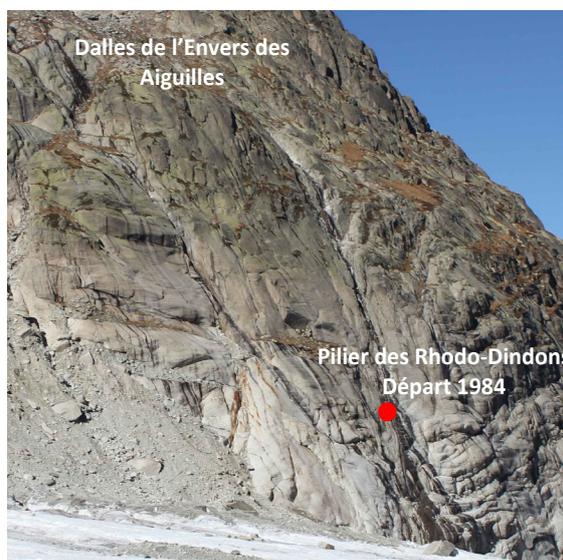
Les impacts du changement climatique sur les voies d'alpinisme et leurs conditions de fréquentation



Fiche n°1 : Le retrait glaciaire complique l'accès aux voies d'escalade rocheuses et les accès aux refuges de haute montagne

Le retrait glaciaire dans le massif du Mont Blanc

- Le massif du Mont Blanc est particulièrement affectés par la fonte des glaciers : diminution de 26% des superficies englacées.
- **La fonte est la plus importante au niveau des langues glaciaires** : à l'aval du refuge de l'Envers des Aiguilles, le glacier du Tacul a perdu 80 m d'épaisseur
- **La fonte concerne aussi la haute altitude** : au col du Midi (3600 m), le glacier du Géant a perdu plus de 30 m d'épaisseur



Impacts sur les itinéraires d'alpinisme

- **Apparition de nouvelles longueurs** au pieds des voies.
- **Croissance du niveau technique** du départ des voies.
- Augmentation du **risque de chutes de pierres** dans les secteurs récemment désenglacés
- Passage du glacier à la paroi plus difficile techniquement.
- Augmentation des hauteurs d'échelles sur les itinéraires d'accès aux refuges.

Ces modifications sont particulièrement importantes lors de périodes caniculaires et en fin de saison estivale

Exemples d'itinéraires/secteurs particulièrement affectés

- Ensemble des voies rocheuses en face sud de l'aiguille du Midi dont la voie Rébuffat-Bacquet.
- Face est du Moine dont la voie Contamine-Labrunie
- Ensemble des voies rocheuses dans l'Envers des aiguilles de Chamonix
- Itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace et l'accès au refuge d'Argentière

Annexe 6.1. Questionnaire envoyé aux guides du SNGM

Les effets du changement climatique sur les conditions de pratique du métier de guide de haute montagne l'été

Dans le cadre de ma thèse de doctorat en géographie, je m'intéresse aux effets du changement climatique sur les milieux de haute montagne et sur les conditions de pratique de l'alpinisme estival. Ce questionnaire, réalisé en partenariat avec la Commission Environnement et Éthique du SNGM, a pour objectif de mieux comprendre comment les guides perçoivent et s'adaptent à l'évolution des milieux de haute montagne.

Environ 10 - 15 minutes sont nécessaires pour y répondre.

Les résultats de cette étude seront utilisés dans un cadre universitaire et par la Commission Environnement et Éthique du SNGM, dans le respect de l'anonymat des participants.

Je vous remercie d'avance pour le temps que vous prendrez pour répondre à ce questionnaire.

Jacques Mourey
Doctorant
Laboratoire EDYTEM / Université Savoie Mont Blanc

Votre pratique du métier de guide

1. Depuis quand êtes-vous guide de haute montagne ?

Renseignez l'année d'obtention du diplôme

2. En 2017, vous êtes :

Une seule réponse possible.

- Pluriactif
- Mono-actif

3. En cas de pluriactivité, précisez votre/vos autre/s métier/s

4. Sur l'année, combien de journées travaillez-vous comme guide ?

5. Vous exercez votre métier de guide en tant que :

Une seule réponse possible.

- Guide indépendant
- Guide indépendant et adhérent à une compagnie et/ou bureau
- Guide indépendant et travaillant pour une agence de voyage
- Guide salarié
- Autre :

6. Quelles sont les trois activités que vous encadrez le plus ?

Trois réponses maximum

Plusieurs réponses possibles.

- Alpinisme estival

- Randonnée glaciaire
- Escalade en falaise
- Ecole d'escalade
- Trekking/randonnée pédestre
- Canyoning
- Alpinisme hivernal
- Cascade de glace
- Ski de randonnée
- Raid à ski
- Ski hors-piste
- Ecole de glace
- Raquette
- Héliiski
- Séminaire
- Expédition (comme professionnel)
- Autre :

7. Quels sont les trois mois sur lesquels se concentrent la majorité de vos journées de travail de guide ?

Trois réponses maximum

Plusieurs réponses possibles.

- Janvier
- Février
- Mars
- Avril
- Mai
- Juin
- Juillet
- Août
- Septembre
- Octobre
- Novembre
- Décembre

Votre pratique du métier de guide l'été (mai à octobre)

8. En été, combien de journées travaillez-vous comme guide ?

9. En été, combien de journées de travail obtenez-vous grâce à une compagnie/bureau ou une agence de voyage ?

10. En été quelles sont les activités que vous encadrez le plus ?

Trois réponses maximum

Plusieurs réponses possibles.

- Alpinisme (hors Mont-Blanc)
- Randonnée glaciaire
- Ascension du Mont-Blanc
- Stages Mont-Blanc

- Ecole de Glace
- Escalade en grande voie
- Ecole d'escalade
- Canyoning
- Trekking/randonnée pédestre
- Expédition (comme professionnel)
- Via Ferrata
- VTT
- Autre :

11. En été, quels sont les trois massifs que vous fréquentez le plus ?
Si possible, hiérarchisez du plus fréquenté au moins fréquenté et précisez le nombre de journées passées en moyenne dans chaque massif (exemple : Aravis (20 journées), Mont-Blanc (15 journées), Vanoise (5 journées))

12. En général, de quel niveau sont les courses que vous effectuez ?
Deux réponses possibles
Plusieurs réponses possibles.

- F
- PD
- AD
- D
- TD
- ED

Votre perception et adaptation aux effets du changement climatique l'été

13. Pour vous, que signifie le terme "changement climatique" ?

14. Observez-vous une évolution des milieux de haute montagne dû au changement climatique ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

15. Si oui, quels sont les principaux changements que vous observez ?

16. D'après vous, depuis quand ces changements sont significatifs ?

17. Ces changements vous obligent-ils à adapter vos pratiques ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

18. Si oui, de quelle manière ?

19. Est-ce une adaptation :

Une seule réponse possible.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Facile

Difficile

20. Votre activité économique est-elle affectée par cette évolution des milieux de haute montagne ?

Une seule réponse possible.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pas du tout

Beaucoup

21. Expliquez votre réponse

22. L'évolution des conditions de pratique liée au changement climatique vous pousse-t-elle à vous déplacer d'avantage d'un massif à un autre ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

23. Pensez-vous que l'évolution des milieux de haute montagne en réaction au changement climatique rend la montagne plus dangereuse pour les alpinistes l'été ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Difficile à évaluer
- Autre :

24. Est-ce que l'évolution des milieux de haute montagne en réaction au réchauffement climatique vous amène à prendre plus de risques ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

25. Avez-vous l'impression que votre clientèle se rend compte des effets du changement climatique sur les milieux de haute montagne ?

Une seule réponse possible.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pas du tout

Beaucoup

26. Essayez-vous de sensibiliser votre clientèle à l'évolution des milieux de haute montagne ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

27. Est-ce que votre clientèle est prête à adapter sa pratique de la haute montagne à l'évolution des milieux ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

28. Que ressentez-vous face à l'évolution des milieux de haute montagne due au changement climatique ?

Trois réponses maximum

Plusieurs réponses possibles.

- Colère
- Tristesse
- Nostalgie
- Inquiétude
- Optimisme
- Perplexité
- Résignation
- Curiosité
- Indifférence
- Stress
- Peur
- Autre :

29. Malgré l'évolution des milieux, avez-vous toujours autant de plaisir à aller en haute montagne ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

30. Expliquez votre réponse

31. Est-ce que la transformation des paysages est en décalage avec votre imaginaire de la haute montagne ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

32. Expliquez votre réponse

33. Dans le futur, pensez-vous que le changement climatique et ses effets sur les milieux de haute montagne vous amèneront à réorganiser et faire évoluer la manière dont vous pratiquez le métier de guide ?

Une seule réponse possible.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Pas du tout

Beaucoup

34. Expliquez votre réponse ?

Vos propres actions sur le climat et la sauvegarde de l'environnement

La Commission Environnement et Éthique du SNGM cherche notamment à savoir quelles actions les guides et compagnies/bureaux de guides mettent déjà en place ou aimeraient mettre en place afin de limiter leurs impacts sur l'environnement montagnard. Ce questionnaire est un premier pas dans cette longue ascension.

35. Dans votre métier de guide et/ou dans votre compagnie/bureau des guides, essayez-vous de réduire votre propre contribution au changement climatique ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

36. Si oui, par quelles actions concrètes ?

37. Apportez-vous une attention particulière à la sauvegarde de la biodiversité ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

38. Si oui, par quelles actions concrètes ?

39. Favorisez vous des hébergements et une alimentation respectueuse de l'environnement (produits bios et/ou locaux) ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

40. Consacrez-vous une attention particulière à limiter votre quantité de déchets et celle de vos clients ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non
- Autre :

41. Un sac poubelle robuste, léger, de petite taille et refermable est aujourd'hui à l'étude par la commission environnement du SNGM. S'il est mis à votre disposition, seriez vous intéressé et l'utiliseriez-vous pour ramasser des déchets en montagne ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

42. D'après vous, en tant que guide, votre pouvoir d'action pour limiter le changement climatique dans les Alpes est :

Une seule réponse possible.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Très faible

Très élevé

43. Seriez-vous prêt à vous impliquer sur des actions futures mises en place par la commission environnement du SNGM sur cette thématique ?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

Votre profil socio-professionnel

44. Age

45. Vous êtes :

Une seule réponse possible.

- Une femme
- Un homme

46. Nationalité

47. Pays de résidence

48. Département de résidence

Code postal

49. Quel est votre diplôme le plus élevé ?

Une seule réponse possible.

- Aucun
- Certificat d'étude
- BEPC / Brevet des collèges
- CAP
- BEP
- Bac professionnel
- Bac général et technologique
- DEUG / Bac +2
- Licence / Bac +3
- Master / Bac +5
- > Bac +5

Pour aller plus loin

Si vous avez des remarques, suggestions, questions ou compléments d'informations, vous pouvez les ajouter ci-dessous

Seriez-vous intéressé par des informations/formations sur le changement climatique en haute montagne et ses effets sur les milieux?

Une seule réponse possible.

- Oui
- Non

Renseignez votre adresse mail/numéro de téléphone si vous acceptez d'être recontacté pour réaliser un entretien plus complet sur cette thématique

Renseignez votre adresse mail si vous êtes intéressé par les résultats de cette étude

Merci de votre réponse !

Jacques Mourey Doctorant Laboratoire EDYTEM - Université Savoie Mont Blanc et,
Commission Environnement et Éthique, SNGM

Fourni par



Google Forms

Compatibilité avec le lecteur d'écran activée.

Annexe 6.2. Rapport de synthèse envoyé aux guides du SNGM

Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique

Enquête par questionnaire (nov.-déc. 2017)
Rapport de synthèse de l'étude – Juin 2018



HORIZONS GUIDES

Axe 5. S'adapter au changement climatique



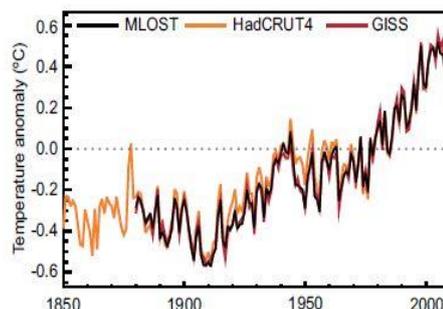
« La haute montagne asséchée », Aiguille du Midi, juillet 2017



AdaPT Mont Blanc

Le changement climatique dans les Alpes

Le **changement climatique** affecte l'essentiel de la planète avec une hausse de la température moyenne mondiale de 0,85°C entre 1880 et 2012. Mais **les régions de haute altitude de l'hémisphère nord se réchauffent plus rapidement encore** (deux à trois fois plus vite). Pour l'arc alpin, le réchauffement fut ainsi **de plus de 2°C** entre la fin du XIX^{ème} et le début du XXI^{ème} siècle, avec une accélération sur les dernières décennies et ce, même à haute altitude. Dans le massif du Mont Blanc, à plus de 4000 m d'altitude, il y a eu un réchauffement de 1,4°C entre 1990 et 2014.



Ecart des températures annuelles moyennes mondiales par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 (IPCC, 2014)



Éboulement dans la face est de la Tour Ronde (Mont Blanc, 3793 m), août 2015, 15 000 m³ (ph. G. Marra)

Les effets du changement climatique en haute montagne

Dans ce contexte, la **haute montagne alpine est l'objet de profondes modifications** dont le très visible **retrait glaciaire** ainsi que la moins connue **dégradation du permafrost** (réchauffement des terrains gelés en permanence).

- Les **glaciers des Alpes ont perdu la moitié de leur surface** entre 1900 et 2012, avec une forte accélération de la fonte depuis les années 1980, tandis que l'on observe une **recrudescence d'éroulements dans les parois rocheuses**.
- Dans le massif du Mont-Blanc, **plus de 700 éroulements** ($V > 100 \text{ m}^3$) se sont ainsi produits entre 2007 et 2017.

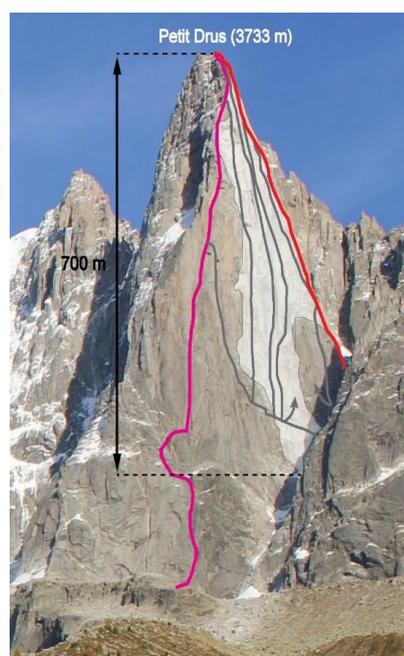
Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation

Les courses telles que décrites dans le topoguide emblématique de G. Rébuffat (1973), *Le Massif du Mont Blanc, les 100 plus belles courses*, ont été comparées à leur état actuel.

25 processus géomorphologiques et glaciologiques liés au changement climatique peuvent affecter et modifier un itinéraire d'alpinisme et ses conditions de fréquentation. En moyenne, **une course est affectée par 9 processus**.

Sur les 95 itinéraires étudiés, **93 ont été modifiés à travers les effets du changement climatique**, dont **25 fortement**, tandis que **2 ont complètement disparu**.

Plus largement, ce travail a permis de montrer que **les périodes de bonnes conditions pour la pratique de l'alpinisme en été ont 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 itinéraires.



— Pilier Bonatti (1955)
— Directe américaine (1965)
— Autre itinéraire
□ Niche d'arrachement de l'éboulement de 2005

Pensez-vous que l'évolution des milieux de haute montagne face au changement climatique rend la montagne plus dangereuse pour les alpinistes l'été ?

Taux de réponse : **98,7%**

	Nb	
Non réponse	3	1,3%
Difficile à évaluer	33	14,3%
Non	3	1,3%
Oui	191	83,0%
Total	230	

- **83 % des guides considèrent la haute montagne comme plus dangereuse pour les alpinistes l'été et 40 % d'entre eux estiment prendre plus de risques.**



Écroulement au Portalet, massif du Mont Blanc, août 2017 (ph. : Q. Chardon)

L'évolution des milieux de haute montagne face au changement climatique vous oblige-t-elle à adapter votre pratique du métier de guide ? Est-ce une adaptation : très facile – facile – difficile – très difficile ?

Taux de réponse : **98,3%**

	Nb	
Non réponse	4	1,7%
Adaptation très facile	41	17,8%
Adaptation facile	77	33,5%
Adaptation difficile	70	30,4%
Adaptation très difficile	38	16,5%
Total	230	

- **L'évolution de la haute montagne oblige 97 % des guides à adapter leur pratique du métier.**
- **51 % des guides considèrent cette adaptation comme facile et 47 % comme difficile.**
- **56,5 % des guides considèrent que leur activité économique est affectée par l'évolution de la haute montagne.**

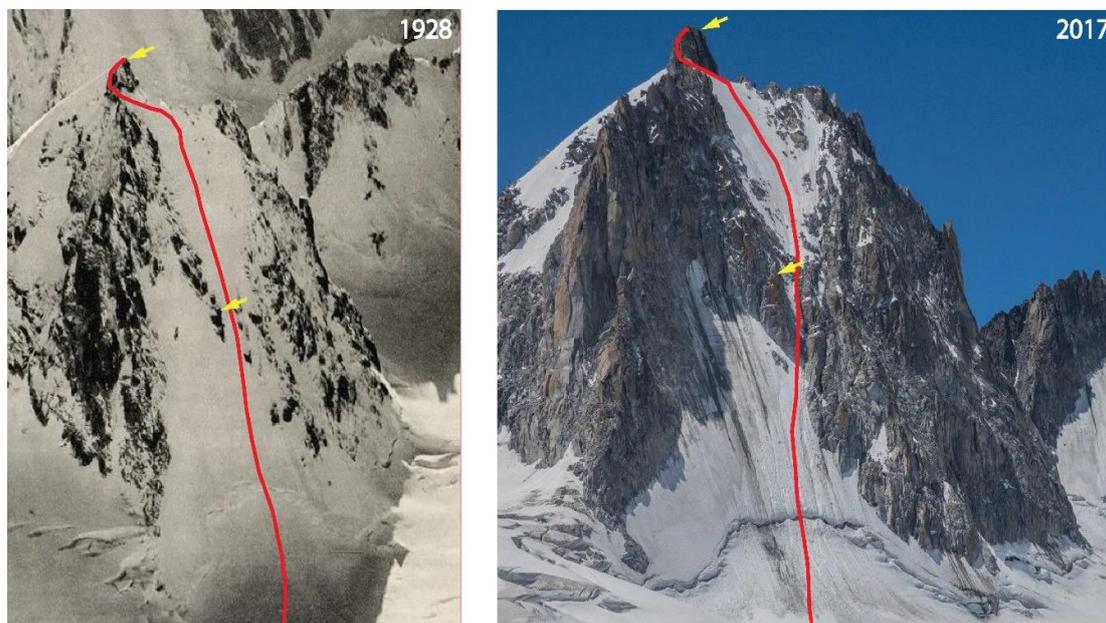
Comment vous adaptez-vous à l'évolution des milieux de haute montagne ?

- **35 modalités d'adaptation différentes ont été identifiées. Elles peuvent être regroupées en cinq stratégies principales :**

Taux de réponse : **89,6%**

	Nb	
Non réponse	24	10,4%
Changement de saisonnalité	85	37,0%
Changement des activités pratiquées	60	26,1%
Changement des lieux de pratiques	59	25,7%
Plus de réactivité et d'attention à porter aux conditions	52	22,6%
Changement des techniques de progression	12	5,2%
Autres	9	3,9%
Total	230	

- **La stratégie la plus couramment mise en place est le changement de la saisonnalité du travail, principalement par la fréquentation d'itinéraire glaciaire le plus tôt possible dans la saison estivale.**



Fonte de la couverture nivo-glaciaire de la face nord de la Tour Ronde (massif du Mont Blanc) entre 1928 et 2017

Quels sont les guides qui considèrent leur adaptation comme facile et quels sont ceux qui la considèrent difficile ?

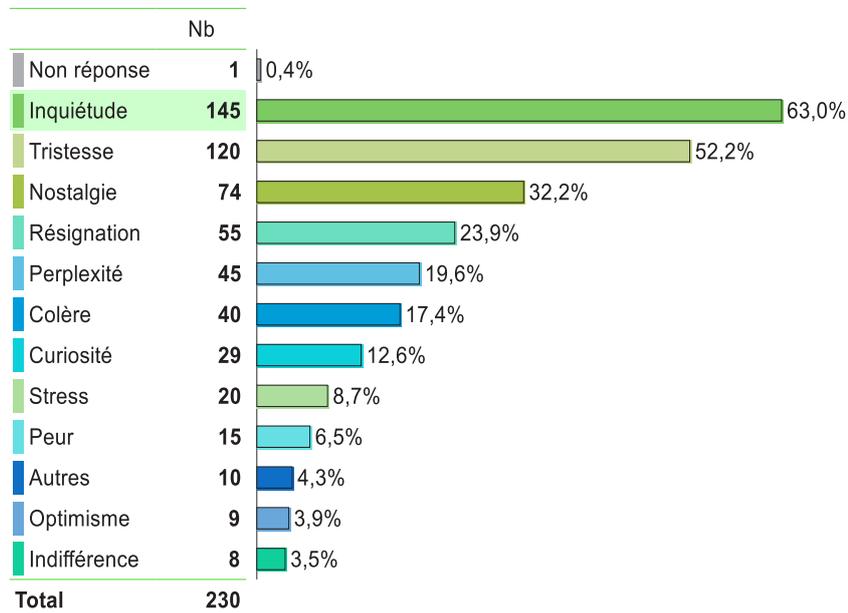


Méthode de lecture du graphique : plus les cercles sont proches, plus leurs relations sont importantes. Les relations les plus fortes sont soulignées par un trait.

- **Les guides qui considèrent leur adaptation comme facile sont ceux qui diversifient leurs activités (report sur des activités qui ne se pratiquent pas en haute montagne) et travaillent en alpinisme uniquement au début de saison.**
- **Les guides qui considèrent leur adaptation comme difficile sont ceux qui conservent leur activité orientée sur l'alpinisme.**

Que ressentez-vous face à l'évolution des milieux de haute montagne ?

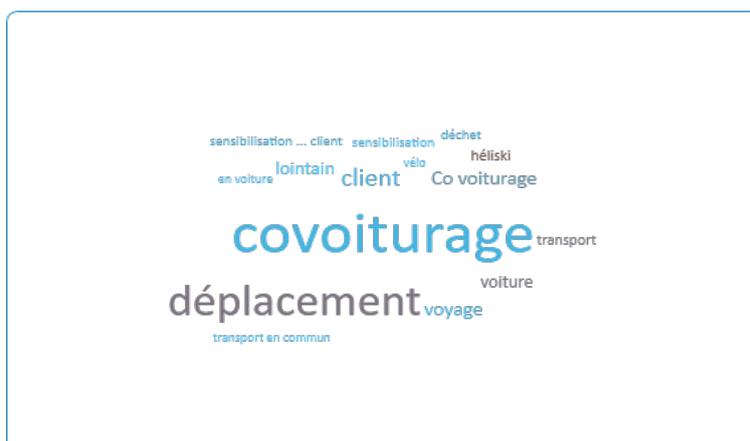
Taux de réponse : 99,6%



- L'évolution des milieux de haute montagne suscite surtout des sentiments d'inquiétude, de tristesse et de nostalgie, mais une large majorité des guides a toujours autant de plaisir à aller en haute montagne.

Dans votre métier de guide et/ou dans votre compagnie/bureau des guides, essayez-vous de réduire votre propre contribution au changement climatique ?

- Bien que 55 % des guides considèrent leur pouvoir d'action sur le changement climatique comme très faible, 64 % essaient de réduire leur propre contribution.
- Les actions mises en place par les guides et les compagnies/bureaux visent principalement à limiter leurs déplacements (ex. : un seul voyage lointain par an) et à favoriser des moyens de transports plus écologiques (bus, covoiturage).



Avez-vous l'impression que votre clientèle se rend compte des effets du changement climatique sur les milieux de haute montagne ?

- D'après les guides, dans l'ensemble, la clientèle se rend compte du fait que les milieux de haute montagne évoluent et une large part (83 %) est prête à adapter sa pratique de l'alpinisme.
- La quasi-totalité des guides (98 %) essaie de sensibiliser sa clientèle au changement climatique et plus largement à la préservation de l'environnement.

71,3 % des guides considèrent que le changement climatique et ses effets sur la haute montagne les amèneront à réorganiser et à faire évoluer la manière dont ils pratiquent le métier de guide.

En bref :

- 83 % des guides considèrent la haute montagne comme plus dangereuse l'été et 40 % estiment prendre plus de risques.
- 56,5 % des guides considèrent que leur activité économique est affectée par l'évolution de la haute montagne.
- 51 % des guides considèrent leur adaptation au changement climatique comme facile et 46 % comme difficile. Ceux qui considèrent leur adaptation comme facile sont ceux qui diversifient leur activité et travaillent en alpinisme uniquement en début de saison estivale. Ceux qui considèrent leur adaptation comme difficile sont ceux qui axent principalement leur activité sur l'alpinisme.

⇒ **L'adaptation au changement climatique pousse les guides à pratiquer d'autres activités que l'alpinisme.**
- 35 modalités d'adaptation différentes ont été identifiées et rassemblées en cinq stratégies principales.
- L'évolution de la haute montagne suscite surtout des sentiments d'inquiétude, de tristesse et de nostalgie, mais une large majorité des guides a toujours autant de plaisir à aller en haute montagne.
- La clientèle semble globalement sensible aux effets du changement climatique et prête à adapter sa pratique.

Dans le futur :

Le changement climatique devrait s'accroître au cours des prochaines décennies et entraîner une **évolution toujours plus profonde des milieux de haute montagne** déjà très sensibles. Aussi, la modification des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation va se **poursuivre et s'accroître**.

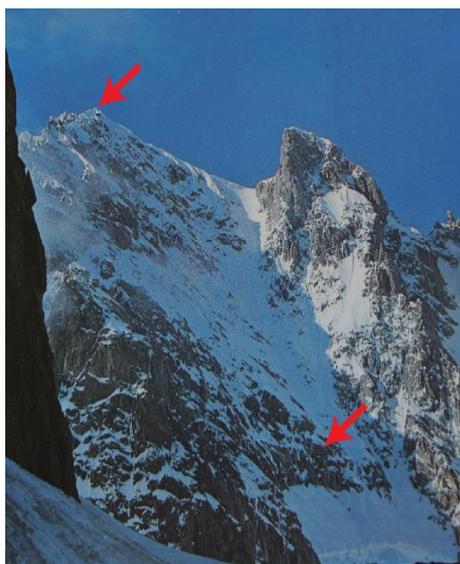
Le mot de la commission *Ethique et Environnement*

Bonjour à toutes et tous,

Si vous lisez ce mot c'est que vous êtes arrivés à la fin de ce rapport et par analogie au sommet... Sommet qui n'est en réalité que la marche d'approche pour la commission "Environnement et Ethique" du SNGM...

Ce rapport nous donne des bases de travail mais il nous reste beaucoup à faire pour vous proposer des solutions concrètes et efficaces permettant à chaque guide qui le souhaite de réduire son impact sur notre belle planète et sur ce beau "terrain de sens et d'expérience" qu'est la haute montagne !

Solutions qui nous l'espérons permettront de dire que oui, collectivement, nous nous emparons du problème lié au réchauffement climatique dans nos pratiques !



Le couloir Whympfer, face sud de l'Aiguille Verte (4122 m, massif du Mont Blanc). À gauche : situation à la fin des années 1960 (G. Rébuffat, 1973). À droite, situation fin août 2017 (ph. C. Lelièvre). La couverture nivo-glaciaire dans le couloir fait l'objet d'une disparition qui laisse apparaître un substratum rocheux très déstructuré à l'origine de fréquentes chutes de pierres. Les flèches rouges pointent des affleurements identiques.

Réalisation/contact

Jacques Mourey

jacques.mourey@univ-smb.fr

Chercheur et Accompagnateur en Montagne

Dir. : Ludovic Ravanel – CR CNRS

Laboratoire EDYTEM – UMR CNRS 5204

Université Savoie Mont Blanc

5, bd de la Mer Caspienne

F-73376 Le Bourget du Lac Cedex

En partenariat avec la commission *Ethique et Environnement* du SNGM



Le bassin de Talèfre et les Grandes Jorasses, 31 août 2017 (C. Lelièvre)

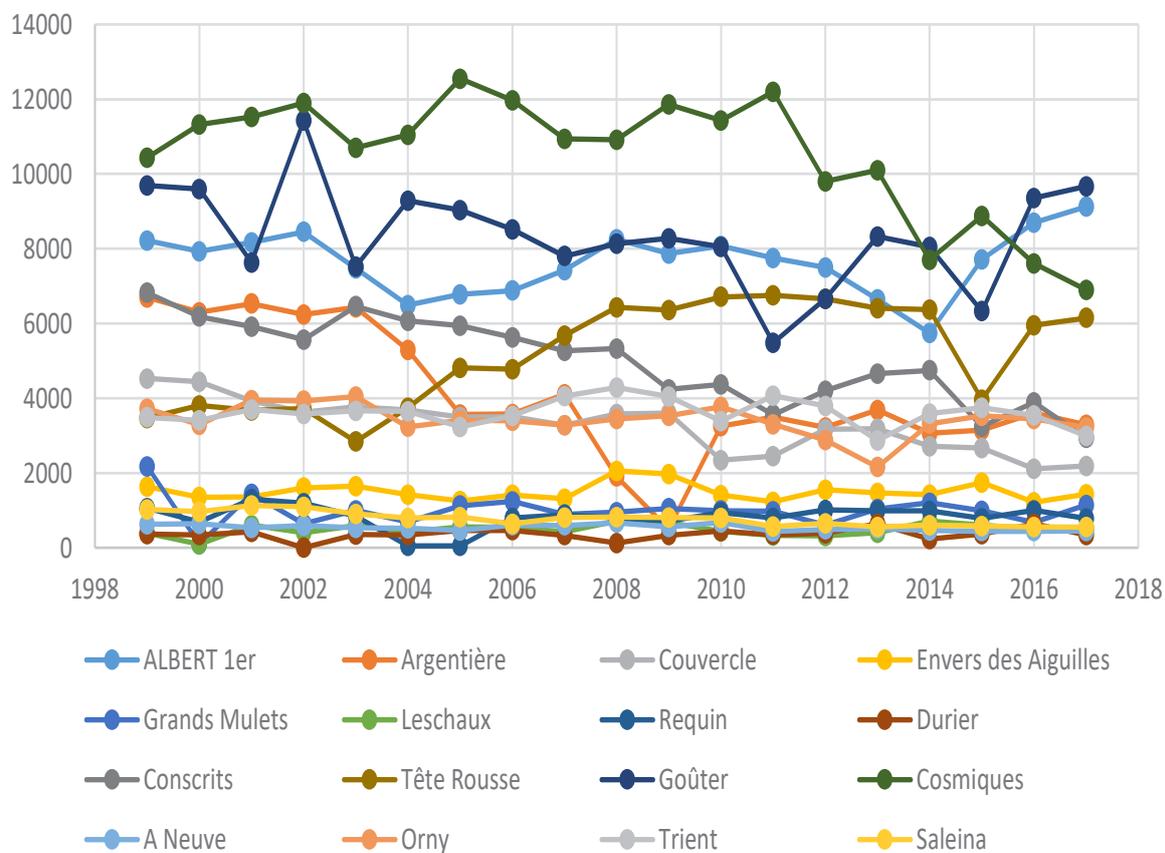
Annexe 7.1. Entretiens réalisés avec les gardiens des refuges du massif du Mont Blanc

Nom	Refuge et période gardé	Date de l'entretien
Christophe Lelièvre	Charpoua ; 2003-2014 Couvercle ; depuis 2015	24/11/2017
Evelynn Giusto	Envers des Aiguille ; depuis 2007	16/10/2017
Michel Tavernier	Couvercle ; 1986-2014	04/04/2017
Christine Mattel	Conscrits ; depuis 2006	04/03/2016
Alicia Blanc et Olivier Meynet	Plan Glacier ; 2014-2015 Robert Blanc ; 2016-2018	24/11/2017
Amélie Aribert	Requin ; 2015-2018	18/12/2017
Antoine Rattin	Goûter ; depuis 2015	27/10/2017
Chloe Laget	Leschaux ; depuis 2014	14/12/2017
Laurence Ravanel	Cosmiques ; 1994-2015	16/10/2017
Sarah Cartier	Charpoua ; depuis 2015	16/10/2017
Manon Navillod Davoine	Durier ; depuis 2010	14/12/2017
Gilbert Pareau	Requin ; 1999-2010	27/10/2017

Annexe 7.2. Nombre de nuitées par années entre 1999 et 2018 dans les refuges du massif du Mont Blanc

Pays	Gestionnaire	Refuge	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
					ALBERT 1er	8219	7930	8172	8451	7473	6487	6779	6880	7422	8250	7871	8073	7754	7493	6652	5744	7709
		Argentière	6700	6297	6533	6241	6432	5296	3569	3580	4103	1906	502	3253	3500	3216	3681	3064	3151	3600	3288	
		Couvercle	4530	4446	3928	3631	3771	3683	3497	3505	3283	3577	3599	2341	2455	3172	3184	2711	2670	2112	2192	
		Envers des Aiguilles	1638	1355	1361	1606	1650	1417	1252	1413	1308	2059	1967	1405	1230	1551	1466	1423	1741	1217	1431	
		Grands Mulets	2180	99	1444	643	1001	684	1127	1237	890	953	1055	994	976	604	1039	1203	989	683	1140	
		Leschaux	390	94	600	407	599	424	558	548	428	711	676	436	333	315	402	714	609	498	520	
		Requin	1062	694	1300	1193	844	50	50	800	881	798	719	946	800	1015	995	989	785	1005	786	
		Durier	365	339	420	nc	350	344	461	467	336	130	335	447	346	389	642	237	367	636	339	
		Conscrits	6822	6185	5920	5565	6461	6071	5937	5632	5270	5328	4233	4368	3559	4201	4652	4747	3242	3885	2938	
		Tête Rousse	3474	3807	3674	3728	2841	3744	4814	4780	5679	6430	6359	6713	6752	6664	6408	6371	3966	5949	6150	6828
		Goûter	9690	9600	7632	11424	7521	9286	9032	8521	7804	8132	8280	8054	5482	6654	8323	8053	6329	9358	9664	11161
		Cosmiques	10430	11320	11530	11900	10700	11050	12550	11970	10940	10920	11860	11430	12200	9800	10100	7700	8880	7603	6900	6848
		A Neuve	630	642	531	592	532	518	457	609	599	670	552	675	436	491	505	461	443	442	452	566
		Orny	3721	3289	3952	3931	4044	3236	3415	3402	3281	3443	3526	3774	3302	2882	2158	3321	3525	3446	3221	3228
		Trient	3488	3414	3701	3576	3665	3648	3231	3527	4059	4287	4045	3391	4072	3797	2868	3592	3745	3545	2989	3490
		Saleina	1022	967	1129	1094	909	800	820	642	805	825	812	792	570	653	556	608	578	558	554	720
		CAS Neuchâtel	64361	60478	61827	63982	58793	56738	57549	57513	57088	58419	56391	57092	53767	52897	53631	50938	48729	53231	51687	32841

Nombre de nuitées par an et pa refuges entre 1999 et 2017



Annexe 8.1. Arrêté préfectoral du 13/07/2018 portant à autorisation temporaire l'accès au sommet du mont Blanc *via* le refuge du Goûter.



PRÉFET DE LA HAUTE-SAVOIE

Préfecture

Direction du cabinet

Service interministériel de défense et de protection civiles

Anancy, le 13 JUIL. 2018

LE PREFET DE LA HAUTE SAVOIE
Officier de la Légion d'Honneur
Officier de l'Ordre National du Mérite

Arrêté n° 2018-0070 PREF/CAB/SIDPC portant restriction temporaire d'accès au sommet du Mont-Blanc *via* le refuge du Goûter

Vu le code de la sécurité intérieure ;

Vu le code général des collectivités territoriales ;

Vu le code de la santé publique ;

Vu le décret n°2004-374 du 29 avril 2004 modifié, relatif aux pouvoirs des préfets, à l'organisation et à l'action des services de l'Etat dans les régions et départements ;

Vu le décret du 3 novembre 2016, portant nomination de Monsieur Pierre LAMBERT en qualité de préfet de la Haute-Savoie ;

Vu l'arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public ;

Vu le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP), notamment son livre IV, chapitre V relatif aux établissements de type REF-refuges de montagne ;

Vu l'arrêté municipal du 13 juin 2013 prononçant la réouverture du Refuge du Goûter (bâtiment neuf) ;

Vu le procès-verbal de visite du refuge de la sous-commission départementale de sécurité du 31 mars 2015 ;

Vu l'urgence,

Considérant le dépassement récurrent et significatif de la capacité d'accueil autorisée du refuge du Goûter, fixée à 120 personnes au titre de la réglementation des établissements recevant du public, en l'occurrence les 18 et 26 juin 2018 puis les 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 juillet 2018, avec un pic à 140 personnes ;

Considérant que ces dépassements sont, pour l'essentiel, provoqués par des ascensionnistes qui s'affranchissent délibérément de l'obligation de réservation préalable au refuge du Goûter ;

Considérant le risque induit par cette surfréquentation compte tenu des conditions d'évacuation en cas d'incendie ou d'incident prescrites pour cet établissement situé à haute altitude, notamment l'obligation de disposer d'au moins un guide pour dix personnes hébergées, lequel ratio et sa vérification ne peuvent être garantis en cas de surfréquentation ;

Considérant la capacité limitée à 120 personnes du volume recueil ;

Considérant les risques sanitaires liés à cette surfréquentation dans un espace contraint situé à haute altitude et aménagé pour un volume d'accueil pré-défini, notamment s'agissant de la consommation d'eau, de l'évacuation des déchets organiques et du respect des normes environnementales ;

Considérant que l'ascension du Mont-Blanc par la voie royale via Tête-Rousse, l'aiguille du Goûter, le dôme du Goûter et l'arête des Bosses implique, pour une grande majorité d'ascensionnistes, au moins une nuit de repos sur l'itinéraire à la montée, parfois une seconde nuit à la descente ;

Considérant que le dépassement de la capacité du refuge du Goûter en situation normale d'exploitation n'est pas acceptable sachant que d'autres solutions d'hébergement existent sur l'itinéraire de la voie royale du Mont-Blanc, en l'espèce, le refuge de Tête-Rousse et l'aire de bivouac accolée ;

Considérant de surcroît que le site classé du Mont-Blanc interdit de fait toute autre solution d'hébergement que les refuges et aires de bivouacs dûment identifiés sur l'itinéraire ;

Considérant que l'abri Vallot, dont la capacité est extrêmement limitée, a pour seule vocation d'accueillir des alpinistes en détresse et ne constitue en aucun cas une solution d'hébergement sur cet itinéraire ;

Considérant les tensions et troubles à l'ordre public intervenus à plusieurs reprises du fait de personnes sans réservation et s'imposant au gardien du refuge, jusqu'à menacer son intégrité physique, et les risques de renouvellement de ces troubles à l'ordre public ;

Considérant, par conséquent, que la surfréquentation du refuge du Goûter est de nature à porter gravement atteinte à la sécurité, la salubrité et la tranquillité publiques ;

Considérant que les seules actions de communication et de prévention, notamment conduites par la Gendarmerie nationale et la mairie de Saint-Gervais-les-Bains, se sont avérées inopérantes pour dissuader la montée au Refuge du Goûter de personnes sans réservation.

Sur proposition de Madame la directrice de cabinet du préfet de la Haute-Savoie

ARRETE

Article 1^{er} : A compter du samedi 14 juillet 2018 et pour une durée de 8 jours, l'accès au sommet du Mont-Blanc par l'itinéraire de l'aiguille du Goûter, du dôme du Goûter et de l'arête des Bosses au-delà du Glacier de Tête-Rousse n'est autorisé qu'aux seules personnes justifiant d'une réservation au refuge du Goûter, seule solution d'hébergement sur l'itinéraire visé.

Article 2 : L'exploitant du refuge du Goûter est tenu de communiquer quotidiennement au Préfet de la Haute-Savoie et au Maire de Saint-Gervais-les-Bains l'état des réservations pour permettre la mise en application de l'article 1 du présent arrêté.

Article 3 : L'application du présent arrêté ne fait pas obstacle à l'accueil au refuge du Goûter de personnes se présentant sans réservation dans un état de détresse justifiant un accueil au titre du principe de solidarité en montagne.

Article 4 : Les forces de l'ordre prendront toutes mesures appropriées pour mettre en œuvre la présente restriction d'accès au public, notamment dans leur appréciation de la capacité des ascensionnistes à s'affranchir du besoin d'un hébergement nocturne dans l'aller-et-retour entre le site de Tête-Rousse et le sommet du Mont-Blanc.

Article 5 : Les dispositions du présent arrêté seront portées à la connaissance du public par apposition de panneaux d'informations aux différents points d'accès piétonniers et par transports ferrés et guidés.

Mme la directrice de cabinet du préfet de la Haute-Savoie ;
M. le colonel, commandant le groupement de gendarmerie départementale de la Haute-Savoie ;
M. le directeur départemental des services d'incendie et de secours ;
M. le maire de Saint-Gervais,
M. le maire de Chamonix,
M. le président de la Fédération française des clubs alpins de montagne (FFCAM)
M. le président du Comité départemental des clubs alpins de montagne, en sa qualité de gestionnaire du refuge du Goûter

sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté qui sera publié au recueil des actes administratifs et notifiés aux services, collectivités et opérateurs chargés de son exécution.

Le préfet,



Dans les deux mois à compter de la notification de la présente décision les recours suivants peuvent être introduits : un recours gracieux, adressé à monsieur le préfet de la Haute-Savoie, un recours hiérarchique, adressé à : M. le Ministre de l'Intérieur – Direction des Libertés Publiques et des Affaires Juridiques – Cabinet – Bureau des polices administratives – Place Beauvau – 75800 Paris cedex 08, un recours contentieux, adressé au tribunal administratif de Grenoble - 2 place de Verdun BP1135 38022 GRENOBLE Cedex. Ce recours juridictionnel doit être déposé au plus tard avant l'expiration du 2e mois suivant la date de notification de la décision contestée (ou bien du 2e mois suivant la date du rejet de votre recours gracieux ou hiérarchique)

Table des matières

Résumé.....	3
Abstract.....	4
Remerciements.....	5
Sommaire.....	9
Sigles et abréviations.....	11
Introduction générale.....	13
Partie I. La pratique de l'alpinisme face aux évolutions des milieux de haute montagne.....	19
Chapitre 1. L'alpinisme : historique et définition de l'objet d'étude.....	21
1.1. Description chronologique d'une pratique en constante évolution.....	21
1.1.1. La conquête du mont Blanc et le développement d'un alpinisme scientifique.....	21
1.1.2. L'Âge d'Or de l'alpinisme et la naissance d'une pratique sportive.....	22
1.1.3. L'entre-deux-guerres : croissance du niveau technique sur fond de nationalisme.....	25
1.1.4. De l'après-guerre aux années 1990 : croissance de l'activité.....	30
A. Professionnalisation et croissance du niveau technique.....	30
B. Démocratisation de l'alpinisme.....	33
1.1.5. L'alpinisme depuis la fin des années 1990, déclin ou mutation ?.....	34
A. De la démocratisation à la consommation.....	34
B. L'alpinisme actuel : déclin ou mutation ?.....	36
1.2. L'alpinisme dans les Alpes, une proposition de définition systémique.....	37
1.2.1. L'alpinisme : un système structuré autour de trois sous-systèmes.....	37
1.2.2. Une évolution uniquement conditionnée par des facteurs socio-culturels ?.....	40
Conclusion du Chapitre 1.....	41
Chapitre 2. Impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne.....	43
2.1. Le changement climatique dans les Alpes depuis la fin du PAG.....	43
2.1.1. Évolution du climat dans les Alpes depuis la fin du PAG.....	43
2.2. Les effets du changement climatique sur la haute montagne alpine – Un état des connaissances....	45
2.2.1. Retrait des glaciers et des couvertures glacio-nivales et processus géomorphologiques associés à la déglaciation.....	45
2.2.1.1. Fonte généralisée des glaciers alpins depuis la fin du PAG.....	45
2.2.1.2. Une crise paraglaciale associées à la déglaciation.....	48
A. Le concept de « paraglaciale ».....	48
B. Le géosystème paraglaciale.....	49
C. Le sous-système gravitaire au cours d'une séquence paraglaciale dans la haute montagne alpine.....	49
2.2.1.3. Évolution des petits appareils glaciaires suspendus et des couvertures glacio-nivales.....	52
A. Retrait des couvertures glacio-nivales.....	52
B. Évolution des glaciers suspendus.....	53
2.2.2. Le permafrost alpin : définition et évolution actuelle.....	54
2.2.2.1. Définition du permafrost et principales caractéristiques.....	55
2.2.2.2. Distribution spatiale du permafrost dans les Alpes.....	56
Conclusion du Chapitre 2.....	62
Chapitre 3. Tourisme de nature et alpinisme face au changement climatique.....	63
3.1. Le tourisme de nature dans les Alpes face au changement climatique.....	63
3.1.1. L'industrie du ski face à une réduction de l'enneigement.....	63

3.1.2. Le tourisme de nature estival dans les Alpes face au changement climatique.....	64
3.2. L'alpinisme dans le contexte actuel de changement climatique : état des connaissances et axes de recherches.....	67
3.2.1. Les impacts du changement climatique sur l'alpinisme : état actuel des connaissances.....	67
3.2.1.1. Impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme, entre accroissement de la difficulté technique et augmentation de la dangerosité.....	68
3.2.1.2. Perception et adaptation des alpinistes aux effets du changement climatique.....	70
3.2.1.3. Quelles lacunes dans la connaissance au regard de la bibliographie ?.....	72
A. Quels sont les processus géomorphologiques et glaciologiques qui affectent les itinéraires d'alpinisme ? Quelles sont les voies les plus affectées ?.....	72
B. Comment sont affectés les alpinistes et comment s'adaptent-ils ?.....	73
3.3. Structuration du travail doctoral, méthodes et échelles d'investigation.....	75
3.3.1. Axes de recherche, méthodes et échelles d'investigation.....	75
3.3.2. Echelles spatiales et temporelles d'investigation.....	80
Conclusion du Chapitre 3	80
Conclusion de la Partie I.....	82
Partie II. Évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	83
Chapitre 4. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation.....	85
4.1. Article 1 - Fiche synoptique.....	86
4.2. Article 2 – Fiche synoptique.....	103
4.2.1. Mise à jour des résultats présentés dans l'Article 2 et outils d'aide à la décision pour la CCVCMB.....	123
4.2.1.1. Mise à jour des résultats pour les étés 2017 et 2018.....	124
4.2.1.2. Aide à la décision pour la CCVCMB.....	127
Conclusion du Chapitre 4.....	127
Chapitre 5. Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	129
5.1. Article 3 – Fiche synoptique.....	130
5.2. La voie normale d'ascension du mont Blanc : analyse multi-méthode du risque de chutes de pierres dans le Grand Couloir du Goûter.....	148
5.2.1. Un appareil photo automatique pour l'analyse de l'enneigement.....	149
5.2.2. Des capteurs de températures pour caractériser l'état thermique local du permafrost...151	
5.2.3. Des capteurs sismiques pour documenter l'occurrence des déstabilisations rocheuses...151	
Conclusion du Chapitre 5.....	152
Conclusion de la Partie II.....	154
Partie III. Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique sur les itinéraires.....	155
Chapitre 6. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique, perception et adaptation.....	157
6.1. Les guides de haute montagne, professionnels emblématiques de l'alpinisme.....	157
6.2. Article 4 – Fiche synoptique.....	161
6.3. Article 5 – Fiche synoptique.....	172

Conclusion du Chapitre 6.....	190
Chapitre 7. Les effets du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne..	191
7.1. Les données de fréquentation des refuges, limites et intérêts.....	192
7.1.1. La fréquentation des refuges : difficulté d'accès et limites de la donnée.....	191
A. Une donnée difficile d'accès.....	192
B. Tous les alpinistes n'utilisent pas les refuges.....	192
C. Les refuges de haute montagne ne sont pas uniquement fréquentés l'été par des alpinistes.....	194
D. Les limites de la collecte de données par les gardiens.....	194
7.1.2. Une donnée qui reste pertinente et nécessaire pour l'étude de la fréquentation de la haute montagne.....	194
7.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne dans le massif du Mont Blanc.....	195
7.2.1. Les refuges du massif du Mont Blanc considérés dans ce travail.....	195
7.2.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc entre 1999 et 2016.....	197
7.3. Impacts de l'été caniculaire 2015 sur la fréquentation des refuges	199
7.3.1. L'été 2015.....	199
7.3.2. Adaptation des gardiens – Les cas des massifs du Mont Blanc et des Écrins.....	204
7.3.3. Limites de l'étude et perspectives de recherche.....	205
Conclusion du Chapitre 7.....	207
Chapitre 8. Mesure de la fréquentation des itinéraires d'alpinisme : quantification des flux, comportements adaptatifs et accidentologie.....	209
8.1. Article 6 – Fiche synoptique.....	210
8.2. Résultats pour la Mer de Glace et l'aiguille du midi.....	220
8.2.1. Fréquentation du bassin de la Mer de Glace en 2017 et 2018.....	220
8.2.2. La fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi.....	222
8.2.3. Fréquentation de la voie normale d'ascension du mont blanc.....	226
A. Résultats des étés 2017 et 2018.....	226
B. Identification d'un schéma de fréquentation et mise en évidence de comportements non adaptés au risque local de chute de pierre.....	229
8.3. Mise à jour de l'étude d'accidentologie sur la voie normale d'ascension du mont Blanc.....	230
8.3.1. Rapport d'étude d'accidentologie - Fiche synoptique.....	232
8.4. Mesure de la fréquentation par caméra semi-automatique.....	256
8.4.1. Présentation du dispositif.....	256
8.4.2. Erreurs de mesure et résultats.....	257
8.4.3. Limites du dispositif et futurs développements.....	260
Conclusion du Chapitre 8.....	261
Conclusion de la Partie III.....	262
Conclusion générale.....	263
Bibliographie.....	271
Bibliographie personnelle.....	284
Table des figures, tableaux et encadrés.....	287
Liste des Annexes.....	291
Table des matières.....	329

