

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).

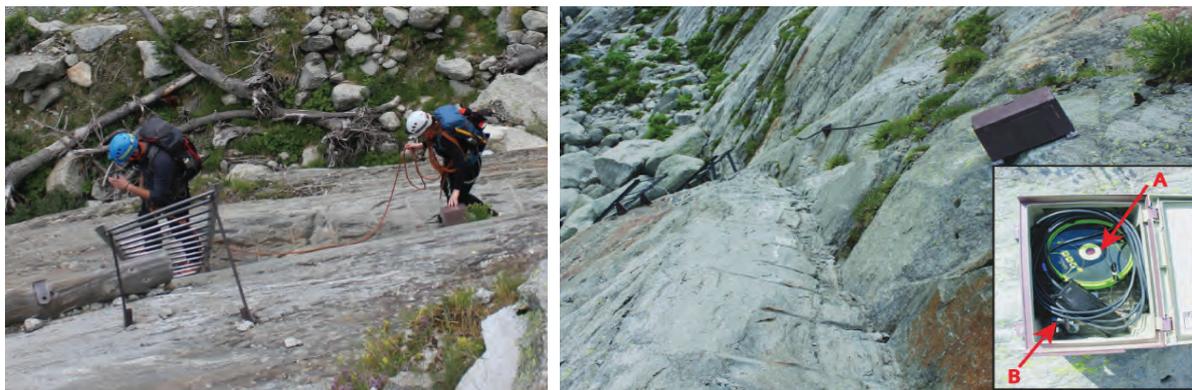


Figure 2 - Capteur Pyro sur l'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers. À droite : boîtier en plastique dans lequel l'Eco-Combo (a) et le capteur Pyro (b) ont été installés. Le boîtier constitue une protection efficace contre le soleil et le vandalisme.

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 déneigée. 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.

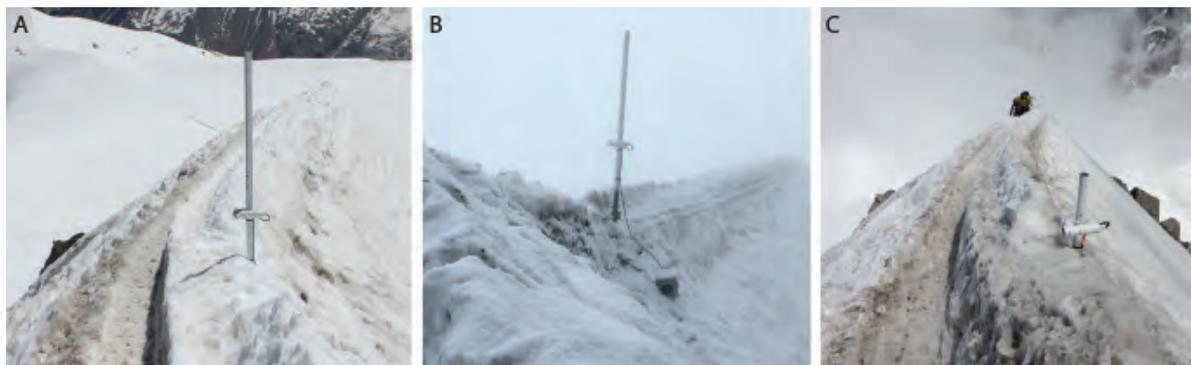


Figure 3 - Le capteur Pyro de l'aiguille du Midi : (a) installation du capteur le 20 juin 2017 ; (b) le 25 juin, le niveau de l'arête avait perdu environ 60 cm et le poteau était susceptible de basculer ; la boîte était déneigée ; (c) le poteau et le capteur ont été réinstallés le 25 juin.

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.

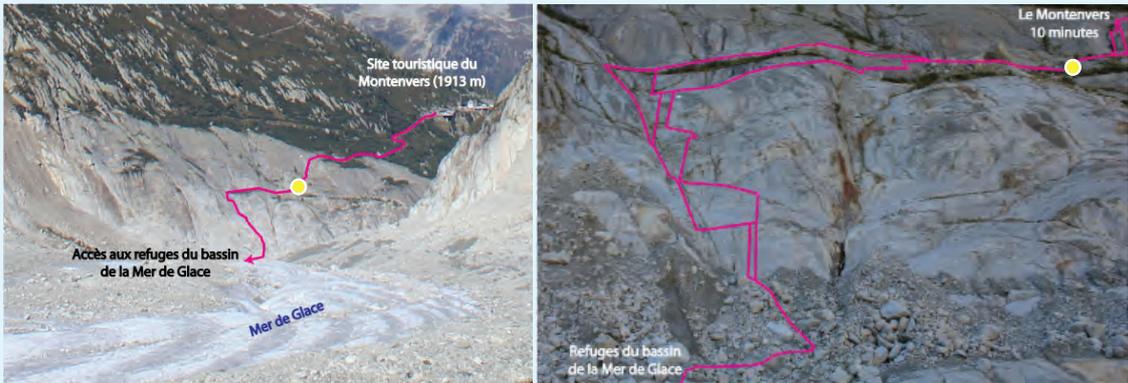
Pour ces deux capteurs, les erreurs de mesures sont donc directement liées au terrain et au mode de déplacement spécifique des alpinistes. Aussi semble-t-il difficile d'améliorer significativement les mesures.

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.

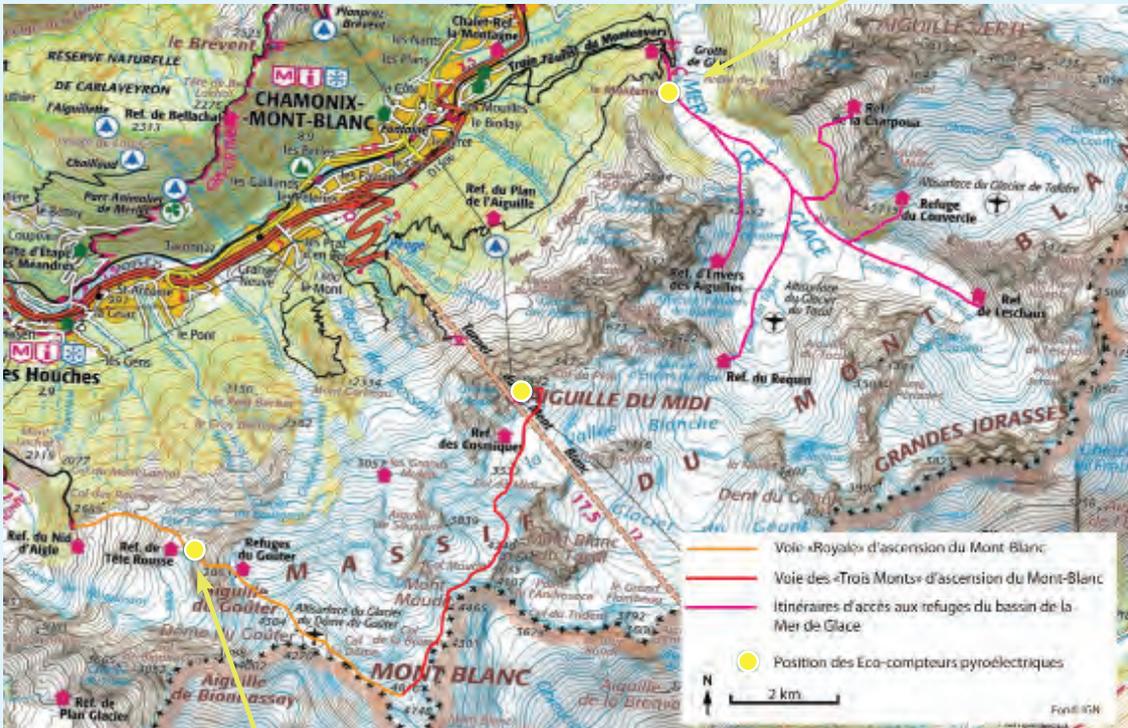
Capteur	Date	Temps de contre-comptage	Erreur	Erreur moyenne
Aiguille du Midi	30/06/2017	1h45	+22 %	-8 %
	13/07/2017	1h30	-36 %	
	22/07/2017	2h15	-10 %	
Mer de Glace	30/06/2017	2h30	+10 %	+27 %
	12/07/2017	2h15	+74 %	
	02/08/2017	3h00	+24 %	
Goûter	27/06/2017	2h00	+4 %	-4 %
	03/07/2017	1h45	-17 %	
	11/07/2017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

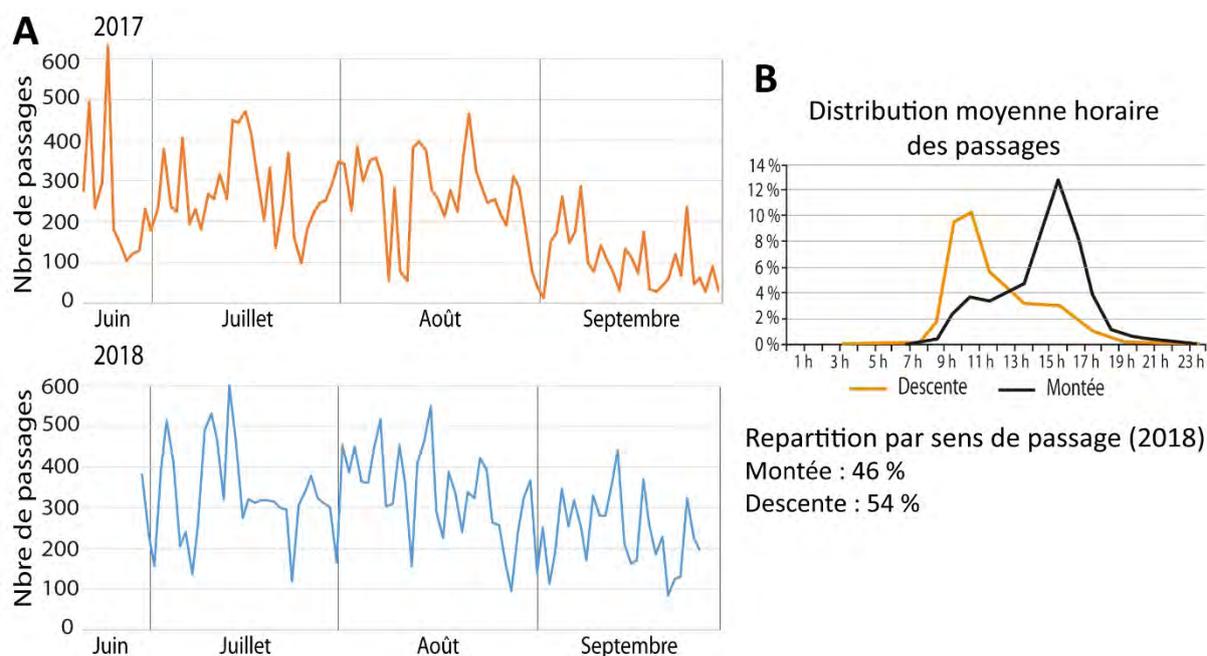


Figure 8.2. Fréquentation de l'itinéraire d'accès à la Mer de Glace depuis le Montenvers. A. Fréquentation journalière au cours des étés 2017 et 2018. B. Distribution moyenne horaire de la fréquentation au cours de l'été 2018.

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.

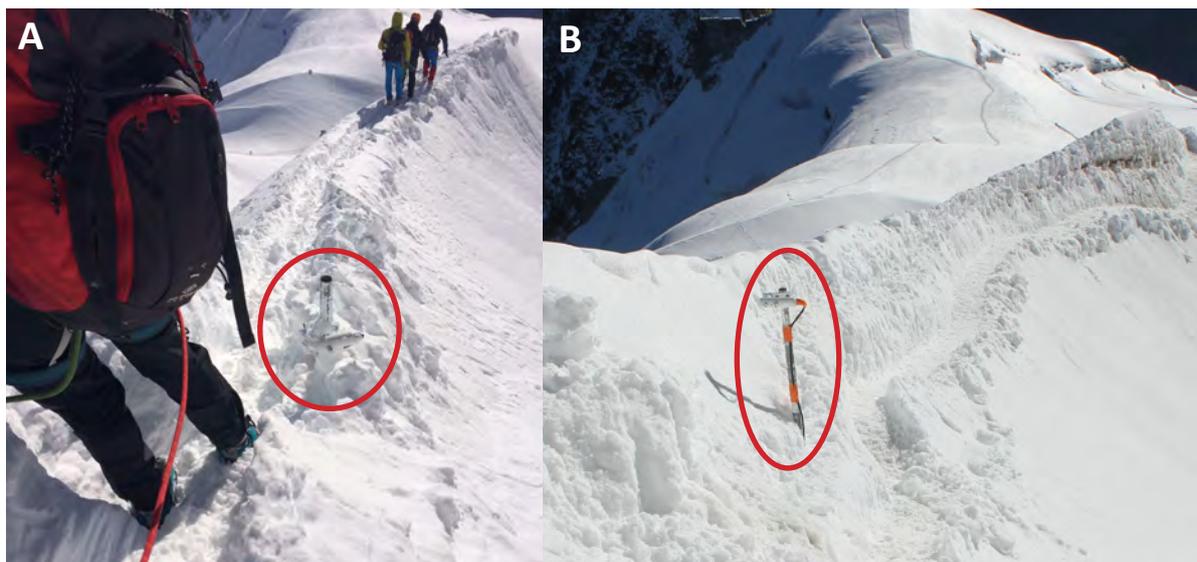


Figure 8.3. Suite à une chute de neige importante, le capteur a été retrouvé (A) presque complètement enseveli sous la neige (12/08/2017) – outre le fait qu’il risque d’être endommagé par les alpinistes, il est loin d’être à la hauteur requise (70 – 80 cm) pour effectuer une mesure de qualité – soit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

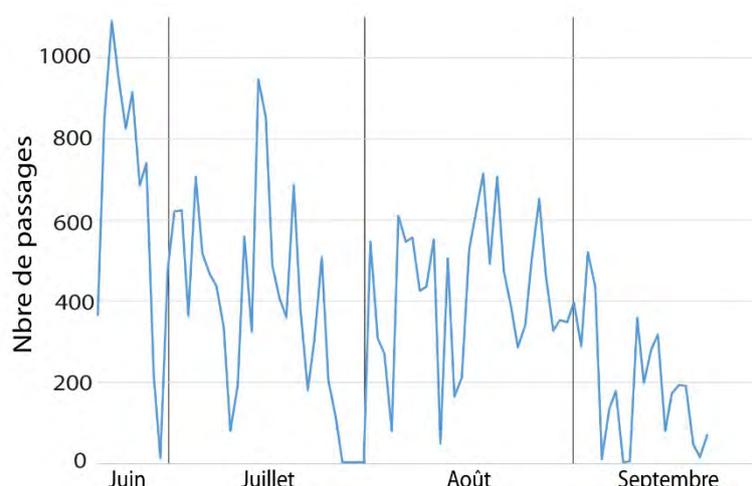
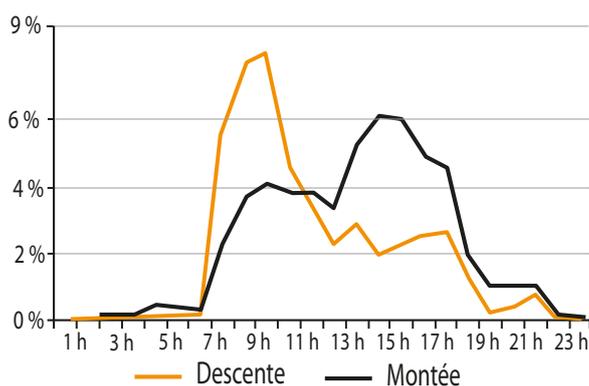


Figure 8.4. Fréquentation moyenne journalière de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017.

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 étés 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 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.

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.

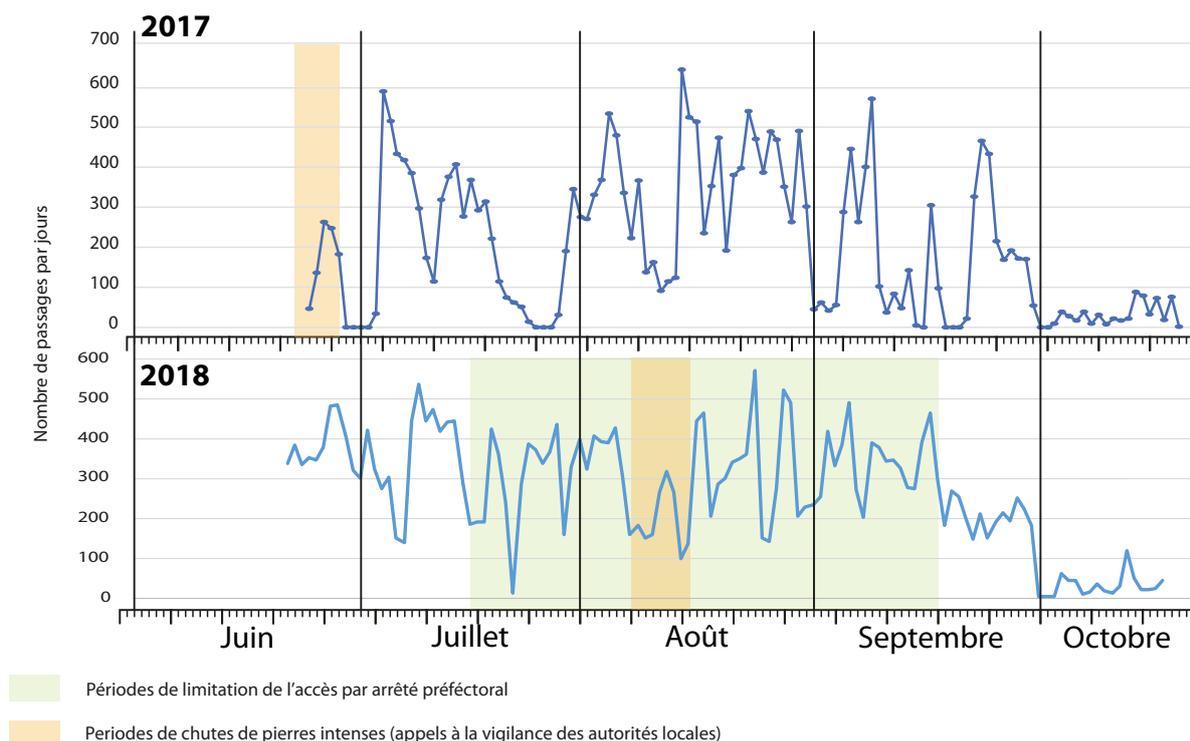


Figure 8.7. Fréquentation du couloir du Goûter en 2017 et 2018, en nombre de passages par jour.

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.

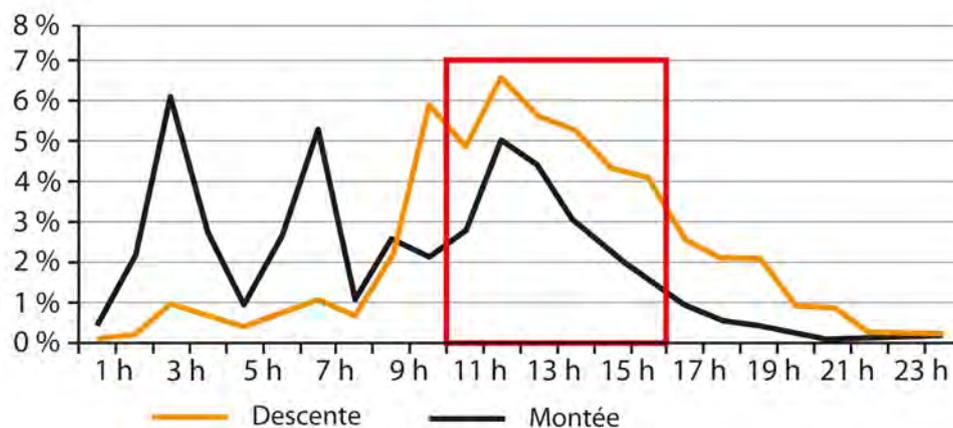


Figure 8.8. Distribution journalière moyenne des passages sur l'ensemble de la saison (identique en 2017 et 2018).

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

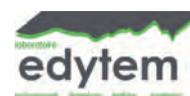
- J. Mourey : réalisation de l'étude dans son ensemble, analyse des données et rédaction du rapport.
- O. Moret : est à l'initiative de la réalisation de l'étude, prise de contact avec le PGHM, participation à la réalisation de l'étude et à la rédaction du rapport.
- P. Descamps : auteur de la première 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

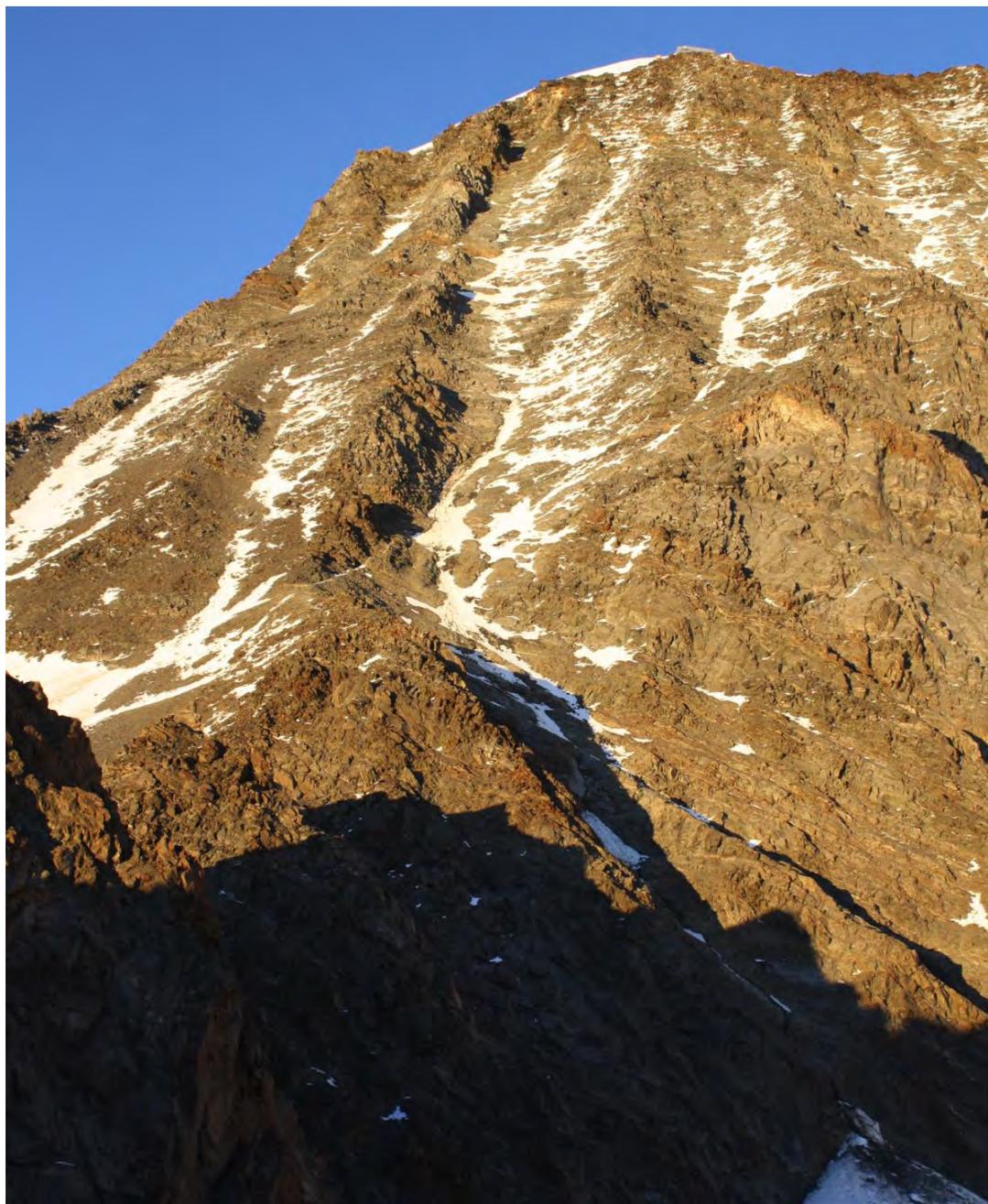


Mai 2018



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

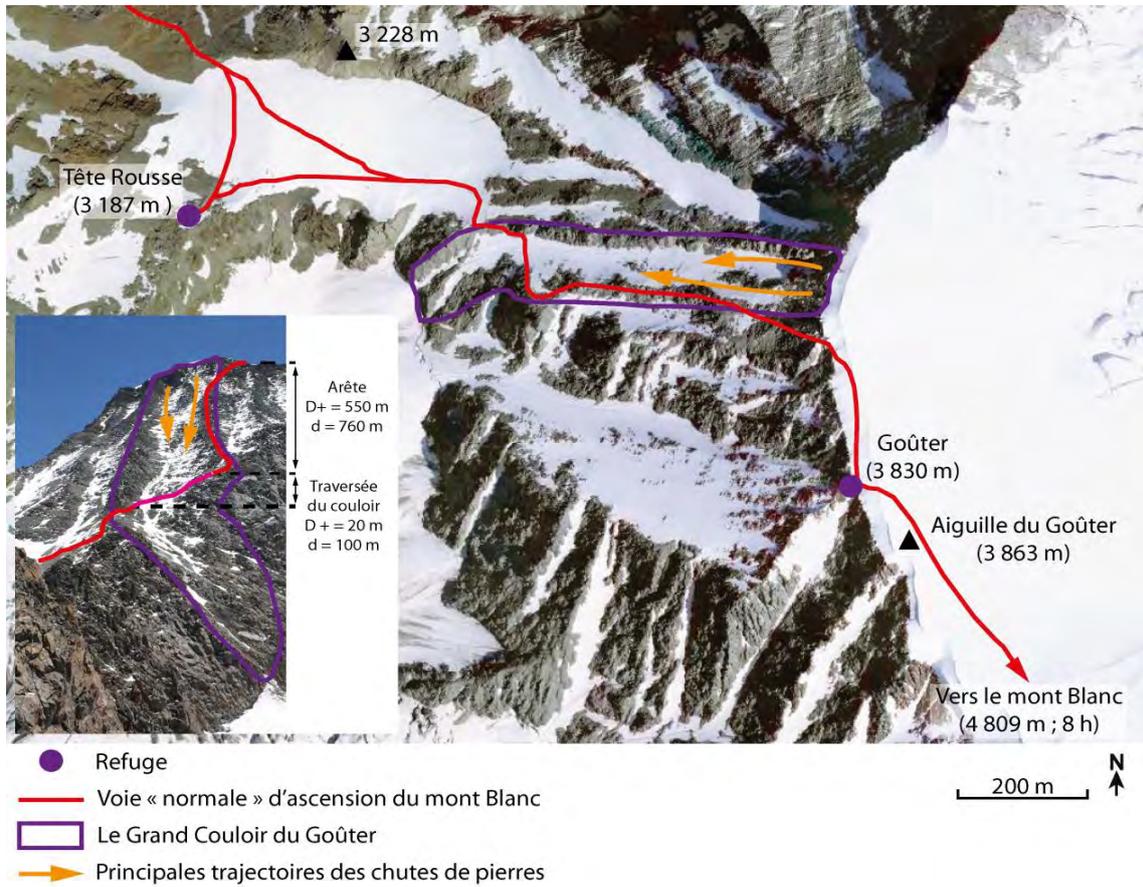
La méthodologie de ce travail est exactement la même que celle mise en œuvre pour l'étude publiée en 2012. Elle consiste à faire l'inventaire exhaustif du nombre d'accidents de type traumatique, sur le tronçon strictement compris entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter, à travers l'examen 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).

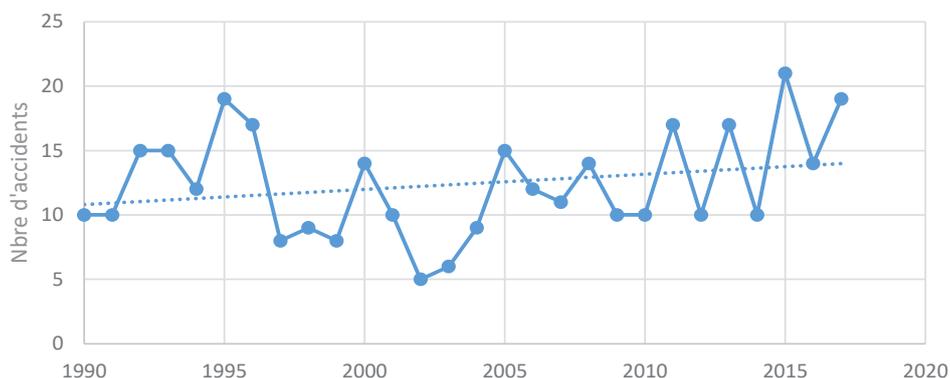
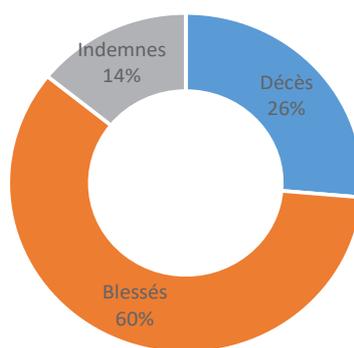


Figure 1. Évolution du nombre d'interventions pour des accidents de type traumatique entre 1990 et 2017 entre le refuge de Tête Rousse et le refuge du Goûter.

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.

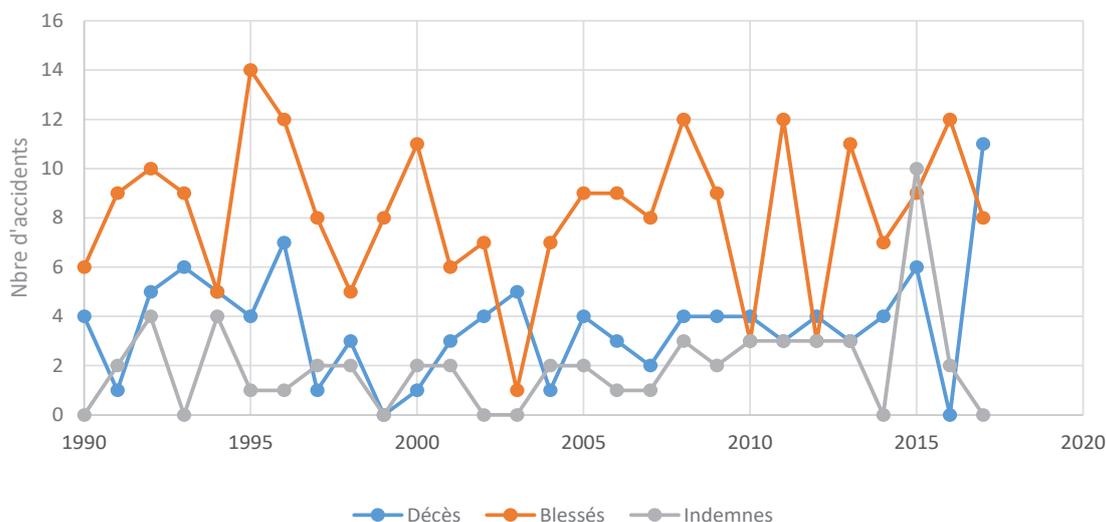


Figure 2. Évolution du nombre de personnes décédées, blessées et indemnes entre 1990 et 2017.

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 %).

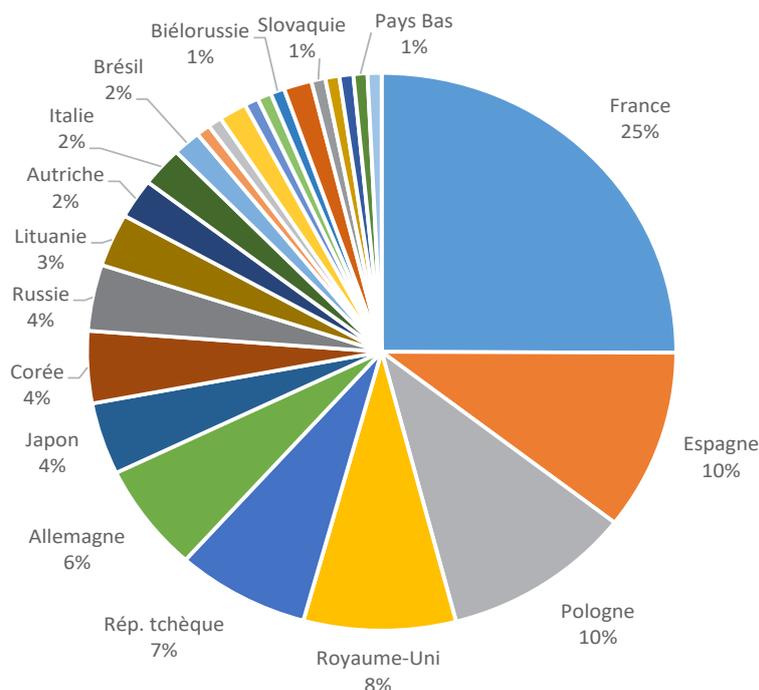


Figure 3. Pays d'origine des victimes d'accidents sur la période 2009 – 2017.

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.**

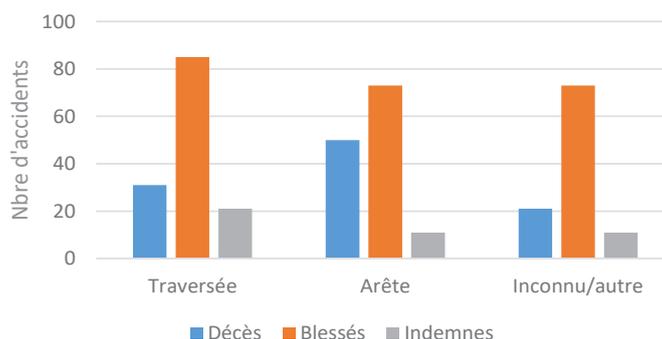


Figure 4. Conséquences des accidents en fonction de leur lieu d'occurrence.

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.

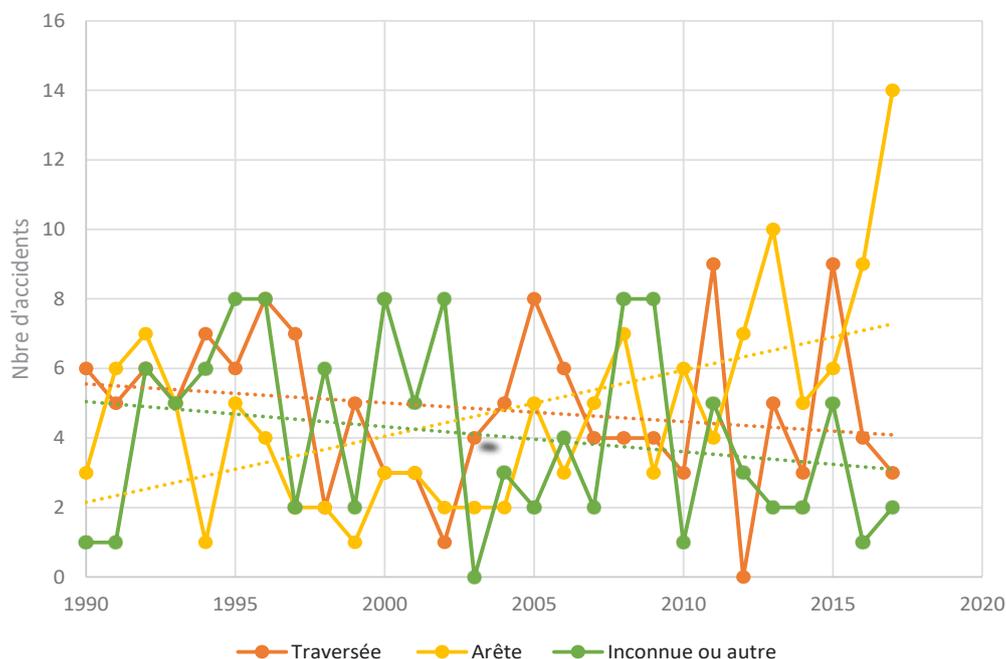


Fig. 5. Évolution de la localisation des accidents — traversée du couloir, arête ou inconnue/autre.

- **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**.

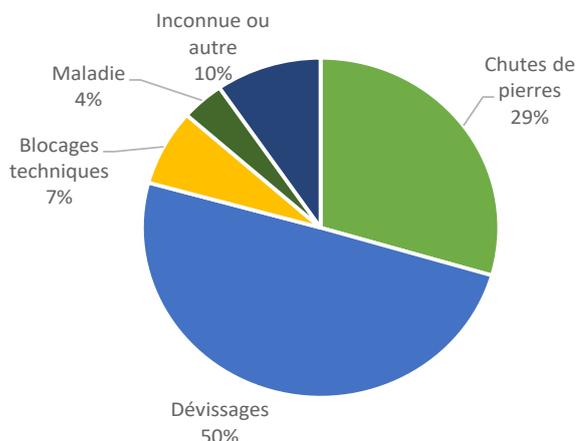


Figure 6. La cause des accidents.

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.

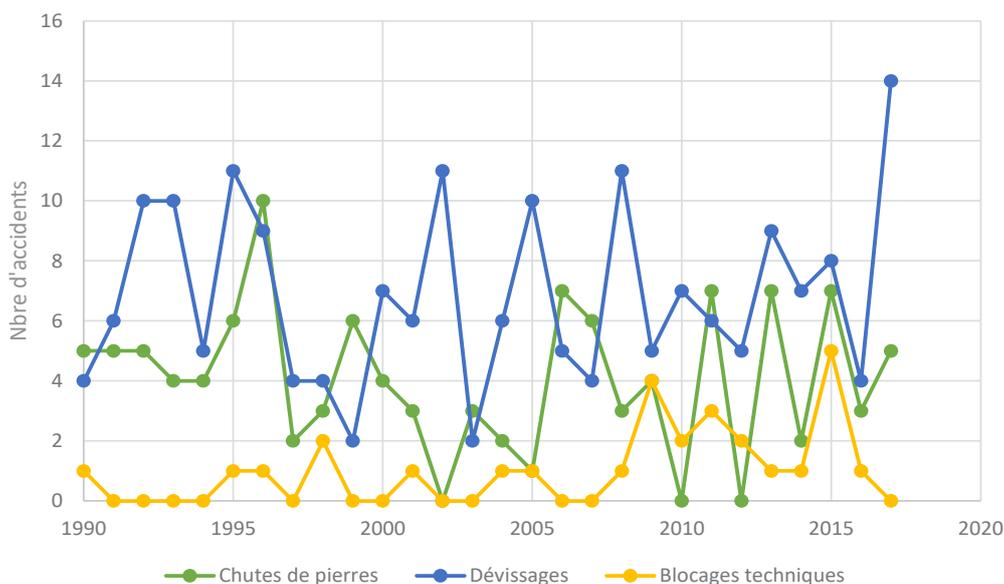


Figure 7. Évolution du nombre d'accidents par dévissages, par chutes de pierres et par blocages techniques entre 1990 et 2017.

• **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.**

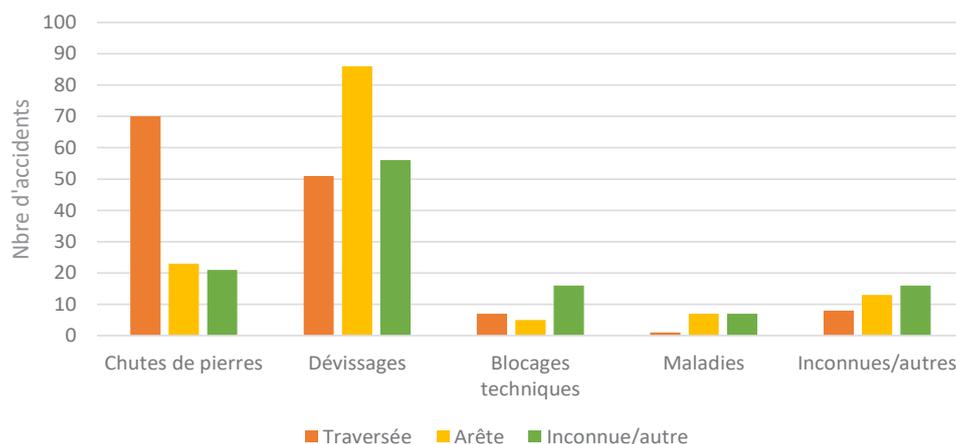


Figure 8. Cause des accidents en fonction de leur localisation.

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.

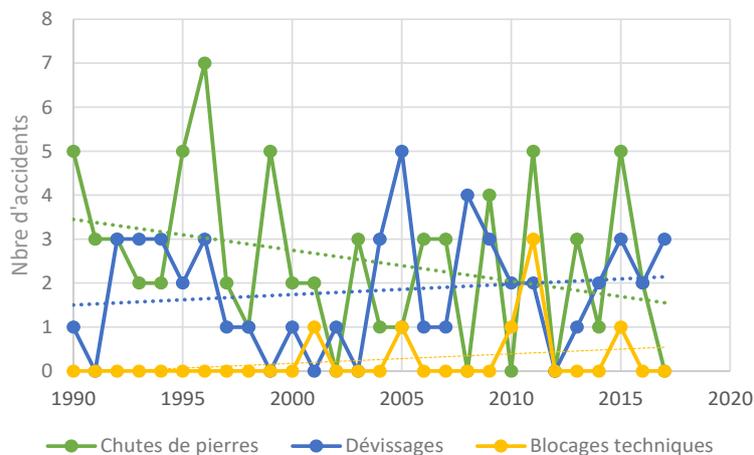


Figure 9. Évolution du nombre et de la cause des accidents dans la traversée du couloir.

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.

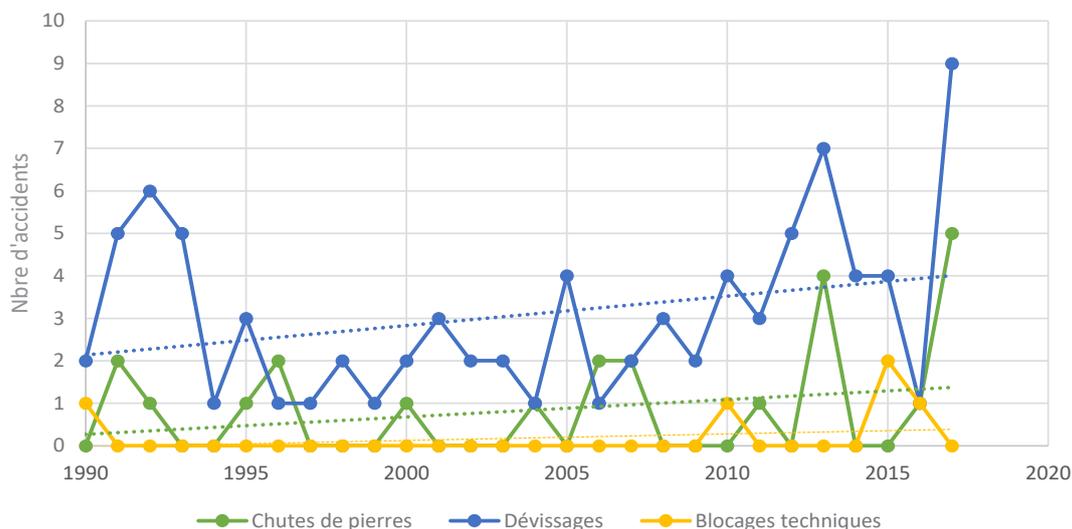


Figure 10. Évolution du nombre et de la cause des accidents qui se sont produits sur l'arête.

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**.

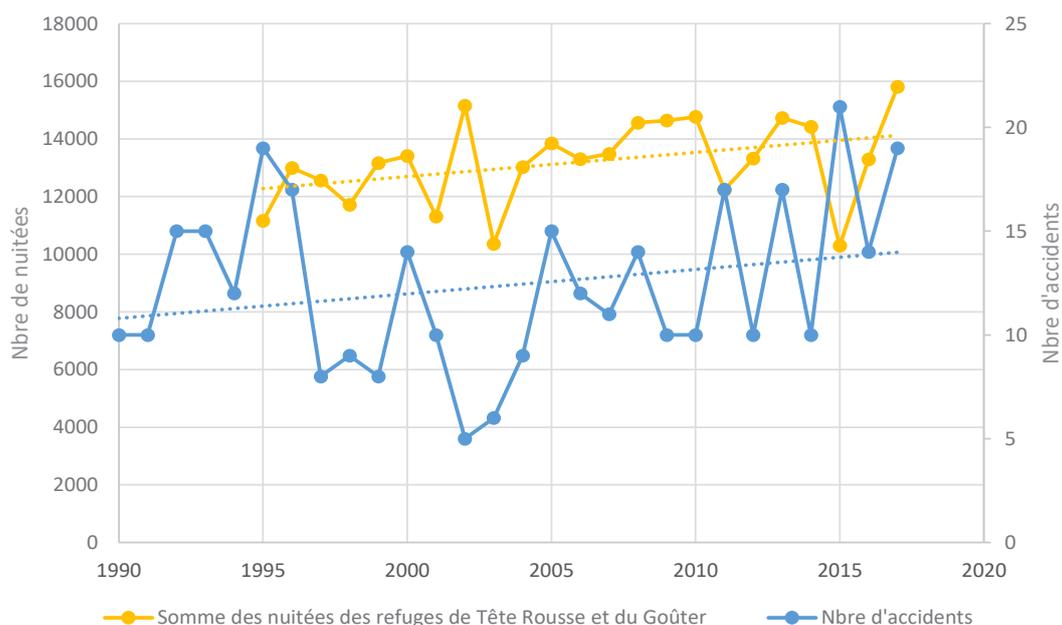


Figure 11. Évolution de la somme des nuitées dans les refuges de Tête Rousse et du Goûter entre 1995 et 2017 (à gauche) et évolution du nombre d'accidents entre 1990 et 2017 (à droite).

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 %.

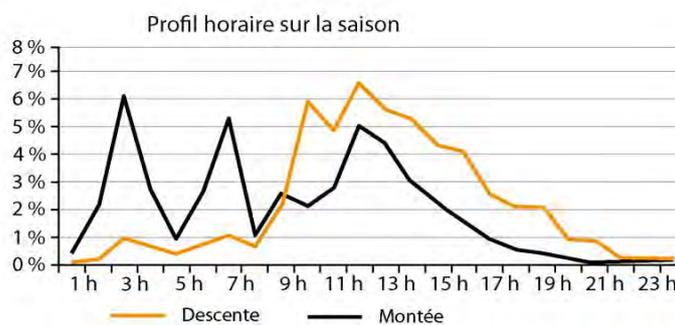


Figure 12. Fréquentation du Grand Couloir du Goûter et chiffres clés en nombre de passages, entre mai et octobre 2017. L'ensemble des données présente une précision de $\pm 4\%$.

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).

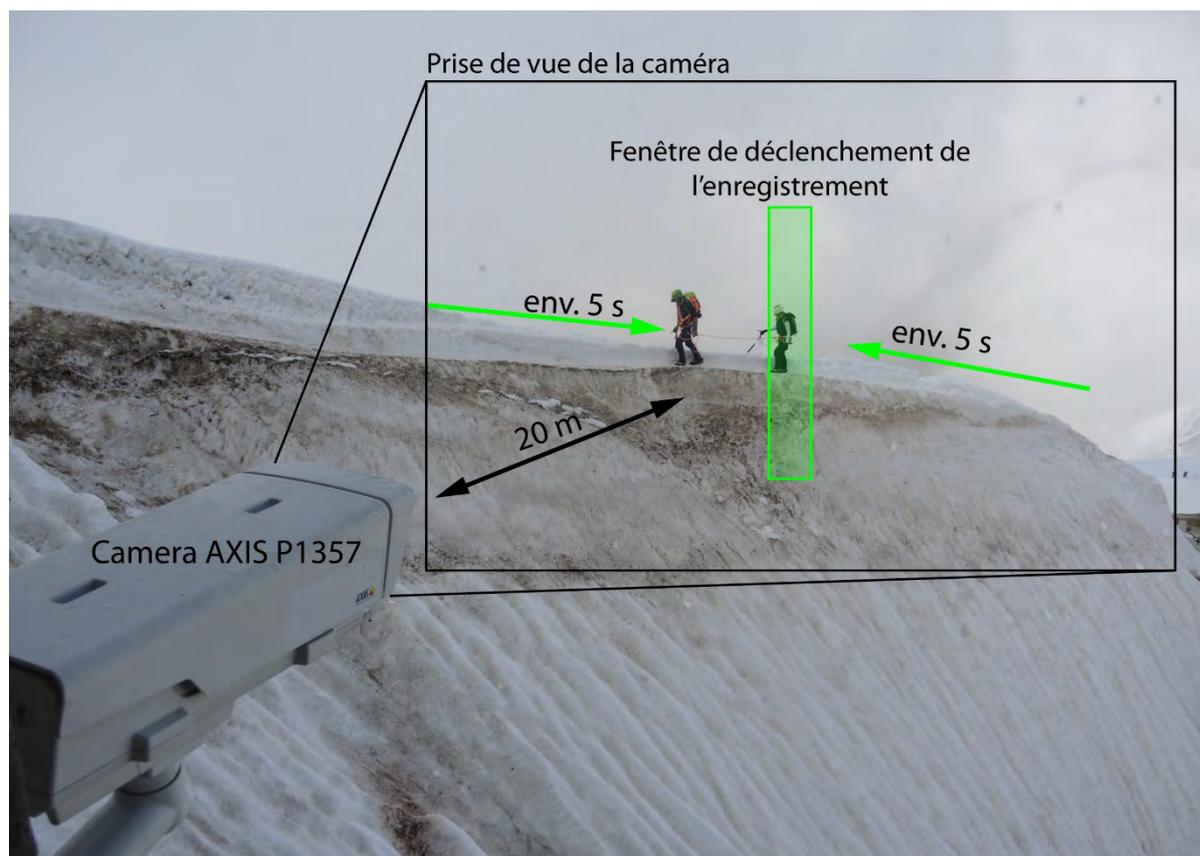


Figure 8.9. Dispositif – caméra AXIS P1357 – installé sur le terrain et position de la fenêtre de déclenchement de l'enregistrement. Cette dernière est positionnée au centre de la prise de vue de la caméra.

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 judiciarisation 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., Khesghi 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 Mühll 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., Rumpf 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 morphotopographic and climate controls. *The Cryosphere*, 7:1455–1471. doi:10.5194/tc-7-1455-2013.

Ravanel L. (2010). Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements 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 paraglacière ? *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. 286

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.....	15
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).....	24
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.....	26
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)....	27
Encadré 1.1. Les différents styles d'escalade.....	28
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.....	29
Encadré 1.2. Les échelles de cotation de la difficulté des voies d'alpinisme.....	30
Tableau 1.1. Les 6 niveaux de l'échelle de difficulté globale.....	31
Figure 1.5. Coinceurs mécaniques (à gauche) et coinceurs câblés (à droite).....	33
Figure 1.6. Escalade sportive : A. Petit au Grand Capucin (3838 m, massif du Mont Blanc, Vialletet, 2012) dans une longueur cotée 8a.....	34
Figure 1.7. Ascension de la goulotte Pélissier, pointe Lachenal (3613 m, massif du Mont Blanc), TD- (M. Jourdannay, 2018).....	34
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).....	37
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).....	37
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.....	41
Figure 1.11. Panneaux d'information sur le sentiers d'accès à la Mer de Glace.....	42
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.....	46
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).....	48
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).....	49
Figure 2.4. Durée de vie d'une séquence paraglaciaire (d'après Churchet Ryder, 1972; Mercier, 2010).....	50

- 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.....52
- Figure 2.6.** Modèle conceptuel d'évolution d'une moraine latérale alpine, depuis un état géomorphologique actif à stable (Eichel et al., 2018).....52
- 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.....53
- 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).....54
- Figure 2.9.** Face sud des Grandes Jorasses. Effondrement du front du glacier suspendu en 1998 et 2014 (Failetaz et al., 2015).....55
- 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.....56
- Figure 2.11.** Profil thermique des terrains à permafrost.....57
- Tableau 2.1.** Distribution du permafrost alpin en fonction de l'altitude et de la température moyenne annuelle de l'air (Haeberli, 1985 ; modifié).....58
- 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.....59
- 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).....61
- Tableau 2.2.** Processus géomorphologiques liés à la dégradation du permafrost (Harris et al., 2001a, modifié).....62
- Figure 2.14.** A. Évolution sur près d'un siècle du volume et de l'altitude des écroulements rocheux relevés dans la face ouest des Drus et de la température moyenne estivale à Chamonix (données Météo France). Les quadrilatères représentent les différents écroulements (Ravel et Deline, 2008). B. Ecoulement dans la face ouest des Drus le 8/08/2003 (J.F. Hagenmuller).63
- 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).....67
- Figure 3.2.** Vers un nouveau retournement des polarités touristiques saisonnières (traduit de Bourdeau, 2009 ; modifié).....68
- Tableau 3.1.** Liste des études utilisées pour la production de l'état actuel des connaissances.....69
- 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).....70
- 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).....72
- Figure 3.5.** Structuration du travail doctoral et échelles spatiales d'investigation.....78

Figure 3.6. Échelles de temps et d'espace traitées dans ce travail doctoral.....	82
Encadré 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles et du calcul des dénivellations à franchir pour atteindre un refuge.....	125
Figure 4.1. Schématisation de l'ajout d'échelles sur les itinéraires d'accès aux refuges dans le bassin de la Mer de Glace.....	125
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.....	126
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.....	127
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).....	128
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).....	130
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).....	133
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).....	151
Figure 5.3. Traitement des photos de l'appareil automatique pour retracer l'évolution des surfaces enneigées dans le couloir du Goûter.....	152
Tableau 6.1. La dynamique des cultures professionnelles (Bourdeau et al., 2006 ; modifié).....	161
Figure 6.1. Département de résidence des guides du SNGM en 2016 (SNGM, 2016).....	162
Encadré 7.1. Le programme RefLab.....	197
Figure 7.1. Évolution du nombre total de nuitées entre 1999 et 2016 pour l'ensemble des refuges considérés.....	199
Tableau 7.2. Évolution moyenne annuelle du nombre de nuitées dans les refuges étudiés sur la période 1999-2016.....	200
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.....	202
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.....	204
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).....	205
Encadré 7.2. Le cas de l'été caniculaire de 2003.....	206
Encadré 7.3. Quand le refuge lui-même est menacé par le changement climatique.....	208
Figure 7.5. A. Cicatrice et dépôt de l'écroulement des Cosmiques du 22 août 1998 (600 m ³) (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).....	208

- Figure 7.6.** Installation de filets et rénovation des fondations du refuge Carrel (3835 m, Italie ; Vuillemier, 2014).....208
- 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.....222
- Figure 8.1.** Alpinistes faisant une pause au niveau du capteur. Leurs déplacements/stationnements devant le capteur engendrent un sur-comptage important.....223
- 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.....224
- 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.....225
- 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.....226
- Figure 8.4.** Fréquentation moyenne journalière de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017.....227
- Figure 8.5.** Distribution moyenne horaire de la fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi en 2017....227
- 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.....228
- Figure 8.6.** Site d'installation du capteur pyroélectrique en 2017 et 2018. Le bloc qui a basculé est surligné en rouge.....229
- Figure 8.7.** Fréquentation du couloir du Goûter en 2017 et 2018, en nombre de passages par jour.....230
- Figure 8.8.** Distribution journalière moyenne des passages sur l'ensemble de la saison (identique en 2017 et 2018).....231
- 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.....259
- 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.....260
- Tableau 8.4.** Erreurs de mesure liées à la multiplication des vidéos sur un laps de temps très court.....260
- Tableau 8.5.** Résultats issus des deux contre-comptages manuels.....261
- 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).....261

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 marquée 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 rimaye, 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).

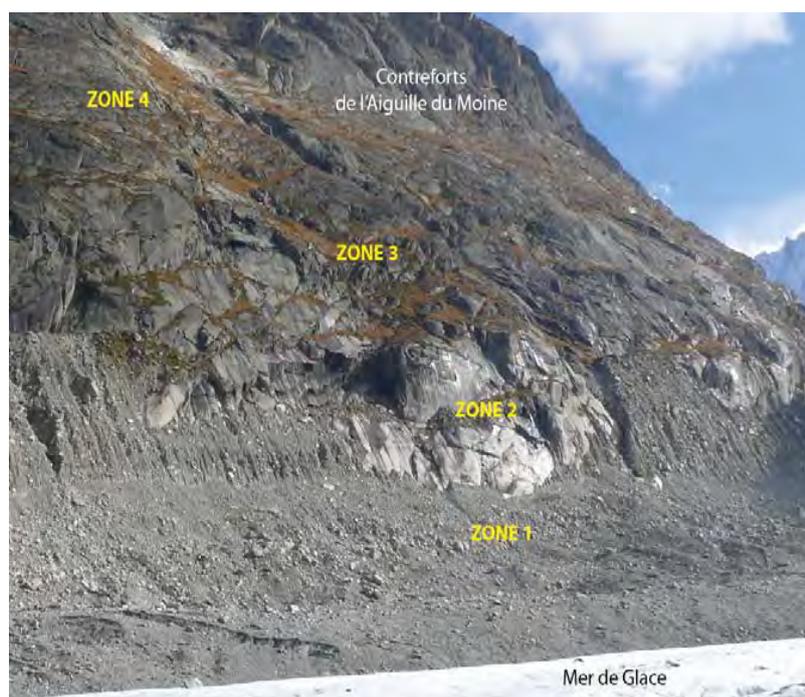


FIG. 2. Les différents secteurs du projet de nouvel itinéraire d'accès au refuge de la Charpoua.

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 Conscrits 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.

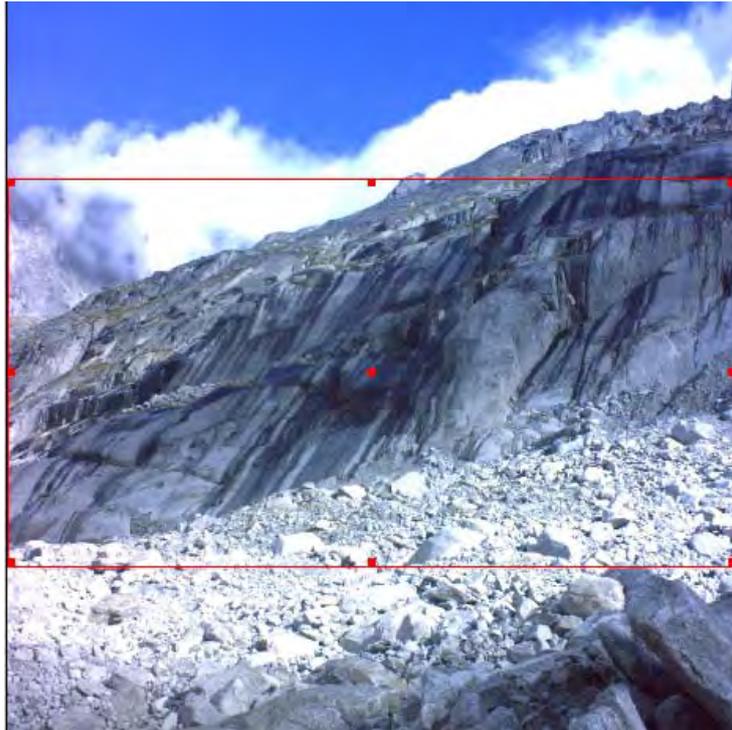


FIG. 3. Fenêtre de scan aval du secteur relatif au nouvel itinéraire d'accès à la Charpoua.
Balayage laser terrestre effectué le 21 octobre 2014.

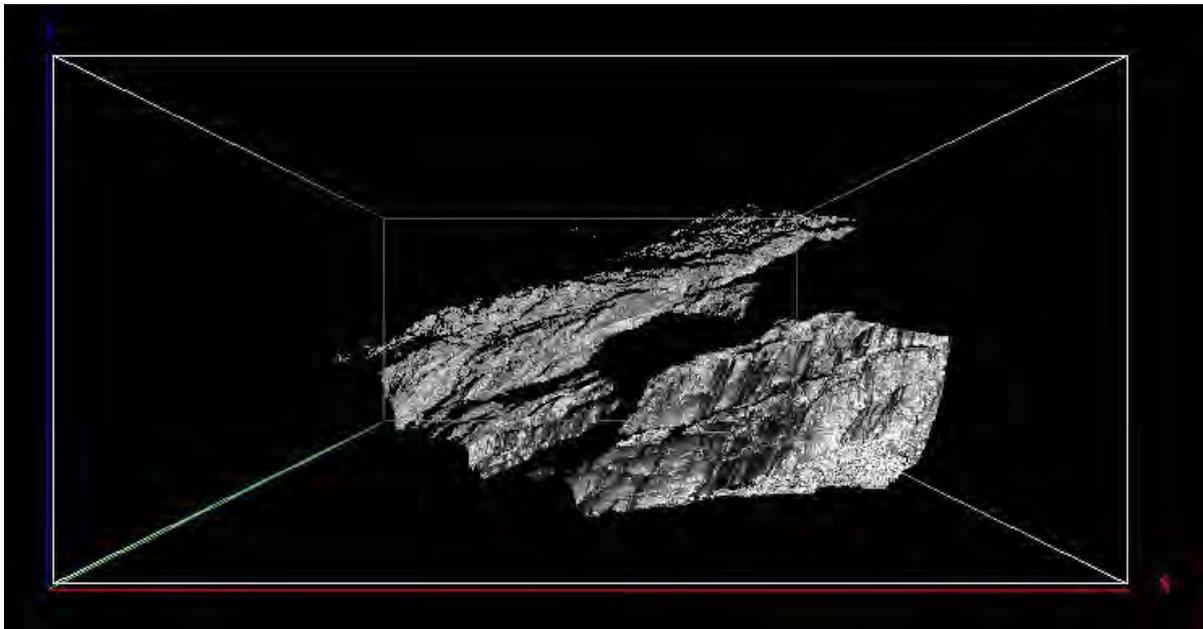


FIG. 4. Modèle numérique aval.

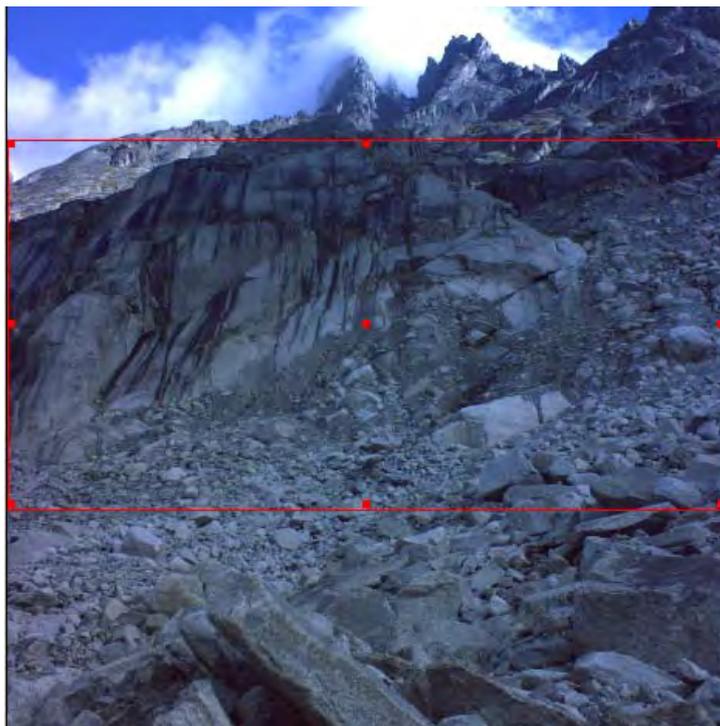
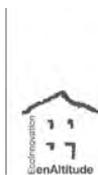


FIG. 5. Fenêtre de scan amont.



FIG. 4. Modèle numérique aval (sera couplé avec le modèle amont).

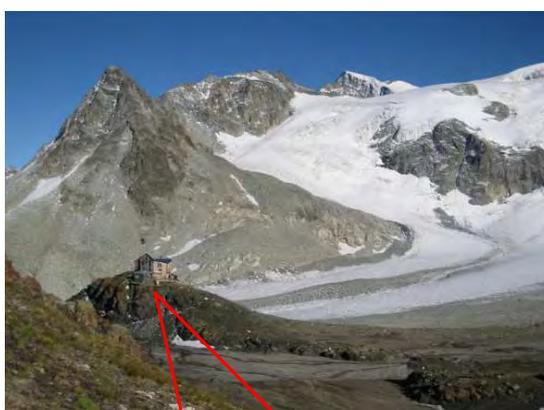
Annexe 4.2. Exemple de Fiche Technique Opérationnelle, dans le cadre du projet ALCOTRA *Eco-Innovation en Altitude*



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





PROJET DE COOPERATION TRANSFRONTALIERE
«ECO INNOVATION EN ALTITUDE»

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 ;

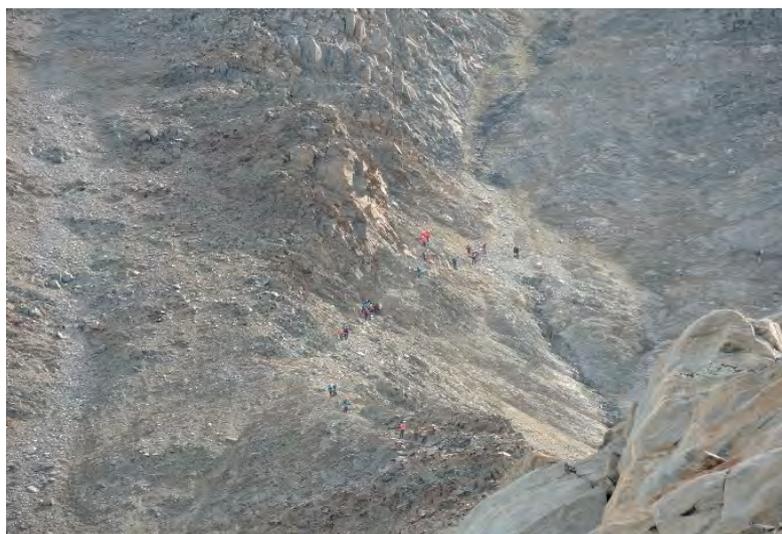
- un appareil photo automatique qui prend 4 photos par jour du couloir pour étudier son enneigement – ayant une forte influence sur l'occurrence des chutes et les volumes mobilisés ;

- 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.

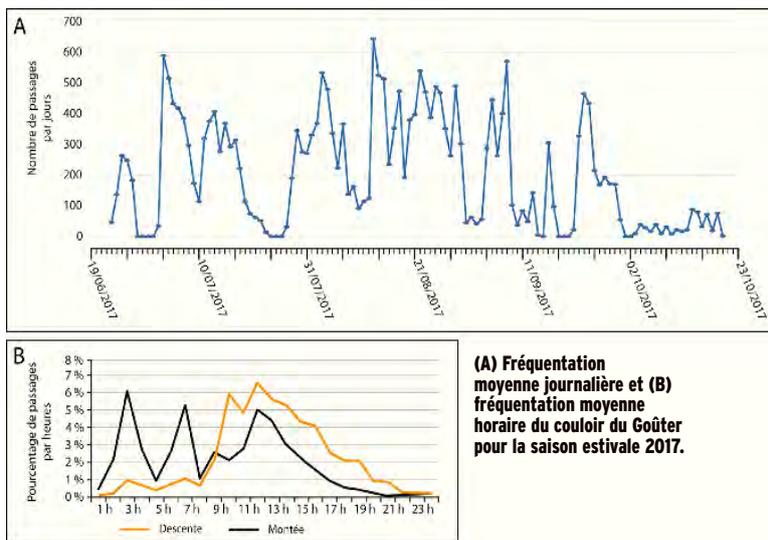


P.-A. Duval

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

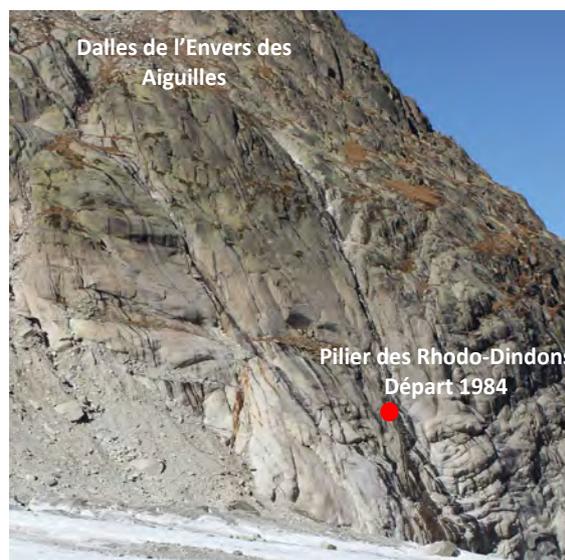
Les impacts du changement climatique sur les voies d'alpinisme et leurs conditions de fréquentation



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
- Hélisti
- 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



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



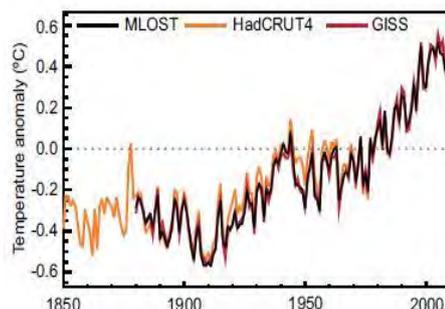
« La haute montagne asséchée », Aiguille du Midi, juillet 2017



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)



Écoulement 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.



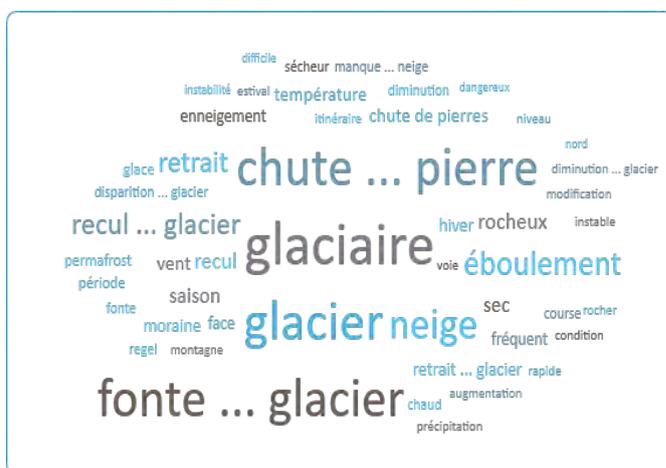
— Pilier Bonatti (1955)
— Directe américaine (1965)
— Autre itinéraire
— Niche d'arrachement de l'éroulement de 2005

Comment les guides de haute montagne perçoivent-ils et s'adaptent-ils à l'évolution des milieux de haute montagne liée au changement climatique ?

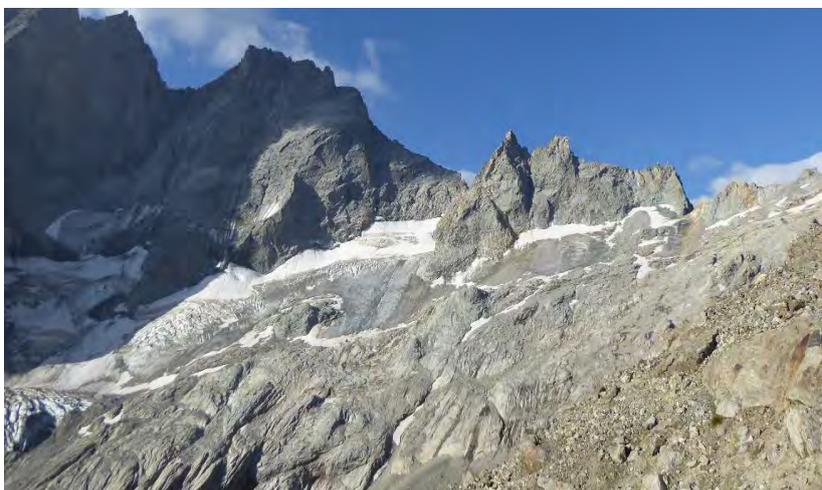
L'étude a été réalisée par questionnaires envoyés aux guides par e-mail en nov.-déc. 2017. Le taux de retour est statistiquement satisfaisant (17 %, soit 230 réponses) et les réponses correspondent à un échantillon de guides représentatif de la population mère.

Résultats

Quels sont les principaux changements observés en haute montagne ?



- La fonte des glaciers et l'intensification des chutes de pierres sont les principaux changements identifiés, respectivement observés par 77 % et 29 % des guides.
- Ces changements sont principalement considérés comme significatifs pour la pratique de l'alpinisme depuis le début des années 1990.



Clos des Cavales, Écrins, juillet 2017
(ph. M. Marcuzzi)

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%**

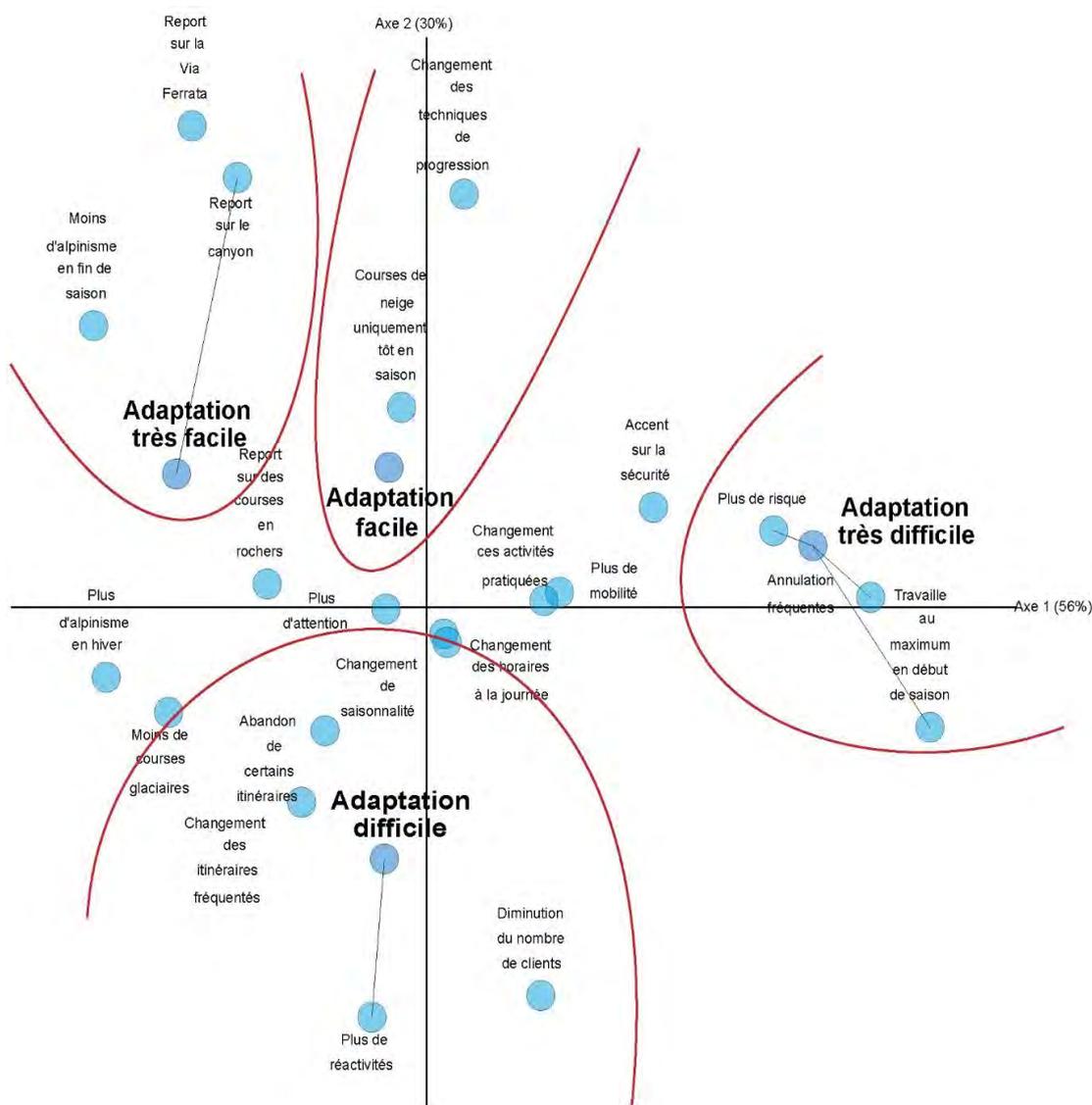
	Nb	
Non réponse	24	10,4%
Changement de saisonnalité	85	37,0%
Changement des activités pratiquées	60	26,1%
Changement des lieux de pratiques	59	25,7%
Plus de réactivité et d'attention à porter aux conditions	52	22,6%
Changement des techniques de progression	12	5,2%
Autres	9	3,9%
Total	230	

- **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 ?

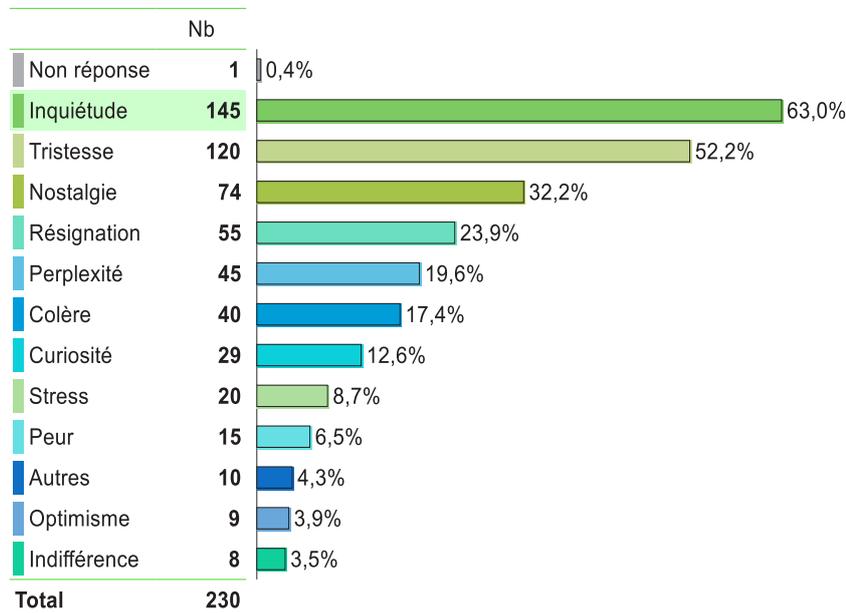


Méthode de lecture du graphique : plus les cercles sont proches, plus leurs relations sont importantes. Les relations les plus fortes sont soulignées par un trait.

- **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 ?

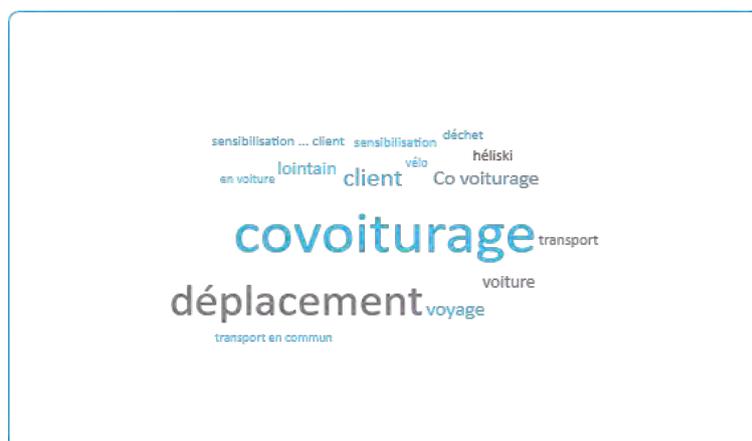
Taux de réponse : 99,6%



- 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)

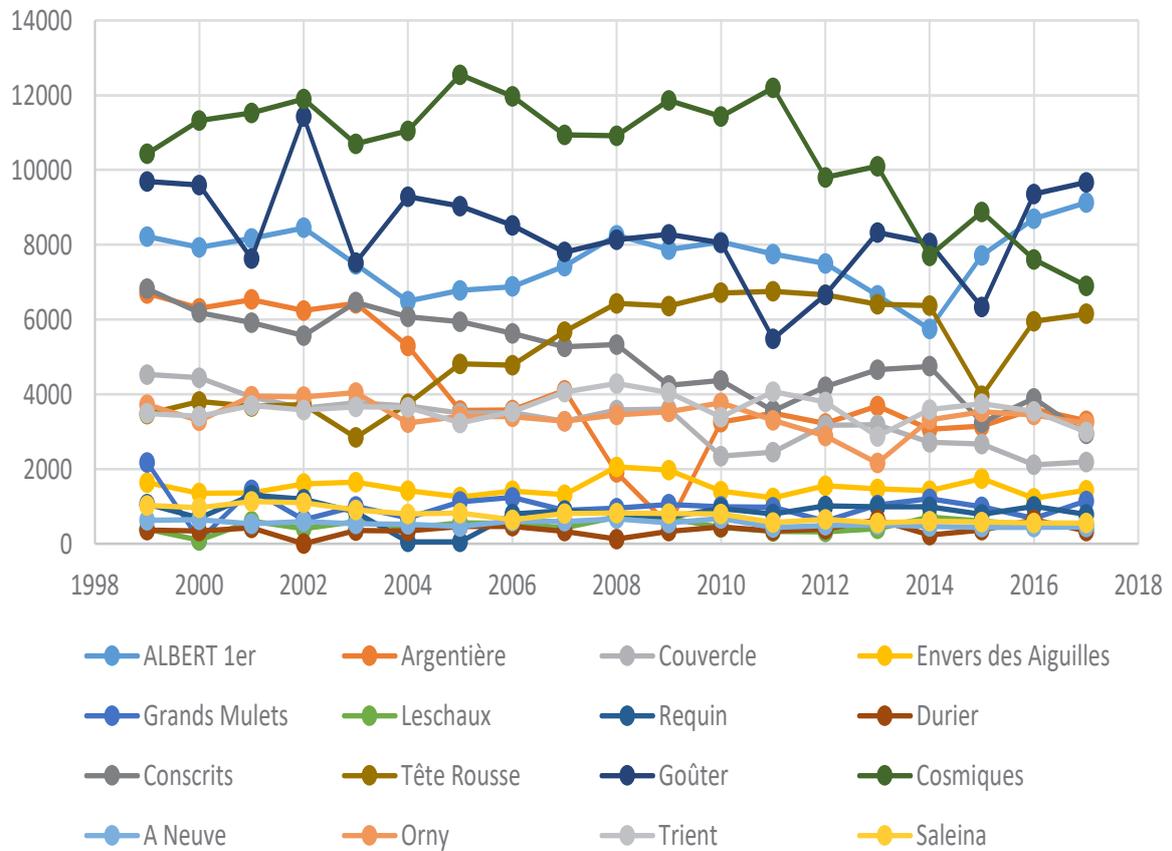
Annexe 7.1. Entretiens réalisés avec les gardiens des refuges du massif du Mont Blanc

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 par refuge 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.



Préfecture
Direction du cabinet
Service interministériel de défense et de
protection civiles

Anancy, le 13 JUL. 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.....	5
Abstract.....	6
Remerciements.....	7
Sommaire.....	11
Sigles et abréviations.....	13
Introduction générale.....	15
Partie I. La pratique de l'alpinisme face aux évolutions des milieux de haute montagne.....	21
Chapitre 1. L'alpinisme : historique et définition de l'objet d'étude.....	23
1.1. Description chronologique d'une pratique en constante évolution.....	23
1.1.1. La conquête du mont Blanc et le développement d'un alpinisme scientifique.....	23
1.1.2. L'Âge d'Or de l'alpinisme et la naissance d'une pratique sportive.....	24
1.1.3. L'entre-deux-guerres : croissance du niveau technique sur fond de nationalisme.....	27
1.1.4. De l'après-guerre aux années 1990 : croissance de l'activité.....	32
A. Professionnalisation et croissance du niveau technique.....	32
B. Démocratisation de l'alpinisme.....	35
1.1.5. L'alpinisme depuis la fin des années 1990, déclin ou mutation ?.....	36
A. De la démocratisation à la consommation.....	36
B. L'alpinisme actuel : déclin ou mutation ?.....	38
1.2. L'alpinisme dans les Alpes, une proposition de définition systémique.....	39
1.2.1. L'alpinisme : un système structuré autour de trois sous-systèmes.....	39
1.2.2. Une évolution uniquement conditionnée par des facteurs socio-culturels ?.....	42
Conclusion du Chapitre 1.....	43
Chapitre 2. Impacts du changement climatique sur les milieux de haute montagne.....	45
2.1. Le changement climatique dans les Alpes depuis la fin du PAG.....	45
2.1.1. Évolution du climat dans les Alpes depuis la fin du PAG.....	45
2.2. Les effets du changement climatique sur la haute montagne alpine – Un état des connaissances....	47
2.2.1. Retrait des glaciers et des couvertures glacio-nivales et processus géomorphologiques associés à la déglaciation.....	47
2.2.1.1. Fonte généralisée des glaciers alpins depuis la fin du PAG.....	47
2.2.1.2. Une crise paraglaciale associées à la déglaciation.....	50
A. Le concept de « paraglaciale ».....	50
B. Le géosystème paraglaciale.....	51
C. Le sous-système gravitaire au cours d'une séquence paraglaciale dans la haute montagne alpine.....	51
2.2.1.3. Évolution des petits appareils glaciaires suspendus et des couvertures glacio-nivales.....	54
A. Retrait des couvertures glacio-nivales.....	54
B. Évolution des glaciers suspendus.....	55
2.2.2. Le permafrost alpin : définition et évolution actuelle.....	56
2.2.2.1. Définition du permafrost et principales caractéristiques.....	57
2.2.2.2. Distribution spatiale du permafrost dans les Alpes.....	58
Conclusion du Chapitre 2.....	64
Chapitre 3. Tourisme de nature et alpinisme face au changement climatique.....	65
3.1. Le tourisme de nature dans les Alpes face au changement climatique.....	65
3.1.1. L'industrie du ski face à une réduction de l'enneigement.....	65

3.1.2. Le tourisme de nature estival dans les Alpes face au changement climatique.....	66
3.2. L'alpinisme dans le contexte actuel de changement climatique : état des connaissances et axes de recherches.....	69
3.2.1. Les impacts du changement climatique sur l'alpinisme : état actuel des connaissances.....	69
3.2.1.1. Impacts du changement climatique sur les itinéraires d'alpinisme, entre accroissement de la difficulté technique et augmentation de la dangerosité.....	70
3.2.1.2. Perception et adaptation des alpinistes aux effets du changement climatique.....	72
3.2.1.3. Quelles lacunes dans la connaissance au regard de la bibliographie ?.....	74
A. Quels sont les processus géomorphologiques et glaciologiques qui affectent les itinéraires d'alpinisme ? Quelles sont les voies les plus affectées ?.....	74
B. Comment sont affectés les alpinistes et comment s'adaptent-ils ?.....	75
3.3. Structuration du travail doctoral, méthodes et échelles d'investigation.....	77
3.3.1. Axes de recherche, méthodes et échelles d'investigation.....	77
3.3.2. Echelles spatiales et temporelles d'investigation.....	82
Conclusion du Chapitre 3	82
Conclusion de la Partie I.....	84
Partie II. Évolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	85
Chapitre 4. Evolution des itinéraires d'accès aux refuges de haute montagne et de leurs conditions de fréquentation.....	87
4.1. Article 1 - Fiche synoptique.....	88
4.2. Article 2 – Fiche synoptique.....	105
4.2.1. Mise à jour des résultats présentés dans l'Article 2 et outils d'aide à la décision pour la CCVCMB.....	125
4.2.1.1. Mise à jour des résultats pour les étés 2017 et 2018.....	126
4.2.1.2. Aide à la décision pour la CCVCMB.....	129
Conclusion du Chapitre 4.....	129
Chapitre 5. Evolution des itinéraires d'alpinisme et de leurs conditions de fréquentation.....	131
5.1. Article 3 – Fiche synoptique.....	132
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.....	150
5.2.1. Un appareil photo automatique pour l'analyse de l'enneigement.....	151
5.2.2. Des capteurs de températures pour caractériser l'état thermique local du permafrost...	153
5.2.3. Des capteurs sismiques pour documenter l'occurrence des déstabilisations rocheuses...	153
Conclusion du Chapitre 5.....	154
Conclusion de la Partie II.....	156
Partie III. Perception et adaptation des alpinistes aux impacts du changement climatique sur les itinéraires.....	157
Chapitre 6. Les guides de haute montagne face aux effets du changement climatique, perception et adaptation.....	159
6.1. Les guides de haute montagne, professionnels emblématiques de l'alpinisme.....	159
6.2. Article 4 – Fiche synoptique.....	163
6.3. Article 5 – Fiche synoptique.....	174

Conclusion du Chapitre 6.....	192
Chapitre 7. Les effets du changement climatique sur la fréquentation des refuges de haute montagne..	193
7.1. Les données de fréquentation des refuges, limites et intérêts.....	194
7.1.1. La fréquentation des refuges : difficulté d'accès et limites de la donnée.....	193
A. Une donnée difficile d'accès.....	194
B. Tous les alpinistes n'utilisent pas les refuges.....	194
C. Les refuges de haute montagne ne sont pas uniquement fréquentés l'été par des alpinistes.....	196
D. Les limites de la collecte de données par les gardiens.....	196
7.1.2. Une donnée qui reste pertinente et nécessaire pour l'étude de la fréquentation de la haute montagne.....	196
7.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne dans le massif du Mont Blanc.....	197
7.2.1. Les refuges du massif du Mont Blanc considérés dans ce travail.....	197
7.2.2. Evolution de la fréquentation des refuges de haute montagne du massif du Mont Blanc entre 1999 et 2016.....	199
7.3. Impacts de l'été caniculaire 2015 sur la fréquentation des refuges	201
7.3.1. L'été 2015.....	201
7.3.2. Adaptation des gardiens – Les cas des massifs du Mont Blanc et des Écrins.....	206
7.3.3. Limites de l'étude et perspectives de recherche.....	207
Conclusion du Chapitre 7.....	209
Chapitre 8. Mesure de la fréquentation des itinéraires d'alpinisme : quantification des flux, comportements adaptatifs et accidentologie.....	211
8.1. Article 6 – Fiche synoptique.....	212
8.2. Résultats pour la Mer de Glace et l'aiguille du midi.....	222
8.2.1. Fréquentation du bassin de la Mer de Glace en 2017 et 2018.....	222
8.2.2. La fréquentation de l'arête est de l'aiguille du Midi.....	224
8.2.3. Fréquentation de la voie normale d'ascension du mont blanc.....	228
A. Résultats des étés 2017 et 2018.....	228
B. Identification d'un schéma de fréquentation et mise en évidence de comportements non adaptés au risque local de chute de pierre.....	231
8.3. Mise à jour de l'étude d'accidentologie sur la voie normale d'ascension du mont Blanc.....	232
8.3.1. Rapport d'étude d'accidentologie - Fiche synoptique.....	234
8.4. Mesure de la fréquentation par caméra semi-automatique.....	258
8.4.1. Présentation du dispositif.....	258
8.4.2. Erreurs de mesure et résultats.....	259
8.4.3. Limites du dispositif et futurs développements.....	262
Conclusion du Chapitre 8.....	263
Conclusion de la Partie III.....	264
Conclusion générale.....	265
Bibliographie.....	273
Bibliographie personnelle.....	286
Table des figures, tableaux et encadrés.....	289
Liste des Annexes.....	293
Table des matières.....	331

