

MESURE DE LA FRÉQUENTATION D'ITINÉRAIRES D'ACCÈS À LA HAUTE MONTAGNE DANS LE MASSIF DU MONT BANC 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 manifestement 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 Ravanel, 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 en détail 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 Eco-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 Ecrins (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. A l'inverse du Pyro, la 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 Dalles 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 reflétant 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 son 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, ASTERS) ; (b) capteur Pyro (photo G. Garcel, ASTERS).

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 Montanvers : 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 (≈ 1700 m ; voir carte IGN 1:25000 3630OT Chamonix) 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 Montanvers (1913 m)

présente des conditions qui le rattachent 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 (voir carte IGN 1:25000 3630OT Chamonix) 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 beau 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-

gendre 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.

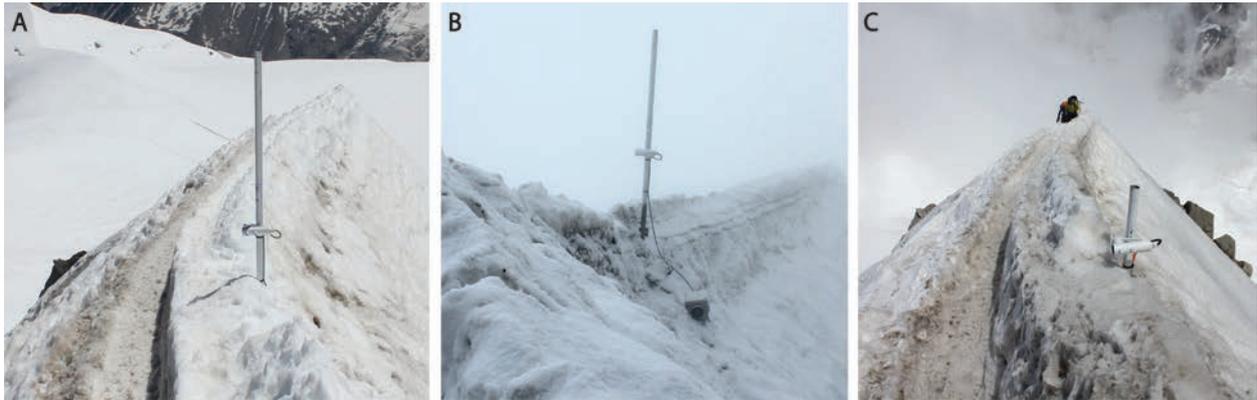


Figure 3 - Le capteur Pyro de l'Aiguille du Midi : (a) installation du capteur le 20 juin 2017 ; (b) le 25 juin, le niveau de l'arête avait perdu environ 60 cm et le poteau était susceptible de basculer ; la boîte était déneigée ; (c) le poteau et le capteur ont été réinstallés le 25 juin.

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 ; voir carte IGN 1:25000 3531ET St-Gervais) 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.

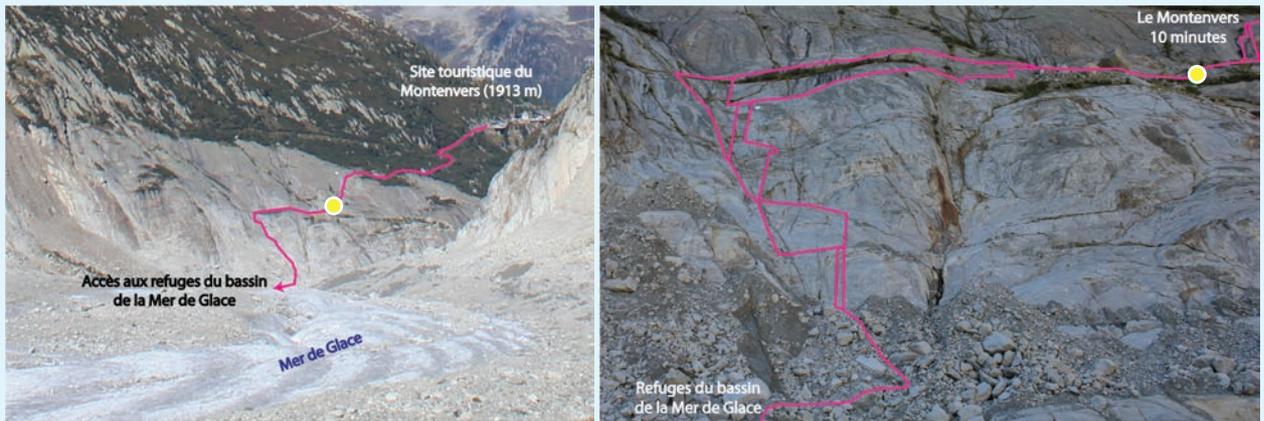
Pour ces deux capteurs, les erreurs de mesures sont donc directement liées au terrain et au mode de déplacement spécifique des alpinistes. Aussi semble-t-il difficile d’améliorer significativement les mesures.

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.

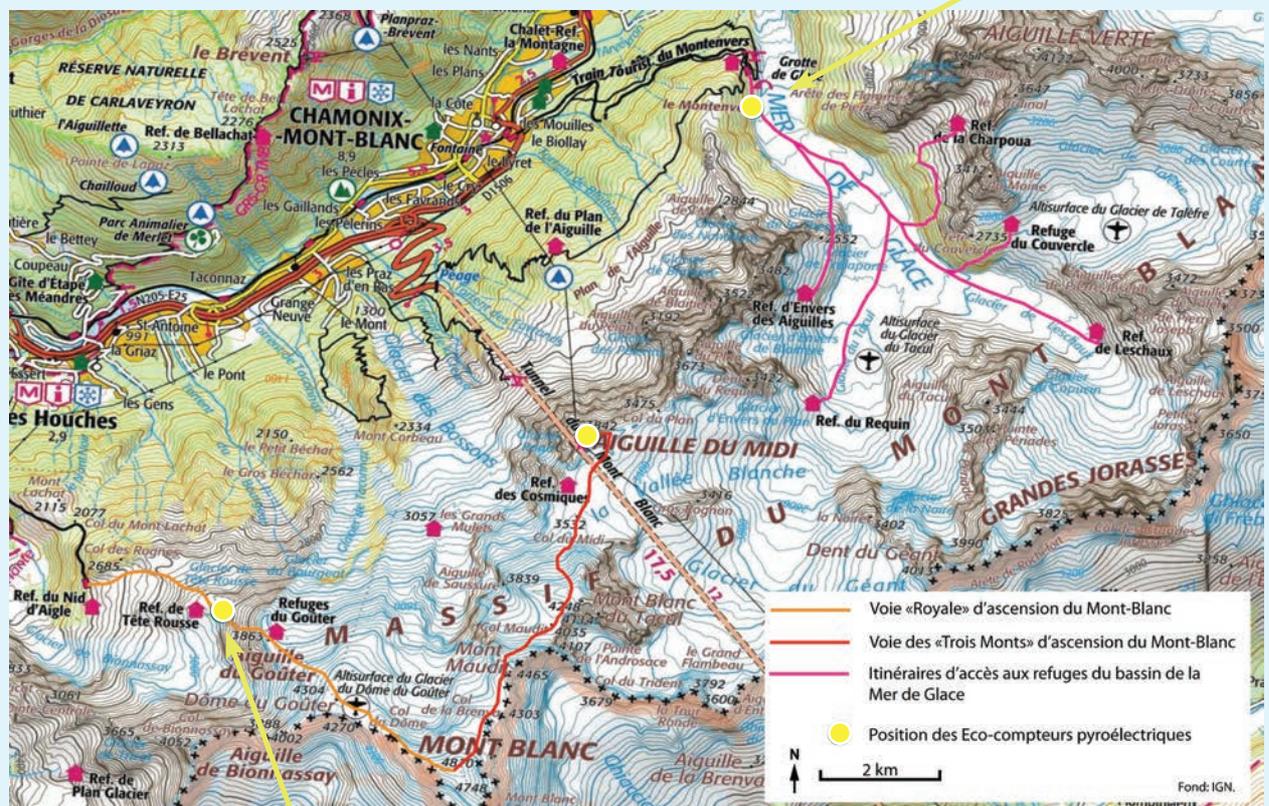
Capteur	Date	Temps de contre-comptage	Erreur	Erreur moyenne
Aiguille du Midi	30/06/2017	1h45	+22 %	-8 %
	13/07/2017	1h30	-36 %	
	22/07/2017	2h15	-10 %	
Mer de Glace	30/06/2017	2h30	+10 %	+27 %
	12/07/2017	2h15	+74 %	
	02/08/2017	3h00	+24 %	
Goûter	27/06/2017	2h00	+4 %	-4 %
	03/07/2017	1h45	-17 %	
	11/07/2017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

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 « 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 02 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 Eco-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.
- DELINE 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.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.
- WATSON A.E., COLE D.N., TURNER D.L., REYNOLDS P.S., 2000. Wilderness recreation use estimation: a handbook of methods and systems. USDA, General Technical Report RMRS-GTR-56, 208 p.
- ZEMP M., HOLGER F., GÄRTNER-ROER I., NUSSBAUMER S., HOELZLE M., PAUL F., HAEBERLI W., DENZINGER F., AHLSTRØM A.P., ANDERSON B., BAJRACHARYA S., BARONI C., BRAUN L.N., CÁCERES B.É., 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., SIGURDSSON 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.