

Risques naturels émergents en haute montagne

Actions conduites dans le cadre du projet ALCOTRA PrévRisk Haute Montagne

– Apports pour les décideurs et les pratiquants –



2018

Auteurs :

Ludovic Ravanel	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, France
Fabrizio Troilo	Fondation Montagne sûre, Courmayeur, Italie
Paolo Pogliotti	ARPA Vallée d'Aoste, Aoste, Italie
Luca Paro	ARPA Piémont, Turin, Italie
Umberto Morra di Cella	ARPA Vallée d'Aoste, Aoste, Italie
Pierre-Allain Duvillard	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, France
Elena Motta	Fondation Montagne sûre, Courmayeur, Italie

Avec les apports complémentaires de :

Philip Deline	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, France
Grégoire Guillet	<i>Idem</i>
Florence Magnin	Université d'Oslo, Norvège
Jacques Mourey	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, France
Christophe Ogier	<i>Idem</i>
Océane Vibert	La Chamoniarde, Chamonix, France

EDYTEM-CNRS : <http://edytem.univ-savoie.fr/>

FMs (*chef de file du projet*) : <http://www.fondazionemontagnasicura.org/fr/>

ARPA VdA : <http://www.arpa.vda.it/fr/>

ARPA Piémont : <http://www.arpa.piemonte.gov.it/>

Citation

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

Sommaire

Avant-propos.....	2
I. Réchauffement du permafrost et déstabilisation des versants de haute montagne.....	3
I.A. Quelques bases à propos du ciment des montagnes.....	3
I.B. Les principales actions du projet.....	4
I.C. Apports du projet du point de vue fondamental.....	12
I.D. Apports pour le gestionnaire.....	15
II. Risques glaciaires collectifs et individuels.....	18
I.A. Notions de glaciologie.....	18
I.B. Le cas du versant nord du Mont Blanc du Tacul.....	20
I.C. Le cas du glacier Whympet des Grandes Jorasses.....	21
I.D. Le cas de la déstabilisation du glacier de la Charpoua.....	23
I.E. Étude innovante sur les ponts de neige au-dessus des crevasses.....	25

Avant-propos

D'une durée de **20 mois**, entre février 2016 et octobre 2017, **le projet *PrévRisk Haute Montagne* a réuni 7 partenaires** italiens, français et suisse : la *Fondation Montagne sûre* (chef de file), les Agences Régionales pour la Protection de l'Environnement de la Vallée d'Aoste (ARPA VdA) et du Piémont (ARPA Piémont) et la commune de Valtournenche côté italien, l'association *La Chamoniarde* (Société de prévention et de secours en montagne de Chamonix) et le laboratoire EDYTEM-CNRS côté français, avec la participation du *Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin* (Crealp) pour la Suisse.

Premier projet dans le cadre de la Stratégie d'avenir de *l'Espace Mont Blanc*, *PrévRisk* a reposé sur la **nécessité de sensibiliser et d'informer populations et pratiquants sur les risques de la montagne dont ceux, émergents, liés aux changements climatiques**. En effet, ces changements modifient profondément les milieux glaciaires (retrait glaciaire) et périglaciaires (dégradation du permafrost) et impliquent de nouveaux processus « naturels » qui, dans une région aussi fréquentée que celle du Mont Blanc, engendrent des risques parfois élevés.

La présente synthèse de l'axe scientifique du projet (WP3 - *Actions phares et innovantes de connaissance et de gestion des risques émergents*) participe de l'objectif du projet d'**augmenter la résilience des communautés face aux risques émergents et spécifiques de la haute montagne**. Il s'est agi de développer des actions pour une meilleure connaissance de ces risques. Cette synthèse – très loin d'être exhaustive tant les activités du projet ont été nombreuses et fructueuses – répond donc à l'exigence d'information des usagers et des gestionnaires de la montagne, ainsi que du grand public, pour mieux comprendre et appréhender les risques spécifiques des hautes altitudes.

I. Réchauffement du permafrost et déstabilisation des versants de haute montagne

I.A. Quelques bases à propos du ciment des montagnes

Le permafrost (ou pergélisol) est un état thermique ; il correspond à tous les terrains gelés durablement. Dans les Alpes, il est présent presque partout au-dessus de 3000 m d'altitude. Il joue un rôle fondamental dans la stabilité des versants rocheux, qu'il s'agisse de parois rocheuses raides ou de formations détritiques (éboulis, moraines, glacier rocheux – GR ci-après). Dans les zones sujettes au permafrost, l'eau issue des précipitations liquides ou de la fusion nivale qui s'infiltré dans les fractures de la roche ou entre les blocs des dépôts détritiques gèle. La glace ainsi constituée agit comme un ciment qui apparaît à l'occasion de travaux ou de la déstabilisation d'un versant (Fig. 1).

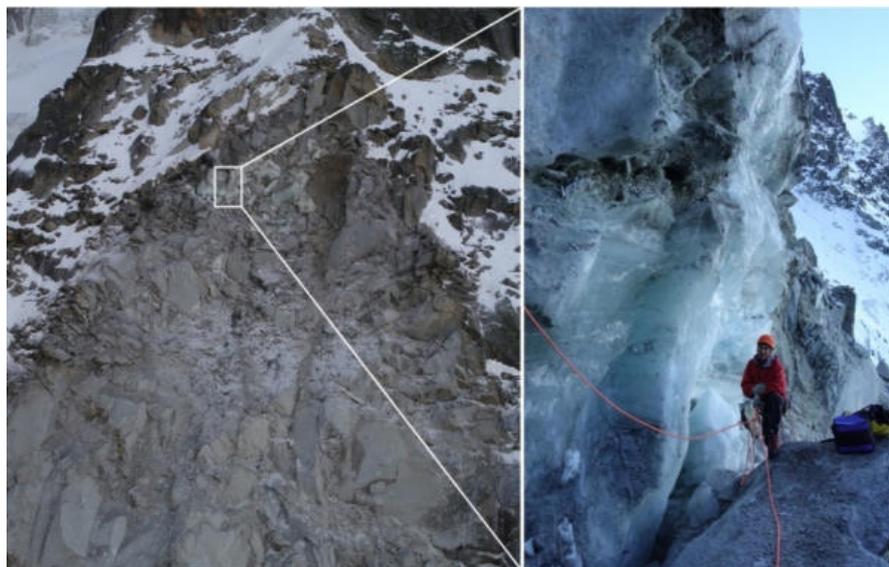


Figure 1 – Dans la partie haute de la cicatrice de l'éroulement de 44 000 m³ qui a affecté l'éperon Tournier (face nord de l'Aiguille du Midi, massif du Mont Blanc, Fr) fin septembre 2017, la paroi est couverte de glace sur une quinzaine de mètres de haut. Cette glace assurait probablement la cohésion du versant jusque-là.

Le permafrost est souvent absent en surface car il se développe et se maintient seulement au-delà d'une certaine profondeur (quelques mètres en général). En effet, les premiers mètres en surface qui dégèlent chaque été correspondent à la « couche active » où sont mesurées des amplitudes thermiques fortes qui tendent à désagréger la roche. À la base de la couche active, la glace éventuellement présente peut atteindre des températures proches de 0°C, passant d'un ciment à un lubrifiant propice à la déstabilisation du versant.

Au cours des dernières décennies, le changement climatique a conduit à une augmentation des températures moyennes globales. Dans les régions de haute latitude et dans les grandes chaînes de montagne comme l'Himalaya ou les Alpes, ce réchauffement est plus rapide et intense qu'à l'échelle globale. Par sa nature, le permafrost est un élément de la cryosphère extrêmement sensible à la hausse des températures. Pendant que dans les régions polaires la dégradation (réchauffement) du permafrost est à l'origine de fortes émissions de gaz à effet de serre (rétroaction positive), cette dégradation en montagne augmente la fréquence des phénomènes d'instabilité de versants par ailleurs souvent pourvus d'infrastructures (pylônes, bâtiments, systèmes paravalanches). Les conséquences de ces instabilités ne se limitent pas aux zones lointaines et peu fréquentées mais peuvent se propager sur de longues distances jusqu'à atteindre des zones densément peuplées comme ce fut le cas dans le Val Bondo (Suisse) en août 2017 suite à un éroulement rocheux de 3,1 millions de m³ survenu sur un versant du Piz Cengalo (Fig. 2).

La compréhension des instabilités de versant liées à la dégradation du permafrost reste encore aujourd'hui parcellaire. *PrévRisk* a permis de mener différentes actions levant le voile sur certains processus en jeu afin de mieux prévenir les risques associés.



Figure 2 – Une avalanche rocheuse détachée du Piz Cengalo (3369 m) en août 2017, dans un secteur à permafrost, a produit une coulée boueuse qui a dévasté une partie d'un village situé 6 km à l'aval (Val Bregaglia, CH).

I.B. Les principales actions du projet

- Mutualisation des données

L'étude de la distribution et des caractéristiques du permafrost dans des secteurs topographiquement aussi complexes que les versants alpins est une activité scientifique récente et délicate. Elle demande d'un côté l'instrumentation de sites d'altitude avec la mesure directe des températures du sous-sol et, de l'autre, l'utilisation de modèles mathématiques capables de reproduire l'évolution de ces températures dans l'espace et le temps à partir de données météorologiques comme la température de l'air, la radiation solaire ou les précipitations. Les données de terrain sont donc fondamentales puisqu'elles permettent de suivre l'état du permafrost ainsi que de valider et d'améliorer les modèles mathématiques par la comparaison entre températures observées et modélisées.

L'instrumentation et la maintenance des sites de mesure ont toutefois un coût économique élevé et supposent une logistique souvent complexe. Les données disponibles sont dès lors encore assez peu nombreuses et dispersées entre les différentes équipes de recherche. Il devient fondamental de partager et rendre publique ces données. On comprend ainsi aisément l'intérêt de projets transfrontaliers comme *PrévRisk*. Ils représentent, pour les partenaires impliqués (*Fondation Montagne sûre*, ARPA Vallée d'Aoste, ARPA Piémont, EDYTEM-CNRS), une occasion précieuse de partage de données, mais aussi d'expériences, de compétences et de ressources afin d'améliorer la compréhension des phénomènes liés au permafrost.

- Recensement des écroulements dans le massif du Mont Blanc

Démontrer l'hypothèse selon laquelle la dégradation du permafrost entraîne une augmentation de la fréquence et du volume des écroulements rocheux ne peut pas s'envisager à partir de l'étude de quelques événements distincts : il est indispensable de raisonner sur un large corpus de données. Sur le versant français du massif du Mont Blanc, de premières observations ont

été réalisées par des guides de haute montagne en 2005 mais le nombre limité de données interdisait toute analyse statistique robuste. Entre 2006 et 2007, plusieurs dizaines de guides, gardiens de refuge et alpinistes ont été formés par EDYTEM-CNRS au recensement d'éroulements et un réseau d'observateurs est devenu opérationnel. Côté italien, le réseau a été mis en place en collaboration avec la *Fondation Montagne sûre*. Le réseau est actif sur la partie centrale du massif, soit près de 60 % de celui-ci. Utilisant d'abord des fiches de signalement, les informations issues du réseau sont maintenant transmises directement par communication orale, téléphone ou mail, ou encore *via* l'application *Alp-Risk* dont *PrévRisk* a permis le renouvellement en construisant *Obs-Alp* (www.obsalp.com; Fig. 3) en collaboration avec *La Chamoniarde*. Réactivé chaque année, le réseau garantit une très bonne représentativité des données. Afin d'obtenir une quasi complétude, les données sont vérifiées et complétées chaque automne à l'occasion de campagnes de terrain.

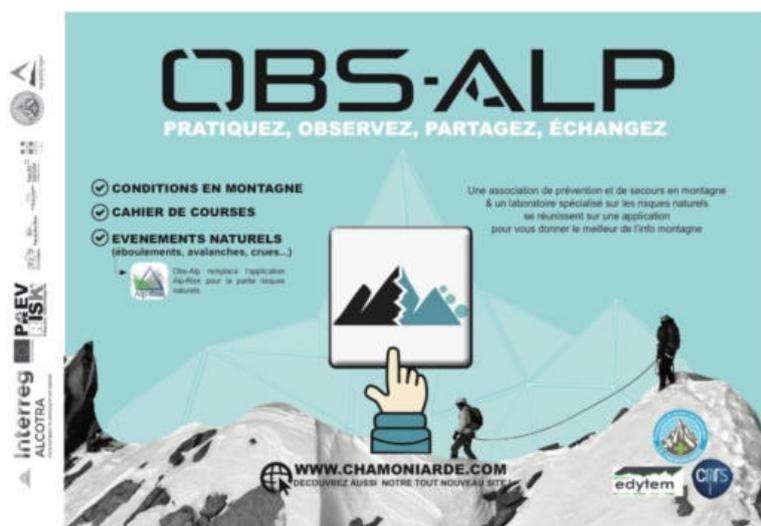


Figure 3 – L'application Obs-Alp, qui remplace Alp-Risk, intègre trois modules destinés aux alpinistes dont un permet le signalement de phénomènes dangereux en montagne comme les éroulements rocheux.

Les données sont ensuite analysées sous Système d'Information Géographique (SIG) afin de connaître les altitudes de déclenchement, la topographie des secteurs déstabilisés, la température modélisée de surface des parois, etc.

Focus – L'Alpine Permafrost Database (APD)

L'APD (www.alpine-permafrostdata.eu) est une plateforme numérique de collecte et de partage de témoignages relatifs à la présence/absence de permafrost dans les Alpes, les « *Permafrost Evidences* ». Dans la base des données gérée par ARPA Vallée d'Aoste, il est possible d'insérer différents types d'évidences (mesures directes de température, mesures géophysiques, observations de glace enfouie ou présente au niveau de cicatrices d'éroulements, mesures de vitesse superficielle de GR), ce qu'ont fait les partenaires impliqués (ARPA Vallée d'Aoste, ARPA Piémont, *Fondation Montagne sûre* et EDYTEM-CNRS). Chaque évidence dispose de métadonnées qui détaillent la localisation de l'évidence (coordonnées géographiques), son contexte géologique et géomorphologique, ainsi que le niveau de fiabilité des informations.

La base des données est née avec le projet européen *PermaNET* (programme *Alpine Space* 2007/2013). Elle contient actuellement 500 évidences et plus de 3000 GR distribués sur l'ensemble de la chaîne alpine. L'APD représente un outil accessible à tous les techniciens et gestionnaires qui ont un intérêt à s'informer sur les risques liés au permafrost, à identifier les sites d'étude et les équipes de recherche gérant les sites instrumentés. Dans le cadre du projet *PrévRisk*, 40 évidences ont été mises à jour et 15 nouveaux points de mesure dans l'espace de coopération ont été ajoutés.

- Suivi de sites à risque par topographie à haute résolution

Les techniques modernes d'acquisition de données topographiques à haute résolution comme le balayage laser terrestre (LiDAR pour *Light Detection and Ranging*) ou la photogrammétrie par drone permettent d'acquérir rapidement (et à assez bas coût pour la photogrammétrie) des modèles 3D extrêmement précis et détaillés d'une surface topographique. Sur ces Modèles Numériques du Terrain (MNT), il est possible d'effectuer des mesures de distance, de pente et de volume grâce à des logiciels spécialisés.

L'un des avantages de ces techniques est de permettre l'étude de zones inaccessibles et/ou dangereuses sans que les équipes aient besoin d'y accéder directement. Une fois acquis, les matériels peuvent être utilisés à relativement bas coût, permettant de répéter périodiquement les campagnes en vue d'effectuer une véritable surveillance des changements de surface. Dans le cas de mouvements de versant, le second avantage de ces instruments par rapport aux mesures ponctuelles plus classiques comme le GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ou le théodolite est l'échelle spatiale d'acquisition. L'analyse d'une succession temporelle de MNT permet de déterminer et localiser avec précision les secteurs les plus actifs et, par suite, de mesurer très exactement les volumes impliqués ainsi que les vitesses de déformation.

Dans le cadre de *PrévRisk* (Fig. 4), des campagnes de photogrammétrie par drone et de levés LiDAR ont été répétées sur différents types de sites par les partenaires impliqués dans les travaux sur le permafrost. Ces campagnes ont souligné la grande fiabilité/polyvalence de ces instruments en milieux difficiles comme la haute montagne, et confirmé la qualité élevée des produits obtenus. Pour la photogrammétrie, la qualité des résultats est influencée par le niveau de préparation des campagnes de mesures et les procédures de contrôle et de traitement des données en phase de restitution. Il est fondamental que ces campagnes soient effectuées par des personnels spécialisés et disposant d'une grande expérience de ces milieux.



Matériel	<i>Optech</i> ILRIS 3D (modèle 2005)	<i>senseFly</i> Ebee	<i>DJI</i> Phantom 4
Type	LiDAR terrestre	drone photo (aile)	drone photo (quadricoptère)
Poids	14 kg + pied, rotule...	1.1 kg + télécommande	1.8 kg + télécommande
Temps de vol	/	1 h	25 min
Précision	4-7 mm à 100 m	5 cm	5-10 cm
Utilisation privilégiée	Modélisation 3D de parois	Modélisation 3D de terrains peu raides	Observation (y compris en conditions topographiques et aérologiques difficiles)

Figure 4 – Comparaison des trois systèmes d'acquisition de données 3D utilisés dans le cadre de *PrévRisk*.

Focus – Photogrammétrie par drone

Plusieurs campagnes de photogrammétrie par drone ont été réalisées dans le cadre du projet sur 5 sites valdôtains (GR et glacier) ainsi que sur 2 sites-test piémontais. En Vallée d'Aoste, la méthode a permis le suivi des vitesses de surface et des changements morphologiques des (i) GR de Gran Sometta (03 juillet, 2 août et 24 août 2016 ; 03 octobre 2017), (ii) GR de la Pointe d'Arpisson (26 juillet, 04 septembre 2017), et (iii) GR du Col d'Olen (28 septembre 2017). Un MNT de la partie couverte de débris rocheux du glacier de la Brenva (03 janvier 2017) a également été produit tandis que la possibilité d'acquisition de données à très haute altitude pour le suivi de la dynamique glaciaire du glacier Timorion par comparaison de la surface modélisée le 1^{er} juin et 22 septembre 2017 a été vérifiée. Les acquisitions effectuées en Piémont (GR Vei del Bouc le 22 août 2017 et GR Granero le 17 octobre 2017) ont alimenté une analyse morphologique et permis d'envisager l'évolution des versants concernés.

Afin de mieux évaluer les précisions qui peuvent être obtenues avec le drone *senseFly* eBee RTK tout en réduisant le nombre de points de calage au sol, une étude spécifique a été réalisée, publiée dans la revue *Remote Sensing* (DOI: 10.3390/rs9020172).

Les activités réalisées dans le cadre du projet ont permis d'établir une méthodologie pour l'analyse des versants de haute altitude. En particulier, des vitesses de déplacement en surface ont été déterminées par comparaison manuelle d'ortho-images à haute résolution ou par SGM (*Semi Global Matching algorithm*) appliqué à des MNT, tout comme des évolutions dans le déplacement de masses détritiques périglaciaires. Les 20 mois du projet ont permis de passer d'une phase d'expérimentation à des méthodes innovantes de suivi des phénomènes dangereux liés au permafrost.

- Caractérisation géophysique de sites à risque

Parmi toutes les méthodes géophysiques, c'est la méthode électrique de courant-direct qui est la plus utilisée dans les recherches sur le permafrost. Du fait d'une augmentation significative de la résistivité électrique survenant au point de congélation (0°C), la méthode de la tomographie de résistivité électrique (ERT) est particulièrement adaptée pour détecter, localiser et caractériser l'état et l'évolution des sols/roches gelés.

Sur le terrain, un courant électrique est injecté au moyen d'une paire d'électrodes dans le sol. Le champ électrique qui en résulte est fonction de la distribution de la résistivité électrique dans le sol, mesurée à l'aide d'un autre couple d'électrodes. Les mesures sont répétées à la faveur d'une ligne d'électrodes préalablement installée. Une procédure de traitement et d'interprétation – l'inversion – permet de générer une image selon les hétérogénéités plus ou moins résistantes du sol qui ont influencé la répartition du champ électrique.

Dans *PrévRisk*, la méthode a été utilisée pour caractériser le permafrost de plusieurs sites à risque (Fig. 5) : l'arête inférieure des Cosmiques (3613 m, massif du Mont-Blanc, présence d'un refuge), l'Aiguille des Grands-Montets (3295 m, massif du Mont-Blanc, présence d'un téléphérique), et le GR déstabilisé de la Pointe d'Arpisson (2750 m, val de Cogne, Italie). Certaines campagnes ont réuni plusieurs partenaires afin de mutualiser les compétences. Les deux premiers sites correspondent à des contextes de paroi rocheuse. En préalable à leur analyse géophysique, une étude en laboratoire a permis d'établir le lien entre la résistivité de la roche et sa température. Ainsi, les iso-valeurs de l'ERT peuvent-être directement traduite en température. Sur les deux sites, il existe une très forte dissymétrie entre la face nord froide et la face sud où le permafrost est très dégradé

voire absent. Une mesure réalisée en 2012 dans la face nord des Grands Montets a également été répétée en septembre 2016 afin d'apprécier les modifications de distribution du permafrost entre ces deux dates. Ces acquisitions ont en outre aidé à la validation des modèles statistiques de la distribution actuelle du permafrost dans le massif du Mont Blanc. Le GR de la Pointe d'Arpisson est quant à lui très actif (mouvement d'environ 11 m de la partie frontale du GR entre 2014 et 2016) et a connu une déstabilisation de son front durant l'été 2016. Ce GR est composé de deux générations de lobe se superposant. Les mesures ERT ont permis de montrer que la zone frontale inférieure instable est pauvre en glace tandis que le front supérieur stable est au contraire encore riche en glace.

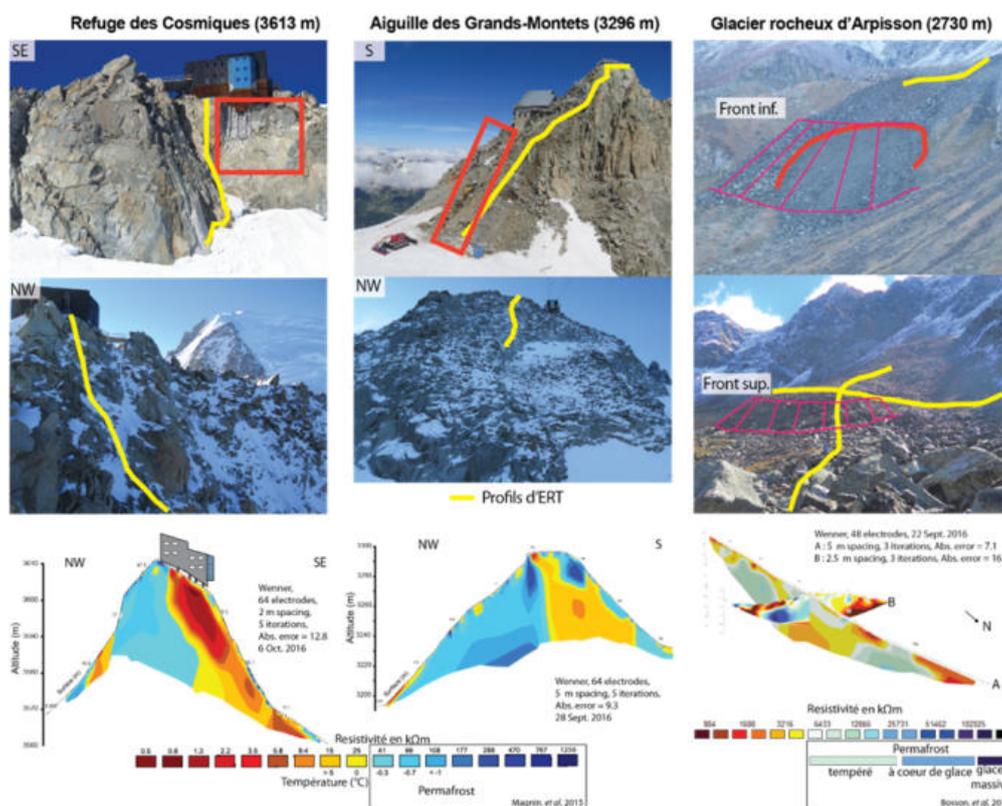


Figure 5 – Localisation des profils de tomographie électrique sur l'arête inf. des Cosmiques (Chamonix, Fr), à l'Aiguille des Grands Montets (Chamonix, Fr) et au GR de la Pointe d'Arpisson (Cogne, It). Les secteurs instables sont encadrés en rouge.

- Développement de l'instrumentation de sites sensibles

En contexte de permafrost, le suivi de l'évolution de la température des parois rocheuses en surface et en profondeur est crucial pour évaluer la stabilité et donc la sécurité des infrastructures qui y sont construites (refuges, gare de téléphériques, pylônes, etc.). Mesurer l'ouverture/fermeture en continu des fractures de la roche apporte des connaissances complémentaires sur les liens complexes qui existent entre le régime cinématique des fractures et la température. En outre, avec une transmission des données en temps réel, ces dispositifs peuvent intégrer un système d'alerte précoce en cas d'instabilité.

Le réseau historique de capteurs pour le suivi du permafrost de parois dans le massif du Mont Blanc, concentré originellement sur l'Aiguille du Midi (3842 m) et quelques autres sommets et développé par plusieurs partenaires du projet (ARPA Vallée d'Aoste, *Fondation Montagne sûre* et EDYTEM-CNRS) a, grâce à *PrévRisk*, été densifié et élargi à trois nouveaux sites sensibles : (i) l'Aiguille des Grands Montets autour de la gare d'arrivée du téléphérique, (ii) l'arête inférieure des Cosmiques

et son refuge (3613 m), et (iii) l'Aiguille du Goûter, son refuge (3815 m, S^t Gervais) et son couloir d'accès. Les différents sites instrumentés sont affectés par des processus gravitaires plus ou moins récurrents (chutes de pierres et écroulements) qui ont déjà affecté les fondations et la stabilité de certaines infrastructures. Le refuge des Cosmiques a par exemple été endommagé par un écroulement de 600 m³ survenu en 1998 tandis que l'escalier d'accès au glacier du Rognon depuis la gare des Grands Montets a subi un affaissement important ces dernières années (Fig. 6).

L'instrumentation thermique mise en place dans le cadre du projet (Fig. 6) apportera des connaissances relatives à (i) la distribution du permafrost (attester localement la présence/absence de permafrost, faciliter et vérifier l'interprétation des données géophysiques, étudier les propriétés thermiques de la roche), et (ii) l'identification des impacts éventuels des infrastructures sur la température des terrains supports (effet refroidissant ou réchauffant). Couplée à l'instrumentation cinématique et au suivi des dynamiques géomorphologiques par drone ou LiDAR, cette méthode permet également de préciser les processus en jeu dans les déstabilisations.

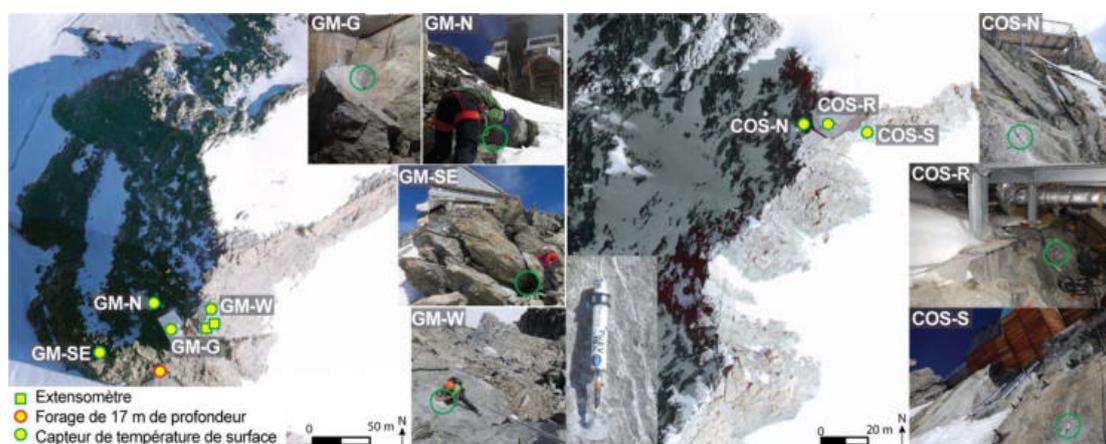


Figure 6 – Instrumentation thermique et cinématique de l'Aiguille des Grands Montets et de l'arête inférieure des Cosmiques (massif du Mont Blanc, Fr).

Un site particulier de suivi est celui de l'Aiguille du Goûter (3863 m). Outre le refuge éponyme qui donne accès au sommet du Mont Blanc, son Grand Couloir très accidentogène (3 décès et 8 blessés par saison estivale, en moyenne) situé sur l'itinéraire d'accès au refuge a fait l'objet d'une instrumentation à visée pluridisciplinaire (Fig. 7) : (i) 4 capteurs de températures installés en juillet 2016 à 10 cm de profondeur dans la roche à 3345, 3460, 3665 et 3830 m d'altitude pour suivre l'état thermique de surface, (ii) un appareil photo automatique installé en juin 2016 – couplées à un modèle topographique 3D acquis par LiDAR, les photos permettent d'étudier l'évolution de la couverture neigeuse et son contrôle sur le permafrost et les chutes de pierres –, (iii) une station météo disponible sur le glacier de Tête Rousse, et (iv) un capteur de fréquentation installé en juin 2017 au pied du couloir pour quantifier (nombre de passages) et caractériser (sens de passage) la fréquentation de ce secteur par les alpinistes pour une meilleure compréhension de leurs vulnérabilités. Les premiers résultats indiquent qu'il existe un couplage entre les périodes où le couloir n'est pas enneigé et les périodes lors desquelles les chutes de pierres sont les plus fréquentes. Un des névés qui dure le plus longtemps est celui au niveau de la traversée du couloir, ce qui la facilite. La fréquentation du couloir semble uniquement conditionnée par la météo et non par les périodes lors desquelles le couloir est en bonnes conditions. Enfin, les décès ne se produisent pas nécessairement lorsque les chutes de pierres sont les plus fréquentes.

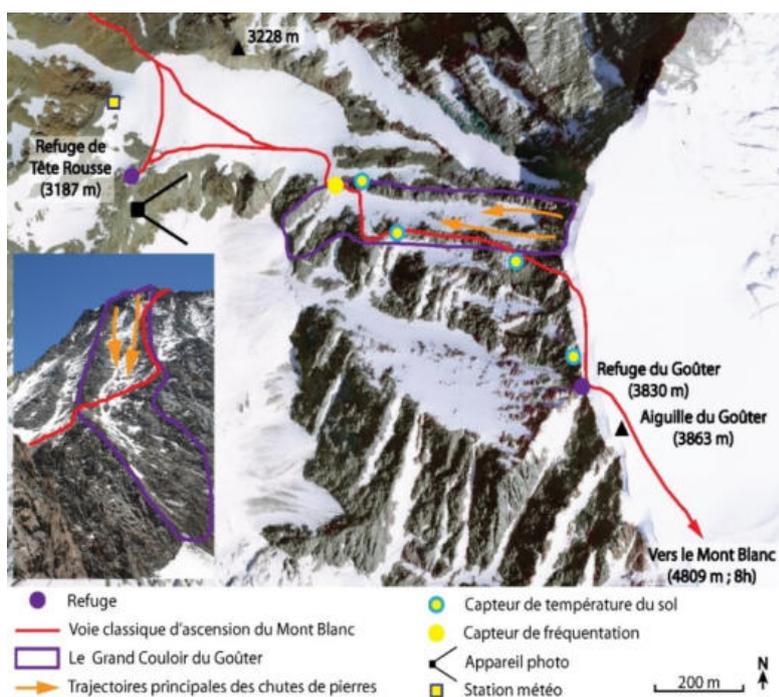


Figure 7 – Le dispositif pluridisciplinaire de suivi du Grand couloir du Goûter, sur la voie classique d'ascension du Mont Blanc (S^t Gervais, Fr).

Au cours du projet est par ailleurs apparu le problème du rôle des couvertures glacio-nivales et des glaciers suspendus sur la distribution du permafrost, dans le cadre plus large de la rétraction des couvertures glacio-nivales et de l'instabilité des glaciers suspendus face au réchauffement climatique. Le projet a dès lors intégré une action d'instrumentation thermique de trois appareils glaciaires du massif du Mont Blanc : faces nord de la Tour Ronde, du Mont Blanc du Tacul et de l'Aiguille du Midi (Fig. 8). Les forages, de 1 à 16 m de profondeur, ont été réalisés à l'aide d'une sonde à vapeur. Ils ont ensuite été équipés de lignes de capteurs de température. Ces forages ont donné une première série de données unique au monde.



Figure 8 – Mise en place d'une ligne de capteurs de température dans l'un des glaciers suspendus de l'Aiguille du Midi (Chamonix, Fr). Un capteur de température implanté dans le rocher complète le dispositif.

Focus – Instrumenter un site : l'exemple de Rochemelon

Le Mont Rochemelon (3538 m) domine les vallées de Susa et Cenischia (province de Turin, Italie). En 2006-2007, une partie de l'arête sud vers 3200 m d'altitude a été affectée par un glissement rocheux évoluant en écoulement/coulée de débris. En l'absence de dommages, l'attention portée à ce phénomène par ARPA Piémont est liée aux conséquences potentielles que pourrait avoir un mouvement plus important du versant suggéré par les témoignages actuels d'instabilité.

Un réseau de surveillance géotechnique composé d'extensomètres et d'antennes GPS a été installé au cours de l'automne 2007, complété en 2013 par des capteurs de température de la roche et dans des fractures, les processus à l'œuvre étant éventuellement liés à la dégradation du permafrost.

Afin d'améliorer le modèle interprétatif déformation/température, *PrévRisk* a permis l'installation (<https://youtu.be/yGRI5InYKMI>) en octobre 2016 d'une nouvelle station de surveillance multi-paramètres intégrant une colonne DMS (*Differential Monitoring of Stability*; CSG s.r.l.) dans un forage vertical de 30 m de profondeur situé à 3150 m d'altitude (Fig. 9). La colonne intègre 30 capteurs mesurant la température et la déformation de la roche tous les mètres, deux capteurs accélérométriques pour la mesure des vibrations de la roche et un piézomètre pour mesurer les pressions hydrauliques dans le forage.

Le système permet ainsi de surveiller automatiquement, en continu et en temps réel, le comportement géotechnique du milieu. Une attention particulière a été accordée à la surveillance thermique, en utilisant des capteurs de température PT1000 d'une grande précision.

Au cours de la première année de surveillance (oct. 2016 - oct. 2017), aucune déformation significative de la colonne n'a été observée et aucun dépassement du seuil accélérométrique n'a été identifié. Les températures tendent à montrer l'absence de permafrost. Le site a été présenté aux partenaires impliqués dans l'étude du permafrost à l'occasion d'une journée commune en octobre 2017.



Figure 9 – Installation d'une colonne multi-paramètre DMS au Mont Rochemelon (Piémont, It). À gauche : forage destructif à air comprimé de 30 m de profondeur. Au centre : insertion de la colonne DMS par hélicoptère. À droite : boîtier métallique abritant les appareils de surface. Le pylône soutient le système d'alimentation photovoltaïque et les antennes de transmission des données.

I.C. Apports du projet du point de vue fondamental

- Distribution du permafrost de paroi dans le massif du Mont Blanc

Un modèle statistico-empirique, élaboré pour cartographier le permafrost à l'échelle des Alpes, a été appliqué au massif du Mont Blanc, en intégrant des variables d'entrée locales à haute résolution spatiale. Une cartographie du permafrost des parois du massif a ainsi été proposée à partir d'un indice permettant d'estimer sa présence. Il couvrirait de 45 à 79 % des 86 km² de parois $\geq 40^\circ$ du massif ; il pourrait être présent sur quelques secteurs structurellement favorables (fracturation importante) dès 1900 m d'altitude en face nord et 2400 m en face sud. Sa présence serait plus continue à partir de 2600 m en face nord et 3000 m en face sud, mais il ne couvrirait la totalité des parois qu'à partir de 3600 m, quelle que soit l'exposition (Fig. 10). Localement, l'interprétation de la carte du permafrost nécessite de tenir également compte de la fracturation et de la présence de neige, non intégrée ici. Les mesures de température en parois ainsi que les mesures géophysiques mises en œuvre dans le cadre de *PrévRisk* ont complété la validation du modèle. Cette validation est indispensable pour modéliser l'évolution future du permafrost comme cela a été fait dans le projet pour trois sommets du massif du Mont Blanc (voir plus bas).

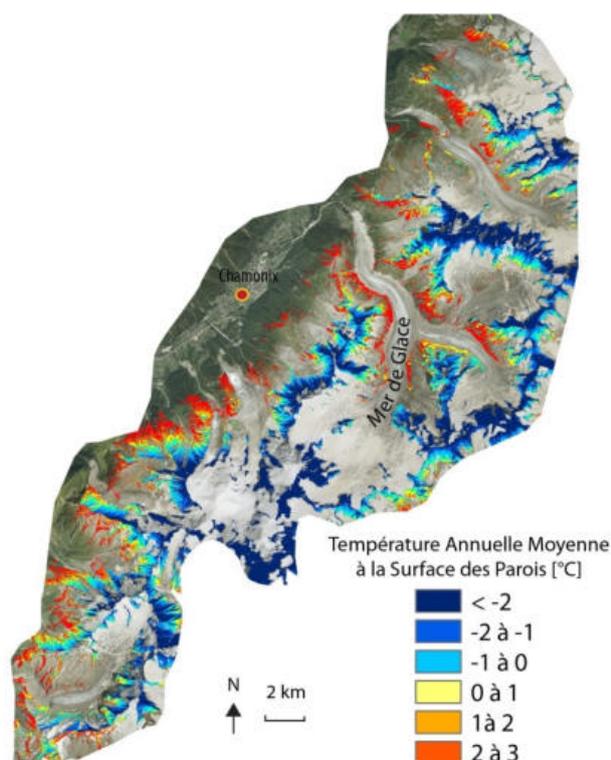


Figure 10 – Distribution du permafrost du massif du Mont Blanc. L'exemple du versant français.

- Evolution de la surface des couvertures glacio-nivales

Milieu de progression très fréquenté par les alpinistes, les couvertures glacio-nivales ont un rôle quasiment inconnu sur le permafrost. L'analyse des mesures effectuées dans le cadre de *PrévRisk* devraient apporter des éléments de réponse. L'évolution de leur surface a quant à elle été évaluée grâce à un outil de monoplottage spécialement développé et basé sur des statistiques bayésiennes et des algorithmes *Markov Chain Monte Carlo*. Combinant l'utilisation d'un MNT et de photographies couvrant une période de 170 ans, l'évolution de trois couvertures glacio-nivales a été reconstituée (Fig. 11) : face nord de la Tour Ronde (3792 m), Linceul aux Grandes Jorasses (4208 m) et Triangle du Mont Blanc du Tacul (4028 m). Les résultats indiquent différentes périodes de croissance/retrait au cours du XX^{ème} siècle. La première période de retrait s'est produite durant les années 1940-1950, suivie par un accroissement jusque dans les années 1980. Depuis lors, les couvertures montrent un retrait généralisé, induisant une difficulté (pentes plus raides, absence de neige recouvrant la glace) et une dangerosité accrue des itinéraires pour les alpinistes.

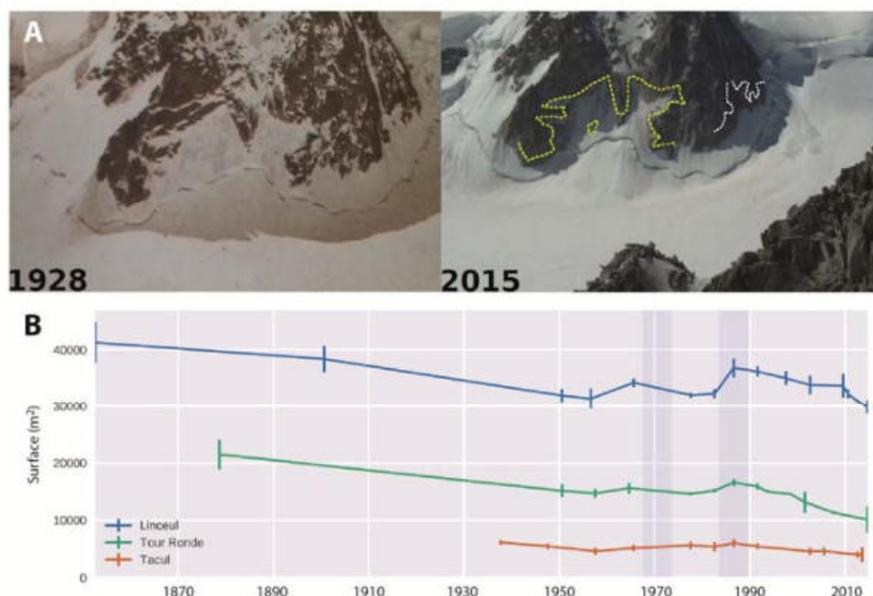


Figure 11 – Evolution de la surface des couvertures glacio-nivales des faces nord. A : Triangle du Mont Blanc du Tacul (Fr). B : Évolution de trois couvertures glacio-nivales au cours du XX^{ème} siècle.

- Analyse de l'APD

Avec *PrévRisk*, les mesures de température de 12 sites de suivi du permafrost situés en Piémont, Vallée d'Aoste et Haute Savoie (Fig. 12) ont été mises à jour et partagées. Parmi les évidences de permafrost qu'il est possible d'insérer dans l'APD, les mesures de température sont les plus importantes car elles représentent une preuve directe de la présence/absence de permafrost tandis que ce paramètre peut être suivi dans le temps.

L'analyse ici présentée n'a pas vocation à fournir un tableau exhaustif de l'état et des caractéristiques du permafrost dans la zone de coopération mais de présenter l'état des températures du permafrost dans différents secteurs d'étude. L'échantillon (Tab. 1) comprend des mesures réalisées en paroi, sur versant, sur plateau, sur substratum rocheux, dans une gamme d'altitudes d'environ 1000 m de dénivellation. Certains points de mesure sont distants de plus de 180 km. Il est toutefois possible de dresser un premier bilan.

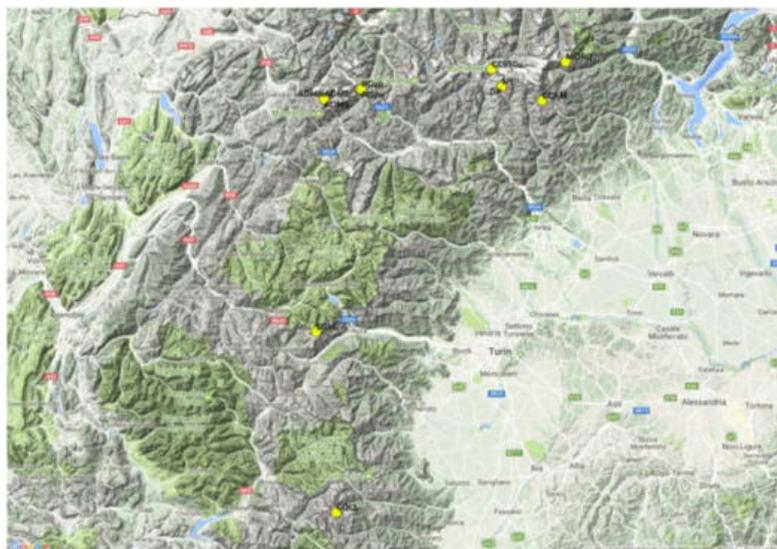


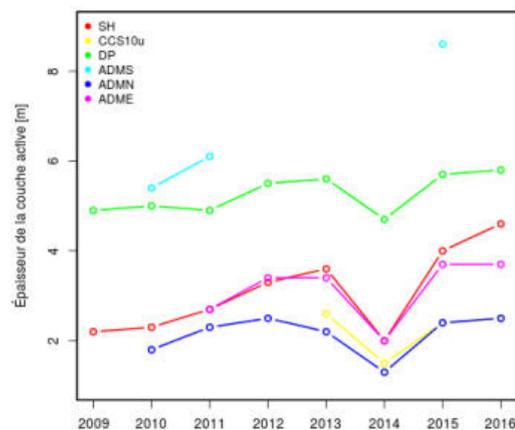
Figure 12 – Localisation des forages de suivi du permafrost mis à jour à l'occasion de *PrévRisk*.

Nom	Acronyme	Altitude (m)	Pente (°)	Exposition (°N)	Type de surface	Morphologie
Cabane Carrel	CCS10u	3800	26	224	Substratum	Arête
Aiguille du Midi Sud	ADMS	3753	55	135	Substratum	Pointe
Aiguille du Midi Est	ADME	3745	65	50	Substratum	Pointe
Aiguille du Midi Nord	ADMN	3738	90	345	Substratum	Pointe
Cime Bianche SH	SH	3100	5	270	Substr./Débris	Plateau
Cime Bianche DP	DP	3100	0	0	Substr./Débris	Plateau
Petit Grapillon Up	Pgup	3047	5	200	Substratum	Pente
Corno del Camoscio	CCAM	3020	25	10	Substratum	Pente
Petit Grapillon	Pgdw	3000	10	200	Substratum	Pente
Col Somellier	SOM	2970	25	240	Substratum	Plateau
Monte Moro	MORO	2870	25	290	Substratum	Plateau
La Colletta	COLL	2850	5	355	Débris grossiers	Arête

Tableau 1. Caractéristiques des sites de forage en contexte de permafrost.

Il est possible d'insérer dans l'APD, pour toutes les années d'observation, la température moyenne annuelle, minimale et maximale enregistrée par chaque capteur de température présent dans un forage. À partir de ces données, l'épaisseur de la couche active peut être déterminée ainsi que son évolution dans le temps (Fig. 13). Ces épaisseurs changent en fonction du contexte morpho-climatique ; elles sont comprises entre 2 et 8 m. Par ailleurs, on note une tendance nette à l'augmentation de la profondeur de la couche active en lien avec le réchauffement du climat. L'été froid 2014 correspond au minimum de la série.

Figure 13 – Évolution de l'épaisseur de la couche active de plusieurs sites mis à jour.



En descendant au-delà de la couche active, à 10 m de profondeur (profondeur fréquemment atteinte par les forages de l'échantillon analysé), les températures sont également très différentes d'un site à l'autre (Fig. 14), depuis les -4°C du versant nord de l'Aiguille du Midi (ADM N) jusqu'aux 2°C du Petit Grapillon (PGdw). Pour comprendre à quel point les caractéristiques des sites peuvent influencer sur les températures en profondeur, la série PGdw peut être comparée à DP : les deux sites sont situés sur des versants peu inclinés, à la même altitude (Tab. 1). Toutefois, le premier ne dispose pas de permafrost contrairement au second. Pour PGdw, la neige qui s'accumule pendant l'hiver protège le substrat rocheux du froid. Le site DP est quant à lui très venteux et la couverture nivale est souvent complètement érodée par le vent, exposant le substratum aux températures froides de l'hiver. En outre, PGdw est caractérisé par un substratum rocheux très compact (roches moutonnées) qui conduit la chaleur. Pour DP, la roche est par contre très fracturée, ce qui favorise la rétention de froid grâce aux circulations d'eau et d'air dans les fractures et entre les blocs.

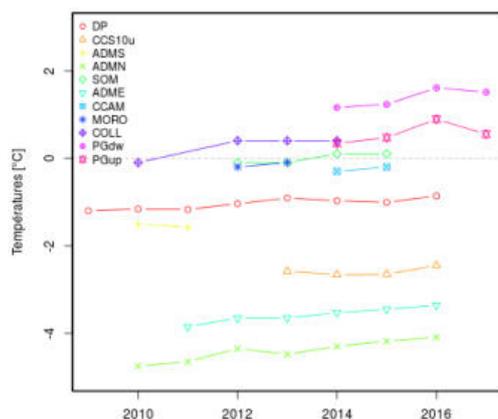


Figure 14 – Evolution des températures à 10 m de profondeur sur différents sites de forage.

En analysant les tendances des températures sur le long terme, le réchauffement est net. La Fig. 15 présente l'intensité de cette tendance pour quatre forages. La chaleur de la surface tend en effet à pénétrer en profondeur.

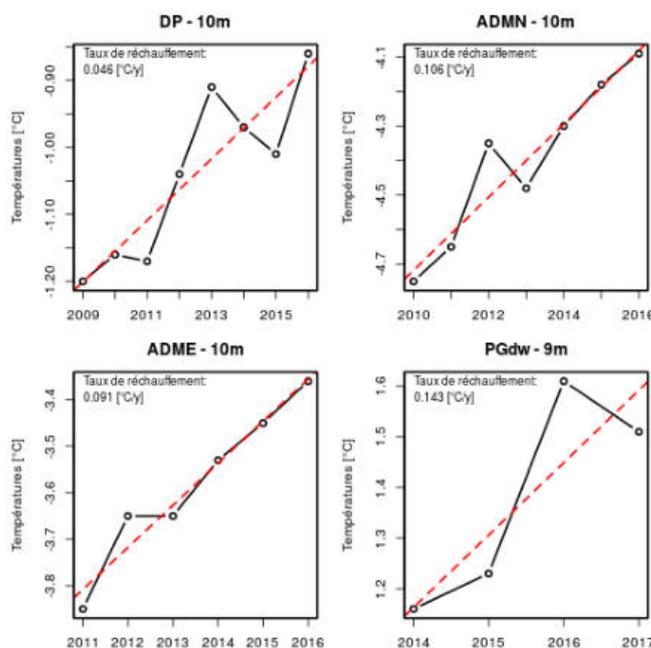


Figure 15 – Tendances au réchauffement de quatre sites à 10 m de profondeur.

I.D. Apports pour le gestionnaire

- Occurrence des écroulements et conditions climatiques

PrévRisk a participé à l'obtention de près de 80 datations cosmogéniques d'échantillons de granite du massif du Mont Blanc dans le but de vérifier la relation climat/écroulements sur un temps long. Trois clusters d'âges d'exposition apparaissent: (i) l'optimum climatique de l'Holocène, (ii) l'optimum climatique médiéval, et (iii) la période postérieure au Petit Âge Glaciaire. Cela valide pleinement l'hypothèse d'une relation étroite entre les périodes chaudes et la déstabilisation des parois. À l'échelle séculaire, cette relation avait déjà été validée à travers la reconstitution de la dynamique des parois emblématiques du massif du Mont Blanc que sont la face ouest des Drus et le versant nord des Aiguilles de Chamonix. Enfin, le recensement des écroulements rocheux qui s'est

poursuivi tout au long du projet a montré le rôle des températures sur le déclenchement des écroulements. Les 650 écroulements documentés depuis 2007 ont en effet montré que (i) la fréquence des écroulements lors d'étés caniculaires pouvait être 2 à 10 fois supérieure à celle d'un été « normal », (ii) 97 % des écroulements se produisent en contexte de permafrost (tempéré, c'est-à-dire proche de 0°C, pour l'essentiel d'entre eux), (iii) les écroulements sont principalement liés à trois processus, éventuellement combinés : approfondissement de la couche active, pression hydraulique et transport de chaleur en profondeur par percolation de l'eau. Enfin, l'analyse statistique des écroulements recensés indique que les plus gros écroulements sont à venir (Fig. 16). Il est donc indispensable d'en prévenir les effets.

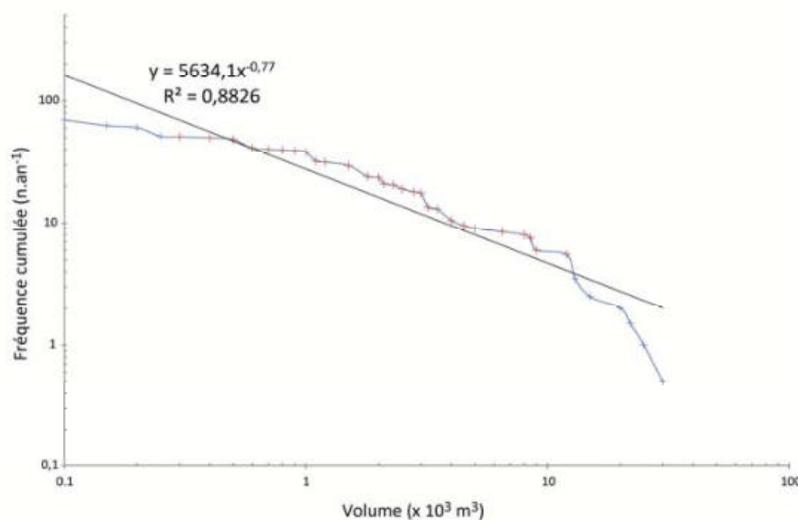


Figure 16 – Distribution cumulée des 313 écroulements documentés dans le massif du Mont Blanc au cours des étés caniculaires 2003 et 2015. La comparaison entre cette distribution et la loi puissance (ligne droite) qui régit les fréquences des écroulements d'une manière générale à travers le monde suggère que les petits et très gros événements sont insuffisamment représentés. Il s'agit pour les petits d'un biais d'observation. Quant aux très gros volumes, on doit s'attendre à leur recrudescence dans les prochaines années/décennies en haute montagne.

- Infrastructures et permafrost, quelles relations ?

La présence d'une infrastructure engendre deux types d'impacts sur la distribution locale du permafrost et l'évolution de son régime thermique. L'infrastructure peut tout d'abord induire un réchauffement local (Fig. 5) et contribuer à la dégradation du permafrost dans le massif rocheux. Sous l'effet de la surcharge liée à l'infrastructure et en raison de la chaleur dégagée par le bâtiment (chauffage, groupe électrogène, etc.), la couche active du permafrost se voit approfondie. Un refroidissement local du sous-sol peut au contraire être induit par des systèmes actifs (pieux réfrigérés) ou passifs (circulations d'air entre le sol et le bâtiment) ou un simple effet d'ombre portée sur le sol qui favorise le maintien local du permafrost.

Parmi les sites instrumentés dans *PrévRisk*, les refuges des Cosmiques et du Goûter ont pu réchauffer le permafrost lors de leur construction mais ils semblent induire aujourd'hui un refroidissement local, ces infrastructures n'étant pas en contact direct avec le sol mais surélevées sur une assise métallique. La gare de téléphérique des Grands Montets et ses activités apportent au contraire de la chaleur dans le sous-sol. Les résultats de l'instrumentation thermique permettront certainement de préciser et quantifier les liens entre infrastructures et refroidissement/réchauffement local du permafrost.

- Quelle dangerosité des glaciers rocheux ?

Les GR sont des masses d'éléments rocheux fins à très grossiers mélangés à de la glace (permafrost), de forme lobée, qui s'écoulent lentement par gravité. Ce mouvement est rendu possible grâce à la glace interne qui se déforme. Ces formes se développent sur des pentes situées à la base de parois rocheuses froides d'où provient le matériel détritique. Par nature, les GR favorisent l'« exportation » du permafrost à des altitudes exceptionnellement basses (en dessous de 2500 m d'altitude dans les Alpes).

En tant qu'entités dynamiques, les GR peuvent présenter un risque en fonction de leur position par rapport aux flux de personnes, aux infrastructures ou aux espaces urbanisés, et de leur vitesse de déformation. Dans les Alpes, de nombreux GR s'écoulent sur des pentes directement situées au-dessus de fonds de vallées. Lorsque le front d'un tel GR se déstabilise, les matériaux libérés peuvent provoquer des coulées de blocs et/ou alimenter des laves torrentielles potentiellement destructrices.

Plusieurs études récentes ont montré une tendance générale à l'accélération des glaciers rocheux sur la dernière décennie, attribuable au changement climatique. La hausse des températures accélère la fusion de la neige et de la glace interstitielle, augmentant considérablement le contenu en eau liquide à l'intérieur du GR. Cela favorise les processus de déformation et d'écoulement.

Dans ce contexte, les administrations publiques des territoires sujets à ces phénomènes devraient entreprendre au plus tôt des études préliminaires afin d'identifier les GR potentiellement dangereux et, éventuellement, de débiter une surveillance. En Suisse par exemple, où certains cas sont étudiés depuis plusieurs années, les gestionnaires aidés de scientifiques expérimentent des systèmes de surveillance et d'alerte permettant d'anticiper la survenue de conditions favorables aux accélérations brutales et/ou aux laves torrentielles.

- Scénario d'évolution du permafrost de paroi

La compréhension quantitative de l'évolution du permafrost est un élément crucial pour évaluer les risques à venir. Trois sommets du massif du Mont Blanc ont été étudiés de ce point de vue dans le cadre de *PrévRisk* (Fig. 17). Situés entre 3160 et 4300 m d'altitude, leurs températures ont été modélisées (modèle d'éléments finis 2D tenant compte de la conduction thermique et des transferts de chaleur latente, validé par les mesures ERT et de température en forage) pour la fin du Petit Âge Glaciaire, aujourd'hui (2015) et 2100 d'après deux scénarii d'émission de gaz à effet de serre. Au cours du XXI^{ème} siècle, le permafrost tempéré (proche de 0°C) devrait s'étendre au moins jusqu'à 4300 m d'altitude dans les parois rocheuses exposées au sud, et jusqu'à 3850 m dans les faces exposées au nord, voire y disparaître.

Les parois à permafrost sont parfois dotées de couvertures de glace ou de glacier suspendus et leur évolution thermique présente les mêmes enjeux de déstabilisation que la roche. Ainsi, le projet a mis en évidence une situation préoccupante à l'Aiguille du Midi : à la base du glacier suspendu, la glace dans le secteur instrumenté est actuellement à -0.5°C alors qu'à la Tour Ronde, pour une même orientation et des altitudes proches, celle-ci est d'environ -6°C. Cette température très élevée suggère une possible déstabilisation à court terme de ce type d'appareils glaciaires. Des mesures complémentaires à celles acquises dans le cadre de *PrévRisk* vont devoir être effectuées dans les prochains mois afin de prévenir les risques liés à une éventuelle rupture du glacier.

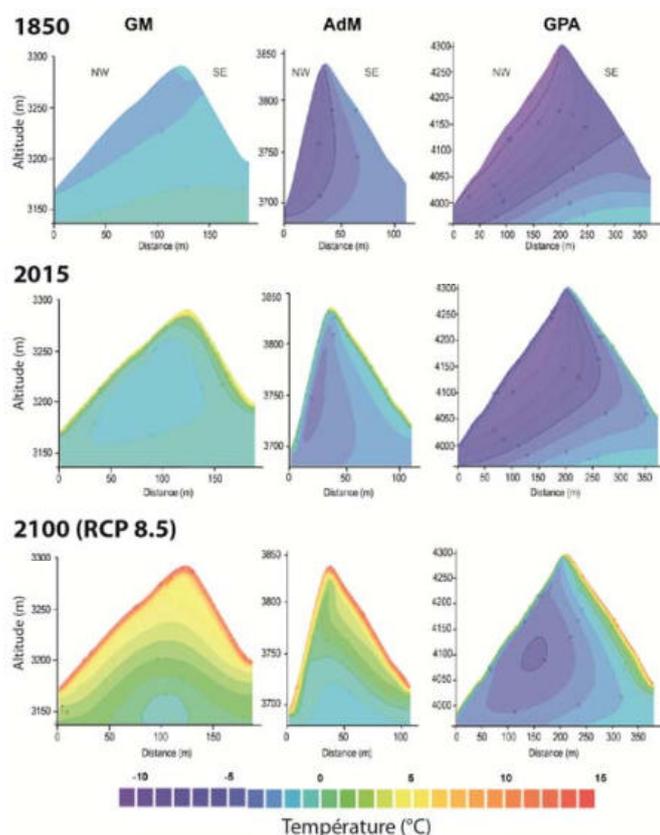


Figure 17 – Modélisation des températures pour trois sommets du massif du Mont Blanc (Aiguille des Grands Montets, Aiguille du Midi et Grand Pilier d'Angle) pour 1850, 2015 et 2100 (scénario climatique RCP 8.5).

II. Risques glaciaires collectifs et individuels

I.A. Notions de glaciologie

Un glacier est un corps de glace en mouvement, né de la diagenèse de la neige en glace (5 à 10 ans dans les Alpes). Les environnements favorables aux glaciers sont caractérisés par un climat froid et humide, permettant suffisamment de précipitations sous forme de neige. Il s'agit dès lors d'un système hydro-climatique (Fig. 18) mais également d'une réserve d'eau douce.

Pour un glacier, son « bilan de masse » est la différence entre l'accumulation et les pertes par ablation, exprimée en volume équivalent en eau (Fig. 19). La période de référence est l'année hydrologique, entre le 1^{er} octobre et le 30 septembre. Si l'accumulation est supérieure à l'ablation, le bilan de masse est positif. Si, au contraire, l'accumulation n'arrive pas à compenser les pertes, le bilan de masse est négatif. Sur le terrain, un bilan de masse négatif se traduit par le retrait du glacier à plus ou moins courte échéance en fonction des caractéristiques du glacier. Le bilan de masse est donc un indicateur à la fois de l'état du glacier et de la tendance climatique de la région dans laquelle il se situe. Depuis les années 1980, on enregistre partout dans les Alpes des bilans de masse négatifs, impliquant un recul généralisé des glaciers. En Vallée d'Aoste, la surface couverte par les glaciers s'est par exemple réduite de 62 % entre 1820 et 2012, et de 17 % entre 1999 et 2012 (données de l'Inventaire des Glaciers de la Vallée d'Aoste). Les séries de bilan de masse les plus longues indiquent qu'ils ont une tendance à devenir toujours plus négatifs.

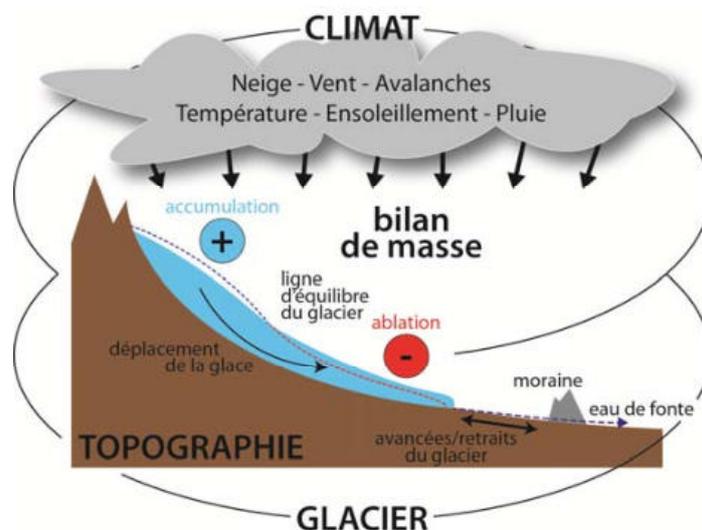


Figure 18 – Le glacier, système hydro-climatique.

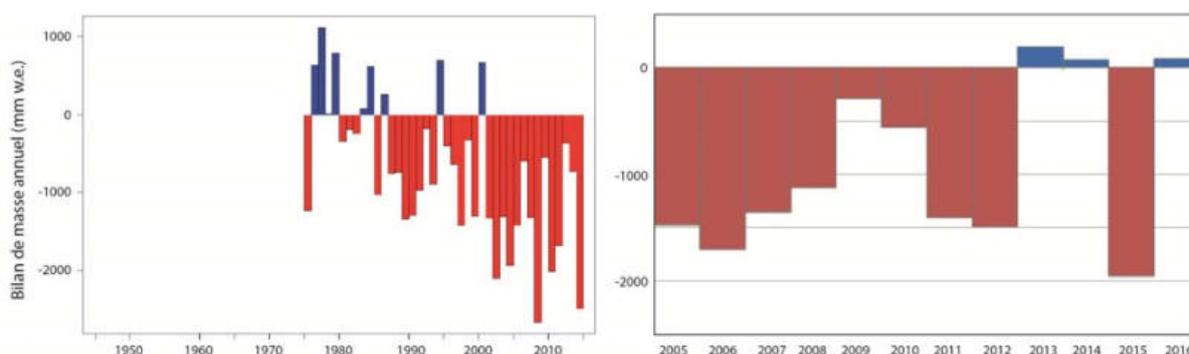


Figure 19 – Bilans de masse des glaciers d'Argentière (à gauche ; massif du Mont Blanc, Fr) et du Rutor (à droite ; It). Les bilans positifs sont en bleu, les bilans négatifs en rouge. Le glacier de l'Argentière est un des glaciers de référence pour le World Glacier Monitoring Service (WGMS). Le glacier du Rutor dispose d'une série de données plus courte. La différence observée entre les deux glaciers, qui sont pourtant proches (environ 30 km), souligne l'importance des effets de site.

Le mouvement des glaciers se produit principalement selon trois modalités : par déformation plastique de la glace (fluage), par glissement du glacier, et par déformation du lit sédimentaire sous-glaciaire. Les glaciers sont dits « froids » si la glace est à température négative. Il s'agit des glaciers de très haute altitude. Au contraire, les glaciers sont « tempérés » si la glace est à 0°C, à l'exception de la couche la plus superficielle (15 m env.) qui est exposée à des variations saisonnières. Le changement climatique peut provoquer non seulement le recul des glaciers, mais aussi des variations dans leur régime thermique. Or, contrairement aux glaciers tempérés qui glissent sur leur lit rocheux, les glaciers froids sont « collés » à la roche. Un glacier suspendu dans une paroi, par définition froid, peut donc se déstabiliser à l'occasion de son passage à un état tempéré. On observe ainsi de plus en plus d'avalanches de glace dont il faut se prémunir, tout comme des poches d'eau qui peuvent se vidanger brutalement, provoquant des inondations ou des laves torrentielles. Avec le changement climatique, les risques glaciaires qui ont toujours influencé la vie en haute montagne prennent un nouveau visage et changent de fréquence, de magnitude et de localisation.

I.B. Le cas du versant nord du Mont Blanc du Tacul

Massif parmi les plus englacés des Alpes avec 94 appareils glaciaires, le massif du Mont Blanc présente plusieurs glaciers dont l'évolution implique des risques importants pour les pratiquants de la montagne et/ou les vallées. Il s'agit des glaciers dits suspendus et des glaciers dont le front se situe sur des pentes raides. Ils connaissent des changements rapides de morphologie si bien qu'il est difficile de suivre leur évolution à court terme. Certains sites sont particulièrement délicats à gérer compte tenu de leur fréquentations importantes, de leur exposition à des risques particuliers ou encore parce qu'ils présentent des risques pour les fonds de vallée. C'est le cas du premier site pilote retenu dans le cadre de *PrévRisk* : la face nord du Mont Blanc du Tacul (4248 m). Sa voie normale est aussi une portion de celle du Mont Blanc au départ du téléphérique de l'Aiguille du Midi. De nombreux accidents ont eu lieu lors de chutes de séracs provoquant des avalanches avec parfois de nombreuses victimes.

Ces contraintes ont fait émerger la nécessité d'un suivi photographique de cette face glaciaire pour documenter l'évolution des séracs. Par ailleurs, en cas d'accident (avalanche, chute de sérac), il est fondamental pour les secours de connaître le nombre de personnes impliquées ; cela évite des recherches et sondages inutiles et donc une exposition au risque sur-avalanche pour les secouristes.

- Dispositif

Installé le 10 juin 2016, le système photographique de suivi (caméra AXIS P1357, fonctionnement jusqu'à -30°C) a dû être adapté aux conditions extrêmes pour permettre la prise d'images à haute fréquence avec une transmission des données en temps réel vers un serveur situé dans la vallée. Suite aux intempéries et à la foudre qui a frappé par deux fois (29 juin et 27 août 2016) une première caméra installée à l'Aiguille du Midi, une seconde a été fixée sous la terrasse du refuge des Cosmiques (3613 m) le 22 septembre 2016. Elle est abritée dans un caisson de protection et dispose d'un système antibuée. Après avoir réglé un problème d'alimentation électrique (panneau solaire) le 22 février 2017, la camera est en fonctionnement (Fig. 20).

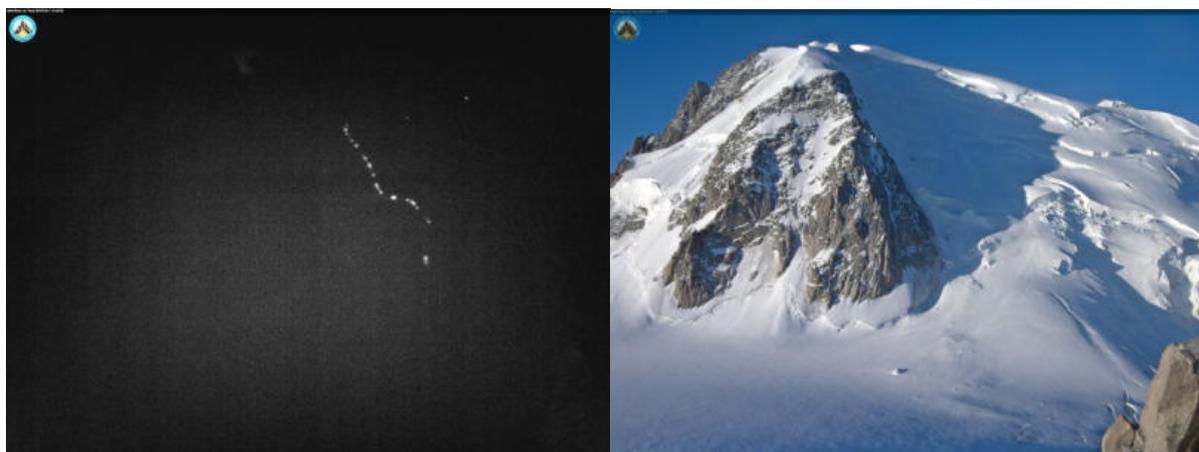


Figure 20 – Deux photographies du Mont Blanc du Tacul (Chamonix, Fr) du 06 juillet 2017. À gauche à 04h00 ; on identifie très bien les lampes frontales des cordées. À droite à 07h15.

- Anticiper et secourir

En cas d'accident, les secouristes du Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne (PGHM) ont accès aux données depuis le serveur de *La Chamoniarde*. Elles leur permettent de déterminer si des personnes sont potentiellement impliquées et combien (Fig. 20). Le serveur a ainsi par exemple été interrogé à l'occasion d'une avalanche survenue en juin 2016 afin de confirmer l'absence de victimes.

D'autre part, les zones de très haute montagne sont assez peu prises en compte du point de vue de l'estimation du risque d'avalanche. Les photos, qui permettent d'observer et de suivre l'activité avalancheuse dans le secteur du Mont Blanc du Tacul, seront mises à profit dans le futur pour évaluer la stabilité du manteau neigeux. De plus, elles apporteront une aide majeure pour améliorer la caractérisation glaciologique du secteur par EDYTEM-CNRS.

I.C. Le cas du glacier Whymper des Grandes Jorasses

- Dynamique du glacier

Le glacier Whymper des Grandes Jorasses (massif du Mont Blanc) forme, dans sa partie sommitale, un glacier suspendu aux dimensions importantes (Fig. 21). Il atteint 4203 m à la Pointe Walker et se termine à l'aval par un front de glace vertical, vers 4050 m d'altitude. Comme tous les glaciers suspendus à base froide, il s'écoule par fluage, sans glissement à sa base. Faute d'ablation par fusion, il atteint périodiquement un volume critique, qui se solde le plus souvent par un écroulement brusque et volumineux de glace. Avec une observation et une rétro-analyse du phénomène sur plusieurs décennies, il est maintenant possible d'appliquer un modèle de prévision des écroulements de glace à travers le suivi des vitesses du glacier.



Figure 21 – Le glacier Whymper (Courmayeur, It). À gauche : la face sud des Grandes Jorasses et le glacier suspendu au centre-haut. À droite : le glacier tel que suivi par la caméra automatique de la Pointe Helbronner.

- Dispositif

Un appareil photo numérique automatisé à haute définition a été installé dans le cadre de *PrévRisk* à proximité de la station sommitale du téléphérique « Skyway » (Pointe Helbronner) à une altitude de 3450 m pour le suivi du glacier suspendu. Le dispositif est composé d'une caméra *Canon* 1200D avec un objectif *Canon* de 200 mm et d'un micro-ordinateur qui dirige l'acquisition et la transmission des images. La connectivité et l'alimentation sont assurées par les réseaux du téléphérique.

En juillet 2017, l'installation d'un duplicateur de focale a permis d'accroître le détail des photos (Fig. 21). La camera permet d'observer l'ouverture de fractures qui sont à l'origine des déstabilisations. Ces données viennent compléter le suivi topographique du glacier. La méthode de traitement des photos utilisée ici, développée par la *Fondation Montagne sûre* et basée sur le calcul de déplacements exprimés en nombre de pixels avec correspondance « vraie » sur le terrain, est la méthode retenue dans le cadre du partage des compétences et des outils dans *PrévRisk*.

- Prévoir et alerter

La *Fondation Montagne sûre* gère, sur mandat de la Région Autonome Vallée d'Aoste, le système de suivi en continu du glacier Whymper. Il est assuré au moyen d'une station topographique automatique qui mesure en continu la distance entre des prismes, installés sur des balises à la surface du glacier, et la station installée en fond de vallée (Planpincieux). L'analyse de ces données permet de quantifier la vitesse de déplacement du glacier. La vitesse de déplacement typique en phase de croissance est d'environ 3-4 cm par jour. Quand la vitesse augmente et dépasse 10 cm par jour, une alerte de danger d'écroulement est lancée. Si la vitesse continue d'augmenter, l'alerte est confirmée et il est possible de déterminer avec une bonne précision le jour de l'écroulement. Au regard du volume estimé et des conditions d'enneigement des pentes à l'aval du sérac, la *Fondation Montagne sûre*, avec le support du Département Activités Géologiques de la Région VdA et la Protection Civile, organise l'évacuation des hameaux exposés.

Focus – Une gestion de crise aux Grandes Jorasses

Le dernier écroulement important du glacier suspendu Whymper a eu lieu en septembre 2014. La Fig. 22 présente les vitesses de déplacement du glacier avant l'événement. D'abord typiques de la croissance du glacier, les vitesses augmentent ensuite avant une accélération qui aboutit à l'écroulement. Celui-ci s'est produit en deux épisodes (Fig. 23) : le 23 septembre avec 52 000 m³ de glace mobilisée, et le 29 septembre avec 55 000 m³. Ni l'un ni l'autre n'a rejoint le fond de vallée, comme prévu grâce à la quantification des volumes instables couplée à une analyse trajectographique. La *Fondation Montagne sûre* avait toutefois mené une action de communication très importante sur les réseaux sociaux afin de mettre en garde la population et dissuader les alpinistes d'effectuer des ascensions dans le secteur.

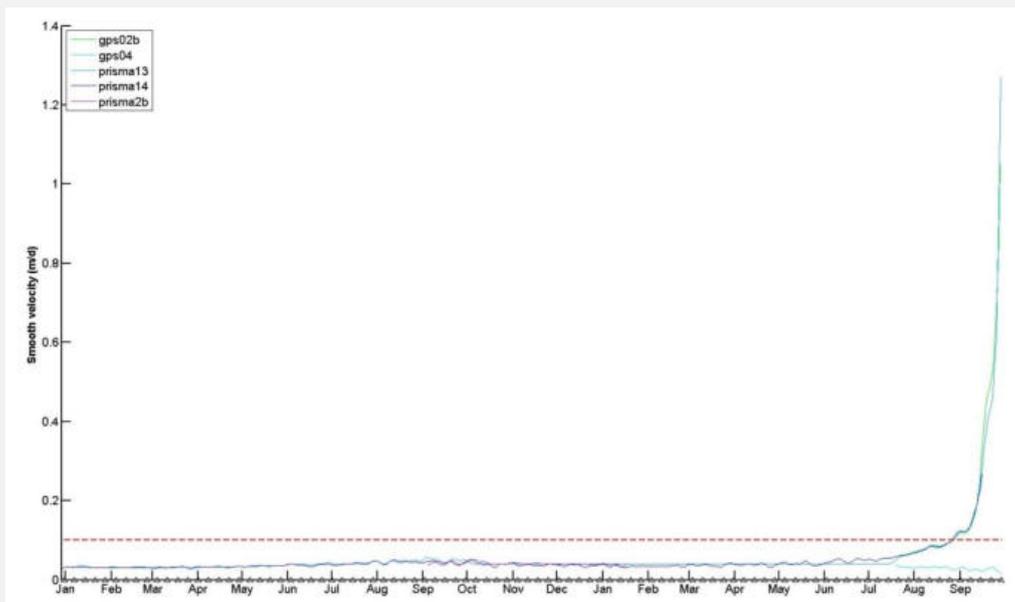


Figure 22 – Les vitesses du glacier Whympfer de janvier 2013 à septembre 2014.



Figure 23 – Evolution du glacier Whympfer (Courmayeur, It) lors de la crise de septembre 2014.

I.D. Le cas de la déstabilisation du glacier de la Charpoua

Le front du glacier de la Charpoua (massif du Mont Blanc) produit depuis deux décennies des écroulements réguliers à l'origine d'avalanches de glace mortelles comme en septembre 1997 ou juillet 2014 (Fig. 24). Si le site n'est aujourd'hui plus concerné par un enjeu fort de dangerosité et d'accessibilité dans la mesure où un nouvel itinéraire a été établi pour rejoindre le refuge de la Charpoua sans passer sous le glacier, l'objectif dans *PrévRisk* était de comprendre un type de déstabilisation qui peut se produire ailleurs dans les Alpes.

- Dynamique du glacier depuis près d'un siècle

37 images aériennes et satellites ont été utilisées pour reconstituer l'évolution du glacier depuis les années 1930 jusqu'à 2015. Après une période de léger recul jusqu'au début des années 1950, le front du glacier a subi un recul important sur une décennie suivie d'une avancée régulière

jusqu'à la fin des années 1980. Depuis, en dehors d'une faible ré-avancée au milieu des années 2000, le glacier subit un recul très marqué. Sur l'ensemble de la période d'étude, deux flux de glace distincts peuvent être observés. Les ruptures proviennent pour l'essentiel du flux de rive droite, très blanc (glace remaniée) et crevassé. En rive gauche, le glacier est davantage couvert de débris et semble moins crevassé. En outre, le retrait du glacier a révélé une topographie favorable aux avalanches : une fois détachée, la glace glisse sur de grandes dalles lisses et raides où l'avalanche prend de la vitesse.

18 avalanches ont été documentées entre 1997 et 2014 par croisement de différentes sources d'information (journaux, témoignages oraux, photos, rapports de secouristes, etc.). Aucun événement n'a été recensé avant la période actuelle de retrait du glacier qui a débuté à la fin des années 1980.

- Origine des déstabilisations du front du glacier de la Charpoua

Le suivi photographique du glacier de la Charpoua (appareil photo automatique *Canon 1000D* installé sur le versant opposé) mis en œuvre dans *PrévRisk* a permis de montrer que : (i) les petites déstabilisations qui ont eu lieu depuis 2016 se sont produites depuis la partie du front située en rive droite ; (ii) une suraccumulation en rive droite liée à la présence d'un grand cône formé par les avalanches issues du versant sud des Drus accélère très certainement le flux de rive droite (Fig. 24) ; (iii) l'hydrologie (pressions hydrauliques) favoriserait le glissement et la rupture du front du glacier sur sa moitié NO (rive droite). Différents facteurs concourent donc à l'instabilité actuelle du front, que la poursuite du retrait glaciaire devrait réduire dans les prochaines années.

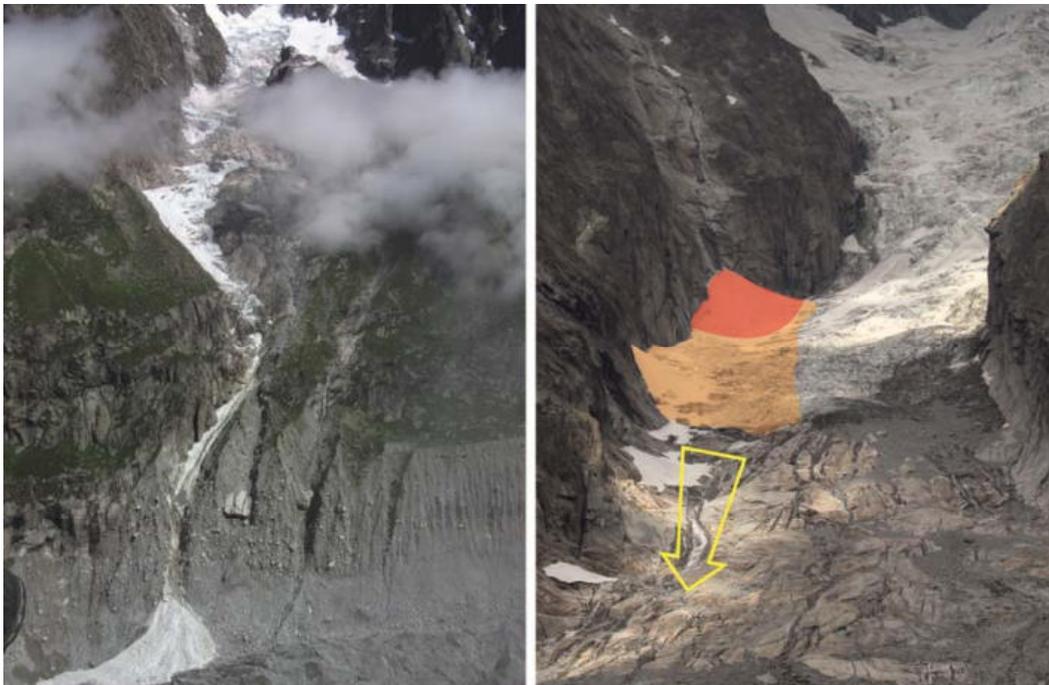


Figure 24 – Contexte avalancheux du glacier de la Charpoua (Chamonix, Fr). À gauche : l'avalanche de glace meurtrière de juillet 2014. À droite : photo-interprétation sur une photographie du 23 juin 2017 issue du système automatique de prise de vues. Un cône d'avalanche (en rouge) constitue une suraccumulation à l'origine d'une accélération de la veine en rive droite du glacier (en orange) qui se solde régulièrement par une rupture du front (flèche jaune), aidée par les écoulements d'eau sous-glaciaires (à l'intérieur de la flèche jaune : le torrent).

I.E. Étude innovante sur les ponts de neige au-dessus des crevasses

Différents symboles de l'alpinisme, dont les glaciers, font l'objet de travaux de recherche, en particulier quant à leur évolution face au réchauffement climatique. Sur les glaciers, un autre élément de l'imaginaire collectif n'a fait l'objet de quasiment aucune étude jusqu'à *PrévRisk* : les ponts de neige qui, à la manière d'une arche, se forment plus ou moins durablement au-dessus des crevasses. Ces structures fragiles sont pourtant une des conditions de la pratique de l'alpinisme mais impliquent un risque important pour les alpinistes et les skieurs (Fig. 25). Les ruptures de ponts de neige sont en effet fréquentes et sont à l'origine de plusieurs décès chaque année dans le massif du Mont Blanc. Entre 2008 et 2014 (7 ans), sur les glaciers de son versant français – hors itinéraire de la Vallée Blanche à ski qui représente pourtant une part importante des secours aux victimes de chutes en crevasse –, le PGHM, qui assure le secours en montagne sur le secteur du massif du Mont Blanc, et le Système National d'Observation de la Sécurité en Montagne (SNOSM) ont dénombré 37 blessés et 13 décès par chutes en crevasse, soit une moyenne de deux décès par an.



Figure 25 – Un exemple de rupture de pont de neige à la surface du glacier de Biafo (Pakistan ; ph. M. Clarys). La perforation du pont de neige s'est faite en son centre lors d'un déplacement en raquettes (neige poudreuse). Une tempête de neige avait dissimulé les crevasses et a rendu uniforme la surface du glacier. La flèche indique le cisaillement dans la lèvre de neige causé par la corde lors de la chute.

- L'enquête en ligne

Devant l'absence quasi totale de données relatives à ces structures fragiles, une enquête en ligne a été mise en œuvre en 2016 pour construire un premier ensemble de connaissances à partir de retours d'expérience. Deux questionnaires en ligne ont ainsi été construits puis diffusés sur Internet *via* les réseaux sociaux et certains sites spécialisés (CamptoCamp, Montagne Magazine, etc.) ainsi que par les partenaires du projet (*La Chamoniarde*, la *Fondation Montagne sûre*, le CREALP et l'ARPA) : l'un sur les incidents/accidents, l'autre sur la gestion du risque spécifique que représente la rupture des ponts de neige. Ils s'adressaient aux skieurs et alpinistes ayant été confrontés à la rupture d'un pont de neige, en tant que victime ou simple témoin. L'objectif était de rassembler un nombre important de retours d'expérience. 209 cas ont été recensés à travers le premier questionnaire et 297 personnes ont répondu au second, donnant lieu à la construction d'une base de données dont l'analyse a notamment permis une première caractérisation des cas de rupture de ponts de neige.

La moyenne altitudinale des ruptures ne change pas significativement selon la saison (environ 3200 m) mais les extrêmes y sont sensibles. L'été, les valeurs sont fortement centrées autour de 3200 m car les glaciers sont exempts de neige aux altitudes plus basses ; les ponts de neige y sont donc très peu présents. Au printemps, les altitudes prennent des valeurs extrêmes. Cette dispersion s'explique par une perte d'épaisseur et un retrait marqué du manteau nival avec la hausse des températures, ainsi que par une fragilisation des structures par humidification. Une forte épaisseur n'est par ailleurs pas nécessairement synonyme de solidité ; la cohésion de la neige joue un rôle plus important. Les témoignages de rupture impliquant des épaisseurs estimées supérieures à 1,5 m (20 cas) font état de neige humide (en surface) ou poudreuse froide, peu cohésives. À l'inverse, les cas de rupture pour des neiges regelées font généralement référence à de faibles épaisseurs : 40 cm en moyenne. Une épaisseur de pont importante associée à une neige regelée est un gage de sécurité. Quand la largeur du pont de neige peut être estimée, cela constitue un facteur décisionnel important : le pont est plus sujet à des effondrements en totalité pour de grandes dimensions, impliquant en outre des sauvetages souvent plus complexes. De nombreux autres enseignements sont présentés dans l'article publié dans la revue *Neige et Avalanches* (n°158).

- Une instrumentation inédite

Pour caractériser la formation des ponts de neige, leur structure, leur évolution et les modalités de leur disparition progressive (fonte) ou brutale (rupture), il a été nécessaire d'instrumenter un site dans le secteur du col du Midi (massif du Mont Blanc), vers 3450 m d'altitude. Lors de la mise en place de l'instrumentation (<https://youtu.be/sO1Y4BwyR8A>), en septembre 2016, la crevasse – orientée N280° – était découverte sur une longueur de 37,5 m et sur une largeur maximale de 6 m correspondant également à la largeur maximale de la crevasse ce jour-là.

Des chutes de neige ou des apports de neige par le vent sont les seuls processus en mesure de permettre la progradation de la ou des corniches et, par la suite, la fermeture de la crevasse. Le dispositif inclut donc un anémomètre-girouette (*Young 05103*) et un système de mesure de la hauteur de neige (*Campbell SR50A*), auxquels est associé un appareil photo numérique automatique (*Canon 1000D*) permettant de suivre l'évolution du pont de neige. Une mire a été placée dans son champ pour donner une échelle aux éléments identifiés/mesurés sur les photos. Une fois le pont de neige construit, les couches de neige le constituant peuvent être affectées par différentes métamorphoses dépendantes des températures extérieures (métamorphose de fonte), de la puissance du rayonnement solaire, et du gradient de température entre l'air à l'intérieur de la crevasse et l'air extérieur (métamorphoses de neige sèche) ; elles peuvent conduire à une augmentation ou, au contraire, à une réduction de la résistance des ponts. La température de l'air extérieur, intérieur (dans la crevasse) et à différentes profondeurs dans la neige, ainsi que la quantité d'énergie solaire reçue sont donc également mesurés. Enfin, dans la crevasse, un extensomètre à fil permet de suivre l'évolution de son ouverture. Celle-ci module en effet très probablement les propriétés mécaniques du pont de neige. Une collaboration avec la *Fondation Montagne sûre* a permis d'étudier les caractéristiques de la neige constituant le pont récemment formé, en décembre 2016.

Les données recueillies depuis la mise en place de l'instrumentation en septembre 2016 jusqu'à la fin du projet sont de très grande qualité malgré la difficulté pour maintenir une telle installation à haute altitude sur un secteur aussi mobile et changeant qu'un glacier (casse de matériel à l'occasion de tempêtes, maintenance très régulière nécessaire, etc.).

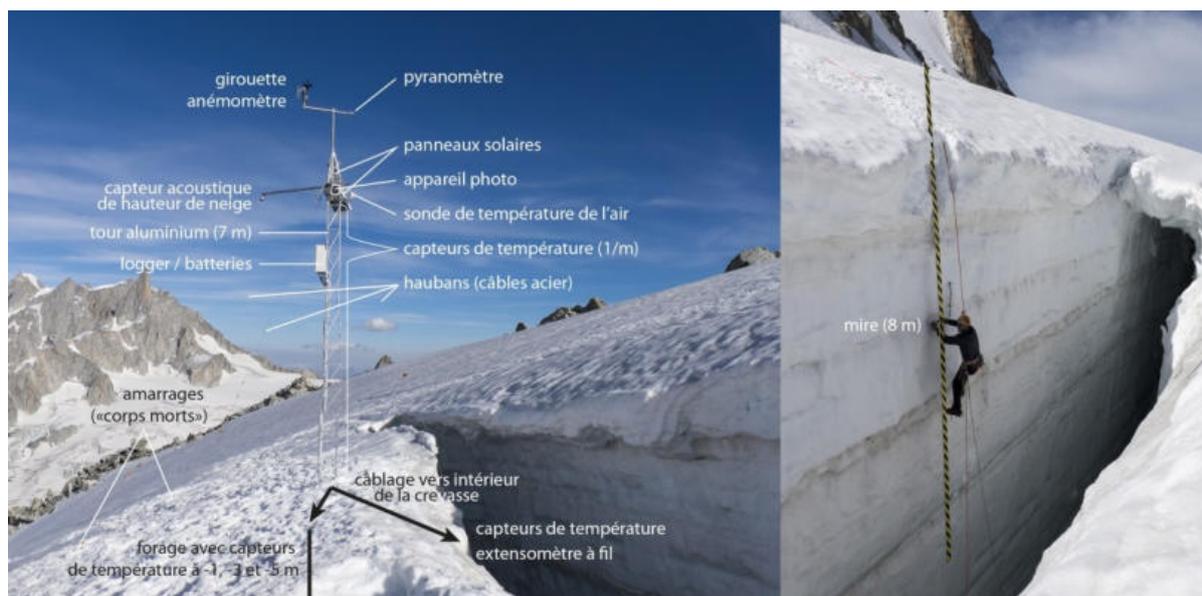


Figure 26 – Détail de l'instrumentation au Col du Midi (Chamonix, Fr).

- Gestion du risque et pistes en matière de prévention

Le croisement des informations acquises à travers l'enquête en ligne avec les données issues de l'instrumentation du pont de neige ont donné lieu à la production de documents (Fig. 27) permettant aux skieurs et alpinistes de s'approprier quelques-unes des connaissances acquises dans le cadre du projet. Ces documents ont également pour vocation de fournir aux pratiquants des outils d'analyse du risque et des éléments de prévention. Ils sont d'ores et déjà utilisés par les partenaires développant des actions de prévention, dont *La Chamoniarde*.

Focus – Formation d'un pont de neige

Les données acquises dans le cadre de l'instrumentation d'un pont de neige à proximité de l'Aiguille du Midi ont notamment révélé que les ponts de neige peuvent se former extrêmement rapidement (Fig. 27 – 4a-b) : quelques heures à quelques jours suffisent. Dans cette construction, la vitesse du vent et sa direction sont des paramètres majeurs : le vent doit être suffisamment fort pour transporter de la neige en suspension dans l'air et par saltation, tandis qu'il doit impérativement souffler de manière suffisamment perpendiculaire à la crevasse. S'il souffle parallèlement, c'est un remplissage de la crevasse qui se produit (Fig. 27 – 4a). Il n'est par ailleurs pas nécessaire qu'il neige pour qu'un pont se forme : la seule mobilisation de la neige au sol par le vent peut suffire pour sa construction.

Réduire les risques de chute en crevasse

Quelques conseils...

Les ponts de neige qui recouvrent les crevasses sont une des conditions de la pratique de l'alpinisme et du ski en haute montagne. Ils constituent cependant un risque important en cas de rupture, en raison notamment des difficultés à les déceler et à en estimer la solidité.

Avant la course S'informer!

Les secteurs crevassés

- Connaître le glacier en conditions défavorables (1) permet d'apprécier les secteurs les plus dangereux (2), tout comme la consultation de photos dans les mêmes conditions.
- Consulter topoguides et sites Internet spécialisés.
- OHM - www.chamoniarde.com - 04 50 53 22 08

(1) Août

(2) Janvier

Glacier du Géant, massif du Mont Blanc

Conditions nivo-météo du moment et des jours précédents

(3)

(4a)

(4b)

Sauf cas exceptionnels (3) où les chutes de neige suffisent, c'est le vent qui construit les ponts, souvent rapidement : seules quelques dizaines d'heures séparent (4a) et (4b) mais sans métamorphose favorable de la neige et/ou nouvelles neiges, ce pont est extrêmement fragile. Etat de la neige et vent des jours précédents sont des paramètres majeurs à prendre en compte.

Pendant la course Identifier...

Indices de présence d'un pont

Aucun indice n'a été détecté dans la moitié des accidents. Encore faut-il savoir les identifier...

- couleur et texture de la neige

- fissuration

- relief en creux

- prolongement visible de la crevasse

Configurations de rupture

Rupture en perforation (localisée), souvent au centre du pont (épaisseur plus faible).

Rupture en flexion (totale).

et prévenir... Si les ruptures de pente sont propices aux crevasses, les zones planes n'en sont pas exemptes! Un pont épais n'est pas nécessairement synonyme de solidité. L'utilisation des skis pour franchir des ponts de neige peu larges (< 2 m) limite le risque de rupture par perforation. Le mauvais temps aggrave fortement le danger (indices non visibles, secours problématique).

Adapter son encordement et maîtriser les techniques de progression et de secours!

Figure 27 – Flyer « Réduire les risques de chute en crevasse » à destination des pratiquants de la haute montagne.

PREV RISK

Haute Montagne

 **Interreg** 
ALCOTRA
Fonds européen de développement régional

