

Rischi naturali emergenti in alta montagna

*Azioni svolte nell'ambito del progetto ALCOTRA PrévRisk Haute Montagne
– Contributi tecnico-scientifici e indicazioni per decisori e frequentatori –*



2018

Autori:

Ludovic Ravanel	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, Francia
Fabrizio Troilo	Fondazione Montagna Sicura (FMS), Courmayeur, Italia
Paolo Pogliotti	ARPA Valle d'Aosta, Aosta, Italia
Luca Paro	ARPA Piemonte, Torino, Italia
Umberto Morra di Cella	ARPA Valle d'Aosta, Aosta, Italia
Pierre-Allain Duvillard	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, Francia
Elena Motta	Fondazione Montagna Sicura (FMS), Courmayeur, Italia

Con il contributo di:

Philip Deline	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, Francia
Grégoire Guillet	<i>Idem</i>
Florence Magnin	Università di Oslo, Norvegia
Jacques Mourey	Laboratoire EDYTEM-CNRS, Chambéry, Francia
Christophe Ogier	<i>Idem</i>
Océane Vibert	La Chamoniarde, Chamonix, Francia

EDYTEM-CNRS: edytem.univ-savoie.fr

FMS (*capofila di progetto*): www.fondazionemontagnasicura.org

ARPA VdA: www.arpa.vda.it

ARPA Piemonte: www.arpa.piemonte.it

Titolo originale e citazione:

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.

Traduzione dal francese:

Lorenzo Dugulin

Revisione della versione in italiano:

Luca Paro (ARPA Piemonte, Torino, Italia)

Sommario

Premessa.....	2
I. Riscaldamento del permafrost e instabilità dei pendii in alta quota.....	3
I.A Alcune nozioni di base sul cemento delle montagne.....	3
I.B Azioni principali del progetto.....	4
I.C Contributi principali del progetto.....	12
I.D Contributi del progetto per i gestori.....	15
II. Rischi glaciali collettivi e individuali.....	18
II.A Nozioni di glaciologia.....	18
II.B Il caso del versante nord del Mont Blanc du Tacul.....	20
II.C Il caso del ghiacciaio Whympfer delle Grandes Jorasses.....	21
II.D Il caso della destabilizzazione del ghiacciaio della Charpoua.....	23
II.E Studio innovativo sui ponti di neve sopra i crepacci.....	25

Premessa

Per **20 mesi**, tra febbraio 2016 e ottobre 2017, il **progetto *PrévRisk Haute Montagne*** ha **riunito 7 partner** italiani, francesi e svizzeri: la *Fondazione Montagna Sicura* (capofila del progetto), le Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale della Valle d'Aosta (ARPA VdA) e del Piemonte (ARPA Piemonte) e il comune di Valtournenche per il lato italiano, l'associazione *La Chamoniarde* (Società di prevenzione e soccorso in montagna di Chamonix) e il laboratorio EDYTEM-CNRS per il lato francese, con la partecipazione del *Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin* (Crealp) per la Svizzera.

Come primo progetto nel quadro della *Stratégie d'avenir dell'Espace Mont Blanc*, *PrévRisk* si è basato sulla **necessità di sensibilizzare e informare la popolazione e i frequentatori sui rischi della montagna, compresi quelli che emergono dai cambiamenti climatici**. Infatti, questi cambiamenti modificano profondamente gli ambienti glaciali (ritiro glaciale) e periglaciali (degradazione del permafrost) e comportano nuovi processi “naturali” che, in una regione così frequentata come il Monte Bianco, generano rischi a volte elevati.

La presente sintesi dell'asse scientifico del progetto (WP3 - *Azioni principali ed innovative di conoscenza e gestione dei rischi emergenti*) contribuisce all'obiettivo del progetto di **umentare la resilienza delle comunità ai rischi emergenti e specifici dell'alta montagna**, sviluppando azioni per una migliore conoscenza di questi rischi. Questa sintesi - lungi dall'essere esauriente in quanto le attività del progetto sono state numerose e proficue - soddisfa quindi l' esigenza di informazione di utilizzatori e gestori della montagna, nonché del pubblico in generale, per comprendere e riconoscere meglio i rischi specifici delle alte quote.

I. Riscaldamento del permafrost e instabilità dei pendii in alta quota

I.A Alcune nozioni di base sul cemento delle montagne

Il **permafrost** è uno stato termico di terreni e rocce che hanno temperature permanentemente uguali a o minori di 0 °C. Nelle Alpi, è presente quasi ovunque sopra i 3000 m di altitudine. Svolge un ruolo fondamentale nella stabilità dei pendii rocciosi, sia che si tratti di ripide pareti rocciose o di formazioni detritiche (ghiaioni, morene, ghiacciai rocciosi o rock glacier - RG in seguito). Nelle zone soggette a permafrost, l'acqua derivante da precipitazioni liquide o dal disgelo che penetra nelle fratture rocciose o tra i blocchi di detriti si congela. Il ghiaccio così formato si comporta come un cemento che talvolta affiora durante i lavori o nelle zone di distacco delle frane (Figura 1).

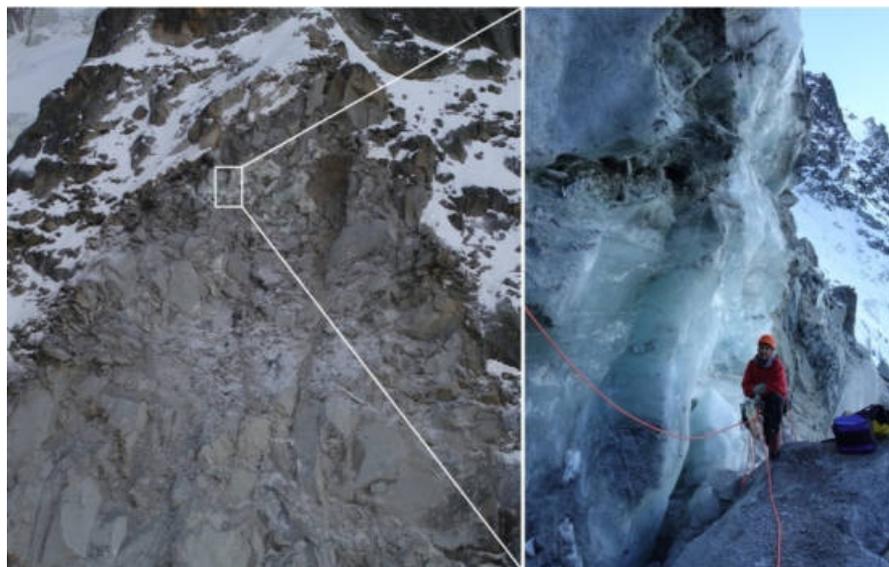


Figura 1 – Nella parte superiore della nicchia di distacco del crollo di 44 000 m³ che ha interessato lo sperone Tournier (parete nord dell'Aiguille du Midi, massiccio del Monte Bianco, Francia) alla fine di settembre 2017, la parete rocciosa è coperta di ghiaccio alto circa 15 m. Questo ghiaccio probabilmente ha assicurato la coesione del versante fino ad allora.

Il permafrost è spesso assente in superficie perché si sviluppa e si mantiene solo oltre una certa profondità (di solito alcuni metri). Infatti, i primi metri sulla superficie che scongelano ogni estate corrispondono allo “strato attivo” dove vengono misurate forti escursioni termiche che tendono a indebolire la roccia. Alla base dello strato attivo, la presenza di ghiaccio può raggiungere temperature vicine a 0 °C, passando da una condizione di cemento ad una di lubrificante favorevole alla destabilizzazione del versante.

Negli ultimi decenni, i cambiamenti climatici hanno portato ad un aumento delle temperature medie globali. Nelle regioni alle alte latitudini e nelle ampie catene montuose come l'Himalaya o le Alpi, questo riscaldamento è più rapido e più intenso che su scala globale. Per sua natura, il permafrost è un elemento della criosfera estremamente sensibile all'aumento delle temperature. Mentre nelle regioni polari il degrado (riscaldamento) del permafrost è all'origine di elevate emissioni di gas serra (cosiddetta “retroazione *-feedback-* positiva”), questo degrado in montagna aumenta la frequenza dell'instabilità dei versanti che spesso ospitano importanti infrastrutture (piloni, edifici, sistemi paravalanghe). Le conseguenze di queste instabilità non si limitano alle aree remote e poco frequentate, ma possono propagarsi per lunghe distanze raggiungendo aree densamente popolate come è avvenuto in Val Bondo (Svizzera) nell'agosto 2017 a seguito del crollo di 3,1 milioni di m³ di roccia su un pendio del Piz Cengalo (Figura 2).

La comprensione delle instabilità di versante legate al degrado del permafrost resta ancora oggi frammentaria.

PrévRisk ha permesso di condurre diverse azioni che hanno fatto luce su alcuni processi in gioco con l'obiettivo di migliorare la prevenzione dei rischi associati.



Figura 2 – Una valanga di roccia staccatasi dal Piz Cengalo (3369 m) nell'agosto del 2017, in una zona di permafrost, ha prodotto una colata di fango e detriti che ha devastato parte di un villaggio a 6 km a valle (Val Bregaglia, Svizzera).

I.B Le principali azioni del progetto

- Condivisione dei dati

Lo studio della distribuzione e delle caratteristiche del permafrost in aree topograficamente complesse come i versanti alpini è una attività scientifica recente e delicata. Da un lato, richiede la strumentazione di siti in quota per la misurazione diretta delle temperature del sottosuolo e, dall'altro, l'uso di modelli matematici in grado di riprodurre l'evoluzione di queste temperature nello spazio e nel tempo a partire da dati meteorologici come la temperatura dell'aria, la radiazione solare e le precipitazioni. I dati sul campo sono quindi fondamentali poiché consentono di monitorare lo stato del permafrost e di validare e migliorare i modelli matematici con il confronto tra temperature rilevate e modellate.

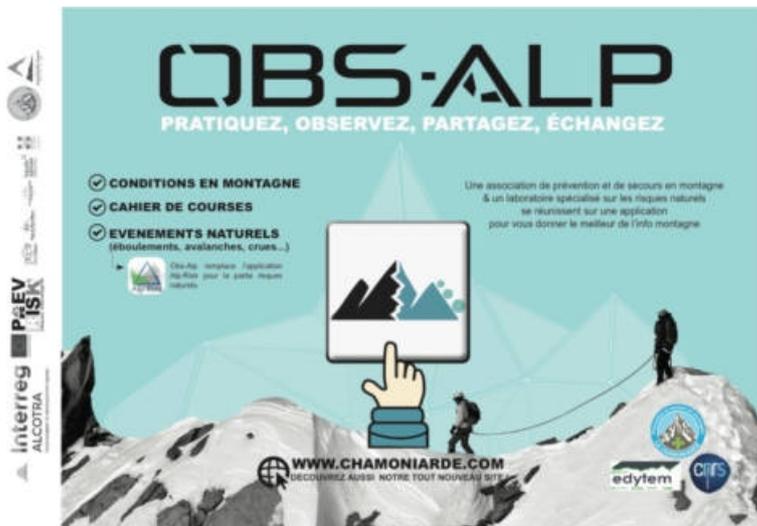
La strumentazione e il mantenimento dei siti di misura hanno tuttavia un costo economico elevato e suppongono una logistica spesso complessa. I dati disponibili sono quindi ancora piuttosto scarsi e dispersi tra i diversi gruppi di ricerca. Diventa essenziale condividere e rendere pubblici questi dati. In questo modo è facile comprendere il valore dei progetti transfrontalieri come *PrévRisk*. Rappresentano, per i partner coinvolti (*Fondazione Montagna Sicura, ARPA Valle d'Aosta, ARPA Piemonte, EDYTEM-CNRS*), una preziosa opportunità per condividere dati, ma anche esperienze, capacità e risorse al fine di migliorare la comprensione dei fenomeni legati al permafrost.

- Censimento dei crolli sul massiccio del Monte Bianco

Dimostrare l'ipotesi che il degrado del permafrost provoca un aumento della frequenza e del volume delle frane in roccia non può essere immaginato a partire dallo studio di alcuni eventi distinti: è essenziale ragionare su un consistente corpus di dati. Sul versante francese del massiccio del Monte Bianco, le prime osservazioni furono fatte da guide di alta montagna nel 2005, ma la quantità limitata di dati consentiva una robusta analisi statistica. Tra il 2006 e il 2007, alcune decine di guide, di gestori di rifugi e di alpinisti sono stati formati da *EDYTEM-CNRS* per il censimento delle frane creando una

rete di osservatori. Dal lato italiano, la rete è stata resa operativa in collaborazione con *Fondazione Montagna Sicura*. La rete è attiva soprattutto nella parte centrale del massiccio, quasi il 60% di esso.

Usando inizialmente le schede informative, le informazioni provenienti dalla rete vengono ora trasmesse direttamente tramite comunicazione orale, telefono o e-mail o tramite l'applicazione *Alp-Risk* che *PrévRisk* ha permesso di rinnovare progettando *Obs-Alp* (www.obsalp.com; Figura 3) in collaborazione con *La Chamoniarde*. Riattivata ogni anno, la rete garantisce un'ottima rappresentazione dei dati. Al fine di ottenere dati utili, gli stessi vengono controllati e completati ogni autunno durante le campagne di rilievo sul campo.



I dati vengono quindi analizzati con sistemi informativi geografici (GIS) al fine di conoscere le quote di distacco, la topografia dei settori destabilizzati, la temperatura modellata della superficie delle pareti, ecc.

Figura 3 – L'applicazione *Obs-Alp* (in francese), che sostituisce *Alp-Risk*, comprende tre moduli per alpinisti, uno dei quali consente la segnalazione di fenomeni pericolosi in montagna come le frane in roccia.

Focus – L'Alpine Permafrost Database (APD)

L'APD è una piattaforma digitale per la raccolta e la condivisione di evidenze relative alla presenza/assenza di permafrost nelle Alpi ("*Permafrost Evidences*"). Nel database gestito da ARPA Valle d'Aosta, è possibile inserire diversi tipi di evidenze (misurazioni dirette della temperatura, misurazioni geofisiche, osservazioni di ghiaccio sepolto o affiorante nelle nicchie di distacco dei crolli, misurazione della velocità dei RG), che i partner coinvolti hanno raccolto (*ARPA Valle d'Aosta, ARPA Piemonte, Fondazione Montagna Sicura e EDYTEM-CNRS*). Ogni evidenza contiene metadati che ne descrivono la posizione (coordinate geografiche), il suo contesto geologico e geomorfologico e il livello di affidabilità delle informazioni.

Il database è nato con il progetto europeo *PermaNET* (programma Spazio Alpino 2007/2013). Attualmente contiene 500 evidenze e più di 3000 RG distribuiti in tutta la catena alpina. L'APD è uno strumento accessibile a tutti i tecnici e gestori che hanno interesse a conoscere i rischi associati al permafrost, identificando i siti di studio e i gruppi di ricerca che gestiscono i siti strumentati. Nell'ambito del progetto *PrévRisk*, sono state aggiornate 40 evidenze e sono stati aggiunti 15 nuovi punti misura nell'area di cooperazione.

- Monitoraggio dei siti a rischio mediante tecniche topografiche ad alta risoluzione

Le moderne tecniche di acquisizione dei dati topografici ad alta risoluzione come la scansione laser terrestre (LiDAR - *Light Detection and Ranging*) o la fotogrammetria con drone consentono di acquisire rapidamente (e a costi relativamente bassi per la fotogrammetria) modelli 3D altamente accurati e dettagliati di una superficie topografica. Su questi Modelli Digitali del Terreno (DTM - *Digital Terrain Models*), è possibile misurare distanze, pendenze e volumi utilizzando software dedicati.

Uno dei vantaggi legati all'uso di queste tecniche è quello di consentire lo studio di aree inaccessibili e/o pericolose senza che gli operatori debbano accedervi direttamente. Una volta acquisiti, gli strumenti possono essere utilizzati a un costo relativamente basso, rendendo possibile la ripetizione periodica delle campagne al fine di effettuare un vero e proprio monitoraggio dei cambiamenti di superficie. Nel caso di movimenti di versante, il secondo vantaggio di questi strumenti rispetto alle misurazioni puntuali più convenzionali come il GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o il teodolite è la scala spaziale di acquisizione. L'analisi di una successione temporale di DTM consente di determinare e localizzare con precisione i settori più attivi e, di conseguenza, di misurare esattamente i volumi coinvolti nonché le velocità di deformazione.

Nell'ambito di *PrévRisk* (Figura 4), le campagne di fotogrammetria con drone e i rilievi LiDAR sono state ripetute su diversi tipi di siti dai partner coinvolti nel lavoro sul permafrost. Queste campagne hanno evidenziato l'alta affidabilità/versatilità di questi strumenti in ambienti difficili come l'alta montagna e hanno confermato l'alta qualità dei prodotti ottenuti. Per la fotogrammetria, la qualità dei risultati è influenzata dal livello di preparazione delle campagne di misurazione e dalle procedure di controllo e di elaborazione dei dati nella fase di restituzione. È essenziale che queste campagne vengano svolte da personale specializzato con una vasta esperienza in questi settori.



Attrezzatura	<i>Optech ILRIS 3D</i> (modèle 2005)	<i>senseFly Ebee</i>	<i>DJI Phantom 4</i>
Tipo	LiDAR terrestre	drone per riprese fotografiche (ad ala)	drone per riprese fotografiche (quadricottero)
Peso	14 kg + trappiede, testa a sfera	1.1 kg + telecomando	1.8 kg + telecomando
Tempo di volo	/	1 h	25 min
Precisione	4-7 mm à 100 m	5 cm	5-10 cm
Utilizzo preferenziale	Modellazione 3D delle pareti	Modellazione 3D di superfici a bassa pendenza	Osservazione (anche in condizioni topografiche e aerologiche difficili)

Figura 4 – Confronto tra i tre sistemi di acquisizione dei dati 3D utilizzati nell'ambito del progetto *PrévRisk*.

Focus – Fotogrammetria con drone

Diverse campagne di fotogrammetria con drone sono state realizzate nell'ambito del progetto in cinque siti della Valle d'Aosta (RG e ghiacciai) e in due siti di prova piemontesi. In Valle d'Aosta, il metodo ha permesso il monitoraggio delle velocità di superficie e dei cambiamenti morfologici di (i) RG di Gran Sometta (3 luglio, 2 e 24 agosto 2016, 3 ottobre 2017), (ii) RG di Punta Arpisson (26 luglio, 4 settembre 2017), e (iii) RG del Col d'Olen (28 settembre 2017). È stato anche prodotto un Modello Digitale del Terreno (DTM) dell'area ricoperta di detriti del ghiacciaio della Brenva (3 gennaio 2017), mentre è stata verificata la possibilità di acquisire dati ad altitudini molto elevate per monitorare la dinamica glaciale del ghiacciaio del Timorion confrontando le aree modellate in seguito ai rilievi del 1 giugno e del 22 settembre 2017. Le acquisizioni effettuate in Piemonte (RG del Vei del Bouc -CN- il 22 agosto 2017 e RG del M. Granero -TO- il 17 ottobre 2017) hanno alimentato un'analisi morfologica e permesso di ipotizzare l'evoluzione dei versanti interessati.

Per valutare meglio i dettagli che possono essere ottenuti con il drone *senseFly eBee RTK* riducendo il numero di punti a terra, è stato condotto uno studio specifico, pubblicato sulla rivista *Remote Sensing* (DOI: 10.3390/rs9020172).

Le attività svolte nell'ambito del progetto hanno permesso di stabilire una metodologia per l'analisi dei versanti di alta quota. In particolare, mediante orto-immagini ad alta risoluzione o mediante SGM (*Semi Global Matching algorithm*) applicato ai DTM sono state determinate le velocità di spostamento e le evoluzioni delle masse detritiche in ambiente periglaciale (RG). I 20 mesi del progetto hanno permesso di passare da una fase sperimentale a metodi innovativi per monitorare i rischi legati al permafrost.

- Caratterizzazione geofisica dei siti a rischio

Tra tutti i metodi geofisici, quello della corrente elettrica diretta è il più utilizzato nella ricerca sul permafrost. A causa di un significativo aumento della resistività elettrica che si verifica nel punto di congelamento (0°C), il metodo della tomografia di resistività elettrica (ERT - *Electrical Resistivity Tomography*) è particolarmente adatto per rilevare, localizzare e caratterizzare lo stato e l'evoluzione di terreni/rocce con presenza di ghiaccio.

Operativamente si procede immettendo una corrente elettrica nel terreno tramite una coppia di elettrodi. Il campo elettrico che ne risulta è funzione della distribuzione della resistività elettrica nel terreno, misurata con un'altra coppia di elettrodi. Le misurazioni vengono ripetute utilizzando una linea di elettrodi installata in precedenza. Una procedura di trattamento e interpretazione - l'inversione - consente di generare un'immagine in base alle eterogeneità del terreno più o meno resistente che hanno influenzato la distribuzione del campo elettrico.

In *PrévRisk*, il metodo è stato utilizzato per caratterizzare il permafrost in diversi siti a rischio (figura 5): la dorsale inferiore dei Cosmiques (3613 m, massiccio del Monte Bianco, Francia, presenza di un rifugio), l'Aiguille des Grands-Montets (3295 m, massiccio del Monte Bianco, Francia, presenza di una funivia) e il RG instabile di Punta Arpisson (2750 m, Val di Cogne, Italia). Alcune campagne hanno riunito diversi partner per la condivisione delle competenze. I primi due siti corrispondono a contesti di pareti rocciose. Prima della loro analisi geofisica, uno studio di laboratorio ha permesso di stabilire il legame tra la resistività della roccia e la sua temperatura. Pertanto, gli iso-valori dell'ERT possono essere direttamente tradotti in temperatura. In entrambi i siti, c'è una forte asimmetria tra la parete nord fredda e la parete sud dove il permafrost è molto degradato o assente.

Una misurazione effettuata nel 2012 sulla parete nord del Grands-Montets è stata ripetuta anche a settembre 2016 al fine di valutare i cambiamenti di distribuzione del permafrost tra queste due date. Queste acquisizioni hanno anche aiutato a convalidare i modelli statistici dell'attuale distribuzione del permafrost nel massiccio del Monte Bianco.

Il RG di Punta Arpisson è molto attivo (movimento di circa 11 m della parte frontale tra il 2014 e il 2016) e ha evidenziato una instabilità della sua fronte durante l'estate del 2016. Questo RG è composto da due generazioni di lobi sovrapposti. Le misurazioni ERT hanno dimostrato che la zona frontale inferiore instabile è povera di ghiaccio mentre la fronte superiore, più stabile, è ancora ricca in ghiaccio.

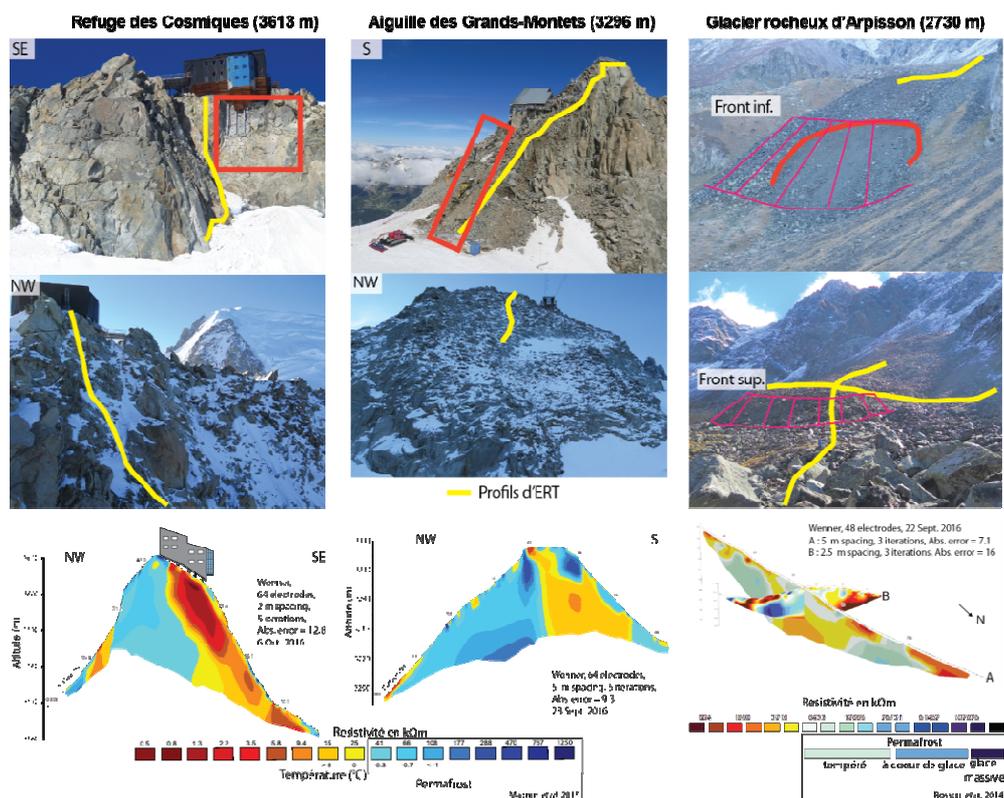


Figura 5 – Localizzazione dei profili di tomografia elettrica sulla dorsale inferiore dei Cosmiques (Chamonix, Francia), Aiguilles des Grands-Montets (Chamonix, Francia) e il RG di Punta Arpisson (Cogne, Italia). I settori instabili sono evidenziati nei poligoni in rosso.

- Sviluppo della strumentazione nei siti a rischio

In tema di permafrost, monitorare l'evoluzione della temperatura delle pareti rocciose in superficie e in profondità è fondamentale per valutare la stabilità e quindi la sicurezza delle infrastrutture ivi costruite (rifugi, stazioni della funivia, piloni, ecc.). Misurare l'apertura/chiusura continua delle fratture rocciose fornisce una conoscenza complementare dei complessi collegamenti tra il regime cinematico di frattura e la temperatura. Inoltre, con la trasmissione dei dati in tempo reale, questi dispositivi possono includere un sistema di allarme rapido in caso di instabilità.

La rete storica di sensori per il monitoraggio del permafrost delle pareti nel massiccio del Monte Bianco, originariamente concentrata sull'Aiguille du Midi (3842 m) e alcune altre cime e sviluppata da diversi partner del progetto (ARPA Valle d'Aosta, Fondazione Montagna Sicura e EDYTEM-CNRS), grazie a PrévRisk, è stata implementata e ampliata a tre nuovi siti sensibili: (i)

l'Aiguille des Grands Montets attorno alla stazione di arrivo della funivia, (ii) la dorsale inferiore dei Cosmiques e il suo rifugio (3613 m), e (iii) l'Aiguille du Goûter, il suo rifugio (3815 m, St Gervais) e il suo canale di accesso. I diversi siti strumentati sono influenzati da processi gravitativi più o meno ricorrenti (caduta massi e crolli) che hanno già interessato le fondazioni con ripercussioni sulla stabilità di alcune infrastrutture. Ad esempio, il rifugio dei Cosmiques è stato danneggiato da un crollo di 600 m³ nel 1998, mentre la scala che porta al ghiacciaio Rognon dalla stazione di Grands-Montets ha subito un significativo cedimento negli ultimi anni (Figura 6).

La strumentazione termica messa in campo durante il progetto (Figura 6) fornirà conoscenze relativamente a (i) la distribuzione del permafrost (attestare localmente la presenza/assenza di permafrost, facilitare e verificare l'interpretazione dei dati geofisici, studiare le proprietà termiche della roccia) e (ii) l'identificazione dei possibili impatti delle infrastrutture sulla temperatura dei terreni di fondazione (effetto di raffreddamento o riscaldamento). Accoppiato con la strumentazione cinematica e il monitoraggio delle dinamiche geomorfologiche con drone o LiDAR, questo metodo consente anche di dettagliare i processi che causano instabilità.

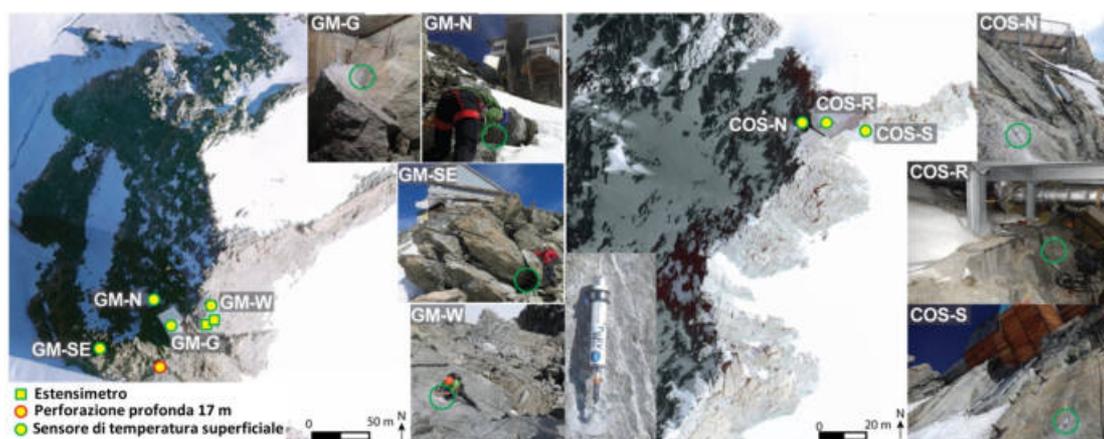


Figura 6 – Strumentazione termica e cinematica dell'Aiguille des Grands-Montets e della dorsale inferiore dei Cosmiques (massiccio del Monte Bianco, Francia).

Un particolare sito di monitoraggio è l'Aiguille du Goûter (3863 m). Oltre il rifugio omonimo che fornisce l'accesso alla vetta del Monte Bianco, è stato oggetto di una strumentazione a finalità multidisciplinare (Figura 7) il suo Grand Couloir, soggetto ad incidenti (3 morti e 8 feriti per stagione estiva, in media) e situato sull'itinerario di accesso al rifugio. Qui sono stati installati: (i) 4 sensori di temperatura nel luglio 2016 a 10 cm di profondità nella roccia a 3345, 3460, 3665 e 3830 m d'altitudine per monitorare lo stato termico in superficie, (ii) un apparecchio fotografico automatico nel giugno 2016 - le foto, abbinata a un modello topografico 3D acquisito da LiDAR, consentono di studiare l'evoluzione del manto nevoso e il suo controllo sul permafrost e la caduta massi -, (iii) una stazione meteorologica disponibile sul ghiacciaio Tête Rousse, e (iv) un sensore di traffico nel giugno 2017 ai piedi del canale per quantificare (numero di passaggi) e caratterizzare (direzione del flusso) la frequentazione di questo settore da parte degli alpinisti per una migliore comprensione della loro vulnerabilità. I primi risultati indicano che esiste un accoppiamento tra periodi in cui il canale non è coperto di neve e periodi durante i quali le cadute massi sono più frequenti. Uno dei nevai più persistenti è proprio quello a livello dell'attraversamento del canale, che facilita il transito degli alpinisti. L'attraversamento del canale sembra condizionato esclusivamente dalle condizioni meteorologiche e non dai periodi durante i quali il canale è in buone condizioni. Infine, i decessi non si verificano necessariamente quando i crolli sono più frequenti.

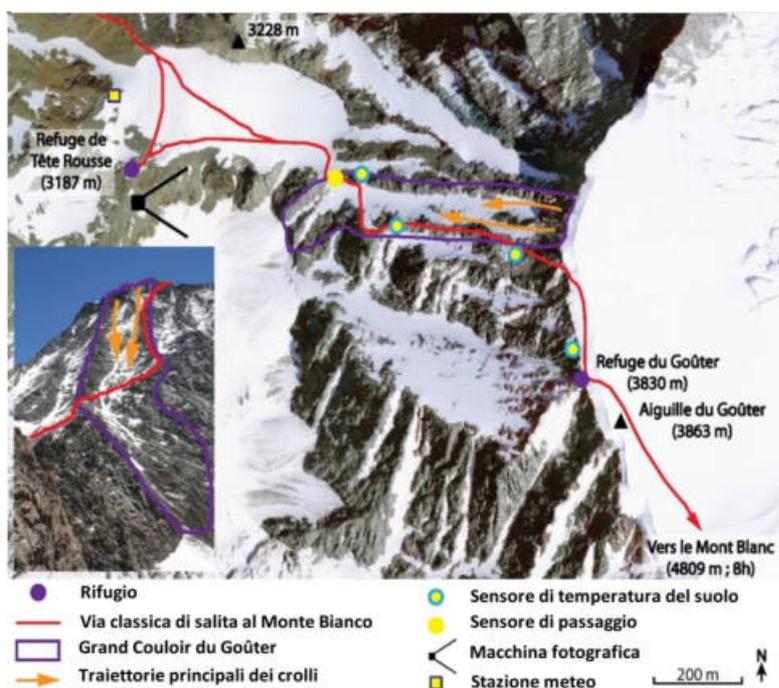


Figure 7 – Il sistema di monitoraggio multidisciplinare del Grand Couloir du Goûter, sul percorso classico di ascensione al Monte Bianco (St. Gervais, Francia).

Nel corso del progetto, è stato anche affrontato il problema del ruolo delle coperture glacio-nivali e dei ghiacciai sospesi sulla distribuzione del permafrost nel più ampio contesto del ritiro delle coperture glacio-nivali e dell'instabilità dei ghiacciai sospesi rispetto al riscaldamento globale. Il progetto ha quindi integrato la strumentazione termica di tre ghiacciai nel massiccio del Monte Bianco: le pareti nord della Tour Ronde, del Monte Bianco del Tacul e dell'Aiguille du Midi (Figura 8). Le perforazioni, da 1 a 16 metri di profondità, sono state eseguite utilizzando una sonda a vapore, al loro interno sono state installate catene di sensori di temperatura. Queste perforazioni hanno fornito una prima serie di dati unici al mondo.



Figura 8 – Installazione di una catena di sensori di temperatura in uno dei ghiacciai sospesi dell'Aiguille du Midi (Chamonix, Francia). Un sensore di temperatura inserito nella roccia completa il dispositivo.

Focus – Installazione di strumentazione in un sito: l'esempio del M. Rocciamelone

Il monte Rocciamelone (3538 m) domina le valli di Susa e Cenischia (provincia di Torino, Italia). Nel 2006-2007, una porzione della dorsale meridionale ad un'altitudine di 3200 m è stata interessata da uno scivolamento roccioso che è evoluto in un crollo/colata di detriti. In assenza di danni, l'attenzione prestata a questo fenomeno dall'ARPA Piemonte è legata alle potenziali conseguenze di un fenomeno di maggiori dimensioni come evidenziato dagli attuali segni di instabilità. Nell'autunno del 2007 è stata installata una rete di monitoraggio geotecnico costituita da estensimetri e capisaldi GPS, a cui si sono aggiunti dal 2013 dei sensori di temperatura in roccia e nelle fratture, in quanto le instabilità potrebbero essere collegate al degrado del permafrost.

Al fine di migliorare il modello interpretativo tra deformazione e temperatura, PrévRisk ha permesso l'installazione (video disponibile su YouTube: <https://youtu.be/yGRi5InYKMI>) nell'ottobre 2016 di una nuova stazione di monitoraggio multiparametrica costituita da una colonna DMS (*Differential Monitoring of Stability* della ditta piemontese C.S.G. s.r.l.) inserita in una perforazione verticale profonda 30 m a quota 3150 m (Figura 9). La colonna dispone di 30 moduli che misurano temperatura e deformazione nella roccia ogni metro, 2 sensori accelerometrici per misurare le vibrazioni della roccia e un piezometro per misurare le pressioni idrauliche nella perforazione.

Il sistema consente quindi di monitorare automaticamente, in modo continuo e in tempo reale, il comportamento geotecnico dell'ammasso roccioso. Particolare attenzione è stata posta al monitoraggio termico, utilizzando sensori di temperatura PT1000 ad elevata precisione.

Durante il primo anno di monitoraggio (ottobre 2016 - ottobre 2017), non è stata osservata alcuna deformazione significativa della colonna e non è stato identificato alcun superamento della soglia accelerometrica. Le temperature misurate finora indicano assenza di permafrost. Il sito è stato presentato ai partner coinvolti nello studio del permafrost in occasione di una giornata congiunta nell'ottobre 2017 ed a tecnici e al pubblico in alcuni eventi divulgativo-formativi.



Figura 9 – Installazione della colonna multiparametrica DMS sul M. Rocciamelone (Piemonte, Italia). A sinistra: perforazione di 30 m di profondità a distruzione di nucleo utilizzando l'aria compressa. Al centro: inserimento della colonna DMS con elicottero. A destra: scatola metallica che ospita i dispositivi di superficie. Il traliccio supporta il sistema di alimentazione fotovoltaica e le antenne di trasmissione dati.

I.C Principali contributi del progetto

- Distribuzione del permafrost nelle pareti rocciose del massiccio del Monte Bianco

Sul massiccio del Monte Bianco è stato applicato un modello statistico-empirico, sviluppato per cartografare la distribuzione del permafrost a livello alpino, integrando le variabili di input locali ad elevata risoluzione spaziale. È stata quindi proposta una carta del permafrost delle pareti rocciose del massiccio basata su un indice numerico che permette di indicare la probabile presenza di permafrost. Condizioni di permafrost sono presenti tra il 45 ed il 79% degli 86 km² delle pareti con inclinazione $\geq 40^\circ$ del massiccio; il permafrost potrebbe essere presente su alcuni settori strutturalmente favorevoli (con fratturazione maggiore) dai 1900 m di altitudine sulla parete nord e 2400 m sulla parete sud. La sua presenza sarebbe più continua dai 2600 m sulle pareti nord e dai 3000 m sulle pareti sud, ma coprirebbe tutte le pareti solo a partire dai 3600 m, per qualunque esposizione (Figura 10). A livello locale, l'interpretazione della carta del permafrost richiede di tenere in considerazione anche il grado di fratturazione e la presenza di neve, aspetti non considerati in questo caso. Le misurazioni della temperatura delle pareti e le misurazioni geofisiche implementate nel quadro di *PrévRisk* hanno completato la validazione del modello. Questa validazione è essenziale per modellare la futura evoluzione del permafrost come è stato fatto nel progetto per tre vette del massiccio del Monte Bianco (vedi oltre).

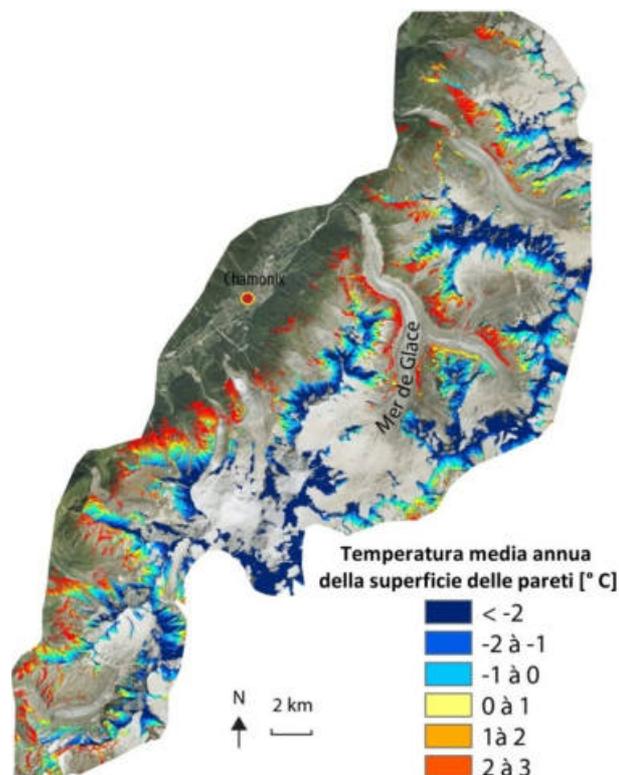


Figura 10 – Distribuzione del permafrost sul versante francese nel massiccio del Monte Bianco.

- Evoluzione della superficie delle coperture glacio-nivali

Ambiente escursionistico molto frequentato dagli alpinisti, le coperture glacio-nivali hanno un ruolo quasi sconosciuto sul permafrost ma l'analisi delle misure effettuate nell'ambito di *PrévRisk* forniranno alcune risposte. La loro evoluzione superficiale è stata valutata utilizzando uno strumento di monoplottting appositamente sviluppato e basato su statistiche bayesiane e algoritmi *Markov Chain Monte Carlo*. Combinando l'uso di un DTM e fotografie per un periodo di 170 anni, è stata ricostruita l'evoluzione di tre coperture glacio-nivali (Figura 11): parete nord della Tour Ronde (3792 m), Linceul aux Grandes Jorasses (4208 m) e il Triangolo del Monte Bianco del Tacul (4028 m). I risultati indicano diversi periodi di crescita/ritiro nel corso del ventesimo secolo. Il primo periodo di ritiro è avvenuto negli anni 1940-'50, seguito da un aumento fino al 1980. Da allora, le coperture mostrano un ritiro generalizzato, inducendo una difficoltà (pendenze più ripide, assenza di neve che copre il ghiaccio) e un aumento della pericolosità degli itinerari per gli alpinisti.

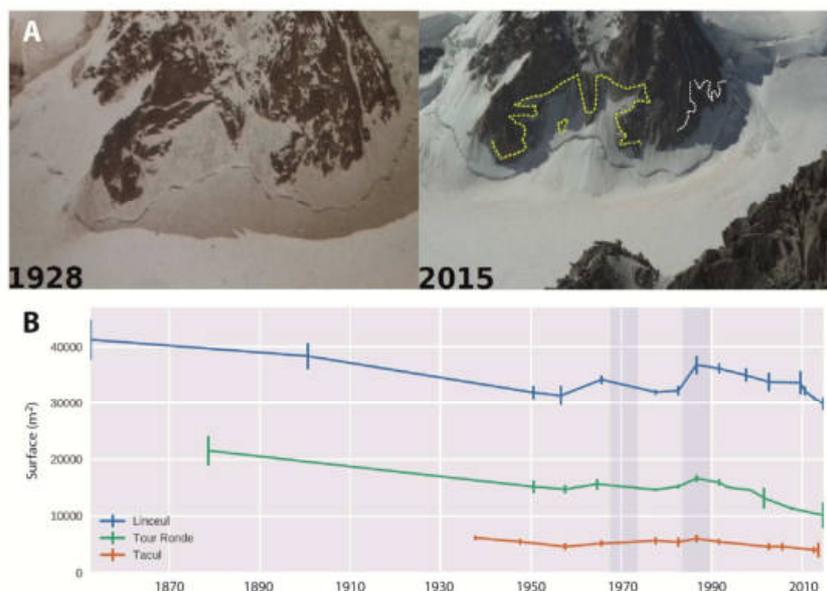


Figura 11 – Evoluzione della superficie delle coperture glacio-nivali delle pareti nord.

A: Triangolo del Monte Bianco del Tacul (Francia). B: Evoluzione di tre coperture glacio-nivali nel corso del XX secolo.

- Analisi dell'APD - Alpine Permafrost Database

Con *PrévRisk*, sono state aggiornate e condivise le misurazioni della temperatura di 12 siti di monitoraggio del permafrost situati in Piemonte, Valle d'Aosta e Haute Savoie (Figura 12). Tra le evidenze del permafrost che possono essere inserite nell'APD, le misurazioni della temperatura sono le più importanti, sia perché rappresentano l'evidenza diretta della presenza/assenza di permafrost sia perché questo parametro può essere monitorato nel tempo.

L'analisi presentata qui non ha lo scopo di fornire un quadro completo dello stato e delle caratteristiche del permafrost nella zona di cooperazione, bensì di presentare lo stato delle temperature del permafrost nelle diverse aree di studio. Il campione (Tabella 1) comprende misurazioni effettuate su parete, versante, plateau e substrato roccioso, in un intervallo di altitudini di circa 1000 m di dislivello. Alcuni punti di misurazione distano tra loro oltre 180 km. Tuttavia, è possibile elaborare alcune considerazioni iniziali.

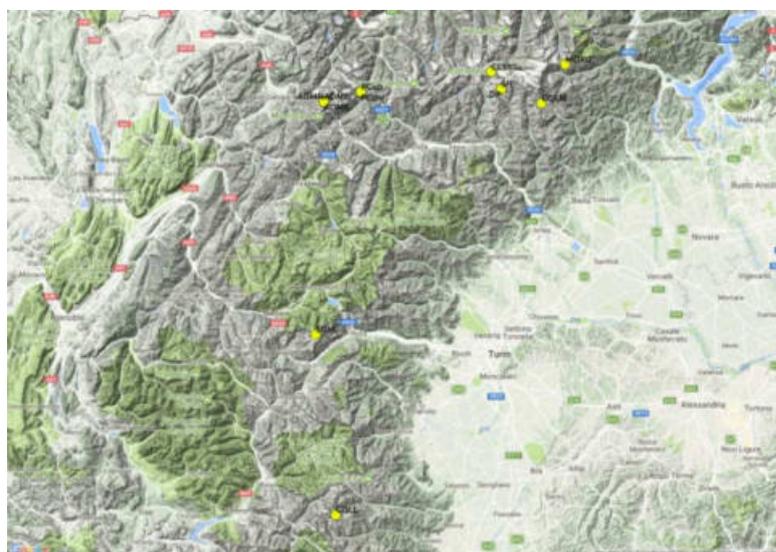


Figura 12 – Localizzazione delle perforazioni di monitoraggio del permafrost aggiornate durante *PrévRisk*.

Nome	Acronimo	Altitudine (m)	Pendenza (°)	Esposizione (°N)	Tipo di superficie	Morfologia
Cabane Carrel	CCS10u	3800	26	224	Substrato	Dorsale
Aiguille du Midi Sud	ADMS	3753	55	135	Substrato	Cima
Aiguille du Midi Est	ADME	3745	65	50	Substrato	Cima
Aiguille du Midi Nord	ADMN	3738	90	345	Substrato	Cima
Cime Bianche SH	SH	3100	5	270	Substr./Detriti	Plateau
Cime Bianche DP	DP	3100	0	0	Substr./ Detriti	Plateau
Petit Grapillon Up	Pgup	3047	5	200	Substrato	Versante
Corno del Camoscio	CCAM	3020	25	10	Substrato	Versante
Petit Grapillon	Pgdw	3000	10	200	Substrato	Versante
Col Somellier	SOM	2970	25	240	Substrato	Plateau
Monte Moro	MORO	2870	25	290	Substrato	Plateau
La Colletta	COLL	2850	5	355	Detriti grossolani	Dorsale

Tabella 1. Caratteristiche dei siti di perforazione in contesto di permafrost.

È possibile inserire nell'APD, per tutti gli anni di osservazione, la media, la minima e la massima temperatura annuale registrate da ciascun sensore di temperatura presente in una perforazione. Da questi dati è possibile determinare lo spessore dello strato attivo e la sua evoluzione nel tempo (Figura 13). Questi spessori variano in base al contesto morfo-climatico e sono compresi tra 2 e 8 m. Inoltre, vi è una chiara tendenza all'aumento della profondità dello strato attivo in relazione al riscaldamento globale. La fredda estate del 2014 corrisponde al minimo della serie.

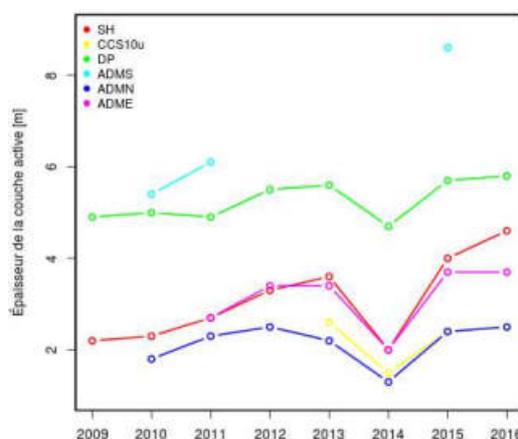


Figura 13 – Evoluzione dello spessore dello strato attivo (asse y) di diversi siti aggiornati.

Scendendo oltre lo strato attivo, a 10 m di profondità (frequentemente raggiunta nelle perforazioni del campione analizzato), le temperature sono anche molto diverse da un sito all'altro (Figura 14), dai -4° C del versante nord dell'Aiguille du Midi (ADM N) fino a $+2^{\circ}$ C del Petit Grapillon (PGdw). Confrontando le serie PGdw e DP si può comprendere come le caratteristiche del sito possono influire sulle temperature in profondità; entrambi i siti si trovano su pendii leggermente inclinati ed alla stessa altitudine (Tabella 1) ma, mentre PGdw non presenta permafrost, DP presenta condizioni di permafrost. Per PGdw, la neve che si accumula durante l'inverno protegge il substrato roccioso dal freddo; DP, invece, è molto ventoso e la neve è spesso completamente erosa dal vento, esponendo il substrato a temperature invernali rigide. Inoltre, PGdw è caratterizzato da un substrato roccioso molto compatto (roccia montonata) che conduce calore. Per DP, la roccia è altamente e tra i blocchi.

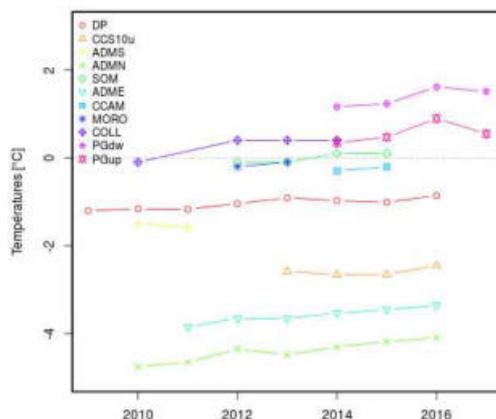


Figura 14 – Evoluzione delle temperature (asse y) a 10 m di profondità in diversi siti di perforazione.

Analizzando l'andamento della temperatura sul lungo termine, il riscaldamento è ben evidente (Figura 14) e in Figura 15 è riportata l'intensità di questa tendenza per quattro perforazioni: il calore dalla superficie tende a penetrare in profondità.

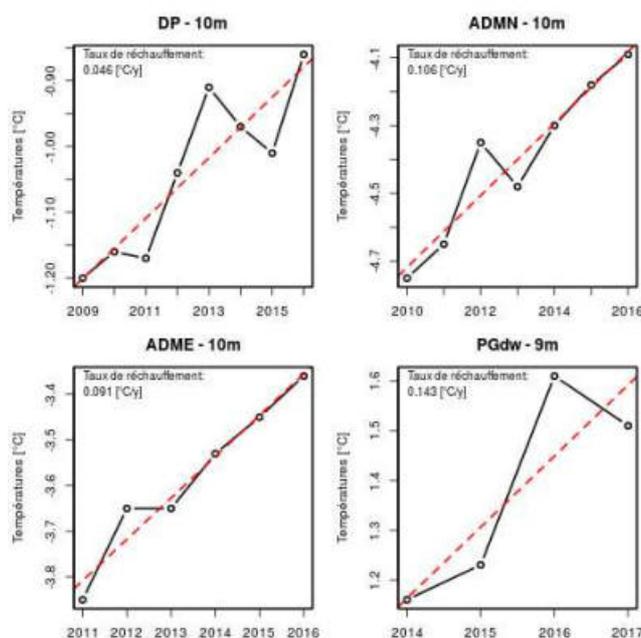


Figura 15 – Tendenza al riscaldamento di quattro siti a 10 m di profondità.

I.D Contributi del progetto per i gestori

- Eventi di crollo e condizioni climatiche

Grazie a *PrévRisk* sono state effettuate circa 80 datazioni cosmogeniche di campioni di granito dal massiccio del Monte Bianco per verificare la relazione clima/crolli su un lungo periodo. Dall'analisi emersero tre gruppi di età: (i) l'optimum climatico dell'Olocene, (ii) l'optimum climatico medievale, e (iii) il periodo successivo alla Piccola Età Glaciale (PEG, XIV÷XIX sec.). Ciò convalida pienamente l'ipotesi di una stretta relazione tra i periodi caldi e l'instabilità delle pareti rocciose. Su una scala secolare, questa relazione era già stata convalidata attraverso la ricostruzione della

dinamica di alcune pareti emblematiche del massiccio del Monte Bianco, quali la parete ovest del Drus e il versante settentrionale delle Aiguilles de Chamonix. L'inventario dei crolli che è stato condotto durante il progetto ha mostrato il ruolo delle temperature sull'insorgere dei crolli. I 650 crolli documentati dal 2007 hanno dimostrato che (i) la frequenza dei crolli durante le estati calde potrebbe essere da 2 a 10 volte maggiore rispetto a quella di un'estate "normale", (ii) il 97% dei crolli si verifica in contesto di permafrost (temperato, cioè vicino a 0°C, per la maggior parte di essi), (iii) i crolli sono principalmente legati a tre processi, eventualmente combinati: approfondimento dello strato attivo, pressione idraulica e trasporto di calore in profondità attraverso la percolazione dell'acqua. Infine, l'analisi statistica dei crolli identificati indica che i crolli di maggiori dimensioni si devono ancora attivare (Figura 16). È quindi essenziale prevenirne gli effetti negativi.

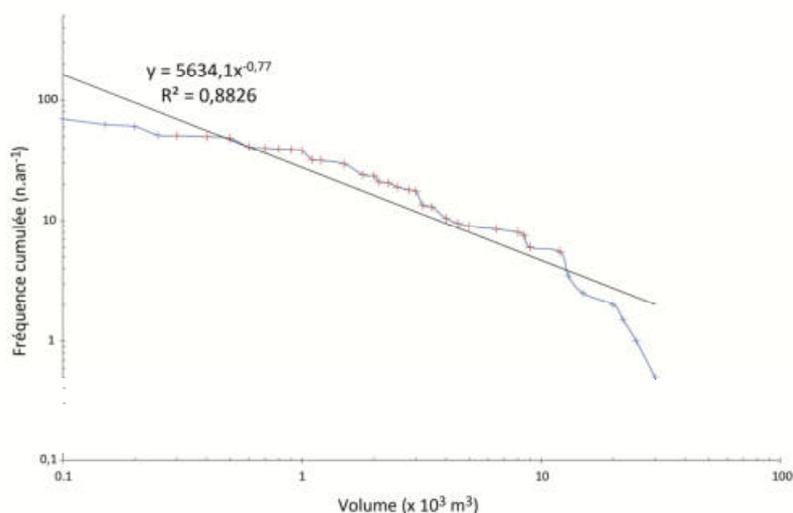


Figura 16 – Distribuzione cumulata (asse y) dei 313 crolli documentati sul massiccio del Monte Bianco durante le estati torride del 2003 e 2015. Il paragone tra questa distribuzione e la legge di potenza (linea retta) che regola le frequenze dei crolli in maniera generale suggerisce che gli eventi piccoli e molto grandi non sono sufficientemente rappresentati: per i fenomeni di piccole dimensioni ciò può essere legato a mancanza di osservazioni, per i volumi molto grandi ci si aspetta una loro recrudescenza nei prossimi anni/decenni in alta montagna.

- Infrastrutture e permafrost, quali relazioni?

La presenza di un'infrastruttura genera due tipi di impatti sulla distribuzione locale del permafrost e l'evoluzione del suo regime termico. Da un lato, l'infrastruttura può indurre un riscaldamento locale (Figura 5) e contribuire alla degradazione del permafrost nell'ammasso roccioso; per cui, sotto l'effetto del sovraccarico collegato all'infrastruttura e a causa del calore rilasciato dall'edificio (riscaldamento, gruppo elettrogeno, ecc.), lo strato attivo si approfondisce. D'altra parte, può esserci un raffreddamento locale nel sottosuolo indotto da sistemi attivi (pali refrigerati) o passivi (circolazione d'aria tra il terreno e l'edificio) o dal semplice effetto ombra sul terreno che favorisce il mantenimento locale del permafrost.

Tra i siti strumentati in *PrévRisk* si è osservato che i rifugi dei Cosmiques e du Goûter hanno riscaldato il permafrost durante la loro costruzione ma oggi sembrano indurre un raffreddamento locale in quanto queste infrastrutture non sono in contatto diretto con il suolo ma sono sopraelevate su una struttura metallica. Diversamente, la stazione della funivia dei Grands Montets e le sue attività apportano calore nel sottosuolo. I risultati della strumentazione termica permetteranno nel

tempo di specificare e quantificare i collegamenti tra infrastrutture e raffreddamento/riscaldamento locale del permafrost.

- Quanto sono pericolosi i rock glacier (RG)?

I RG sono corpi detritici costituiti da elementi rocciosi da fini (ghiaie) a molto grossolani (blocchi) mescolati a ghiaccio (permafrost), di forma lobata, che scorrono lentamente per gravità. Questo movimento è reso possibile grazie al ghiaccio interno che si deforma. Queste forme si sviluppano sui pendii alla base delle pareti fredde di roccia da cui proviene il materiale detritico. Per loro natura, i RG favoriscono la traslazione del permafrost a quote eccezionalmente basse (sotto i 2500 m di altitudine nelle Alpi).

Come entità dinamiche, i RG possono presentare un rischio in base alla loro velocità di deformazione ed alla loro posizione rispetto al transito di persone o alla presenza di infrastrutture o di aree urbanizzate. Nelle Alpi, molti RG scorrono sui pendii direttamente sopra i fondovalle. Quando la fronte di un RG si destabilizza, i materiali rilasciati possono causare crolli e/o alimentare colate detritiche potenzialmente distruttive.

Diversi studi recenti hanno mostrato una tendenza generale all'accelerazione dei rock glacier nell'ultimo decennio a causa dei cambiamenti climatici. Le temperature in aumento accelerano la fusione della neve e del ghiaccio interstiziale, aumentando significativamente il contenuto di acqua liquida all'interno del RG. Ciò favorisce i processi di deformazione e di colamento.

In questo contesto, le amministrazioni pubbliche dei territori soggetti a questi fenomeni dovrebbero intraprendere al più presto studi preliminari per identificare i RG potenzialmente pericolosi e, eventualmente, per avviare un monitoraggio. In Svizzera, ad esempio, dove alcuni casi sono stati studiati per diversi anni, i gestori assistiti da tecnici e ricercatori sperimentano dei sistemi di monitoraggio e di allarme per anticipare il verificarsi di condizioni favorevoli all'accelerazione improvvisa e/o all'innescio di colate detritiche.

- Scenario di evoluzione del permafrost in pareti rocciose

La comprensione quantitativa dell'evoluzione del permafrost è un elemento cruciale nella valutazione dei rischi futuri. A tal proposito sono state studiate tre cime del massiccio del Monte Bianco nel contesto di *PrévRisk* (Figura 17). Situate tra 3160 e 4300 m di quota, le loro temperature sono state modellate (modello a elementi finiti in 2D tenendo conto della conduzione del calore e del trasferimento del calore latente, convalidato dalle misurazioni ERT e dalla temperatura nelle perforazioni) considerando due scenari di emissioni di gas serra e tre diversi periodi: la fine della Piccola Età Glaciale, oggi (2015) ed il 2100. I risultati indicano che durante il XXI secolo, il permafrost temperato (vicino a 0° C) dovrebbe estendersi almeno fino a 4300 m di altitudine nelle pareti rocciose esposte a sud e fino a 3850 m nei versanti rivolti a nord.

Le pareti con permafrost presentano talvolta coperture di ghiaccio o ghiacciai sospesi che complicano notevolmente la valutazione della loro evoluzione termica, una sfida analoga a quella di determinarne la loro instabilità. Ciò nonostante, il progetto ha evidenziato una situazione preoccupante all'Aiguille du Midi: alla base del ghiacciaio sospeso, il ghiaccio nel settore strumentato è attualmente a -0,5° C (alla Tour Ronde, in condizioni analoghe di esposizione e quota, la temperatura basale è di circa -6° C). Questa temperatura molto elevata suggerisce una possibile destabilizzazione a breve termine di questo tipo di ghiacciai. Per prevenire i rischi associati alla

possibile rottura del ghiacciaio, nei prossimi mesi dovranno essere eseguite misurazioni complementari ed integrative a quelle acquisite nel quadro di *PrévRisk*.

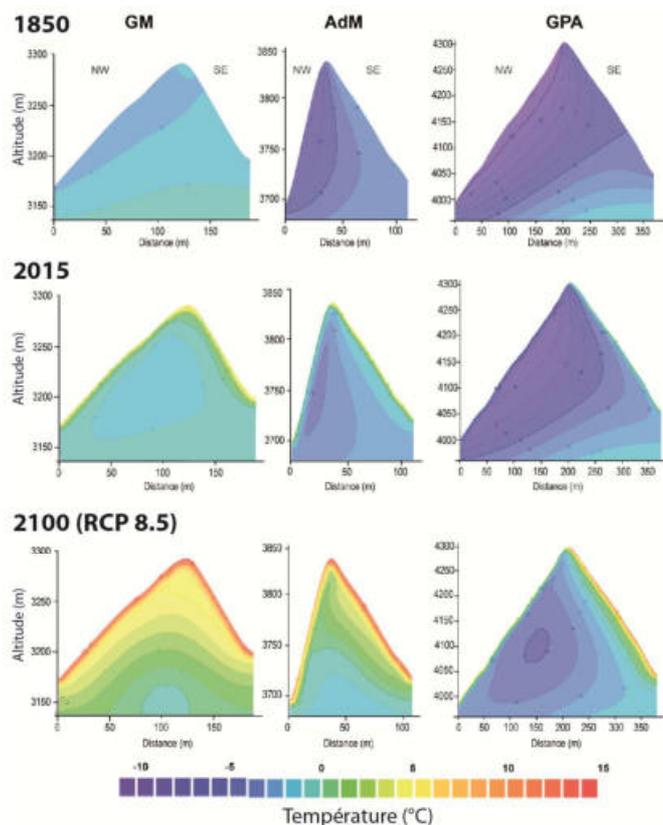


Figura 17 – Modellazione della temperatura per tre cime del massiccio del Monte Bianco (Aiguille des Grands Montets, Aiguille du Midi e Grand Pillar d'Angle) per gli anni 1850, 2015 e 2100 (scenario climatico RCP 8.5).

II. Rischi glaciali collettivi e individuali

II.A Nozioni di glaciologia

Un ghiacciaio è un corpo di ghiaccio in movimento, nato dalla diagenesi della neve ghiacciata (da 5 a 10 anni nelle Alpi). Gli ambienti favorevoli ai ghiacciai sono caratterizzati da un clima freddo e umido, che consente precipitazioni sufficienti sotto forma di neve. Si tratta quindi non solo di un sistema idro-climatico (Figura 18) ma anche di una riserva di acqua dolce.

Per un ghiacciaio, il suo “bilancio di massa” è la differenza tra accumulo e ablazione, espressa come volume equivalente di acqua (Figura 19). Il periodo di riferimento è l'anno idrologico, tra l'1 ottobre e il 30 settembre. Se l'accumulo è maggiore dell'ablazione, il bilancio di massa è positivo. Se, al contrario, l'accumulo non può compensare le perdite, il bilancio di massa è negativo. Sul campo, un bilancio di massa negativo porta al ritiro del ghiacciaio sul più o meno breve periodo a seconda delle caratteristiche del ghiacciaio. Il bilancio di massa è quindi un indicatore sia dello stato del ghiacciaio sia dell'andamento climatico della regione in cui è situato. A partire dagli anni 1980, si registrano ovunque nelle Alpi dei bilanci di massa negativi, il che implica un ritiro generalizzato dei ghiacciai. Nella Valle d'Aosta, l'area coperta da ghiacciai si è per esempio ridotta del 62% tra il 1820 e il 2012 e del 17% tra il 1999 e il 2012 (dati dell'Inventario dei ghiacciai della Valle d'Aosta). Le serie storiche più lunghe di bilancio di massa indicano una loro tendenza a diventare sempre più negativi.

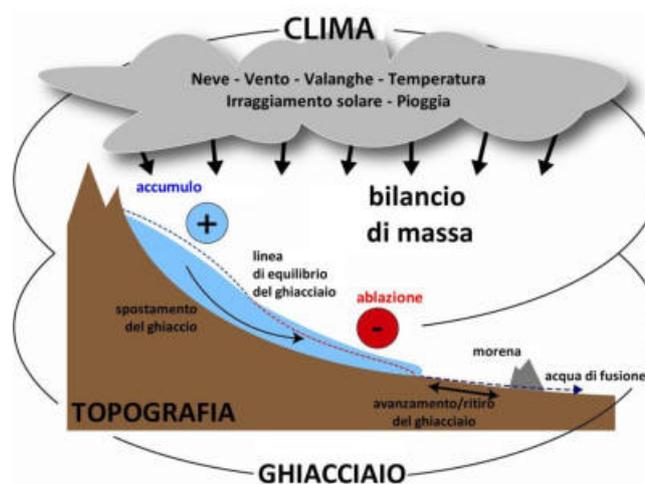


Figura 18 – Il ghiacciaio, sistema idro-climatico.

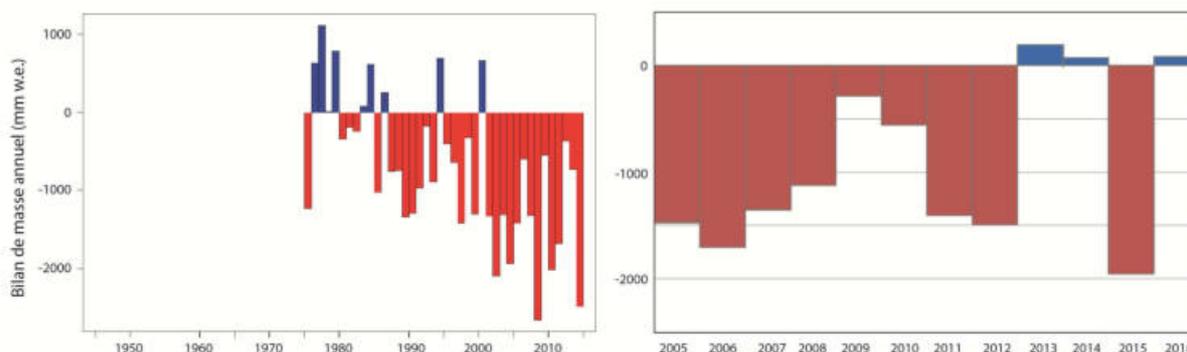


Figura 19 – Bilanci di massa (asse y) dei ghiacciai dell'Argentière (massiccio del Monte Bianco, Francia; a sinistra) e Rutor (Italia; a destra). I bilanci positivi sono blu, quelli negativi sono rossi. Il ghiacciaio dell'Argentière è uno dei ghiacciai di riferimento per il World Glacier Monitoring Service (WGMS). Il ghiacciaio Rutor ha una serie di dati più breve. La differenza osservata tra i due ghiacciai, che sono comunque vicini (circa 30 km), sottolinea l'importanza degli effetti legati al sito.

Il movimento dei ghiacciai si verifica principalmente in tre modi: per deformazione plastica del ghiaccio (flusso), per scivolamento del ghiacciaio e per deformazione del letto sedimentario subglaciale. Si dice che i ghiacciai sono "freddi" se il ghiaccio ha una temperatura negativa. Ciò si verifica in modo particolare nei ghiacciai ad alta quota. Al contrario, i ghiacciai sono "temperati" se il ghiaccio è a 0°C, ad eccezione dello strato più superficiale (circa 15 m), che è esposto a variazioni stagionali. I cambiamenti climatici possono causare non solo il ritiro dei ghiacciai, ma anche variazioni nel loro regime termico. Tuttavia, a differenza dei ghiacciai temperati che scorrono sul loro letto roccioso, i ghiacciai freddi sono "bloccati" sulla roccia. Un ghiacciaio sospeso su una parete verticale, per definizione freddo, può quindi essere destabilizzato durante la transizione verso uno stato temperato producendo valanghe di ghiaccio. Nelle Alpi tali fenomeni sono in aumento e per questo devono essere attentamente monitorati; anche i laghi epi- ed endo-glaciali, che possono svuotarsi repentinamente causando inondazioni o colate detritiche, devono essere opportunamente sorvegliati. Con il cambiamento climatico, i pericoli glaciali che hanno sempre influenzato la vita di alta montagna stanno cambiando in frequenza, grandezza e localizzazione.

II.B Il caso del versante nord del Mont Blanc du Tacul

Il Monte Bianco, massiccio tra i più glacializzati delle Alpi con 94 apparati glaciali, presenta diversi ghiacciai la cui evoluzione comporta rischi significativi per chi vive e frequenta la montagna e/o le valli. I maggiori problemi sono legati ai ghiacciai sospesi e ai ghiacciai la cui fronte si trova su pendii ad elevata inclinazione in quanto subiscono rapidi cambiamenti morfologici, sebbene non sia facile seguire la loro evoluzione a breve termine. Alcuni siti sono particolarmente difficili da gestire a causa del loro elevato numero di frequentatori, della loro esposizione a rischi particolari o perché presentano rischi per i fondovalle. È il caso del primo sito pilota selezionato nel quadro di *PrévRisk*: la parete nord del Mont Blanc du Tacul (4248 m). La sua via normale è anche parte di quella di ascesa al Monte Bianco con partenza dalla funivia dell'Aiguille du Midi. Si sono verificati numerosi incidenti con a volte numerose vittime a causa di distacchi di seracchi che hanno prodotto ingenti valanghe.

Queste problematiche hanno messo in evidenza la necessità del monitoraggio fotografico di questa superficie glaciale dedicata a documentare l'evoluzione dei seracchi. Ciò è utile anche in caso di incidente (valanga, distacco di seracchi) in quanto consente ai soccorsi di conoscere il numero di persone eventualmente coinvolte, evitando ricerche e indagini superflue ed una esposizione al rischio di valanga per i soccorritori.

- Dispositivo di ripresa

Installato il 10 giugno 2016, il sistema fotografico di monitoraggio (telecamera AXIS P1357, funzionante fino a -30° C) è stato preventivamente adattato alle condizioni estreme per consentire la ripresa di immagini ad alta frequenza con trasmissione dei dati in tempo reale a un server situato in valle. A causa delle intemperie e dei fulmini che hanno colpito due volte (29 giugno e 27 agosto 2016) una prima macchina fotografica installata sull'Aiguille du Midi, una seconda è stata installata sotto la terrazza del rifugio dei Cosmiques (3613 m) il 22 Settembre 2016. Il dispositivo è stato posizionato in una scatola di protezione e dispone di un sistema anti-appannamento. Dopo aver risolto un problema di alimentazione elettrica (pannello solare) il 22 febbraio 2017, la fotocamera è tornata in funzione (Figura 20).

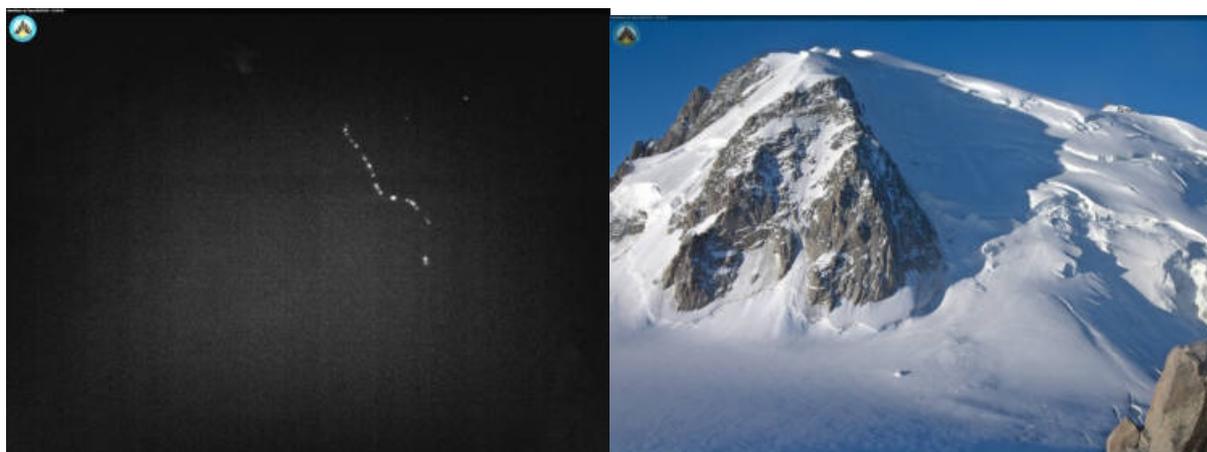


Figura 20 – Due fotografie del Monte Bianco di Tacul (Chamonix, Francia) del 6 luglio 2017. A sinistra alle 04:00 (sono molto ben visibili le luci frontali delle cordate). A destra alle 07:15.

- Anticipare e soccorrere

In caso di incidente, i soccorritori del Peloton de Gendarmerie de Haute Montagne (PGHM) hanno accesso ai dati del server de *La Chamoniarde* tramite i quali determinano se e quante persone sono potenzialmente coinvolte (Figura 20). Ad esempio, il server è stato interrogato durante una valanga avvenuta nel giugno 2016 per confermare l'assenza di vittime.

D'altra parte, le aree di montagna molto alta non vengono sufficientemente considerate dal punto di vista della valutazione del rischio valanghivo. Le foto, che consentono di osservare e seguire l'attività valanghiva nell'area del Monte Bianco del Tacul, saranno utilizzate in futuro per valutare la stabilità del manto nevoso. Inoltre, forniranno un'assistenza importante per migliorare la caratterizzazione glaciologica del settore da parte dell'*EDYTEM-CNRS*.

II.C Il caso del ghiacciaio Whymper delle Grandes Jorasses

- Dinamica del ghiacciaio

Il ghiacciaio Whymper delle Grandes Jorasses (massiccio del Monte Bianco) forma nella sua parte sommitale un ghiacciaio sospeso di grandi dimensioni (Figura 21). Raggiunge i 4203 m alla Punta Walker e termina a valle con una fronte di ghiaccio verticale, verso i 4050 m di altitudine. Come tutti i ghiacciai sospesi con base fredda, scorre per deformazione, senza scivolamento alla base. In assenza di ablazione per fusione, raggiunge periodicamente un volume critico, che spesso si traduce in un improvviso e voluminoso collasso del ghiacciaio. Con un'osservazione e un'analisi retrospettiva del fenomeno per diversi decenni, è ora possibile applicare un modello per prevedere il collasso del ghiacciaio monitorandone le velocità di movimento.



Figura 21 – Il ghiacciaio di Whymper (Courmayeur, Italia).

A sinistra: la parete sud delle Grandes Jorasses e il ghiacciaio sospeso in alto al centro. A destra: il ghiacciaio seguito dalla telecamera automatica posta presso la stazione di Punta Helbronner.

- Dispositivo di ripresa

Per il monitoraggio del ghiacciaio sospeso nell'ambito del progetto *PrévRisk* è stata installata una macchina fotografica digitale automatizzata ad alta definizione vicino alla stazione a monte della funivia "Skyway" (Punta Helbronner) ad un'altitudine di 3450 m. Il dispositivo è costituito da una fotocamera Canon 1200D con obiettivo Canon da 200 mm e un microcomputer che gestisce l'acquisizione e la trasmissione delle immagini. Connettività e alimentazione sono fornite dalle reti delle funivie.

A luglio 2017, l'installazione di un duplicatore focale ha permesso di aumentare il dettaglio delle foto (Figura 21). L'apparecchio consente di osservare l'apertura di fratture all'origine delle instabilità. Questi dati completano il monitoraggio topografico del ghiacciaio e il metodo utilizzato per l'elaborazione delle foto, basato sul calcolo degli spostamenti espressi in numero di pixel con corrispondenza "vera" sul campo, è stato sviluppato da *Fondazione Montagna Sicura*. Il metodo è stato quindi adottato dal partenariato ed integrato nel quadro della condivisione di competenze e strumenti in *PrévRisk*.

- Prevedere e allertare

Fondazione Montagna Sicura (FMS) gestisce, per conto della Regione Autonoma Valle d'Aosta, il sistema di monitoraggio in continuo del ghiacciaio Whympfer. Viene assicurato per mezzo di una stazione topografica automatica che misura in continuo la distanza tra i prismi installati sulla superficie del ghiacciaio e la stazione installata a fondo valle (Planpincieux). L'analisi di questi dati consente di quantificare la velocità di movimento del ghiacciaio. La tipica velocità di movimento nella fase di crescita è di circa 3-4 cm al giorno. Quando la velocità aumenta e supera i 10 cm al giorno, viene lanciato un avviso di pericolo di crollo. Se la velocità continua ad aumentare, l'avviso è confermato ed è possibile determinare con precisione il giorno del crollo. In base al volume stimato ed alle condizioni di innevamento dei pendii a valle del seracco, *FMS*, con il supporto del Dipartimento Attività Geologiche della Regione Valle d'Aosta e della Protezione Civile, organizza l'evacuazione delle frazioni minacciate.

Focus – Gestione delle crisi alle Grandes Jorasses

L'ultimo collasso importante del ghiacciaio sospeso Whympfer è avvenuto nel settembre 2014. La Figura 22 presenta le velocità di movimento del ghiacciaio prima dell'evento. Inizialmente tipiche della crescita del ghiacciaio, le velocità aumentano prima dell'accelerazione che porta al collasso. Ciò avvenne in due episodi (Figura 23): il 23 settembre con 52.000 m³ di ghiaccio mobilizzato e il 29 settembre con 55.000 m³. Nessuno dei due eventi ha raggiunto il fondovalle, come previsto grazie alla quantificazione dei volumi instabili accoppiata con un'analisi della traiettoria. *FMS*, tuttavia, aveva condotto una campagna di comunicazione molto importante sui social network per mettere in guardia la popolazione e scoraggiare gli alpinisti dall'effettuare scalate nella zona.

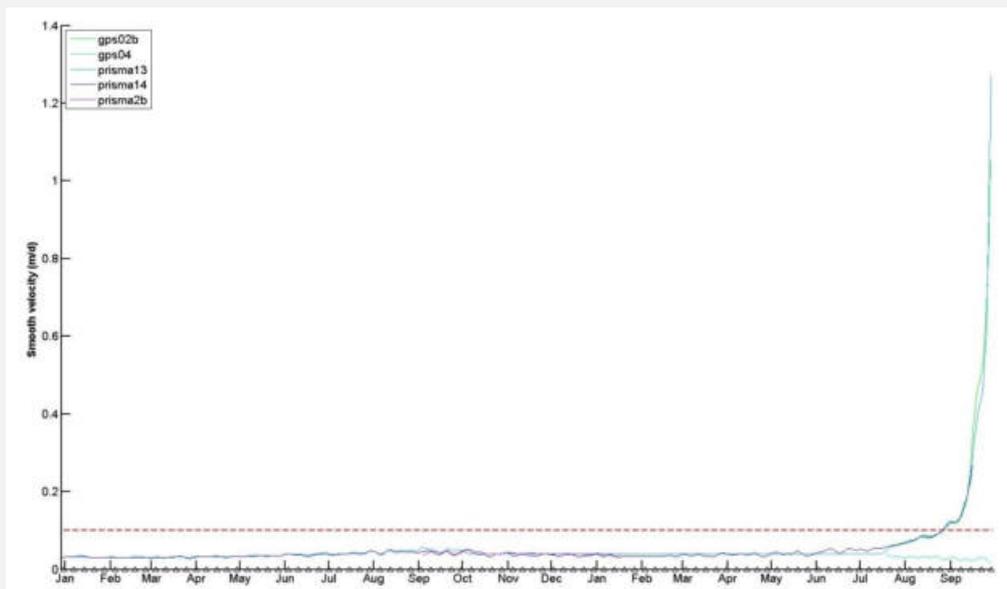


Figura 22 – Le velocità (asse y) del ghiacciaio Whympfer da gennaio 2013 a settembre 2014.



Figure 23 – Evoluzione del ghiacciaio Whympfer (Courmayeur, Italia) durante la crisi del settembre 2014.

II.D Il caso della instabilità del ghiacciaio della Charpoua

La fronte del ghiacciaio della Charpoua (massiccio del Monte Bianco) produce da due decenni crolli regolari all'origine di valanghe di ghiaccio mortali, come nel settembre del 1997 o nel luglio 2014 (Figura 24). Sebbene il sito oggi non sia più interessato da un grave problema di pericolosità e accessibilità poiché è stato creato un nuovo percorso per raggiungere il rifugio di Charpoua senza passare sotto il ghiacciaio, l'obiettivo in *PrévRisk* è stato quello di capire i meccanismi della instabilità che possono verificarsi altrove nelle Alpi.

- Dinamica del ghiacciaio da quasi un secolo

Per ricostruire l'evoluzione del ghiacciaio dal 1930 al 2015 sono state utilizzate 37 immagini aeree e satellitari. Dopo un periodo di leggero ritiro durato fino all'inizio degli anni '50, la fronte del ghiacciaio ha subito un declino più significativo per un decennio seguito da un costante progresso

fino alla fine degli anni '80. Da allora, a parte una debole riaccelerazione a metà degli anni 2000, il ghiacciaio ha subito una riduzione molto marcata. Durante l'intero periodo di studio, è possibile osservare due distinti flussi di ghiaccio. Le rotture provengono principalmente dal fianco destro, molto bianco (ghiaccio rimodellato) e fessurato. Sul fianco sinistro, il ghiacciaio è più coperto di detriti e sembra meno fessurato. Inoltre, il ritiro del ghiacciaio ha rivelato una topografia favorevole alle valanghe: una volta staccato, il ghiaccio scivola su ampie lastre, lisce e ripide, dove la valanga aumenta di velocità.

Tra il 1997 e il 2014 sono state documentate 18 valanghe, incrociando diverse fonti di informazione (giornali, testimonianze orali, foto, relazioni di soccorso, ecc.). Nessun evento è stato registrato prima dell'attuale ritiro del ghiacciaio iniziato alla fine degli anni '80.

- Origine della instabilità della fronte del ghiacciaio della Charpoua

Il monitoraggio fotografico del ghiacciaio della Charpoua (macchina da presa automatica Canon 1000D installata sul versante opposto), implementato in *PrévRisk*, ha permesso di mostrare che: (i) le piccole instabilità che si sono verificate dal 2016 sono state originate dalla parte della fronte situata sul fianco destro; (ii) un eccesso di accumulo sul lato destro legato alla presenza di un grande cono generato da valanghe provenienti dal versante sud del Drus accelera sicuramente il flusso del fianco destro (Figura 24); (iii) l'idrologia (pressioni idrauliche) favorirebbe lo scivolamento e la rottura della fronte del ghiacciaio sulla sua metà Nord-Ovest (lato destro). Vari fattori contribuiscono così all'attuale instabilità della fronte, che tuttavia dovrebbe ridursi nei prossimi anni con la prosecuzione del ritiro glaciale.



Figura 24 – Contesto valanghivo del ghiacciaio della Charpoua (Chamonix, Francia). A sinistra: la valanga di ghiaccio del luglio 2014 che ha causato la morte degli alpinisti. A destra: fotointerpretazione su una fotografia del 23 giugno 2017 dal sistema automatico di ripresa. Un cono di valanga (in rosso) costituisce un eccesso di accumulo all'origine di una accelerazione del lato destro del ghiacciaio (in arancione) che provoca regolarmente una rottura della fronte (freccia gialla), favorita dai flussi d'acqua subglaciali (all'interno della freccia gialla: il torrente).

II.E Studio innovativo sui ponti di neve sopra i crepacci

I ponti di neve, che, come un arco, si formano più o meno permanentemente sopra i crepacci dei ghiacciai, sono un importante elemento dell'ambiente glacio-nivale poco o nulla studiato prima de progetto *PrévRisk*. Tuttavia, queste fragili strutture sono una delle condizioni più comuni nella pratica alpinistica, che comportano un rischio significativo per alpinisti e sciatori (Figura 25). Le rotture dei ponti di neve sono infatti frequenti e causano diversi morti ogni anno nel massiccio del Monte Bianco. Tra il 2008 e il 2014, sui ghiacciai del versante francese – fuori dall'itinerario di sci della Vallée Blanche, che rappresenta comunque una parte importante dei soccorsi alle vittime di cadute nei crepacci – la *Gendarmerie* (PGHM), che fornisce soccorso in montagna nel settore del massiccio del Monte Bianco, e il Sistema Nazionale di Osservazione della Sicurezza della Montagna (SNOSM) hanno segnalato 37 feriti e 13 morti per cadute in crepaccio, con una media di due morti all'anno.



Figura 25 – Un esempio di rottura di un ponte di neve sulla superficie del ghiacciaio Biafo (Pakistan, foto M. Clarys). La perforazione del ponte di neve si è formata al centro durante una escursione con racchette da neve (in neve polverosa). Una tempesta di neve ha nascosto i crepacci e ha reso uniforme la superficie del ghiacciaio. La freccia indica il taglio del bordo di neve causato dalla corda durante la caduta.

- Il sondaggio on-line

Data la quasi totale assenza di dati su queste fragili strutture, nel 2016 è stato implementato un sondaggio on-line per costruire una prima serie di conoscenze basate sul feedback di esperienze dirette. Sono stati redatti due questionari on-line, distribuiti su Internet attraverso social network e siti specializzati (*Camptocamp*, *Mountain Magazine*, ecc.) ed i siti dei partner di progetto (*La Chamoniarde*, *Fondazione Montagna Sicura*, *CREALP* e *ARPA*): un questionario verteva sugli incidenti/infortuni, l'altro sulla gestione del rischio specifico rappresentato dalla rottura dei ponti di neve. I questionari erano rivolti a sciatori e alpinisti che si erano trovati di fronte alla rottura di un ponte di neve come vittime o semplici testimoni. L'obiettivo era raccogliere un gran numero di feedback di esperienze.

Attraverso il primo questionario sono stati identificati 209 casi mentre 297 persone hanno risposto al secondo questionario. I dati sono confluiti in un specifico database creato *ad hoc* la cui analisi ha consentito, in particolare, una prima caratterizzazione dei casi di rottura dei ponti di neve.

La media altitudinale delle rotture dei ponti di neve non cambia in modo significativo a seconda della stagione (circa 3200 m), ma i valori estremi sono interessanti. In estate, i valori sono fortemente centrati attorno ai 3200 m perché i ghiacciai sono privi di neve alle quote più basse; i ponti di neve sono quindi poco presenti. In primavera, invece, le quote assumono i valori più elevati. Questa dispersione è spiegata da una perdita di spessore e da una marcata compattazione del manto nevoso con l'aumento delle temperature, nonché da un indebolimento delle strutture a causa della umidificazione della copertura nevosa. Uno strato spesso non è necessariamente sinonimo di solidità; la coesione della neve, infatti, gioca un ruolo più importante. Le testimonianze di rottura che implicano spessori stimati superiori a 1,5 m (20 casi) indicano neve bagnata (in superficie) o polverosa fredda, non molto coesa. Viceversa, i casi di rottura per neve ghiacciata si riferiscono generalmente a spessori bassi: 40 cm in media. Un grande spessore del ponte associato alla neve ghiacciata è una garanzia di sicurezza. Nei casi in cui gli alpinisti possono stimare la larghezza del ponte di neve, questo è un fattore decisionale importante: il ponte tende a collassare nella sua interezza quando è di grandi dimensioni, spesso comportando salvataggi più complessi per i malcapitati. Molte altre informazioni sono reperibili (in francese) nell'articolo pubblicato nella rivista *Neige et Avalanches* (n. 158).

- Una strumentazione senza precedenti

Per caratterizzare la formazione dei ponti di neve, la loro struttura, la loro evoluzione e le modalità della loro scomparsa graduale (fusione) o improvvisa (rottura), è stato necessario strumentare un sito nel settore del Col du Midi (massiccio del Monte Bianco), a circa 3450 m di quota. Durante l'installazione della strumentazione (video sul canale YouTube <https://youtu.be/sO1Y4BwyR8A>), nel settembre 2016, il crepaccio - orientato N280° - era scoperto per una lunghezza di 37,5 m e una larghezza massima di 6 m corrispondente anche alla larghezza massima del crepaccio quel giorno. Le nevicate o la neve portata dal vento sono gli unici processi che consentono la progradazione della o delle cornici e, successivamente, la chiusura del crepaccio. Il dispositivo installato comprende quindi un anemometro a banderuola (*Young 05103*) e un sistema di misurazione della profondità della neve (*Campbell SR50A*), alle quali è associata una fotocamera digitale automatica (*Canon 1000D*) per monitorare l'evoluzione del ponte di neve. Nel campo di ripresa di quest'ultima è stato posto un riferimento per dare la scala dimensionale degli elementi identificati/misurati nelle foto. Una volta che il ponte di neve si è formato, gli strati di neve che lo costituiscono possono essere influenzati da diverse metamorfosi dipendenti da alcuni fattori: (i) dalle temperature esterne (metamorfosi di fusione), (ii) dalla energia delle radiazioni solari e (iii) dal gradiente di temperatura tra l'aria all'interno del crepaccio e l'aria esterna (metamorfosi della neve asciutta); tali trasformazioni possono portare ad un aumento o, al contrario, a una riduzione della resistenza dei ponti. Nel sito, sono state pertanto misurate anche le temperature dell'aria esterna, di quella interna (nel crepaccio) ed a diverse profondità nella neve, così come la quantità di energia solare ricevuta. Infine, nel crepaccio, un estensimetro a filo permette di monitorare l'evoluzione della sua apertura che modula, molto probabilmente, le proprietà meccaniche del ponte di neve. La collaborazione tra EDYTEM-CNRS e *Fondazione Montagna Sicura* ha permesso di studiare le caratteristiche della neve del ponte recentemente formatosi nel dicembre 2016. I dati raccolti dopo l'installazione della strumentazione nel settembre 2016 fino alla fine del progetto sono di altissima qualità, nonostante la difficoltà a mantenere un'installazione ad alta quota in un settore mobile e mutevole come un ghiacciaio (rottura delle attrezzature durante le tempeste, manutenzione necessaria molto regolare, ecc.).



Figura 26 – Dettaglio della strumentazione al Col du Midi (Chamonix, Francia). 1 - anemometro a banderuola o anemogoniometro; 2 - piranometro; 3 - pannelli solari; 4 - macchina fotografica; 5 - sensore di temperatura dell'aria; 6 - sensori di temperatura (1 ogni metro di altezza); 7 - tiranti (cavi d'acciaio); 8 - nivometro ad ultrasuoni; 9 - traliccio in alluminio; 10 - acquisitore dati (datalogger) e batterie; 11 - ancoraggi ("corpi morti"); 12 - perforazione strumentata con sensori di temperatura posti a 1, 3 e 5 m di profondità; 13 - cavidotto per strumenti posti all'interno del crepaccio; 14 - sensori di temperatura (interni al crepaccio); 15 - estensimetro a filo (interno al crepaccio); 16 - elemento di riferimento lungo 8 m per la ripresa fotografica.

- Gestione del rischio e percorsi in tema di prevenzione

L'incrocio delle informazioni acquisite attraverso il sondaggio online con i dati della strumentazione del ponte di neve ha portato alla produzione di documenti (Figura 27) che consentono a sciatori e alpinisti di far proprie alcune conoscenze acquisite nel quadro del progetto. Questi documenti hanno anche lo scopo di fornire agli utilizzatori degli strumenti di analisi del rischio e degli elementi di prevenzione, già utilizzati dai partner, tra i quali *La Chamoniarde*, per lo sviluppo di azioni di prevenzione.

Focus – Formazione di un ponte di neve

I dati acquisiti nel quadro della strumentazione di un ponte di neve vicino all'Aiguille du Midi hanno rivelato in particolare che i ponti di neve possono formarsi estremamente rapidamente (Figura 27 - 4a-b): sono sufficienti poche ore o pochi giorni. In questa costruzione, la velocità del vento e la sua direzione sono parametri importanti: il vento deve essere abbastanza forte da trasportare la neve sospesa nell'aria o per saltazione, e deve soffiare in maniera sufficientemente perpendicolare al crepaccio. Se soffia parallelamente alla lunghezza del crepaccio, si verifica un suo riempimento (Figura 27 - 4a). Non è tuttavia necessario che nevichi perché un ponte si formi: il semplice spostamento della neve al suolo da parte del vento può essere sufficiente per la sua costruzione.









Ridurre il rischio di cadere in un crepaccio

Alcuni consigli...

I ponti di neve che coprono i crepacci sono importanti nella pratica dell'alpinismo e dello sci in alta montagna. Tuttavia, costituiscono un rischio significativo in caso di rottura, a causa soprattutto della difficoltà nell'individuarli e stimarne la solidità.

Prima dell'escursione informarsi!

Aree dei crepacci

- Conoscere il ghiacciaio in condizioni avverse (1) consente di apprezzare le aree più pericolose (2), proprio come la consultazione di fotografie nelle stesse condizioni.
- Consultare topoguide e siti web specializzati.
- OHM - www.chamoniarde.com - 04 50 53 22 08



(1) Agosto

(2) Gennaio

Ghiacciaio del Géant, massiccio del Mont Blanc

Condizioni nivo-metereologiche del momento e dei giorni precedenti



Tranne in casi eccezionali (3) in cui le nevicate sono sufficienti, è il vento che costruisce i ponti, spesso rapidamente: solo alcune decine di ore separano (4a) e (4b) ma senza una metamorfosi favorevole della neve e/o nuove nevi, questo ponte è estremamente fragile. Lo stato della neve e il vento dei giorni precedenti sono parametri importanti da tenere in considerazione.

Durante l'escursione Identificare...

Segni di presenza di un ponte

Nessun segno è stato rilevato nella metà degli incidenti. Bisogna sapere come identificarli...



Configurazione della rottura



e prevenire...

Se le interruzioni di pendenza sono favorevoli ai crepacci, le aree pianeggianti non ne sono esenti! Un ponte spesso non significa necessariamente solidità. L'uso degli sci per attraversare ponti di neve poco larghi (<2 m) limita il rischio di rottura per perforazione. Il maltempo aumenta notevolmente il pericolo (segni non visibili, soccorso problematico).

Adatta la tua legatura in cordata in base alle condizioni e padroneggia le tecniche di progressione e salvataggio!

Figura 27 – Volantino "Ridurre il rischio di cadere in un crepaccio" per i frequentatori dell'alta montagna.

