



HAL
open science

De l'observation des écroulements aux solutions opérationnelles : près de deux décennies d'études sur les risques cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc

Florence Magnin, Ludovic Ravel, Matan Ben-Asher, Josué Bock, Maëva Cathala, Pierre-Allain Duvillard, Pierrick Jean, Jean-Yves Josnin, Suvrat Kaushik, André Revil, et al.

► To cite this version:

Florence Magnin, Ludovic Ravel, Matan Ben-Asher, Josué Bock, Maëva Cathala, et al.. De l'observation des écroulements aux solutions opérationnelles : près de deux décennies d'études sur les risques cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 2023, 111-2, 10.4000/rga.11644 . hal-04773163

HAL Id: hal-04773163

<https://hal.science/hal-04773163v1>

Submitted on 8 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License



Journal of Alpine research/Revue de géographie alpine

111-2 | 2023

Les versants englacés de la haute montagne alpine :
évolution holocène et impacts de la crise climatique
actuelle

De l'observation des écroulements aux solutions opérationnelles : près de deux décennies d'études sur les risques cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc

Florence Magnin, Ludovic Ravel, Matan Ben-Asher, Josué Bock, Maëva
Cathala, Pierre-Allain Duvillard, Pierrick Jean, Jean-Yves Josnin, Suvrat
Kaushik, André Revil et Philip Deline



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/11644>

DOI : 10.4000/rga.11644

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

From Rockfall Observation to Operational Solutions: Nearly 20 years of Cryo-gravitational Hazard
Studies in Mont-Blanc Massif - URL : <https://journals.openedition.org/rga/11703> [en]

Éditeur :

UGA Éditions/Université Grenoble Alpes, Association pour la diffusion de la recherche alpine

Référence électronique

Florence Magnin, Ludovic Ravel, Matan Ben-Asher, Josué Bock, Maëva Cathala, Pierre-Allain
Duvillard, Pierrick Jean, Jean-Yves Josnin, Suvrat Kaushik, André Revil et Philip Deline, « De
l'observation des écroulements aux solutions opérationnelles : près de deux décennies d'études sur les
risques cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc », *Journal of Alpine Research | Revue de
géographie alpine* [En ligne], 111-2 | 2023, mis en ligne le 02 novembre 2023, consulté le 06 février
2024. URL : <http://journals.openedition.org/rga/11644> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.11644>

Ce document a été généré automatiquement le 6 février 2024.



Le texte seul est utilisable sous licence CC BY-NC-ND 4.0. Les autres éléments (illustrations, fichiers
annexes importés) sont « Tous droits réservés », sauf mention contraire.

De l'observation des écroulements aux solutions opérationnelles : près de deux décennies d'études sur les risques cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc

Florence Magnin, Ludovic Ravel, Matan Ben-Asher, Josué Bock, Maëva Cathala, Pierre-Allain Duvillard, Pierrick Jean, Jean-Yves Josnin, Suvrat Kaushik, André Revil et Philip Deline

Les recherches menées au cours des 18 dernières années dans le MMB ont été majoritairement financées par plusieurs programmes de recherche : projets Alcotra PERMAdataROC, PrévRisk Haute-Montagne, AdaPT Mont-Blanc, et PrévRisk CC ; projets EU AlpineSpace PermaNET ; projets ANR ANR-14-CE03-000 VIP Mont-Blanc et ANR-19-CE01-0018 WISPER. Les auteurs remercient la Communauté de communes de la vallée de Chamonix Mont-Blanc, la Compagnie du Mont-Blanc, la Compagnie des guides de Chamonix et l'École nationale de ski et d'alpinisme pour leur soutien depuis 2005, ainsi que les nombreux collègues qui ont contribué à ces projets, en particulier (liste non-exhaustive): Paolo Pogliotti, Umberto Morra di Cella and Edoardo Cremonese de l'Agence Regionale per la Protezione dell'Ambiente Valle d'Aosta (Aosta, Italie), Jeannette Noetzli désormais à l'Institut pour la Neige et les Avalanches (Davos, Suisse), Stephan Gruber actuellement à l'Université de Carleton (Ottawa, Canada), Michael Krautblatter désormais à l'Université Technique de Munich (Allemagne), et Jan Beutel actuellement à l'Université d'Innsbruck (Autriche). Les auteurs remercient également le comité éditorial du Journal of Alpine research/Revue de géographie Alpine pour la gestion du manuscrit, l'éditrice invitée (Marta Chiarle), le relecteur anonyme et Lothar Schrott pour leurs commentaires constructifs et les corrections sur le manuscrit.

Introduction

- 1 Depuis la fin des années 1980, le changement climatique a provoqué de profonds changements dans les paysages, les écosystèmes, les ressources économiques et les risques naturels en haute montagne. Les paysages glaciaires sont peu à peu remplacés par des paysages à dominante minérale, avec des accumulations de matériaux instables (moraine, éboulis), des parois raides soumises aux processus de décompression post-glaciaire, et de nouveaux lacs qui se forment dans les surcreusements glaciaires ou derrière les barrages morainiques (Haeberli *et al.*, 2016). En parallèle, les mouvements de masse affectant les parois périglaciaires s'intensifient, pouvant entraîner la déstabilisation d'infrastructures (par ex. refuges, remontées mécaniques ; Duvillard *et al.*, 2019), la modification ou la disparition des voies d'alpinisme (Mourey *et al.*, 2019) et de potentielles catastrophes majeures provoquées par des événements de grande ampleur et des processus en cascade (Haeberli *et al.*, 2016). L'émergence de ces risques nécessite le développement de connaissances approfondies pour établir des stratégies de prévention et d'adaptation ciblées.
- 2 Alors que le recul des glaciers est un facteur couramment considéré pour appréhender la déstabilisation des versants, notamment par le biais de processus d'ajustement dit « paraglaciaires » (Ballantyne *et al.*, 2014), la dégradation du permafrost — c'est-à-dire le dégel des terrains dont la température reste durablement $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — en réponse au réchauffement atmosphérique, est progressivement devenue le centre de nombreux questionnements scientifiques (par ex. Gruber *et al.*, 2004). L'absence de prise en compte du permafrost de paroi (c.-à-d. le permafrost affectant les parois rocheuses) jusqu'au début des années 2000, principalement en raison de son invisibilité, a fortement limité la compréhension systémique de la morphodynamique alpine. Un retour aux études pionnières de la géomorphologie périglaciaire (par ex. Walder, 1985) et de l'ingénierie des milieux froids (par ex. Mellor, 1971) combiné au développement d'études spécifiques sur le permafrost de parois (par ex. Gruber *et al.*, 2004) et sur les parois à permafrost, c.-à-d. les parois susceptibles d'être affectées par du permafrost (par ex. Ravanel *et al.*, 2010), a permis de mieux comprendre le rôle du permafrost dans la morphodynamique des parois.
- 3 Plusieurs processus thermo-hydro-mécaniques associés au permafrost sont considérés comme de possibles mécanismes de déclenchement des écroulements ($V > 100\text{ m}^3$) (Krautblatter *et al.*, 2013). Ils opèrent à différentes profondeurs et selon différents temps de réponse aux forçages climatiques, allant des échelles de temps saisonnières telles que l'approfondissement de la couche active (c.-à-d. la couche superficielle qui dégèle en été et regèle en hiver), aux échelles de temps millénaires avec la dégradation du permafrost formé en profondeur au cours de l'Holocène (Noetzli et Gruber, 2009). Les roches gelées et les fractures remplies de glace sont mécaniquement altérées lorsqu'elles se réchauffent et dégèlent, ce qui rend les parois à permafrost particulièrement sensibles au réchauffement atmosphérique. Mais comme les ruptures rocheuses sont d'abord le résultat de contraintes normales (liées à la masse rocheuse), le rôle des différents processus associés à la dégradation du permafrost dépend de l'épaisseur des masses rocheuses. Les profondeurs de détachement $< 20\text{ m}$ sont plutôt associées aux ruptures au niveau des joints de glace (contact roche-glace ou glace-glace), tandis que les profondeurs de détachement $> 20\text{ m}$ sont plutôt le résultat d'un changement des propriétés mécaniques de la roche (Krautblatter *et al.*, 2013). La

compréhension des ruptures survenant au niveau des fractures remplies de glace est limitée car elles impliquent une variété de processus thermiques, hydrogéologiques et mécaniques non linéaires. En effet, la chaleur se propage par conduction thermique dans la masse rocheuse, mais les fractures favorisent la ventilation de l'air et l'advection de chaleur par les infiltrations d'eau. Les échanges de chaleur latente lors de la congélation de l'eau et de la fonte de la glace jouent également un rôle important. Par ailleurs, les circulations d'eau dans la roche scellée par de la glace peuvent conduire au développement d'une colonne d'eau à l'origine de pressions hydrostatiques élevées. L'élévation de la température n'est donc pas le seul facteur de déclenchement possiblement associé à la dynamique du permafrost. La présence fréquente de glace et d'eau dans les niches d'arrachement (par ex. Deline *et al.*, 2013) illustre la complexité de ces mécanismes de déclenchement combinant le réchauffement et la fonte des joints de glace mais aussi des processus thermiques et mécaniques liés à l'eau. Ainsi, relier ces explications théoriques à une compréhension technique des ruptures de versants rocheux observées pose de nombreux défis pour le développement de solutions opérationnelles de gestion des risques.

- 4 Suite aux études pionnières sur le permafrost de paroi initiées en Suisse après l'été caniculaire de 2003, marqué par de nombreux écroulements rocheux (Gruber *et al.*, 2004), les recherches ont débuté en France dans le massif du Mont-Blanc (MMB) en 2005. Le MMB est naturellement apparu comme un terrain d'étude privilégié, notamment grâce à son unique combinaison d'aiguilles et d'éperons rocheux plus ou moins englacés, et aux études antérieures sur les avalanches rocheuses (Deline *et al.*, 2012). Plusieurs projets de recherche se sont succédé, largement initiés ou dirigés par Philip Deline et maintenant portés par plusieurs chercheurs actifs au sein du laboratoire EDYTEM. Cette contribution résume les 18 premières années de recherche dans le MMB sur les processus gravitaires induits par la dégradation de la cryosphère des parois alpines — ici nommés « processus cryo-gravitaires » — et qui abordent les questions suivantes. Où et quand se développent les aléas cryo-gravitaires ? Quels sont les processus physiques impliqués dans leur déclenchement ?

Le massif du Mont-Blanc : un laboratoire à ciel ouvert privilégié pour l'étude de la morphodynamique et de la cryosphère des parois alpines

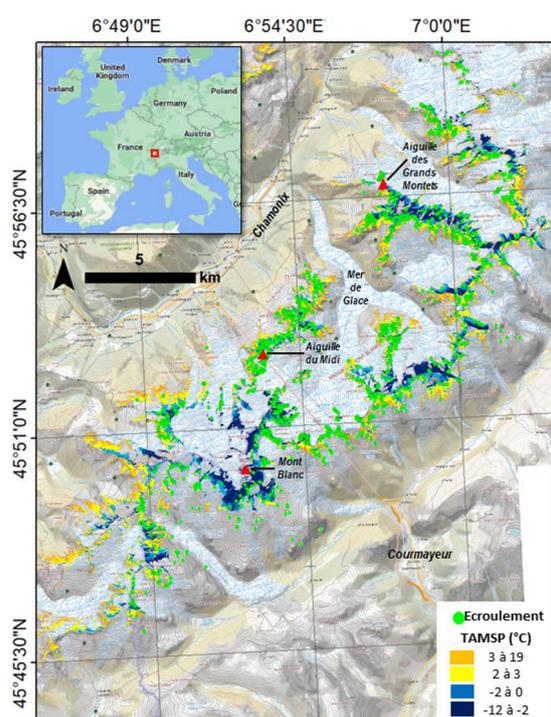
Cadre général

- 5 Le MMB est l'un des massifs cristallins externes des Alpes européennes occidentales. Il s'étend sur 550 km² en France, Suisse et Italie. Il constitue une fenêtre sur le socle hercynien situé dans les nappes Penniques et Helvétiques. Il est composé de deux unités lithologiques principales : une série métamorphique hercynienne de 453 ± 3 Ma (principalement des gneiss et des schistes mafiques) et un granite calco-alcalin de 304 ± 3 Ma traversé de filons aplitiques (von Raumer et Bussy, 2004). D'orientation SO-NE, ce batholite est limité au NO par une large zone de cisaillement et par des chevauchements à l'E et au SE. Les failles et les zones de cisaillement sont principalement orientées SO-NE, avec un pendage subvertical organisé selon une géométrie en éventail qui souligne les principales caractéristiques topographiques du massif. Fortement asymétrique, l'angle moyen de pente entre le sommet du mont Blanc

à 4808 m d'altitude et Courmayeur (1230 m) sur son versant SE est d'environ 40°, tandis qu'il est de 15° sur son versant NO qui descend vers Chamonix à 1040 m d'altitude. Cette asymétrie se retrouve aussi dans les conditions climatiques, la crête principale avec 28 sommets au-dessus de 4000 m d'altitude marquant une frontière climatique où les flux méditerranéens et atlantiques se rencontrent. Par conséquent, le côté italien est généralement plus chaud et plus sec que le côté français.

- 6 À la fin des années 2000, les glaciers couvraient encore près de 100 km² (Gardent *et al.*, 2014 ; Fig. 1), avec un retrait glaciaire marqué depuis les années 1980 tandis que la morphodynamique des parois rocheuses s'accélère, posant des risques pour les infrastructures et les populations (Deline *et al.*, 2012).

Figure 1



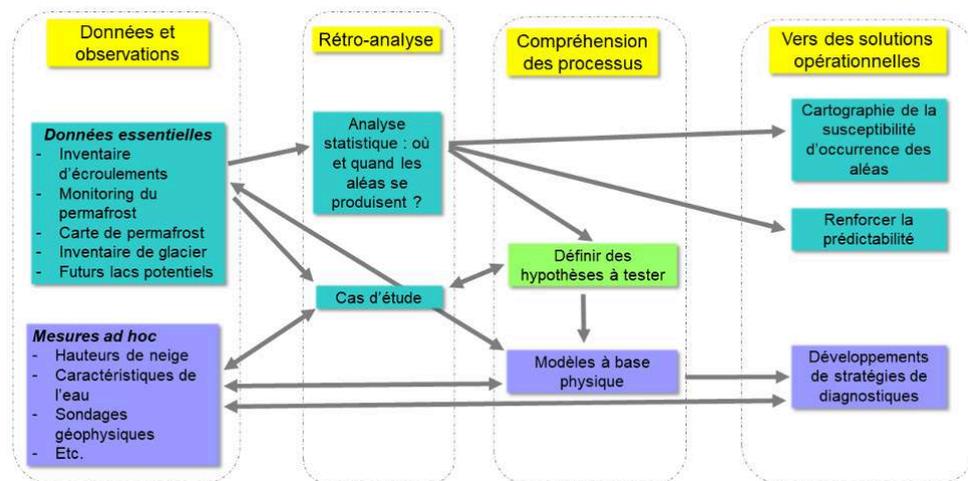
Massif du Mont-Blanc, écroulements inventoriés pendant la période 2007-2021 et TAMSP (Température annuelle à la surface des parois) prédite. Carte d'arrière-plan de l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). La distribution des écroulements en fonction de la TAMSP est illustrée dans la Figure 3.

Principales données et connaissances acquises au cours des 18 dernières années

- 7 Les investigations sur le permafrost ont débuté à l'automne 2005, avec les premiers capteurs de température installés à proximité de la surface (à des profondeurs de 3 à 55 cm) des parois de l'aiguille du Midi (AdM, 3842 m ; Magnin *et al.*, 2015), alors que quelques mois auparavant, le pilier Bonatti s'écroulait (292 000 m³ ; Guérin *et al.*, 2020) et attirait l'attention sur la morphodynamique récente des parois du MMB. Depuis lors, diverses données ont été collectées et obtenues à partir d'observations de terrain et de modèles pour mieux comprendre le permafrost et la dynamique des parois, et formuler

des hypothèses sur le développement des aléas cryo-gravitaires (Fig. 2). Les analyses de la distribution temporelle des écroulements dans le MMB sur des échelles de temps saisonnières à millénaires ont montré que les phases d'activité gravitaire sont concomitantes des périodes chaudes, telles que l'Optimum climatique de l'Holocène (Gallach *et al.*, 2020), les années 1940 et les trois dernières décennies (Ravel et Deline, 2011), ou les étés caniculaires de 2003 et 2015 (Ravel *et al.*, 2017). Depuis 2007, un réseau d'observateurs signale les écroulements dans la partie centrale du massif et contribue à l'établissement d'une base de données détaillée (Fig. 1 ; Ravel et Deline, 2013). En parallèle, les données de température de proche surface des parois de l'AdM ont été incluses dans une collection de données à l'échelle des Alpes (Cremonese *et al.*, 2011) qui a été utilisée pour calibrer un modèle de régression linéaire multiple — le « *rock model* » (Boeckli *et al.*, 2012) — calculant la Température annuelle moyenne de la surface des parois (TAMSP) à la Température annuelle moyenne de l'air (TAMA) et au Rayonnement solaire incident potentiel (RSIP). Le modèle a été utilisé pour cartographier le permafrost sur l'ensemble de l'arc alpin et a été ensuite appliqué au MMB sur la base d'un Modèle numérique de terrain (MNT) à une résolution de 4 m. Le même modèle mis en application avec la TAMA de 1981-2010 mesurée à Chamonix et spatialisée avec un gradient altitudinal de 0,55 °C/100 m est illustré dans la Figure 1. Depuis 2010, les études sur le permafrost sont renforcées par un suivi de la température dans 5 forages : 4 forages d'une profondeur de 10 m à l'AdM (le dernier installé en 2021), et un forage de 17 m de profondeur installé en 2017 à l'Aiguille des Grands Montets. Le suivi des parois par la répétition de levés par balayage laser terrestre, comme à la Tour Ronde (3792 m, Rabatel *et al.*, 2008), a mis en lumière la relation possible entre la fonte des « tabliers de glace » (TG, corps de glace immobiles) et l'occurrence des écroulements. Les TG ont été récemment inventoriés par Kaushik *et al.*, (2022), complétant ainsi un précédent inventaire des glaciers (Gardent *et al.*, 2014) qui a été utilisé pour modéliser les surcreusements des lits glaciaires dans le but d'anticiper l'emplacement potentiel de futurs lacs (Cathala *et al.*, 2021). Ces lacs pourraient être une source d'aléas en cascade de forte magnitude dans les décennies à venir, mais aussi de nouvelles ressources économiques (Haeberli *et al.*, 2016). Les développements les plus récents visent à relier ces différentes données pour mettre au point des approches intégrées des aléas cryo-gravitaires afin de contribuer au développement de solutions opérationnelles pour les aménageurs du territoire, les géotechniciens et les pratiquants de la montagne (Fig. 2). Si les progrès récents aident à mieux définir où et quand ces aléas cryo-gravitaires surviennent, les principaux défis sont liés à la compréhension de leur déclenchement et de leur développement spatial.

Figure 2



Organisation de la recherche sur les aléas cryo-gravitaires dans le massif du Mont-Blanc.

Distribution spatio-temporelle des risques cryo-gravitaires

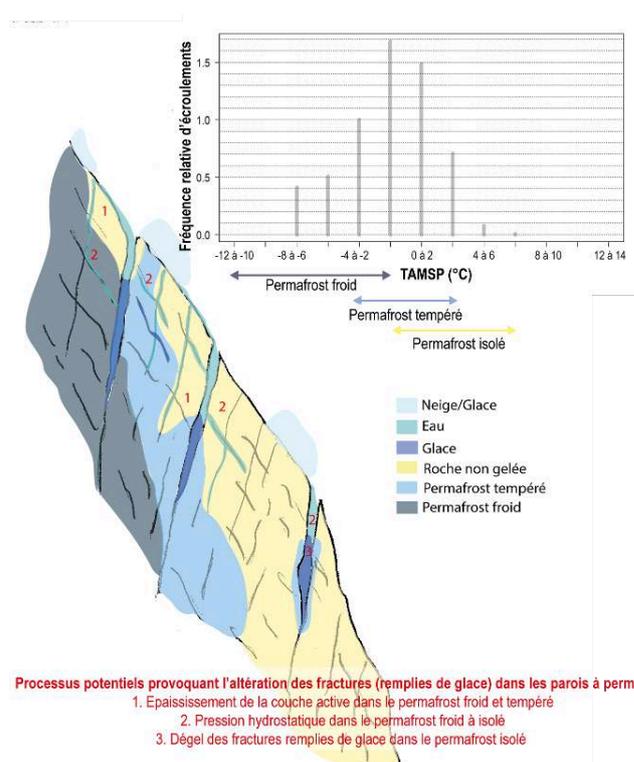
- 8 De 2007 à 2021, 1389 écroulements > 100 m³ ont été recensés avec leurs coordonnées précises, des paramètres topographiques, la date d'occurrence, et, si possible, diverses caractéristiques supplémentaires telles que la profondeur de la cicatrice ou l'observation de glace dans celles-ci. La plupart des événements sont superficiels (profondeur médiane et moyenne de la cicatrice d'environ 4 m) et leur survenue, si elle est liée à la dynamique du permafrost, est très probablement due à une rupture au contact de la glace dans les fractures (Krautblatter *et al.*, 2013). L'analyse de cet ensemble de données révèle des caractéristiques clés de la distribution spatiale et temporelle des écroulements, aidant à identifier les mécanismes de déclenchement.

Les écroulements sont-ils provoqués par la dégradation de la cryosphère ?

- 9 La Figure 3 illustre la distribution des 1152 événements qui se sont produits dans la zone couverte par la carte de TAMSP (Fig. 1). Celle-ci représente la TAMSP moyenne sur une période de 30 ans, proposant un état d'équilibre de la TAMSP pouvant être représentative des conditions potentielles de permafrost en profondeur si l'on ignore les flux de chaleur transitoires et tridimensionnels (Noetzli *et al.*, 2007 ; Noetzli et Gruber, 2009). Cependant, les valeurs absolues de TAMSP sont en partie biaisées par les limites du « rock model » qui ne prend pas en compte la neige, et par son implémentation sur un MNT qui lisse les reliefs accidentés. Pour limiter les interprétations abusives, l'analyse se base sur une appréciation qualitative de la TAMSP qui est alors traduite en conditions de permafrost tempéré (proche de 0 °C) et isolé à continu et froid. En prenant ces précautions, les écroulements apparaissent associés au permafrost de manière manifeste ; aucun événement n'a été observé dans des parois non gelées. Le pic de fréquence des écroulements est situé dans des conditions de

permafrost tempéré tandis que peu d'événements se sont produits dans des conditions de permafrost froid ou isolé. La large gamme de conditions de permafrost dans lesquelles les écoulements se sont produits, soutient l'hypothèse selon laquelle divers processus liés au permafrost sont susceptibles de déclencher des écoulements, incluant le réchauffement de la glace qui persiste dans les fractures du fait de l'effet retardateur de la consommation de chaleur latente lorsque cette glace fond, ou l'infiltration d'eau dans des conditions de permafrost froid (Hasler *et al.*, 2011 ; Fig. 3). Mais les conditions proches du point de fusion (permafrost tempéré) restent les plus actives. Par ailleurs, 11,5 % des écoulements se sont produits dans des pentes qui étaient couvertes par des TG dans les années 1950 (Ravel et al., 2023b). Bien que cette quantification soit limitée car elle ne tient pas compte du recul des glaciers au pied des parois et qu'elle soit possiblement affectée par de possibles décalages entre les TG digitalisés et le référencement des écoulements, elle suggère qu'une partie des écoulements est directement liée aux perturbations thermiques et mécaniques associées au retrait des glaces de surface, qui incluent la décompression mécanique (Ballantyne *et al.*, 2014), la formation du permafrost (Wegmann *et al.*, 1998) ou d'une couche active (Hartmeyer *et al.*, 2020).

Figure 3



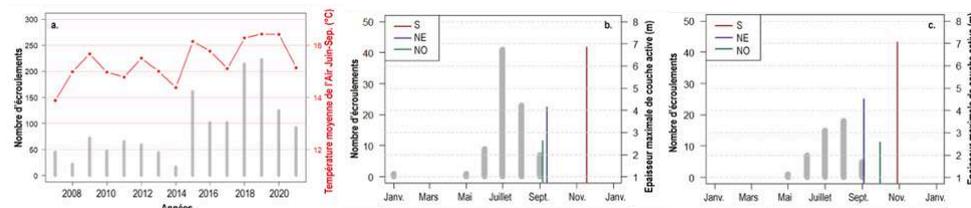
Distribution des écoulements (fréquence relative : pourcentage d'écoulements / pourcentage de surface des parois) dans le massif du Mont-Blanc selon des conditions de permafrost interprétées (haut) et possibles mécanismes de déclenchement associés au permafrost.

Les écoulements sont-ils provoqués par le dégel saisonnier ?

- 10 Les écoulements recensés se sont principalement produits pendant la saison chaude : la période de juin à septembre rassemble 96 % des événements. Depuis 2015, le nombre

annuel d'écroulements a considérablement augmenté, en concomitance avec la hausse de la température moyenne de l'air (TMA) pendant la saison chaude. En général, plus la saison chaude a une température élevée, plus la fréquence des écoulements est élevée (Fig. 4a). L'approfondissement de la couche active (CA) et le réchauffement et la fonte de la glace contenue dans les fractures qui en résultent peuvent alors être considérés comme les principaux mécanismes déclencheurs, expliquant ainsi le lien potentiel entre une TMA plus élevée et des écoulements plus fréquents (Fig. 3). Cependant, certaines observations ne corroborent pas ce lien direct. Par exemple, en 2019, presque deux fois plus d'écroulements ont été observés qu'en 2020 (Fig. 4a), or la CA s'est approfondie entre 2019 et 2020 dans 2 des 3 forages de l'AdM (Fig. 4bc), en concordance avec une TMA plus élevée (Fig. 4a). De plus, la plupart des écoulements surviennent généralement bien avant que le maximum de CA ne soit atteint (c'est particulièrement le cas pour 2020). Une telle constatation a déjà été rapportée en comparant la fréquence des écoulements et la CA modélisée pour l'été caniculaire de 2003 en Suisse (Gruber *et al.*, 2004), ce qui soutient l'hypothèse de processus liés à l'eau accélérant le transfert de chaleur ou provoquant une pression qui ne peut pas être représentée par des mesures 1D ou un modèle de conduction thermique simple. Une telle hypothèse est également étayée par l'estimation récente de l'infiltration potentielle d'eau calculée à partir de la fonte de la neige et des cumuls de pluie, qui a montré qu'il y avait davantage d'eau disponible pour l'infiltration en 2019 qu'en 2020 (Ben-Asher *et al.*, 2022). Évaluer les processus liés à l'eau est donc devenu un défi majeur pour mieux comprendre à la fois les processus de dégradation du permafrost et les mécanismes de déclenchement des écoulements (Krautblatter *et al.*, 2012).

Figure 4



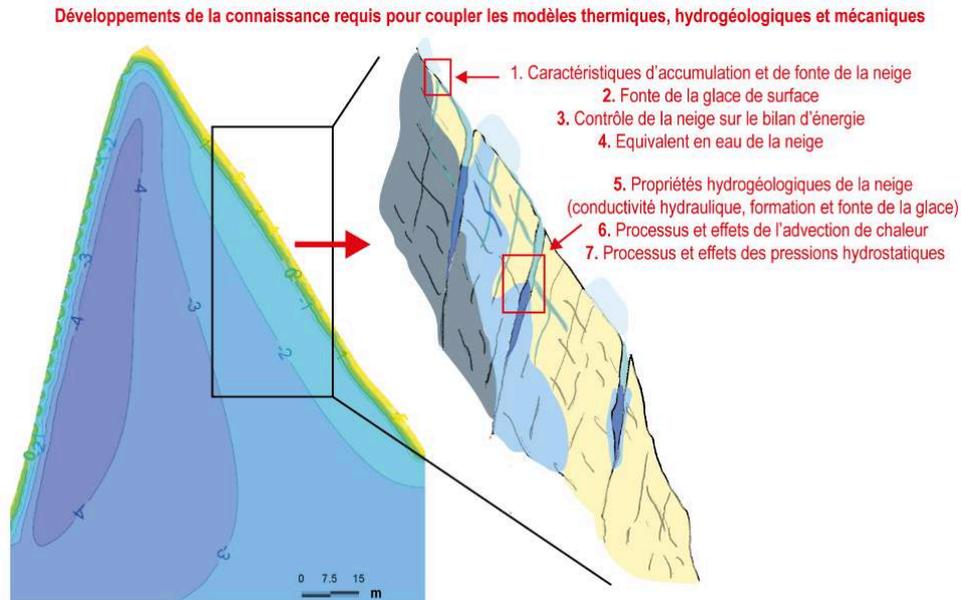
a. Distribution des écoulements par année et température de l'air pendant la période active. b. et c. Distribution des écoulements (uniquement ceux observés directement) en 2019 et 2020, et la profondeur maximale de Couche active (CA) dans les forages S, NE et NO de l'AdM placés à la date à laquelle le maximum de CA a été atteint.

Développements en cours pour améliorer la compréhension des processus de déstabilisation

- 11 Pour appréhender les effets thermiques et mécaniques de l'infiltration et de la circulation de l'eau dans les parois à permafrost, de récents efforts ont porté sur le couplage des modèles thermiques et hydrogéologiques avec des outils de modélisation numérique avancés (Magnin et Josnin, 2021). L'objectif ultime serait de simuler les processus agissant à des échelles spatiales et temporelles fines et de fournir des données pertinentes pour les modèles mécaniques. Cependant, les limites actuelles sont dues (i) à la capacité de contraindre les paramètres physiques clés qui contrôlent les processus hydrologiques et hydrogéologiques dans les milieux de haute montagne, (ii) à

la capacité des modèles hydrogéologiques conventionnels à simuler les processus spécifiques du permafrost, et (iii) au manque de mesures de terrain pour contraindre les modèles et valider les simulations (Fig. 5).

Figure 5



Modèle thermique simulant les conditions de permafrost dans les parois raides (exemple pour l'AdM modifié de Magnin *et al.* [2017a]) et les principaux défis à surmonter (en rouge) pour atteindre les échelles spatiales de simulations et les processus ciblés.

Principaux défis de la quantification de l'eau d'infiltration

- 12 La fonte de la neige qui s'accumule de manière hétérogène sur les parois alpines représente une source d'eau majeure en haute montagne (Fig. 5). Cependant, relier les chutes de neige à l'infiltration d'eau dans un tel environnement est difficile car les processus d'accumulation et de fonte de la neige sur les parois sont complexes. Les informations quantitatives sur l'accumulation de neige sur les parois sont rares et les techniques de mesure présentent de grandes marges d'erreurs et d'incertitudes (par ex. Haberkorn *et al.* 2017). De plus, l'infiltration de l'eau de fonte peut se produire plusieurs jours, semaines ou mois après une chute de neige. Pendant cette période, la neige peut être redistribuée par le vent et les processus gravitaires, elle peut se sublimer ou fondre et geler à nouveau, formant une croûte de glace imperméable (Phillips *et al.*, 2016).
- 13 Dans le MMB, la caractérisation de l'accumulation de neige a été réalisée sur la face sud de l'AdM en utilisant la photogrammétrie diachronique, des modèles photogrammétriques à haute résolution et une modélisation numérique. Environ 25 % de la neige tombée s'accumule sur la paroi d'une déclivité moyenne de 55° (Ben-Asher *et al.*, 2022). La hauteur moyenne de la neige diminue progressivement entre un angle de pente de 40°, où elle est d'environ 1 m (jusqu'à > 2,5 m ponctuellement), et 70°, seuil au-dessus duquel la neige ne s'accumule plus. En couplant des outils avancés de modélisation climatique, de bilan énergétique et de transfert de chaleur, la même étude

a quantifié l'équivalent en eau de la neige et les périodes d'infiltration. Elle a fourni des informations sur la température de surface et par conséquent sur la distribution et l'évolution du permafrost, ainsi que des données d'entrée pour des modèles hydrogéologiques couplés à des modèles thermiques. Ces développements récents élargissent la compréhension acquise dans des études antérieures, montrant le contrôle exercé par la neige sur les conditions locales de permafrost des parois rocheuses (Magnin *et al.*, 2017b), ce qui constitue un défi majeur pour les études futures. En plus de la neige, la fonte des TG, comme observée pendant l'été caniculaire de 2022, est une autre source possible d'eau avec une influence mal comprise sur le bilan d'énergie des parois à permafrost (Ravanel *et al.*, 2023). D'autres défis pour l'étude des infiltrations d'eau sont liés à la connaissance limitée de la conductivité hydraulique des parois à permafrost fracturées.

Défis dans l'évaluation des processus hydrogéologiques

- 14 Dans les roches à faible perméabilité, l'eau circule principalement dans les fractures dont la conductivité hydraulique peut varier en fonction de la saturation et de l'état de l'eau interstitielle, qui peut changer au fil des saisons. La formation de glace dans les fractures influence directement la capacité de l'eau à s'écouler à l'échelle macroscopique et peut donc altérer la conductivité hydraulique.
- 15 L'utilisation d'outils numériques pour améliorer la compréhension globale des caractéristiques et des processus hydrogéologiques rencontre plusieurs difficultés lorsqu'il s'agit de les appliquer aux roches gelées. Les échelles spatiales et temporelles des processus susmentionnés s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur et nécessitent d'importantes ressources de calcul numérique (temps CPU pouvant aller jusqu'à plusieurs semaines). Les équations physiques décrivant les processus hydrologiques dans des conditions non saturées, telles que celles prévalant dans les milieux fracturés à permafrost, sont également fortement non linéaires, ce qui entraîne des instabilités numériques. Enfin, les changements de phase de l'eau ne sont pas toujours intégralement implémentés dans les modèles hydrogéologiques. Par exemple, le module *PiFreeze* qui simule la congélation de l'eau dans le programme Feflow® ne fonctionne pas avec des éléments discrets, qui seraient les plus appropriés pour décrire les fractures. L'amélioration attendue des logiciels et des capacités de calcul pourrait repousser ces limites actuelles. En parallèle de ces défis numériques, des travaux de recherche sur le terrain doivent être menés afin d'obtenir des mesures directes des caractéristiques des écoulements d'eau, qui serviront à contraindre les modèles. En effet, les observations des processus hydrogéologiques dans les parois à permafrost sont rares et généralement indirectes, telles que les anomalies de température dans les forages (par ex. Phillips *et al.*, 2016). À l'AdM, des écoulements d'eau significatifs sont observés l'été dans les galeries creusées au cœur du piton central, au niveau de fractures de la roche. Depuis l'été 2022, un suivi a été mis en place afin de mesurer et d'échantillonner cette eau d'infiltration, de manière à évaluer le débit et l'âge de l'eau, ainsi que la connectivité des fractures. Les sondages géoélectriques portent également l'espoir d'appréhender les processus hydrogéologiques avec des perspectives géotechniques prometteuses.

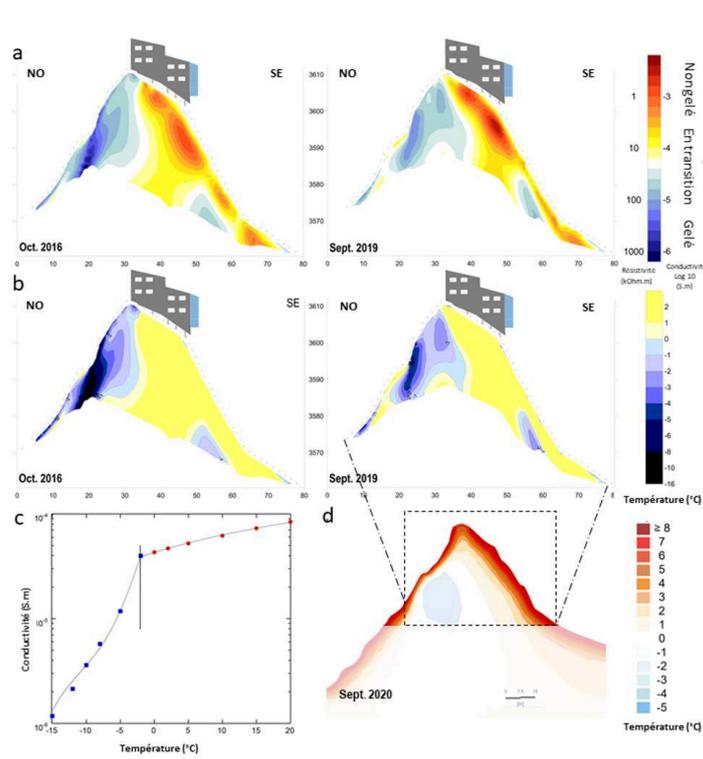
Vers des solutions opérationnelles pour faire face aux aléas cryo-gravitaires

- 16 Les aléas cryo-gravitaires posent divers types de risques dans le MMB, et leur anticipation est nécessaire pour pouvoir mieux en maîtriser les conséquences. Pour les applications géotechniques, les diagnostics *in situ* sont mis au défi de la difficulté d'estimer la teneur, la distribution et les caractéristiques de la glace interstitielle. Pour les pratiquants de la haute montagne, déterminer les périodes les plus à risques serait utile, tandis que pour les aménageurs, anticiper l'étendue spatiale et l'intensité des aléas est nécessaire. Trois directions de recherche sont donc envisagées pour ébaucher le développement de solutions opérationnelles.

Développer des stratégies de diagnostic

- 17 Dans le MMB, 60 éléments d'infrastructure comprenant des remontées mécaniques, des déclencheurs d'avalanches et des refuges, sont installés sur des terrains à permafrost (Duvillard *et al.*, 2019), incluant des parois, des versants rocheux altérés et modérément inclinés, et parfois des matériaux non consolidés. Bien que les conditions de permafrost puissent être approximativement évaluées, les diagnostics géotechniques bénéficieraient d'une compréhension détaillée de l'état thermique et de la teneur en glace du terrain, de leur distribution et de leur évolution potentielle. Les forages destructifs permettent une telle évaluation quantitative mais leur représentativité spatiale est faible. De plus, les approches de modélisation actuelles pour cartographier ou simuler l'évolution du permafrost en profondeur ne sont pas appropriées pour les roches très fracturées avec une teneur en glace potentiellement élevée. Les approches géophysiques portent l'espoir de surmonter ces limites. Malgré leur caractère indirect (c'est-à-dire la mesure de *proxies*), la tomographie de résistivité électrique combinée aux mesures de polarisation provoquée pourrait offrir de nouvelles opportunités pour accéder à ces paramètres (Duvillard *et al.*, 2021). Cette approche a l'avantage d'être non invasive et non destructive, et plus représentative spatialement grâce aux inversions 2D à 3D (Fig. 6a et 6b). Couplée aux avancées récentes dans les modèles pétrophysiques (Fig. 6c) et comparée aux modèles thermiques (Fig. 6d), la teneur en eau et en glace pourrait être interprétée quantitativement (par ex. Wagner *et al.*, 2019). L'inversion conjointe de données galvanométriques/électromagnétiques avec des données sismiques et de géoradar, ainsi que la fusion avec des modèles pétrophysiques et thermiques, seront essentielles pour obtenir une distribution 3D des propriétés cryo/hydromécaniques des environnements alpins et de leur évolution potentielle vers des états critiques pertinents pour les questions géotechniques (Wagner *et al.*, 2019). Les défis futurs incluent également le développement de méthodes d'inversion conjointe utilisant des données topographiques ou géophysiques, ou des observations directes à partir de forages profonds, ainsi que des inversions contraintes temporellement en combinant des données géophysiques diachroniques, des modèles thermiques et des résultats de modélisation mécanique. Comme de nombreux sites de montagne sont difficilement accessibles, l'utilisation de flottes de drones effectuant des mesures géophysiques à distance est une autre perspective.

Figure 6



Exemple de développements géoelectriques récents combinant des sondages de tomographie de résistivité électriques et de polarisation provoquée répétées, des modèles pétrophysiques et des modèles thermiques appliqués à l'arête des Cosmiques, complété à partir de Duvillard *et al.* (2021) et Magnin *et al.* (2017a). a. Profils géoelectriques inversés. b. Distribution de la température modélisée (seules les valeurs négatives sont fiables) à partir de c. tests en laboratoire sur des échantillons de roche et de modèles pétrophysiques calibrés. d. Température modélisée avec le programme Feflow® tel que réalisé par Magnin *et al.* (2017a).

Améliorer la prédictibilité des risques cryo-gravitaires

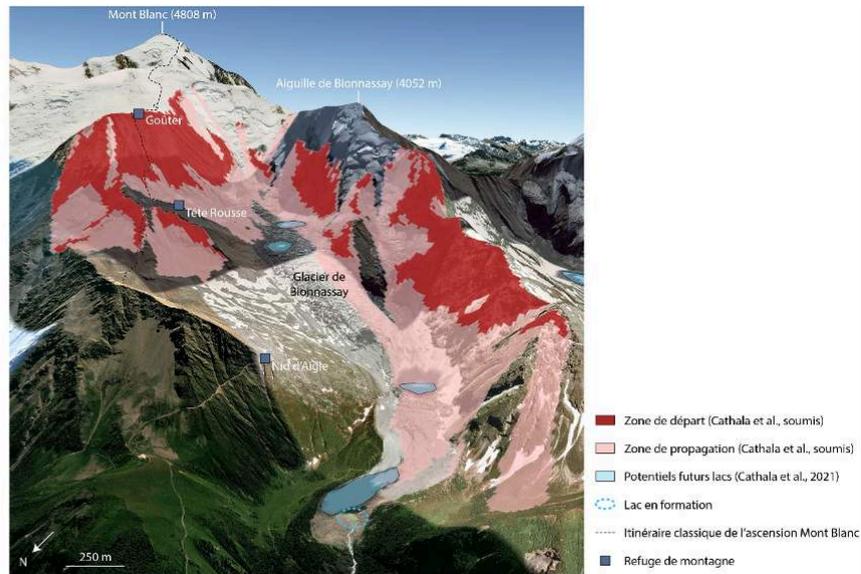
- 18 L'augmentation de la fréquence et du volume des écroulements menace la durabilité des activités en haute montagne (Mourey *et al.*, 2019). Une analyse statistique récente des températures simulées en surface et à la profondeur des cicatrices des écroulements inventoriés a montré une grande significativité statistique entre des températures en surface et des températures de cicatrices plus élevées qu'habituellement et leur occurrence, démontrant ainsi la possibilité de prévoir leur probabilité d'occurrence (Legay *et al.*, 2021), ce qui pourrait aider les alpinistes dans leur analyse des risques. Plusieurs améliorations pourraient être envisagées pour renforcer la prédictibilité des écroulements. Tout d'abord, l'étude pourrait être mise à jour avec des événements récents (2016-2022), ce qui améliorerait la robustesse statistique. De plus, la significativité statistique pourrait être améliorée en comparant les résultats des simulations de température lors des événements réels à certains événements aléatoires définis en fonction des principales caractéristiques topographiques des événements réels (pour plus de détails, voir Legay *et al.*, 2021).
- 19 Une autre source d'amélioration réside dans la justesse de la température de surface simulée, qui pourrait être perfectionnée en utilisant un modèle de bilan d'énergie tenant compte de la neige et de la pluie (Ben-Asher *et al.*, 2022). Il serait également

intéressant de prendre en compte d'autres variables que la température journalière de l'air pour déterminer les paramètres associés aux occurrences d'écroulements, tels que la date de fonte de la neige qui contrôle en partie la température de surface mais peut également être utilisée comme un *proxy* pour l'infiltration d'eau, ou les maxima et minima de la température de l'air par exemple. Cela serait particulièrement pertinent pour les écroulements survenant au début de l'été, car la neige persiste souvent en haute altitude jusqu'à cette période. Le pic d'occurrence des écroulements dans le MMB en juillet 2019 (Fig. 4 b), qui a été atteint bien avant le maximum de CA, pourrait par exemple être lié à la quantité assez élevée d'eau disponible provenant de la fonte des neiges et des précipitations en début d'été (Ben-Asher *et al.*, 2022).

Cartographier la susceptibilité actuelle et future d'occurrence de risques cryo-gravitaires

- 20 Les approches intégrées couplant la compréhension de la dynamique du permafrost, de la fonte des faces englacées (TG, glaciers suspendus), du recul des glaciers et des changements paysagers qui en résultent, sont importantes pour répondre aux besoins des décideurs et aménageurs du territoire. Ce type d'approche permet en effet d'anticiper la mutation spatiale des aléas dans les conditions climatiques et cryosphériques changeantes, ainsi que les éventuelles ressources économiques qui résultent des changements paysagers (Haeberli *et al.*, 2016).
- 21 La distribution spatiale des écroulements inventoriés peut être utilisée pour cartographier les zones de déstabilisation potentielles dans une approche d'évaluation des risques, comme illustré dans la Figure 7 (Cathala *et al.*, soumis) qui montre les versants rocheux dont la TAMSP calculée est $< 0^{\circ}\text{C}$, les zones potentielles de propagation, et les futurs lacs modélisés dans le bassin versant de Bionnassay (Cathala *et al.*, 2021). Ce bassin versant apparaît clairement comme un secteur à surveiller en raison de son lac en cours de formation, ainsi que les nombreux lacs qui pourraient se former à l'avenir, et qui sont potentiellement exposés à des écroulements rocheux et des chutes de séracs. Les acteurs du territoire devront donc surveiller cette zone avec une grande attention afin d'anticiper d'éventuels événements de grande ampleur. Cette zone serait également particulièrement intéressante pour étudier la relation entre le permafrost et les glaciers suspendus. Une question clé est de savoir le rôle éventuel de la dégradation du permafrost des parois environnantes dans la fonte et/ou la déstabilisation des glaciers suspendus.

Figure 7



Exemple d'approche intégrée considérant les parois potentiellement instables, les zones de propagation possibles définies à partir d'observations des écoulements, et les sources potentielles d'aléas en cascade à approfondir pour les questions d'aménagement du territoire.

Conclusions

- 22 Au cours des trois dernières décennies, les parois de la haute montagne alpine sont devenues de plus en plus instables, avec une augmentation notable de la fréquence des écoulements et des événements de grande ampleur causant parfois des aléas en cascade dévastateurs pour les vallées, favorisés par le stockage de matériaux non consolidés et instables laissés par le retrait des glaciers. Dans les Alpes européennes, le MMB s'est naturellement imposé comme un laboratoire à ciel ouvert pour l'étude du permafrost de paroi et des parois à permafrost de haute altitude en raison de l'accélération de leur morphodynamique depuis les années 1990, du caractère unique des sommets de haute altitude, de la variété des systèmes glaciaires et des implications sociétales importantes de ces dynamiques environnementales.
- 23 Au cours des 18 dernières années, de nombreuses données ont été mesurées pour mieux comprendre quand, où, et pourquoi se produisent les déstabilisations rocheuses. Les données acquises suggèrent une influence dominante des processus liés à la dégradation du permafrost. Les principales directions de recherche visent à :
- i. approfondir les analyses statistiques qui pourraient servir au développement d'outils de prévision afin d'évaluer les périodes et les zones les plus à risque,
 - ii. à améliorer les modèles numériques couplant les processus thermiques avec les processus hydrogéologiques, et *in fine* avec les processus mécaniques, qui, associés à des sondages géophysiques, pourraient offrir de nouvelles approches de diagnostic à des fins géotechniques,
 - iii. étudier l'interaction entre les appareils nivo-glaciaires (TG et glaciers suspendus) et le permafrost,

- iv. et enfin, développer des approches intégrées combinant les connaissances les plus avancées afin d'anticiper les changements cryosphériques et paysagers pour aider les aménageurs du territoire dans leur évaluation des risques et des ressources économiques.
- 24 Ces directions de recherche approfondiront le travail initié il y a bientôt 20 ans qui a fait du MMB un site mondialement reconnu pour l'étude des parois à permafrost et du permafrost de paroi, et plus généralement de la cryosphère des versants raides et de ses implications géomorphologiques et sociétales.

BIBLIOGRAPHIE

- Ballantyne, C. K., Sandeman, G. F., Stone, J. O., Wilson, P., 2014.- « Rock-slope failure following Late Pleistocene deglaciation on tectonically stable mountainous terrain », *Quaternary Science Reviews*, vol. 86, p. 144-157. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.12.021>.
- Ben-Asher, M., Magnin, F., Westermann, S., Malet, E., Berthet, J., Bock, J., Ravanel, L., Deline, P., 2022.- « Estimating surface water availability in high mountain rock slopes using a numerical energy balance model », *Earth Surface Dynamics Discussion* [preprint], p. 1-25. DOI : <https://doi.org/10.5194/esurf-2022-58>.
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012.- « A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges », *The Cryosphere*, vol. 6, p. 125-140. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-6-125-2012>.
- Cathala, M., Magnin, F., Linsbauer, A., Haeberli, W., 2021.- « Modelling and characterizing glacier-bed overdeepenings as sites for potential future lakes in the deglaciating French Alps », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 27, n° 1, p. 19-36. DOI : <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15255>.
- Cathala, M., Magnin, F., Ravanel, L., Dorren, L., Zuanon, N., Berger, F., Bourrier, F., Deline, P., 2023.- « Mapping Release and Propagation Areas of Permafrost-Related Rock Slope Failures in the French Alps », *Geomorphology*, article soumis. DOI : <https://doi.org/10.2139/ssrn.4522860>.
- Cremonese, E., Gruber, S., Phillips, M., Pogliotti, P., Boeckli, L., Noetzli, J., Suter, C., Bodin, X., Crepaz, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Lang, K., Letey, S., Mair, V., Morra di Cella, U., Ravanel, L., Scapozza, C., Seppi, R., Zischg, A., 2011.- « Brief Communication: "An inventory of permafrost evidence for the European" » *The Cryosphere*, vol. 5, p. 651-657. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-5-651-2011>.
- Deline, P., Gardent, M., Magnin, F., Ravanel, L., 2012.- « The Morphodynamics of the Mont Blanc Massif in a Changing Cryosphere: A Comprehensive Review », *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, vol. 94, p. 265-283. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x>.
- Deline, P., Broccolato, M., Noetzli, J., Ravanel, L., Tamburini, A., 2013.- « The December 2008 Crammont Rock Avalanche, Mont Blanc Massif Area, Italy », dans C. Margottini, P. Canuti, and K. Sassa (dir.), *Landslide Science and Practice*, Volume 4, *Global Environmental Change*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 403-408. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-642-31337-0_52.

- Duvillard, P.-A., Ravel, L., Marcer, M., Schoeneich, P., 2019.- « Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps », *Reg. Environ. Change*, vol. 19, p. 1281-1293. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01465-z>.
- Duvillard, P.-A., Magnin, F., Revil, A., Legay, A., Ravel, L., Abdulsamad, F., Coperey, A., 2021.- « Temperature distribution in a permafrost-affected rock ridge from conductivity and induced polarization tomography », *Geophysical Journal International*, vol. 225, n° 2. DOI : <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa597>.
- Gallach, X., Carcaillet, J., Ravel, L., Deline, P., Ogier, C., Rossi, M., Malet, E., Garcia-Sellés, D., 2020.- « Climatic and structural controls on Late-glacial and Holocene rockfall occurrence in high-elevated rock walls of the Mont Blanc massif (Western Alps) », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 45, p. 3071-3091. DOI : <https://doi.org/10.1002/esp.4952>.
- Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J.-P., Deline, P., 2014.- « Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s », *Global and Planetary Change*, vol. 120, p. 24-37. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.004>.
- Gruber, S., Hoelzle, M., Haerberli, W., 2004.- « Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003 », *Geophysical Research Letters*, vol. 31. DOI : <https://doi.org/10.1029/2004GL020051>.
- Guerin, A., Ravel, L., Matasci, B., Jaboyedoff, M., Deline, P., 2020.- « The three-stage rock failure dynamics of the Drus (Mont Blanc massif, France) since the June 2005 large event », *Nature Scientific Reports*, vol. 10, 17330. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74162-1>.
- Haberkorn, A., Wever, N., Hoelzle, M., Phillips, M., Kenner, R., Bavay, M., Lehning, M., 2017.- « Distributed snow and rock temperature modelling in steep rock walls using Alpine3D », *The Cryosphere*, vol. 11, p. 585-607. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-11-585-2017>.
- Haerberli, W., Buetler, M., Huggel, C., Friedli, T. L., Schaub, Y., Schleiss, A. J., 2016.- « New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks », *Climatic Change*, vol. 139, p. 201-214. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1771-5>.
- Hartmeyer, I., Delleske, R., Keuschnig, M., Krautblatter, M., Lang, A., Schrott, L., Otto, J.-C., 2020.- « Current glacier recession causes significant rockfall increase: the immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls », *Earth Surface Dynamics*, vol. 8, p. 729-751. DOI : <https://doi.org/10.5194/esurf-8-729-2020>.
- Hasler, A., Gruber, S., Font, M., Dubois, A. 2011.- « Advective Heat Transport in Frozen Rock Clefts: Conceptual Model, Laboratory Experiments and Numerical Simulation », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 22, n°4, p. 378-389. DOI : <https://doi.org/10.1002/ppp.737>.
- Kaushik, S., Ravel, L., Magnin, F., Trouvé, E., Yan, Y., 2022.- « Ice Aprons in the Mont Blanc Massif (Western European Alps): Topographic Characteristics and Relations with Glaciers and Other Types of Perennial Surface Ice Features », *Remote Sensing*, vol. 14, n° 21, 5557. DOI : <https://doi.org/10.3390/rs14215557>.
- Krautblatter, M., Huggel, C., Deline, P., Hasler, A., 2012.- « Research Perspectives on Unstable High-alpine Bedrock Permafrost: Measurement, Modelling and Process Understanding », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 23, n° 1, p. 80-88. DOI : <https://doi.org/10.1002/ppp.740>.
- Krautblatter, M., Funk, D., Günzel, F. K., 2013.- « Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space », *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 38, n° 8, p. 876-887. DOI : <https://doi.org/10.1002/esp.3374>.

- Legay, A., Magnin, F., Ravanel, L., 2021.- « Rock temperature prior to failure: Analysis of 209 rockfall events in the Mont Blanc massif (Western European Alps) », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 32, n° 3, p. 520-536. DOI : <https://doi.org/10.1002/ppp.2110>.
- Magnin, F., Josnin, J.-Y. 2021.- « Water Flows in Rock Wall Permafrost: A Numerical Approach Coupling Hydrological and Thermal Processes », *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 126, n° 11, e2021JF006394. DOI : <https://doi.org/10.1029/2021JF006394>.
- Magnin, F., Deline, P., Ravanel, L., Noetzli, J., Pogliotti, P., 2015.- « Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l) », *The Cryosphere*, vol. 9, p. 109-121. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-9-109-2015>.
- Magnin, F., Josnin, J.-Y., Ravanel, L., Pergaud, J., Pohl, B., Deline, P., 2017.- « Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century », *The Cryosphere*, vol. 11, p. 1813-1834. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017>.
- Magnin, F., Westermann, S., Pogliotti, P., Ravanel, L., Deline, P., Malet, E., 2017.- « Snow control on active layer thickness in steep alpine rock walls (Aiguille du Midi, 3842 m a.s.l., Mont Blanc massif) », *CATENA*, vol. 149, n° 2, p. 648-662. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.006>.
- Mellor, M., 1971.- « Strength and Deformability of Rocks at Low Temperatures, Corps of Engineers, U.S. Army », *Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, 88 p.
- Mourey, J., Marcuzzi, M., Ravanel, L., Pallandre, F., 2019.- « Effects of climate change on high Alpine mountain environments: Evolution of mountaineering routes in the Mont Blanc massif (Western Alps) over half a century », *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 51, n° 1, p. 176-189. DOI : <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1612216>.
- Noetzli, J., Gruber, S. 2009.- « Transient thermal effects in Alpine permafrost », *The Cryosphere*, vol. 3, p. 85-99. DOI : <https://doi.org/10.5194/tc-3-85-2009>.
- Noetzli, J., Gruber, S., Kohl, T., Salzmann, N., Haeberli, W., 2007.- « Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography », *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, vol. 112. DOI : <https://doi.org/10.1029/2006JF000545>.
- Phillips, M., Haberkorn, A., Draebing, D., Krautblatter, M., Rhyner, H., Kenner, R., 2016.- « Seasonally intermittent water flow through deep fractures in an Alpine Rock Ridge: Gemsstock, Central Swiss Alps », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 125, p. 117-127. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.02.010>.
- von Raumer, J. F., Bussy, F., 2004.- « Mont Blanc and Aiguilles Rouges Geology of their polymetamorphic Basement (External Massifs, Western Alps, France-Switzerland) », *Section des Sciences de la Terre, Université de Lausanne, Lausanne*.
- Rabatel A., Deline P., Jaillet S., Ravanel L., 2008.- « Rock falls in high-alpine rock walls quantified by terrestrial LiDAR measurements: a case study in the Mont Blanc area », *Geophysical Research Letters*, vol. 35, n° 10, L10502. DOI : <https://doi.org/10.1029/2008GL033424>.
- Ravanel, L., Duvillard, P.-A., Astrade, L., Faug, T., Deline, P., Berthet, J., Cathala, M., Magnin, F., Baratier, A., Bodin, X., 2023.- « The Taconnaz rockfall (Mont-Blanc massif, European Alps) of November 2018: A complex and at-risk rockwall-glacier-torrent morphodynamic continuum », *Applied Sciences*, vol. 13, n° 17, 9716.
- Ravanel, L., Guillet, G., Kaushik, S., Preunkert, S., Malet, E., Magnin, F., Trouvé, E., Montagnat, M., Yan, Y., Deline, P., 2023.- « Ice aprons on steep high-alpine slopes: insights from the Mont-Blanc massif, Western Alps », *Journal of Glaciology*, p. 1-17. DOI : <https://doi.org/10.1017/jog.2023.15>.

Ravanel, L., Deline, P. 2011.- « Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the “Little Ice Age” », *The Holocene*, vol. 21, n° 2, p. 357-365. DOI : <https://doi.org/10.1177/0959683610374887>.

Ravanel, L., Magnin, F., Deline, P. 2017.- « Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif », *Science of The Total Environment*, vol. 609, p. 132-143. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>.

Wagner, F. M., Mollaret, C., Günther, T., Kemna, A., Hauck, C., 2019.- « Quantitative imaging of water, ice and air in permafrost systems through petrophysical joint inversion of seismic refraction and electrical resistivity data », *Geophysical Journal International*, vol. 219, n° 3, p. 1866-1875. DOI : <https://doi.org/10.1093/gji/ggz402>.

Walder, J., 1985.- « A theoretical model of the fracture of rock during freezing », *Geological Society of America Bulletin*.

Wegmann, M., Gudmundsson, G. H., Haeberli, W. 1998.- « Permafrost changes in rock walls and the retreat of alpine glaciers: a thermal modelling approach », *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 9, n° 1, p. 23-33. DOI : [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199801/03\)9:1<23::AID-PPP274>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199801/03)9:1<23::AID-PPP274>3.0.CO;2-Y).

RÉSUMÉS

L'augmentation de la fréquence des écroulements rocheux ($V > 100 \text{ m}^3$), d'abord observée dans les Alpes européennes depuis les années 2000, a impulsé des études sur les parois de haute altitude et le permafrost de paroi. Le massif du Mont-Blanc (MMB) est progressivement devenu un terrain d'étude pilote grâce aux nombreuses données et connaissances acquises au travers de divers projets de recherche. L'analyse statistique de la distribution des écroulements (> 1300 événements recensés entre 2007 et 2021) met en évidence leur lien avec la distribution du permafrost ainsi qu'avec l'augmentation de la température de l'air. Cette analyse ouvre des perspectives prometteuses en termes de développement d'outils de prévision pour aider les pratiquantes de la haute montagne et les acteurs-rices dans leurs stratégies d'atténuation des risques. Néanmoins, la compréhension des mécanismes de déstabilisation des parois rocheuses se heurte à la diversité des processus thermo-hydro-mécaniques potentiellement impliqués. Pour améliorer cette compréhension, les recherches actuellement menées dans le MMB se concentrent sur les processus d'infiltration et de circulation de l'eau dans les parois à permafrost en combinant des approches de modélisation numérique avancées avec des études de terrain *ad hoc*. Le couplage de modèles thermiques et hydrogéologiques, et leur combinaison avec des méthodes géoélectriques pourraient permettre d'évaluer la distribution et la quantité d'eau ou de glace interstitielle, une information cruciale pour les applications géotechniques. Parallèlement, la synthèse des données et connaissances acquises dans des approches intégrées des changements de paysage et des risques liés à la dégradation du permafrost, au recul des glaciers, à la formation potentielle de lacs et à la déstabilisation des parois rocheuses, apparaît comme une base essentielle pour les projets d'aménagement du territoire. Enfin, les échanges thermiques et hydrologiques entre les parois à permafrost et les appareils nivo-glaciaires qui y sont nichés (tabliers de glace et glaciers suspendus) sont une autre perspective de recherche à explorer, avec des implications pluridisciplinaires.

INDEX

Mots-clés : parois à permafrost, permafrost de paroi, écroulements, massif du Mont-Blanc

AUTEURS

FLORENCE MAGNIN

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

LUDOVIC RAVANEL

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

MATAN BEN-ASHER

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

JOSUÉ BOCK

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

MAËVA CATHALA

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

PIERRE-ALLAIN DUVILLARD

NAGA Geophysics

PIERRICK JEAN

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

JEAN-YVES JOSNIN

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

SUVRAT KAUSHIK

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

ANDRÉ REVIL

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM

PHILIP DELINE

Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont-Blanc, CNRS, UMR CNRS 5204, EDYTEM