

# LE PERMAFROST DE MONTAGNE À EDYTEM : DEUX DÉCENNIES D'AVANCÉES SCIENTIFIQUES

*MOUNTAIN PERMAFROST AT EDYTEM: TWO DECADES OF SCIENTIFIC ADVANCES*

PHILIP DELINE<sup>1</sup>, XAVIER BODIN<sup>1</sup>, FLORENCE MAGNIN<sup>1</sup>, LUDOVIC RAVANEL<sup>1</sup>

*Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont Blanc – UMR CNRS 5204  
Contact : pdeli@univ-smb.fr*

## RÉSUMÉ

Alors que le permafrost était largement ignoré, sinon inconnu, dans la haute montagne française il y a une vingtaine d'années encore, l'évolution de sa morphodynamique en lien avec le changement climatique combinée à l'effet d'entraînement produit par les recherches conduites sur le sujet en Suisse ont amené le laboratoire EDYTEM à investir de plus en plus activement ce champ de recherche au cours des deux dernières décennies. Après une courte phase balbutiante, la construction et la participation à des projets européens ont permis, dans la deuxième moitié des années 2000, de poser les bases de notre activité de recherche, avec l'Aiguille du Midi (3842 m) comme site pilote pour l'étude du permafrost de paroi, une approche multi-méthodes des écroulements qui l'affectent, et le recrutement d'un premier chercheur CNRS spécialiste des glaciers rocheux. La période suivante fut celle à la fois de la consolidation et du foisonnement de nos recherches, marquée par le recrutement de deux autres chercheurs spécialistes des écroulements et du permafrost dans les parois, le démarrage ou l'achèvement de plusieurs thèses de doctorat, et notre organisation à Chamonix de ce qui aura été jusqu'en 2023 la dernière conférence internationale sur le permafrost. Ces dernières années ont vu l'ouverture de nouvelles pistes de recherche, de la datation des parois d'altitude affectées par des écroulements tardiglaciaires et holocènes à l'étude des glaciers rocheux déstabilisés, de celle des tabliers de glace à la reconnaissance de la vulnérabilité des infrastructures sur permafrost, de l'exploration des glacières à l'étude des dépôts à molards. Deux décennies de recherche qui valent à EDYTEM d'être pleinement reconnu par la communauté 'permafrost' internationale.

**MOTS-CLÉS:** permafrost, glacier rocheux, écroulements, parois, morphodynamiques, cryosphère, haute montagne

## ABSTRACT

*While permafrost was largely ignored, if not unknown, in the French high mountain areas some twenty years ago, the evolution of its morphodynamics in connection with climate change, combined with the ripple effect produced by research carried out on the topic in Switzerland have led EDYTEM to invest more and more actively this field of research over the past two decades. After a short stammering phase, our construction of and participation in European projects made it possible to lay the foundations of our research activity in the second half of the 2000s, with the Aiguille du Midi (3842 m a.s.l.) as a pilot site for the study of the rockwall permafrost, a multi-method approach to the rockfalls affecting it, and the recruitment of a first CNRS researcher expert in rock glaciers. The following period led to the consolidation and expansion of our researches, and was marked by the recruitment of two other researchers on rockfalls and rockwall permafrost, the start or completion of several PhD theses, and our organization in Chamonix of what will be the last international conference on permafrost until 2023. The last few years have seen the opening of new research topics, from the dating of rockwalls affected by Lateglacial and Holocene rock slope failures to the study of destabilized rock glaciers, from investigation on cold-based ice aprons to the recognition of the vulnerability of infrastructure on permafrost, from the exploration of ice caves to the study of molards. Two decades of researches have earned EDYTEM full recognition from the international 'permafrost' community.*

**KEYWORDS:** permafrost, rock glacier, rock fall, rockwall, morphodynamics, cryosphere, high mountain, modelling, fieldwork

## INTRODUCTION

Le permafrost et son évolution sont devenus depuis quelques années un sujet dont les médias se sont emparés. État thermique, le permafrost caractérise toute roche ou formation superficielle dont la température reste inférieure ou égale à 0 °C pendant au moins deux années consécutives. Si de l'eau était présente sous forme liquide dans ces terrains avant qu'ils ne gèlent, elle est alors devenue de la glace. Le permafrost occupe environ 25 % de la surface des continents de l'hémisphère nord, très majoritairement dans les milieux polaires et sub-polaires. Sa dégradation sous l'effet du changement climatique (CC) en cours s'accompagne de l'émission abondante de gaz à effet de serre. Cette boucle de rétroaction positive du CC justifie les nombreuses recherches menées depuis plusieurs décennies par la communauté scientifique 'arctique', et dont les résultats ont fait l'objet d'une synthèse récente par le GIEC (IPCC, 2019). Mais ce rapport comprend également un chapitre consacré à la cryosphère de la haute montagne qui décrit, outre celle du manteau nival et des glaciers, l'évolution actuelle du permafrost de montagne et ses effets sur la morphodynamique de ce milieu. Deux des principales manifestations

de ces effets sont l'accélération de l'écoulement des glaciers rocheux et l'augmentation de la fréquence des écroulements dans les parois à permafrost. Un glacier rocheux est une accumulation de débris rocheux qui contient de la glace généralement interstitielle et en lentilles, dont la faible vitesse de fluage varie avec la proportion de glace, sa température, la présence d'eau et l'angle de pente. Un écroulement rocheux résulte du détachement d'un volume de roche > 100 m<sup>3</sup> qui se dépose en contrebas d'une paroi après avoir parcouru une distance qui varie avec le volume mobilisé et le type de surface de propagation. En haute montagne, l'écroulement peut être déclenché par un séisme, la disparition de la pression qu'exerçait un glacier sur la paroi, ou la dégradation du permafrost.

L'étude des écroulements, des glaciers rocheux et du permafrost qui les conditionnent sont l'un des thèmes forts de la recherche menée par notre laboratoire depuis sa création. Cet article en propose l'historique, en distinguant après les balbutiements (2003-2004) une période de premiers travaux conduits dans un cadre international (2005-2011), puis leur consolidation (2012-2018) et leur maturité (2019-2023).

## I. PRÉMICES

Le grand écroulement rocheux de janvier 1997 sur le glacier de la Brenva (massif du Mont Blanc (MMB); Deline, 2001) avait suscité des interrogations de la part du géologue de la Région Autonome Vallée d'Aoste (RAVA) sur le rôle éventuel d'une dégradation du permafrost dans son déclenchement. Des discussions avaient suivi sur le terrain avec W. Haerberli (Univ. Zürich) en 2000, qui venait de publier son étude pionnière sur la relation entre dégradation du permafrost et instabilités de versant rocheux (Haerberli *et al.*, 1997), mais dont Deline (2002) ne discutera que marginalement. C'est en effet la fréquence remarquable d'écroulements dans les Alpes lors de l'été caniculaire 2003 – au cours duquel la toute première communication scientifique sur la relation permafrost/écroulements (Noetzli *et al.*, 2003) eut lieu à l'occasion de la 8<sup>e</sup> ICOP (conférence internationale sur le permafrost) à Zürich – qui suscita la décision d'investir ce champ de la recherche, embryonnaire en Suisse mais inexistant ailleurs. Jusqu'alors, les rares recherches françaises sur le permafrost de montagne se concentraient sur les glaciers rocheux (*e.g.* Evin, 1988), en particulier celui du Laurichard (Francou et Reynaud, 1992).

Au printemps 2004, entre journée glacio-nivo de la SHF (Société Hydro-technique de France) à Grenoble et EGU à Nice, nous avons discuté, avec ceux qui deviendront nos partenaires suisses puis italiens, de la constitution d'une base de données des écroulements à compléter par des relevés de parois par balayage laser terrestre (TLS) et la pose de capteurs de température sur les versants italiens du MMB et du Cervin. Tandis qu'une fiche de signalement d'écroulement était distribuée au début de l'été 2004 à une vingtaine de guides de haute montagne de Courmayeur qui avaient suivi une formation sur le sujet, et que des forages pour géophones étaient réalisés au Cervin (projet *CENSI\_CRO* soutenu par la RAVA), ces partenaires prévoient de déposer début 2005 un projet intitulé *ALPermaRISK* d'un budget total de 1,3 M€ et dont EDYTEM était le porteur dans le cadre du programme *Interreg IIIB Alpine Space*, en y associant des partenaires allemands et autrichiens.

## II. PROJETS INTERNATIONAUX ET PREMIERS TRAVAUX (2005-2011)

Du fait des incertitudes apparues quant à ce programme *Alpine Space*, EDYTEM et ses partenaires italiens (Fondation Montagne sûre, ARPA (*Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente*) de la Vallée d'Aoste et CNR-Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica di Torino) se sont rabattus fin 2004 sur la préparation d'un projet plus modeste dans le cadre du programme *Interreg III Alcotra France-Italie*, qui s'articulerait avec *ALPermaRISK* – lequel ne pourra finalement pas être déposé. Ce projet *PERMAdataROC*, d'un budget total de 0,5 M€, monté rapidement avec le concours du bureau d'études (BE) Bourjot puis déposé en avril 2005, a pu démarrer en mars 2006. Il combinait trois axes de recherche: (i) *CENSI\_CRO*: recensement et analyse des écroulements dans le MMB, actuels grâce à un réseau d'observateurs et passés à l'aide d'archives et d'études antérieures (fig. 1); (ii) *PERMA\_TEMP*: mesure par thermistors et modélisation du régime thermique dans les parois

rocheuses du MMB et du Cervin; et (iii) *PERMA\_CRO*: suivi des écroulements actuels par TLS sur une dizaine de parois du MMB et par géophones au Cervin. Au printemps 2005, EDYTEM fut le premier laboratoire français à acquérir un scanner laser terrestre à longue portée (Optech ILRIS 3D) via des financements du ministère de la recherche et du CNRS obtenus par J.-J. Delannoy. En juin, eurent lieu avec S. Jaillet les relevés de paroi à la Tour Ronde et aux Aiguilles d'Entrèves – les premiers d'une longue série dans le MMB qui se poursuit toujours actuellement. Le report de celui de la face ouest des Drus à cause de la météo nous priva de ce relevé avant l'écroulement de 265 000 m<sup>3</sup> survenu la nuit du 29-30 juin (Ravel et Deline, 2008), dernier d'une série d'instabilités allant croissant depuis les années 1950 à laquelle L. Ravel consacra son Master 1 en 2005-2006. Cette même année universitaire, S. Gruber fut accueilli au laboratoire grâce à l'Appel d'offres Ministère pour post-



Figure 1 – Dépôt d'écroulement au pied de la face nord de la Tour Ronde (massif du Mont Blanc), une paroi à permafrost. Cet écroulement a eu lieu le 13 août 2022; avec 18 000 m<sup>3</sup>, il est le second plus volumineux des 282 écroulements recensés dans le massif pendant l'été caniculaire de 2022. Le tablier glaciaire au pied de la face nord a été instrumenté de 2016 à 2017.

docs étrangers – supprimé depuis... Ses compétences acquises à Zürich (e.g. Gruber *et al.*, 2004) se révélèrent très précieuses pour armer scientifiquement notre petite équipe et développer nos activités de terrain, en particulier à l'Aiguille du Midi (AdM) à partir de novembre 2005. En collaboration avec ses collègues zurichois, il publia les premiers articles sur le sujet au nom du laboratoire (Gruber et Haerberli, 2007; Noetzli *et al.*, 2007; Salzmann *et al.*, 2007; Gruber, 2008). En 2006-2007, A. Rabatel bénéficia d'un post-doc d'un an pour traiter les données TLS (Rabatel *et al.*, 2008) – y compris celles acquises au Laurichard dans le cadre la thèse de X. Bodin (2007), qui s'appuya sur la plate-forme technologique du laboratoire (S. Jaillot et E. Ployon) pour la cartographie et les levés 3D –, tandis que L. Ravel fut, lors de son Master 2, la cheville ouvrière de *PERMAdataROC* pour les écroulements. En 2008, V. Coviello (Politecnico Torino/INSA Lyon) fit son stage de fin d'étude d'ingénieur à EDYTEM sur la modélisation topo-géologique 3D de l'AdM à partir des scènes LiDAR, tandis que A. Hartbrot (Ecole Nationale de la Météorologie) traita les données de nos stations météo mobiles et celles de *Météo France* lors d'un stage au laboratoire et à l'ARPA.

*PERMAdataROC* s'acheva en juin 2008, mais nos recherches ont pu se poursuivre avec le projet *PermaNET* (*Permafrost long-term monitoring network*), qui associa à partir de juillet 2008 quatorze partenaires, autrichiens (4), allemand (1), suisse (1), italiens (5) et français (PACTE, GIPSA-Lab et EDYTEM) dans le cadre du programme de *Coopération Territoriale Européenne Espace Alpin*. D'une durée de 3 ans et doté d'un budget de 3,3 M€, ses principaux objectifs étaient: (ii) l'amélioration de la connaissance de la distribution spatiale du permafrost dans les Alpes, avec sa cartographie; (ii) la mise en place d'un réseau d'observation et de mesure du permafrost pour le suivi à long terme de son évolution en lien avec celle du climat; (iii) une meilleure caractérisation des phénomènes géomorphologiques liés à la dégradation du permafrost susceptibles d'engendrer des aléas. Un exemple de celle-ci sera l'étude conduite sur l'écroulement du Crammont dans la Vallée d'Aoste en 2008, qui met en évidence le rôle probable de la dégradation du permafrost dans son déclenchement (Deline *et al.*, 2011).

L'AdM est alors devenue un site majeur pour l'étude du permafrost de paroi dans les Alpes (fig. 2): MNT à haute résolution par TLS, stations météo automatiques, capteurs de température mis en place entre 3 et 55 cm

de profondeur et tomographie de résistivité électrique (ERT) réalisée dans *PERMAdataROC* (Deline *et al.*, 2009), complétés par trois forages de 10 m équipés de chaînes de 15 thermistors (Magnin *et al.*, 2015a) dans le cadre de *PermaNET*. La modélisation de la température dans les parois de l'AdM a été ensuite développée en 2010-2011 par F. Magnin dans le cadre de son Master 2, en collaboration avec J. Noetzli (Univ. Zürich), qui fit un séjour de trois mois au laboratoire, financé par l'INEE.

En 2010, X. Bodin réussit le concours de chargé de recherche au CNRS après deux années de post-doctorat à Fribourg, Waterloo et Santiago. Arrivé en novembre à EDYTEM, il va activement y développer le volet glacier rocheux en poursuivant ses collaborations internationales (Bodin, 2010). Un mois plus tard, L. Ravel (2010) soutint sa thèse de doctorat, qui approfondit et développe ses travaux de Master en combinant (i) l'étude des écroulements depuis la fin du la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG) par photo-comparaison (Ravel et Deline, 2011), (ii) l'analyse des écroulements récents (Ravel *et al.*, 2010a), recensés en particulier à l'aide du réseau d'observateurs (Ravel et Deline, 2013a), et (iii) celle de l'instabilité des parois suivies par relevés TLS annuels (Ravel *et al.*, 2010b).

Cette période d'engagement d'EDYTEM dans l'étude du permafrost de montagne se conclut par une campagne de prélèvements d'échantillons conduite par L. Ravel à l'automne 2011 sur plusieurs parois du bassin du Géant, pour datation cosmogénique ( $^{10}\text{Be}$ ) des niches d'arrachement, qui trouvera son prolongement quelques années plus tard.

Nos travaux ont été présentés régulièrement à partir de 2006 dans des conférences nationales (e.g. journées glacio-nivo de la SHF, colloques de la Société Suisse de géomorphologie) mais surtout internationales (e.g. EGU, AGU, *Alpine Glaciological Meeting*), en particulier celles dédiées au permafrost, avec la 9<sup>e</sup> ICOP à Fairbanks en 2008 (P. Deline) puis la 3<sup>e</sup> EUCOP à Longyearbyen en 2010 (les quatre auteurs). Initié en 2003, l'observatoire *PermaFrance* a été développé sous l'impulsion de P. Schoeneich (laboratoire PACTE) dans le cadre de *PermaNET*, associant principalement EDYTEM et PACTE; son premier rapport, essentiellement consacré aux mesures de température et au déplacement de glaciers rocheux, présente de premiers éléments sur les écroulements dans le MMB depuis 2005 (Schoeneich *et al.*, 2010).



Figure 2 – Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc). Ce site de haute altitude (3 842 m) est densément instrumenté depuis 2005 pour l'étude de la distribution du permafrost de paroi et de son évolution.

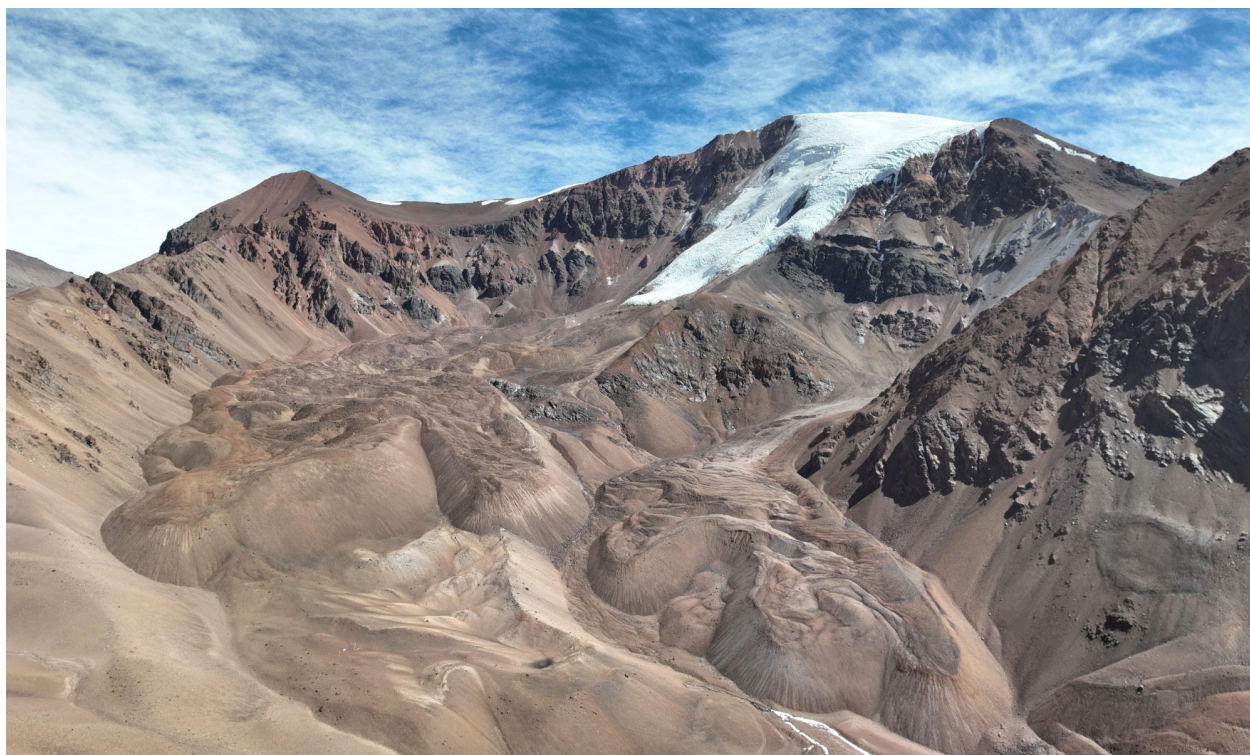
### III. DU FOISONNEMENT SCIENTIFIQUE À L'EUCOP 5 (2012-2018)

Les études pendant la période précédente se sont principalement focalisées sur un effet présumé de la dégradation du permafrost de paroi : les écroulements. Cette deuxième période va approfondir ces recherches tout en développant désormais l'étude du permafrost de paroi lui-même d'une part, celle des glaciers rocheux d'autre part.

Alors qu'un article de synthèse de nos travaux sur la cryosphère du MMB est proposé à l'occasion du départ en retraite de W. Haeberli (Deline *et al.*, 2012), les campagnes de terrain s'intensifient en 2012, en particulier à l'AdM : ERT avec M. Krautblatter (Univ. Bonn puis Munich), dispositif de mesure de la distribution et de l'épaisseur du manteau nival (Master 2 de G. Davesne), installation de six extensomètres dans des fractures et d'un dispositif de télétransmission des données (y compris des forages) avec J. Beutel et S. Weber, mesures ERT réalisées également à l'Aiguille des Grands Montets et sur l'Arête des Cosmiques (Ravel *et al.*, 2013b), mais aussi sur les glaciers rocheux du secteur Pierre Ronde-Rognes-Dérochoir dans le MMB (Bosson *et al.*, 2015).

L'équipe s'est renforcée. L. Ravel, après des post-docs à Zurich (campagne de prélèvements d'échantillons à l'automne 2011 pour datation cosmogénique des niches d'arrachement dans le bassin du Géant) et Lausanne (début d'étude d'une moraine PAG à cœur de glace rendue instable par la dégradation du permafrost et le retrait du glacier; Ravel *et al.*, 2018), est de retour à temps plein dans le MMB comme directeur de «*La Chamoniarde*» (Société de prévention et de secours en montagne de Chamonix). Il rejoindra EDYTEM en tant que chargé de recherche CNRS en 2014. F. Magnin a commencé sa thèse de doctorat à l'automne 2011 (Magnin, 2015), financée (et environnée) par le programme Cible de la Région Rhône-Alpes – c'était avant l'ère Wauquiez... E. Malet, ingénieur à EDYTEM, est très présent – et très précieux ! Enfin, des étudiants de Master s'investissent, dont P.-A. Duvillard qui débute son M1 sur les infrastructures en contexte de permafrost.

Cette intense activité va se concrétiser par une impressionnante série d'articles publiés en 2015, à commencer par ceux associés à la thèse de F. Magnin



*Figure 3 – Cerro del Tapado (5 536 m, Andes centrales, Chili). À l'aval du glacier blanc, la partie principale du complexe qui occupe le vallon est formée par un glacier noir (i.e. à couverture détritique supraglaciaire) qui se prolonge par un glacier rocheux bifide aux fronts très raides, qui dominant/recouvrent un glacier rocheux inactif dont le front est à c. 4 300 m. À droite, glacier rocheux de Las Tolas.*

(qui les développe et approfondit) : Magnin *et al.* (2015a) caractérisent le régime thermique de l'AdM et les effets de la neige et de la fracturation sur celui-ci, Magnin *et al.* (2015b) proposent une modélisation statistique de la distribution du permafrost de paroi dans le MMB, et Magnin *et al.* (2015c) analysent la distribution 2D du permafrost à partir des premiers profils ERT réalisés sur des parois subverticales – Magnin *et al.* (2017a) mettront ensuite en évidence l'effet très variable de la couverture nivale sur le permafrost de paroi. Duvillard *et al.* (2015) démontrent que 10 % des 1769 infrastructures présentes en contexte de permafrost probable dans les Alpes françaises sont exposées à un risque fort de déstabilisation, tandis que Bodin *et al.* (2015) brossent un tableau de la morphodynamique récente dans ce massif en lien avec le permafrost.

Les années suivantes voient émerger de nouveaux axes de recherche sur les écroulements et le permafrost de paroi : croisement de ces deux objets pour les étés caniculaires de 2003 et 2015 (Ravel *et al.*, 2017a); modélisation de la dynamique du permafrost de la fin du PAG à celle du XXI<sup>e</sup> siècle (Magnin *et al.*, 2017b); modélisation physique avec *FeFlow* de la température de la roche, abordée en 2013 (M2 de M.-L. Rosner), et de la circulation d'eau dans les fractures, lors du post-doc de 2016 de F. Magnin à EDYTEM dans le cadre du WP2 *Permafrost et évolution des versants rocheux* du projet ANR *VIP-Mont-Blanc*; glaciers suspendus à base froide et couvertures glacio-nivales (M2 de G. Guillet en 2016); datation des niches d'arrachement holocènes dans le MMB – explorée par Böhlert *et al.* (2008) –, avec les M1 et M2 de C. Ogier en 2015 et 2016 et la thèse de X. Gallach (2018) co-dirigée avec ISTERre à partir de 2015 dans le cadre du projet MB-RED / *Mont Blanc Rock Exposure Dating*, financée par AGIR-POLE PAGE.

Dans le cadre de sa thèse débutée en 2015 et co-dirigée avec PACTE, M. Marcer (2018) modélise statistiquement la distribution du permafrost dans les Alpes françaises à partir de l'inventaire des glaciers rocheux (Marcer *et al.*, 2017). Le détachement brutal du glacier rocheux du Bérard en 2006 est étudié par Bodin *et al.* (2016), et la vitesse d'écoulement de celui du Laurichard est reconstituée sur 10 ans en combinant plusieurs méthodes (Bodin *et al.*, 2018).

Ces recherches ont donné lieu à l'encadrement de nombreux travaux d'étudiant.es : 20 mémoires (M1 et M2) et stages (L3 et ingénieur) sur les écroulements et/ou le permafrost en haute montagne ont par exemple été menés entre 2012 et 2018 à EDYTEM. Elles nous ont également amenés à diriger un chapitre d'ouvrage consacré à la relation dégradation de la glace/instabilités de versants en haute montagne (Deline *et al.*, 2015; 2021).

Les recherches s'étendent alors spatialement : Pyrénées avec des collègues espagnols au Vignemale (Rico *et al.*, 2021); Andes argentines avec le séjour de

X. Bodin au IANIGLA de Mendoza pendant 10 mois en 2014 (Bodin et Trombotto, 2015; Ruiz et Bodin, 2015); cartographie du permafrost dans le Chili semi-aride (fig. 3; Azócar *et al.*, 2017); Norvège pour F. Magnin dans la foulée de sa thèse, avec son post-doctorat dans le cadre du projet *Cryowall* à Oslo en 2017 et 2018, où elle produira la carte de la distribution du permafrost des parois du pays (Magnin *et al.*, 2019) – avant de retrouver EDYTEM en 2019 mais en tant que chargée de recherche CNRS.

Le laboratoire contribue à l'animation et à la structuration de la recherche sur le permafrost et les milieux périglaciaires au niveau national et international. Ainsi, X. Bodin est successivement secrétaire puis trésorier de l'AFdP (Association française du Périglaciaire), dont le laboratoire co-organisa la réunion annuelle aux Deux Alpes en 2015, à Chambéry en 2016 et à Chamonix en 2018. F. Magnin, 'Ambassadrice' du laboratoire lors de toutes les conférences internationales sur le permafrost de cette période – 10<sup>e</sup> ICOP 2012 à Salekhard, 11<sup>e</sup> ICOP 2016 à Postdam, 4<sup>e</sup> EUCOP en 2014 à Evora, ACOP 2017 à Sapporo –, présenta à Evora, notre proposition d'organiser la 5<sup>e</sup> EUCOP en 2018 à Chamonix. À partir de novembre 2016, la petite équipe (titulaires, post-doctorante et doctorants) prépara de plus en plus activement la tenue de l'EUCOP 5, avec la collaboration de collègues de PACTE, des Universités de Lausanne et Fribourg, et de l'ARPA Vallée d'Aoste.

Du 22 juin au 1<sup>er</sup> juillet 2018, l'EUCOP 5 accueillit dans les salles du Majestic de Chamonix 460 participants dont 150 jeunes chercheurs du PYRN (*Permafrost Young Researchers Network*) provenant de 29 pays, qui proposèrent 484 communications dans 25 sessions (fig. 4). Précédée par des réunions et *workshops* du PYRN, de l'IPA (*International Permafrost Association*) et de plusieurs groupes, la cérémonie d'ouverture eu lieu le 25 juin, lors de laquelle l'IPA remit son *Lifetime Achievement Award* à W. Haeberli – qui donnera en soirée une conférence grand public (280 participants) sur l'état des connaissances sur le permafrost de montagne. Suivirent trois jours de présentations orales et de posters, entrecoupés par une journée d'excursions au glacier rocheux du Dérochoir (106 participants) et de la Mer de Glace au Brévent (240 participants). Trois excursions régionales de trois jours dans la vallée d'Aoste, le Valais et le massif des Écrins (30 participants), menées par des membres français, italiens et suisses du comité d'organisation, ont conclu l'EUCOP. Outre la qualité de l'organisation et le temps magnifique, le quizz du PYRN, la tartiflette au lac des Gaillands et le banquet final ont contribué au succès de cette conférence – qui aura été jusqu'à juin 2023 (EUCOP 6) le dernier grand rendez-vous mondial du permafrost, la 12<sup>e</sup> ICOP prévue en 2020 à Langzhou ayant été en effet d'abord reportée en 2021 puis annulée du fait de la pandémie de Covid-19 (fig. 4)...



Figure 4 – Les participant.es à l'EUCOP 5 (conférence européenne sur le permafrost), organisée principalement par notre laboratoire en 2018 à Chamonix. Près de 500 communications y firent présentées par plus de 450 congressistes provenant d'une trentaine de pays.

#### IV. CONTINUITÉS ET NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE (2019-2023)

Cette période s'ouvre avec le Plan d'Action pour la Prévention des Risques Glaciaires et périglaciaires (PAPROG), soutenu par le Ministère de la Transition Écologique, qui vise à comprendre et gérer les risques liés à la dégradation de la cryosphère dans les Alpes françaises. Il est l'aboutissement d'une longue préparation dont nous avons été partie prenante, débuté en 2012 avec un séminaire organisé par le PARN (Pôle Alpin Risques Naturels) et le ministère, puis élaboré par un groupe de travail sous la houlette de D. Richard (INRAE). Le PAPROG finance des travaux de laboratoires comme EDYTEM investis dans ces champs de recherche, avec une finalité appliquée (production de cartes, d'expertises, de méthodologies d'évaluation des risques) tout en contribuant à nourrir les recherches plus fondamentales sur la morphodynamique associée à la dégradation du permafrost de montagne.

Les études sur la dynamique des glaciers rocheux se poursuivent avec de nouvelles méthodes/techniques telles que l'interférométrie radar dans les Alpes (Strozzi *et al.*, 2020 ; Bertone *et al.*, 2022) ou la photogrammétrie à l'aide de drones dans les Andes (Vivero *et al.*, 2021). Mais les travaux se concentrent particulièrement sur l'accélération récente de l'écoulement des glaciers rocheux, interrompue parfois par des pauses comme au Laurichard, qui résulterait de la combinaison d'une élévation de la température de la glace et d'un apport

d'eau de fusion (Thibert et Bodin, 2022), et plus encore sur la déstabilisation d'un nombre croissant de glaciers rocheux. Articulant (i) analyse des marqueurs géomorphologiques tels que crevasses et escarpement à leur surface pour cartographier à l'échelle des Alpes françaises les secteurs à permafrost susceptibles de déstabilisation (Marcer *et al.*, 2019), (ii) étude de cas comme le détachement du front du glacier rocheux du Col du Lou en 2015 (Marcer *et al.*, 2020), et (iii) analyse des orthoimages des 337 glaciers rocheux actifs sur les derniers 65 ans, Marcer *et al.* (2021) mettent en évidence un quadruplement moyen de leur vitesse corrélée à l'élévation de la température de l'air, et la déstabilisation de 5 % d'entre eux. D'autres approches méthodologiques émergent : prise en compte du fluage lors de la comparaison de MNTs d'un glacier rocheux avec manteau nival saisonnier (Goetz *et al.*, 2019) ; suivi à haute résolution du déplacement de surface par *time-lapse* par Marsy (2020) dans le cadre de sa thèse de doctorat co-dirigée avec le LISTIC, en développant une méthode automatique de correction du mouvement de la caméra (Marsy *et al.*, 2018) pour permettre le calcul de champs de vecteurs de déplacement avec des paires d'images stéréo (Marsy *et al.*, 2020) – T. Duvanel poursuivant en 2022 et 2023 le développement d'une chaîne de traitement appliquée aux glaciers rocheux dans le cadre de son Master 2 puis de son contrat au



laboratoire; déploiement d'un réseau de capteurs sismiques passifs à la surface d'un glacier rocheux pour suivre les cycles gel/dégel superficiels *via* leur effet sur son élasticité (Guillemot *et al.*, 2021); reconstitution de la vitesse d'émergence et du bilan de masse de surface du Laurichard sur la période 1952-2019 en combinant MNTs, géoradar (GPR) et calcul des flux (Cusicanqui *et al.*, 2021); reconstitution par datation cosmogénique de la mise en place depuis le début de l'Holocène d'un glacier rocheux d'1 km de long dont seul le secteur amont est toujours actif (Lehmann *et al.*, 2022). Ces nombreux travaux contribuent à compléter le panorama mondial des connaissances sur les vitesses des glaciers rocheux (Pellet *et al.*, 2021) et à élaborer une théorie plus robuste de la dynamique des glaciers rocheux (Cicoira *et al.*, 2020). Par ailleurs, nous contribuons à la mise sur pied de l' *Action group IPA - Rock glacier inventories and kinematics* lancé en 2018 à l'EUCOP 5, un effort international sans précédent pour élaborer des standards d'inventaire et de suivi des glaciers rocheux à l'échelle globale (<http://www.rgik.org/>).

Dans le même temps, P.-A. Duvillard (2019) traite dans sa thèse de doctorat de la déstabilisation dans les Alpes françaises des terrains caractérisés par la présence de permafrost et d'infrastructures dans le contexte du réchauffement climatique. Il s'appuie notamment sur quatre travaux de M1 réalisés quelques années plus tôt. Des études de cas sont mobilisées, dans le cadre d'une thèse CIFRE avec le BE IMSRN et du projet EU POIA *PermaRisk* (2018-2021): 12 infrastructures des stations de ski entre 1990 et 2018 dont les types de dommage résultent de processus géomorphologiques et entraînent des stratégies de résilience (Duvillard *et al.*, 2019a), ou un pylône du funitel de Val Thorens implanté sur un glacier rocheux et déstabilisé en 2016 (Duvillard *et al.*, 2019b). Amélioré, l'indice de risque de déstabilisation proposé par Duvillard *et al.* (2015) considère désormais que 16 % des 947 infrastructures concernées présentent un risque fort de déstabilisation (Duvillard *et al.*, 2021). Ces études se sont appuyées en particulier sur des prospections géoélectriques (Duvillard *et al.*, 2018), y compris pour estimer la température dans des parois (Duvillard *et al.*, 2021). Elles ont donné lieu à des développements méthodologiques stimulés par l'arrivée de A. Revil à EDYTEM, sur le contrôle de la conductivité de différents matériaux par leur température, avec une polarisation qui dépend de la salinité de l'eau ou de la glace (Coperey *et al.*, 2019c), ou sur la conductivité complexe de roches expliquée par un modèle considérant la polarisation intragrain du graphite qu'elles contiennent (Abdulsamad *et al.*, 2019d).

Les premiers résultats sur la fréquence des écroulements dans les parois granitiques du bassin du glacier du Géant (Gallach *et al.*, 2018), basés sur des

campagnes antérieures, ont été enrichis par Gallach *et al.* (2020) qui déterminent à partir de l'identification et la datation cosmogénique de 62 écroulements quatre périodes de plus grande fréquence pendant l'Holocène. Croisant l'âge des niches d'arrachement avec la valeur de réflectance de leur surface obtenue par spectroscopie en laboratoire, Gallach *et al.* (2021) proposent un indice colorimétrique, qui varie selon le degré de patine de ces niches et en permet la datation. Ces travaux pourraient trouver un prolongement avec des mesures de spectrométrie de réflectance des parois par l'imageur hyperspectral, en cours d'acquisition par un consortium piloté par l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, qui permettraient d'estimer la fréquence d'écroulement sur les dernières dizaines de milliers d'années non plus à l'échelle de quelques parois mais à celle du MMB.

Les écroulements récents dans les parois à permafrost et les conditions qui y président restent très étudiés. Après avoir faiblement réévalué le volume de l'écroulement de 2005 aux Drus (292 000 m<sup>3</sup>) par photogrammétrie (Guérin *et al.*, 2017), Guérin *et al.* (2020) y identifient trois phases d'activité gravitaire post-2005: décroissante jusqu'en 2008, puis un pic d'écroulements (61 000 m<sup>3</sup>) pendant trois ans affectant la niche de 2005, suivi d'une nouvelle phase de calme jusqu'en 2016. À partir de la modélisation de la température de surface et des niches d'arrachement de 209 écroulements survenus dans le MMB entre 2007 et 2015 et précisément datés, Legay *et al.* (2019) montrent que les plus volumineux (niche > 4 m de profondeur) sont favorisés par le permafrost 'chaud' (*i.e.* > -2 °C) et directement contrôlés par une vague de chaleur de quelques jours au cours d'une période de température de l'air (et donc de la roche en profondeur) exceptionnellement élevée. L'inventaire de plus de 1 700 écroulements recensés dans le MMB depuis 2007 a été traité statistiquement par P. Jean en 2023 lors de son Master 1 Wafin d'approfondir notre compréhension des conditions de leur déclenchement. A. Lhosmot a fait en 2019 lors son Master 2 une première analyse des 14 années de levés TLS alors disponibles sur 12 parois du MMB, soit un total de 376 écroulements dont 91 dans la seule face E de la Tour Ronde – des travaux poursuivis actuellement par L. Courtial-Manent dans sa thèse de doctorat. Dans le cadre de sa thèse (CIFRE avec le BE Alpes-Ingé), M. Cathala et ses collaborateurs (soumis) (i) formulent des scénarios de zones de départ d'écroulements potentiels établis à partir de la base de données de 1 389 écroulements dans le MMB pour identifier les versants à permafrost plus ou moins instables, et (ii) utilisent un modèle de propagation fondé sur 3 545 écroulements alpins pour déterminer à l'échelle des Alpes françaises les secteurs nécessitant une étude détaillée. Pour sa part, la thèse de doctorat de J. Mourey (2019) traitait notamment de l'exposition des alpinistes aux risques associés à

l'évolution du permafrost (Mourey *et al.*, 2019), en particulier aux chutes de pierre dans le couloir de l'Aiguille du Goûter (Mourey *et al.*, 2022) – un volet du projet EU *Alcotra France-Italie PrévRisk Haute Montagne* (2016-2017).

Les travaux en collaboration avec les collègues d'Oslo se sont poursuivis. En Norvège, deux déformations gravitaires profondes de versant (DGPV) de 10 et 26 M m<sup>3</sup> avec permafrost ont fait l'objet d'une étude combinant mesure du déplacement (dGPS, extensométrie, télémétrie laser, interférométrie radar), mesure de la température de surface et sa reconstitution depuis le PAG, tomographie sismique à réfraction et ERT 3D, et modélisation de la température 2D. Cette étude suggère que la présence de glace dans les fractures et l'espace poral de la roche, à une température proche du point de fusion, contrôle (au moins localement) la dynamique de ces DGPVs (Etzelmüller *et al.*, 2022). Une analyse statistique de 299 DGPVs réparties dans l'ensemble de la Norvège révèle que ceux affectés par la présence de permafrost actuellement et au PAG sont aussi ceux qui se déforment le plus (Penna *et al.*, 2023). Enfin, dans le cadre du projet ANR Wisper (*Water and ice related processes in steep slope permafrost*, 2020-2023), la modélisation de la circulation d'eau dans les parois à permafrost par Magnin et Josnin (2021) suggère que celle-ci permet l'aggradation du permafrost à une plus grande profondeur que sans circulation; en revanche, si des fractures peuvent rester englacées alors que la roche a dégelé, les fractures déglacées dans lesquelles l'eau circule constituent des corridors de dégel dans la roche encore gelée. Par ailleurs, les volumes d'eau liquide qui peuvent se former au-dessus ou dans la roche gelée y exercent une pression hydrostatique déstabilisatrice. Toutefois, Ben-Asher *et al.* (2022) montrent que si la fonte de la neige en est la principale source au-dessus de 3600 m, le volume d'eau qui pénètre dans les fractures est faible car 75 % de la neige sur les parois est remobilisée (gravité et vent) tandis qu'une couche de glace imperméable se forme à la base du manteau nivale.

Dans les Alpes françaises, trois nouveaux forages équipés de capteurs de température pour le suivi du permafrost de paroi complètent ceux de 2009 à l'AdM: les Grands Montets (2016, 17 m, 3242 m), la Grande Motte à Tignes (2019, 20 m, 3640 m) et le Piton nord de l'AdM (2020, 10 m, 3754 m). La modélisation de la distribution de la température dans les parois se poursuit, appuyée sur un réseau de capteurs de surface (36 Geoprecision et 30 iButtons) déployé par F. Magnin de la Vanoise au Mercantour, tandis que son évolution dans le massif des Aiguilles Rouges entre 1960 et 2020 est modélisée par L. Dunand lors de son M2. Au Svalbard, le suivi pendant quatre ans et la modélisation de la température de surface des parois littorales ont montré que la banquise contribue au maintien du permafrost qui les affecte en les protégeant

du rayonnement thermique de la mer (Schmidt *et al.*, 2021).

Douze années de mesures du permafrost dans les Alpes françaises dans le cadre de *PermaFrance* permettent de mettre en évidence que (i) le permafrost dans les parois, froid et pauvre en glace, s'est réchauffé de plus de 1 °C en une décennie, alors que la température dans les glaciers rocheux, riches en glace, est restée proche de 0 °C; (ii) la couche active s'est généralement épaissie, en particulier depuis l'été caniculaire de 2015, et a atteint sa valeur maximale en 2022 (Magnin *et al.*, en révision).

Partant de leur relation avec le permafrost, L. Ravel a développé activement ces dernières années un axe de recherche sur les petits glaciers suspendus à base froide et sur les tabliers de glace, articulé en particulier avec la thèse de doctorat de G. Guillet (2020), puis celle de S. Kaushik (2023) co-dirigée avec le LISTIC. Après avoir développé une méthode bayésienne reconstituant l'orientation et la calibration de l'appareil photo utilisé afin de calculer des surfaces à partir de photos d'archives (Guillet *et al.*, 2020), Guillet et Ravel (2020) ont mis en évidence la rétraction de six tabliers glaciaires du MMB depuis la fin du PAG, comprise entre 20 et 100 % de la superficie d'origine; cette étude à grande échelle a été étendue aux glaciers froids d'une dizaine d'autres faces dans les Alpes occidentales par E. Perroud lors de ses M1 et M2 en 2021 et 2022. À l'échelle du MMB, les 423 tabliers de glace recensés par télédétection optique ont perdu 29 % de leur superficie entre 2001 et 2018 (Kaushik *et al.*, 2021); par rapport à 1952, 200 d'entre eux avaient perdu 25 % et 47 % de leur superficie en 2001 et 2019, respectivement, avec des variations entre tabliers qui tiennent à l'exposition et à l'altitude à l'échelle du massif, combinées à la topographie et à leur dimension à l'échelle locale (Kaushik *et al.*, 2022). Par ailleurs, Kaushik *et al.* (2022) montrent du point de vue méthodologique que la rétrodiffusion des tabliers de glace détectée par les images radar satellitaires décroît fortement lors de la fonte de la neige qui les recouvre. Ces tabliers de glace se sont formés pendant l'Holocène, comme le suggèrent les âges de *c.* 0,6 et 2,6 ka du Triangle du Tacul obtenus par la datation du carbone organique contenu dans la glace (Guillet *et al.*, 2021). Des âges confirmés dans la synthèse des travaux sur les tabliers de glace dans le MMB par Ravel *et al.* (2023), qui souligne les effets de la rétraction des tabliers de glace sur l'instabilité des parois rocheuses, y compris par leur diminution d'épaisseur comme mesurée au Triangle du Tacul par un réseau de balises d'ablation. Au-delà d'une amplitude saisonnière qui peut dépasser 20 °C, les tabliers glaciaires sont bien des indicateurs de la présence du permafrost dans la roche: la température moyenne annuelle à la base de deux tabliers instrumentés est ainsi de -4,8 °C et -8,1 °C. Ces travaux ont été menés en particulier grâce au projet EU *Alcotra AdaPT Mont-Blanc* (2018-2020).

Le permafrost est également étudié *via* les dépôts d'éroulement à molards par C. Morino lors de son post-doc dans le cadre du projet ANR Permolarde (*Tracking the degradation of mountain permafrost with molards*, 2019-2023). Les molards sont des amas de matériel rocheux de taille métrique à plurimétrique, cimentés par la glace interstitielle liée à la présence de permafrost dans le versant, déposés lors d'un glissement, qui évoluent vers une forme conique à mesure de la fonte de la glace qu'ils contiennent (Morino *et al.*, 2021). Plusieurs centaines de molards témoignent ainsi que l'éroulement de Niiortuut (Groenland) de 1952 s'est produit aux dépens d'un talus d'éboulis qui était cimenté par la glace de permafrost (Svennevig *et al.*, 2023). Les molards sont utilisés comme analogues des amas coniques qui caractérisent les éjectas autour de certains cratères d'impact sur Mars, suggérant qu'ils proviennent de blocs de régolithe cimentés par de la glace (Morino *et al.*, 2023). En Islande, C. Morino, F. Magnin et E. Malet ont installé en 2021 des capteurs de température de surface (30 iButtons et 2 Geoprecision) sur les plateaux, parois et talus de trois sites, dont le talus d'éboulis a été affecté par des mouvements de

terrain. Leurs données sont utilisées pour y modéliser la distribution du permafrost, ainsi que son évolution depuis plusieurs décennies en utilisant la température de l'air, bien corrélée avec celles mesurées par les capteurs. En 2023, C. Morino, X. Bodin et P. Deline, en collaboration avec des collègues du CEAZA et du IANIGLA, ont étudié dans les Andes centrales semi-arides du Chili et d'Argentine plusieurs dépôts à molards et pseudo-molards – ainsi que des glaciers rocheux; outre leur observation sur le terrain, ces dépôts ont fait l'objet de levés topographiques par drone pour la réalisation de MNTs à haute résolution par photogrammétrie.

Enfin, une dernière forme de permafrost est étudiée depuis peu par EDYTEM: les glaciers. Deux de ces grottes englacées d'altitude modeste, qui marquent localement une limite inférieure de la cryosphère, ont été en effet instrumentées (capteurs de température de l'air et de la glace, balises d'ablation): la 'Cave à glace d'Anterne' dans le massif des Fiz en 2020, et la 'Grande Glacière du Parmelan' dans le massif des Bornes en 2023.

## CONCLUSION

Ces deux décennies de recherche sur le permafrost de montagne ont permis à notre laboratoire de trouver sa place dans la communauté scientifique tant nationale, très réduite, qu'internationale qui étudie cette thématique. L'attribution par l'IPA de l'organisation de l'EUCOP 5 en fut une manifestation évidente, comme le sont les collaborations nationales et surtout internationales qui ont été nouées, avec un nombre croissant de projets de recherche et de thèses préparées au laboratoire ou en co-tutelle, et naturellement l'augmentation très forte des publications ces dernières années (fig. 5) – dont une douzaine citées dans le chapitre 'haute montagne' du rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère (IPCC, 2019).

Le soutien apporté par la section 31 du CNRS, avec le recrutement de trois chargés de recherche en huit ans et la promotion de L. Raveland comme DR en 2022 suite à son HDR de 2020, témoigne de cette reconnaissance progressive de nos travaux tout en ayant grandement permis leur réalisation. Il manifeste le caractère précieux de l'écosystème français de la recherche – envié à juste titre par beaucoup de nos collègues étrangers –, qui articule *via* les UMR le soutien de l'Université et celui des organismes tels que le CNRS. Un soutien qui aura permis d'assurer un passage de relais au sein du laboratoire pour ces recherches sur le permafrost de montagne – P. Deline partant en retraite à l'automne 2023.

Si la communication sur nos travaux est très active dans les conférences scientifiques – comme

dernièrement encore à l'EUCOP 6 avec une demi-douzaine de participant.es d'EDYTEM –, celle en direction du grand public est devenue progressivement très réactive, en réponse à une forte demande médiatique et, plus largement, sociale. Elle prend des formes très diverses: soirées-débats, formation d'enseignants et de guides de haute montagne, interventions en direction du public scolaire, initiatives variées comme par exemple la Nuits des chercheurs, organisée par la Galerie Eureka (Chambéry) en septembre 2022, interventions dans tous types de médias – plus de 180 pour L. Raveland de 2018 à 2021! Cette médiatisation nous vaut d'être régulièrement sollicités par des étudiants et des collègues non USMB pour encadrer des stages et des Masters.

Au-delà de la moisson de résultats scientifiques, l'instrumentation de sites de haute montagne dans des conditions généralement contraignantes a donné lieu à l'expérimentation de nombreux outils et méthodes (Raveland *et al.*, 2017b), tandis que la découverte de nouveaux terrains et la mise en œuvre de nouveaux axes de recherche ont été de règle au cours de ces deux décennies. Et si l'approche modélisatrice est incontournable, en science en général et pour la compréhension du permafrost de montagne en particulier, la pratique du terrain nous le semble toujours tout autant – d'autant que notre «terrain de jeu» reste l'un des plus excitants qui soient!

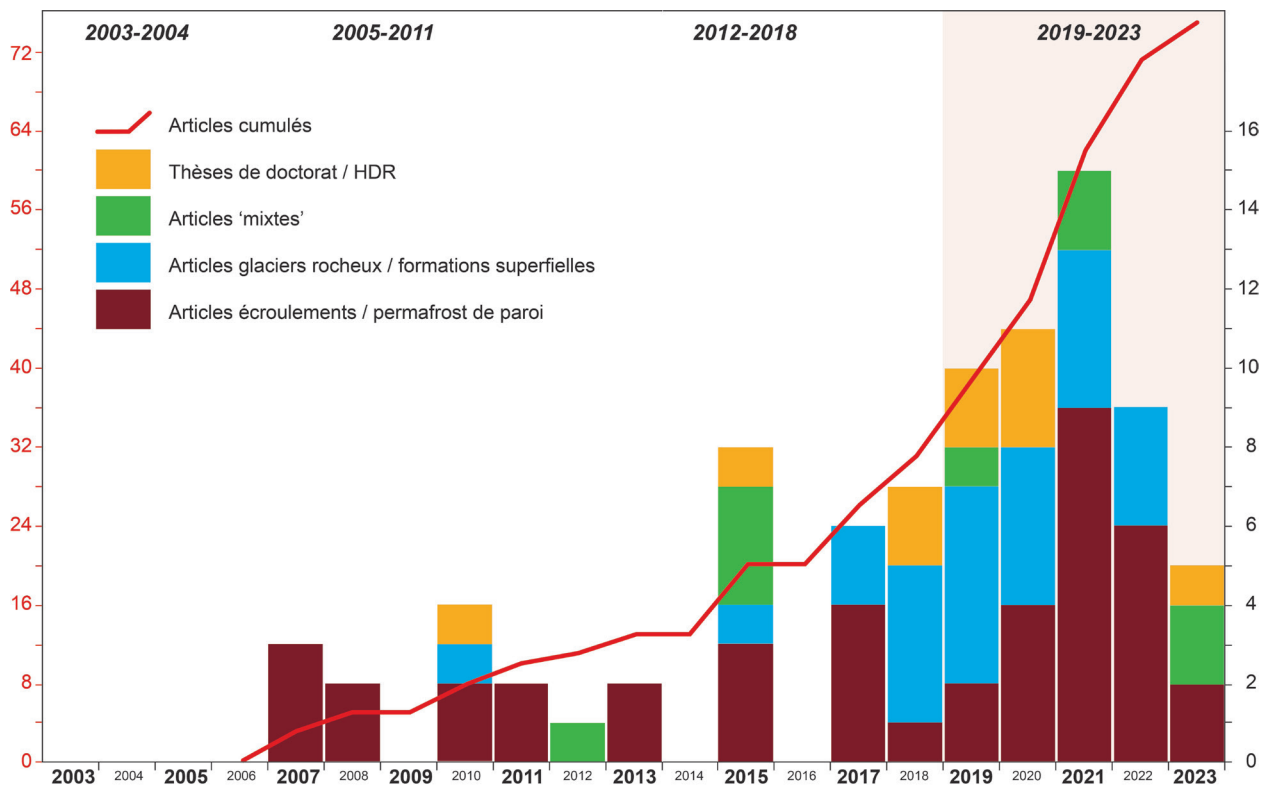


Figure 5 – Évolution entre 2007 et 2023 (jusqu'en juin) du nombre d'articles publiés dans des revues à comité de lecture et audience internationale, et du nombre de thèses soutenues.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous et toutes les collègues, doctorant.es et étudiant.es, cités ou non, du laboratoire comme de nombreuses autres institutions nationales et internationales, avec lesquelles ils et elles ont collaboré activement ou plus épisodiquement au cours de ces 20 dernières années. Merci également aux deux relecteurs scrupuleux, L. Astrade et J. Mourey. Cet article est dédié à la mémoire de Velio Coviello, étudiant puis collègue (CNR-IRPI, Padova) toujours enthousiaste, décédé début avril 2023 dans une avalanche en Valtournenche (Vallée d'Aoste, Italie).

## BIBLIOGRAPHIE

- ABDULSAMAD F., REVIL A., GHORBANI A., TOY V., KIRILOVA M., COPEREY A., DUVILLARD P.-A., MÉNARD G., RAVANEL L. (2019). Complex conductivity of graphitic schists and sandstones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. doi: 10.1029/2019JB017628.
- AZÓCAR G. F., BRENNING A., BODIN X. (2017). Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. *The Cryosphere*, 11, 877-890, doi: 10.5194/tc-11-877-2017.
- 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 Discussions*. doi: 10.5194/esurf-2022-58.
- BERTONE A., BARBOUX C., BODIN X., BOLCH T., BRARDINONI F., CADUFF R., CHRISTIANSEN H.H., DARROW M., DELALOYE R., ETZELMÜLLER B., HUMLUM O., LAMBIEL C., LILLEØREN K.S., MAIR V., PELLEGRINON G., ROUYET L., RUIZ L., STROZZI T. (2022). Incorporating kinematic attributes into rock glacier inventories exploiting InSAR data: preliminary results in eleven regions worldwide. *The Cryosphere*, 1-37. doi: 10.5194/tc-2021-342.
- BODIN X. (2007). *Géodynamique du pergélisol de montagne: fonctionnement, distribution et évolution récente: l'exemple du massif du*

- Combeynot (Hautes Alpes). Thèse de doctorat, Université Paris-Diderot, 272 p.
- BODIN X., ROJAS F., BRENNING A. (2010). Status and evolution of the cryosphere in the Andes of Santiago (Chile, 33.5°S). *Geomorphology*, 118, 453-464. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.016.
- BODIN X., KRYSIECKI J.-M., SCHOENEICH P., LE ROUX O., LORIER L., ECHELARD T., PEYRON M., WALPERSDORF A. (2017). The 2006 collapse of the Bérard rock glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 28, 209-223. doi: 10.1002/ppp.1887.
- BODIN X., THIBERT E., SANCHEZ O., RABATEL A., JAILLET S. (2018). Multi-Annual Kinematics of an Active Rock Glacier Quantified from Very High-Resolution DEMs: An Application-Case in the French Alps. *Remote Sensing*, 10 (4), 547. doi: 10.3390/rs10040547.
- BODIN X., SCHOENEICH P., DELINE P., RAVANEL L., MAGNIN F., KRYSIECKI J.-M., ECHELARD T. (2015). Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés: évolutions récentes dans les Alpes françaises. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 103. doi: 10.4000/rga.2806/2885.
- BODIN X., TROMBOTTO D. (2015). Evaluación de los aportes de la fotogrametría terrestre en el estudio de glaciares de escombros (Cordón del Plata, Mendoza, Argentina). *Acta geológica lilloana*, 27, 87-96.
- BÖHLERT R., GRUBER S., EGLI M., MAISCH M., BRANDOVÁ D., HAEERLI W., IVY-OCHS S., CHRISTL M., KUBIK P.W., DELINE P. (2008). Comparison of exposure ages and spectral properties of rock surfaces in steep, high Alpine rock walls; a field study at Aiguille du Midi (France). In: KANE D.L., HINKEL K.M. (Eds.), *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Permafrost 2008*, Institute of Northern Engineering – University of Alaska Fairbanks, 143-148
- BOSSON J.-B., DELINE P., BODIN X., SCHOENEICH P., BARON L., GARDENT M., LAMBIEL C. (2015). The influence of ground ice distribution on geomorphic dynamics since the Little Ice Age in proglacial areas of two cirque glacier system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 666-680. doi: 10.1002/esp.3666.
- CATHALA M., MAGNIN F., RAVANEL L., DORREN L., ZUANON N., BERGER F., BOURRIER F., DELINE P., soumis. Mapping release areas and runout distances of potential rock slope failures from permafrost-affected rockwalls: a new method and application to the French Alps. Landslides.
- CICOIRA A., MARCER M., GÄRTNER-ROER I., BODIN X., ARENSON L.U., VIELI A. (2020). A general theory of rock glacier creep based on in-situ and remote sensing observations. *Permafrost and Periglacial Processes*. 32, 139-153.
- COPEREY A., REVIL A., ABDULSAMAD F., STUTZ B., DUVILLARD P.-A., RAVANEL L. (2019). Low frequency induced polarization of porous media undergoing freezing: preliminary observations and modelling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. doi: 10.1029/2018JB017015.
- CUSICANQUI D., RABATEL A., VINCENT C., BODIN X., THIBERT E., FRANCOU B. (2021). Interpretation of volume and flux changes of the Laurichard rock glacier between 1952 and 2019, French Alps. *J. Geophys. Res.-Earth*, 126. doi: 10.1029/2021JF006161.
- DELINE P. (2001). Recent Brenva rock avalanches (Valley of Aosta): new chapter in an old story? *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, Supplemento*, 5, 55-63.
- DELINE P. (2002). *Étude géomorphologique des interactions entre écroulements rocheux et glaciers dans la haute montagne alpine: le versant sud-est du massif du Mont Blanc (Vallée d'Aoste)*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 365 p.
- DELINE P., BÖLHERT R., COVIELLO V., CREMONESE E., GRUBER S., KRAUTBLATTER M., JAILLET S., MALET E., MORRA DI CELLA U., NOETZLI J., POGLIOTTI P., RABATEL A., RAVANEL L., SADIÉ B., VERLEYSDONK S. (2009). L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc): un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude. In: Deline, P., Ravanel, L. (Eds.), *Neige et glace de montagne. Reconstitution, dynamique, pratiques*, *Collection EDYTEM*, 8, 135-146.
- DELINE P., ALBERTO W., BROCCOLATO M., HUNGR O., NOETZLI J., RAVANEL L., TAMBURINI A. (2011). The December 2008 Crammont rock avalanche, Mont Blanc massif area, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 3307-3318. doi:10.5194/nhess-11-3307-2011.
- 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*, 94, 265-283. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x.
- DELINE P., GRUBER S., DELALOYE R., FISCHER L., GEERTSEMA M., GIARDINO M., HASLER A., KIRKBRIDE M., KRAUTBLATTER M., MAGNIN F., MCCOLL S., RAVANEL L., SCHOENEICH P. (2015). Chapter 15 - Ice Loss and Slope Stability in High-Mountain Regions. In: HAEERLI W., WHITEMAN C. (Volume Eds.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, 521-561. ISBN: 978-0-12-394849-6, in: SHRODER J. (Series Ed.) *Hazards and Disasters Series*, Elsevier, Amsterdam.

- DELINÉ P., GRUBER S., AMMAN F., BODIN X., DELALOYE R., FAILLETAZ J., FISCHER L., GEERTSEMA M., GIARDINO M., HASLER A., KIRKBRIDE M., KRAUTBLATTER M., MAGNIN F., MCCOLL S., RAVANEL L., SCHOENEICH P., WEBER S. (2021). Chapter 15 - Ice Loss from Glaciers and Permafrost and related Slope instability in High-Mountain Regions. In: HAEBERLI W., WHITEMAN C. (Volume Eds.), *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, 2<sup>nd</sup> edition, 501-540. In: SHRODER J. (Series Ed.), *Hazards and Disasters Series*, Elsevier, Amsterdam. doi: 10.1016/B978-0-12-817129-5.00015-9.
- DUVILLARD P.-A. (2019). *Déstabilisation des terrains-supports d'infrastructures de haute montagne en contexte de réchauffement climatique dans les Alpes françaises*. Thèse de doctorat, USMB.
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., DELINÉ P. (2015). Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne engendré par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises. *Revue de Géographie Alpine / Journal of Alpine Research*, 103. doi: 10.4000/rga.2816/2896.
- DUVILLARD P.-A., REVEL A., QI Y., SOUEID AHMED A., COPEREY A., RAVANEL L. (2018). Three-Dimensional electrical conductivity and induced polarization tomography of a rock glacier. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 123. doi: 10.1029/2018JB015965.
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., MARCER M., SCHOENEICH P. (2019a). Recent evolution of damage to infrastructure on permafrost in the French Alps. *Reg. Environ. Change*. doi: 10.1007/s10113-019-01465-z.
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., SCHOENEICH P., MARCER M., PIARD J.-F. (2019b). Analyse multi-méthodes de la déstabilisation d'un pylône de remontée mécanique implanté sur un glacier rocheux des Alpes françaises. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*. doi: 10.4000/geomorphologie.12945.
- DUVILLARD P.-A., MAGNIN F., REVEL A., LEGAY A., RAVANEL L., ABDULSAMAD F., COPEREY A. (2021). Temperature distribution in a permafrost-affected rock ridge from conductivity and induced polarization tomography. *Geophysical Journal International*, 225, 1207-1221. doi: 10.1093/gji/ggaa597.
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., SCHOENEICH P., DELINÉ P., MARCER M., MAGNIN F. (2021). Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps. *Cold Regions Science and Technology*, 189: 103311. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103311.
- ETZELMÜLLER B., CZEKIRDA J., MAGNIN F., DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., MALET E., ASPAAS A., KRISTENSEN L., SKREDE I., MAJALA G.D., JACOBS B., LEINAUER J., HAUCK C., HILBICH C., BÖHME M., HERMANN S., ERIKSEN H.Ø., LAUKNES T R., KRAUTBLATTER M., WESTERMANN S. (2022). Permafrost in monitored unstable rock slopes in Norway – new insights from temperature and surface velocity measurements, geophysical surveying, and ground temperature modelling. *Earth Surface Dynamics*, 10, 97-129. doi: 10.5194/esurf-10-97-2022.
- EVIN M. (1988). *Dynamique, répartition et âge des glaciers rocheux des Alpes du sud*. Thèse d'État, Université de Grenoble, 309 p.
- FRANCOU B., REYNAUD L. (1992). 10-year surficial velocities on a rock glacier (Laurichard, French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, 209-213. doi: 10.1002/ppp.3430030306.
- GALLACH X. (2018). *Reconstitution de la fréquence des écroulements rocheux post-LGM dans le massif du Mont Blanc*. Thèse de doctorat, Université Fourier, 242 p.
- GALLACH X., RAVANEL L., EGLI M., BRANDOVA D., CHRISTL M., GRUBER S., DELINÉ P., PALANDRE F., CARCAILLET J. (2018). Timing of rockfalls in the Mont Blanc massif (Western Alps): evidence from surface exposure dating with cosmogenic <sup>10</sup>Be. *Landslides*, 15, 1991-2000. doi: 10.1007/s10346-018-0999-8.
- GALLACH X., CARCAILLET J., RAVANEL L., DELINÉ P., OGIER C., ROSSI M., MALET E., GARCIA-SELLES D. (2020). Climatic and structural controls on Lateglacial and Holocene rockfall occurrence in high-elevated rock walls of the Mont Blanc massif (Western Alps). *Earth Surface Processes and Landforms*, 45 (13), 3071-3091. doi: 10.1002/esp.4952.
- GALLACH X., PERRETTE Y., LAFON D., CHALMIN E., DELINÉ P., RAVANEL L., CARCAILLET J., WALLET T. (2021). A new method for dating the surface exposure age of granite rock walls in the Mont Blanc massif by reflectance spectroscopy. *Quaternary Geochronology*, 64, 101156. doi: 10.1016/j.quageo.2021.101156.
- GOETZ J., FIEGUTH P., KASIRI K., BODIN X., MARCER M., BRENNING A. (2019). Accounting for permafrost creep in high-resolution snow depth mapping by modelling sub-snow ground deformation. *Remote Sensing of Environment*. 231, 111275. doi: 10.1016/j.rse.2019.111275
- GRUBER S. (2008). Le permafrost de haute montagne. In: DELINÉ P., RAVANEL L. (dir.), *Neige et glace de montagne. Reconstitution, dynamique, pratiques. Collection EDYTEM*, 8, 125-134. doi: 10.3406/edyte.2009.1079.
- GRUBER S., HOELZLE M., HAEBERLI W. (2004). Permafrost Thaw and Destabilization of

- Alpine Rock Walls in the Hot Summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, 31, 13. doi: 10.1029/2004GL020051.
- GRUBER S., HAEBERLI W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112, F02S18. doi: 10.1029/2006JF000547.
- GUERIN A., ABELLÁN A., MATASCI B., JABOYEDOFF M., DERRON M.-H., RAVANEL L. (2017). Brief communication: 3-D reconstruction of a collapsed rock pillar from Web-retrieved images and terrestrial lidar data – the 2005 event of the west face of the Drus (Mont Blanc massif). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1207-1220. doi: 10.5194/nhess-17-1207-2017.
- GUERIN A., RAVANEL 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. *Scientific Reports*, 10: 17330. doi: 10.1038/s41598-020-74162-1.
- GUILLEMOT A., BAILLET L., GARAMBOIS S., BODIN X., HELMSTETTER A., MAYORAZ R., LAROSE E. (2021). Modal sensitivity of rock glaciers to elastic changes from spectral seismic noise monitoring and modelling. *The Cryosphere*, 15, 501-529. doi: 10.5194/tc-15-501-2021.
- GUILLET G. (2020). *La glace des parois à permafrost de haute montagne : étude glaciologique et thermo-mécanique*. Thèse de doctorat, USMB, 145 p.
- GUILLET G., GUILLET T., RAVANEL L. (2020). Camera orientation, calibration and inverse perspective with uncertainties: a Bayesian method applied to area estimation from diverse photographs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159, 237-255. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.013.
- GUILLET G., RAVANEL L. (2020). Variations in surface area of six ice aprons in the Mont-Blanc massif since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology*, 66, 777-789. doi: 10.1017/jog.2020.46.
- GUILLET, G., PREUNKERT, S., RAVANEL, L., MONTAGNAT, M., FRIEDRICH, R. (2021). Investigation of a cold-based ice apron on a high-mountain permafrost rock wall using ice texture analysis and micro-<sup>14</sup>C dating: a case study of the Triangle du Tacul ice apron (Mont Blanc massif, France). *Journal of Glaciology*, 67, 1205-1212. doi: 10.1017/jog.2021.65
- HAEBERLI W., WEGMANN M., VONDER MOHLL D. (1997). Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90, 407-414.
- IPCC, (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [PÖRTNER H.-O., ROBERTS D.C., MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., TIGNOR M., POLOCZANSKA E., MINTENBECK K., ALEGRÍA A., NICOLAI M., OKEM A., PETZOLD J., RAMA B., WEYER N.M. (dir.)]. Cambridge University Press, Cambridge, 755 p. doi: 10.1017/9781009157964.
- KAUSHIK S., RAVANEL L., MAGNIN F., YAN Y., TROUVE E., CUSICANQUI D. (2021). Distribution and Evolution of Ice Aprons in a Changing Climate in the Mont Blanc Massif (Western European Alps). *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XLIII-B3, 469-475. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-469-2021.
- KAUSHIK S., CERINO B., TROUVE E., KARBOU F., YAN Y., RAVANEL L., MAGNIN F. (2022). Analysis of the Temporal Evolution of Ice Aprons in the Mont-Blanc Massif Using X and C Band SAR Images. *Frontiers in Remote Sensing*, 3, 930021. doi: 10.3389/frsen.2022.930021.
- KAUSHIK S., RAVANEL L., MAGNIN F., YAN Y., TROUVE E., CUSICANQUI D. (2022). Effects of topographic and meteorological parameters on the surface area loss of ice aprons in the Mont Blanc massif (European Alps). *The Cryosphere*, 16, 4251-4271. doi: 10.5194/tc-16-4251-2022.
- KAUSHIK S. (2023). *Ice aprons and hanging glaciers: new insights from optical and SAR remote sensing of the Mont-Blanc massif (western European Alps)*. Thèse de doctorat, USMB, 200 p.
- 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*, 32 (3), 520-536. doi: 10.1002/ppp.2110.
- LEHMANN B., ANDERSON R.S., BODIN X., CUSICANQUI D., VALLA P.G., CARCAILLET J. (2022). Alpine rock glacier activity over Holocene to modern timescales (western French Alps). *Earth Surface Dynamics*, 10, 605-633. doi: 10.5194/esurf-10-605-2022.
- MAGNIN M. (2015). *Distribution et caractérisation du permafrost des parois du massif du Mont Blanc. Une approche combinant monitoring, modélisation et géophysique*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 304 p.
- MAGNIN F., DELINE P., RAVANEL L., NOETZLI J., POGLIOTTI P. (2015a). Thermal characteristics of steep Alpine rock walls: preliminary observations at the Aiguille du Midi (3 842 m a.s.l, Mont Blanc massif, France). *The Cryosphere*, 9, 109-121. doi: 10.5194/tc-9-109-2015.
- MAGNIN F., BRENNING A., BODIN X., DELINE P., RAVANEL L. (2015b). Modélisation statistique de la distribution du permafrost de paroi: application au massif du Mont Blanc. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 21, 145-162. doi: 10.4000/geomorphologie.10965.

- MAGNIN F., KRAUTBLATTER M., DELINE P., RAVANEL L., MALET E., BEVINGTON A. (2015c). Determination of warm, sensitive permafrost areas in near-vertical rockwalls and evaluation of distributed models by electrical resistivity tomography. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120. doi: 10.1002/2014JF003351.
- MAGNIN F., WESTERMANN S., POGLIOTTI P., RAVANEL L., DELINE P., MALET E. (2017a). Snow control on active layer thickness in steep alpine rock walls (Aiguille du Midi, 3842 m a.s.l, Mont Blanc massif). *Catena*, 149, 648-662. doi: 10.1016/j.catena.2016.06.006.
- MAGNIN F., JOSNIN J.-Y., RAVANEL L., PERGAUD J., POHL B., DELINE P. (2017b). Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21<sup>st</sup> century. *The Cryosphere*, 11, 1813-1834. doi.org/10.5194/tc-11-1813-2017.
- MAGNIN F., ETZELMÜLLER B., WESTERMANN S., ISAKSEN K., HILGER P., HERMANN S. R. L. (2019). Permafrost distribution in steep rock slopes in Norway: measurements, statistical modelling and implications for geomorphological processes. *Earth Surface Dynamics*, 7(4), 1019-1040, doi:10.5194/esurf-7-1019-2019.
- 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*, 126 (11), e2021JF006394. doi: 10.1029/2021JF006394.
- MAGNIN, F., RAVANEL, L., BODIN, X., DELINE, P., MALET, E., KRYSIECKI, J.M., SCHOENEICH, P., en révision. Permafrost warmed by up to > 1 °C per decade in the French Alps. Main results from the *PermaFrance* network over the period 2010-2022. *Permafrost and Periglacial Processes*.
- MARCE M. (2018). *Déstabilisation des glaciers rocheux dans les Alpes Françaises : une évaluation à l'échelle régionale et locale*. Thèse de doctorat, UGA, 179 p.
- MARCE M., BODIN X., BRENNING A., SCHOENEICH P., CHARVET R., GOTTARDI F. (2017). Permafrost Favorability Index: Spatial Modeling in the French Alps Using a Rock Glacier Inventory. *Frontiers in Earth Science*, 5, 105. doi: 10.3389/feart.2017.00105.
- MARCE M., SERRANO C., BRENNING A., BODIN X., GOETZ J., SCHOENEICH P. (2019). Evaluating the destabilization susceptibility of active rock glaciers in the French Alps. *The Cryosphere*, 13, 141-155. doi: 10.5194/tc-13-141-2019.
- MARCE M., RINGSØ NIELSEN S., RIBEYRE C., KUMMERT M., DUVILLARD P.-A., SCHOENEICH P., BODIN X., GENUITE K. (2020). Investigating the slope failures at the Lou rock glacier front, French Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31, 15-30. doi: 10.1002/ppp.2035.
- MARCE M., CICOIRA A., CUSICANQUI D., BODIN X., ECHELARD T., OBREGON R., SCHOENEICH P. (2021). Rock glaciers throughout the French Alps accelerated and destabilised since 1990 as air temperatures increased. *Communications Earth & Environment*, 2, 1-11. doi: 10.1038/s43247-021-00150-6.
- MARSY G. (2020). *Apport de l'imagerie optique time-lapse stéréoscopique pour la quantification à haute résolution spatio-temporelle (4D) des dynamiques de versants en montagne*. Thèse de doctorat, USMB, 144 p.
- MARSY G., VERNIER F., CASTAINGS W., BODIN X., TROUVÉ E. (2018). Détection automatique de zones en mouvement dans des séries d'images non recalées: Application à la surveillance des mouvements gravitaires. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 217-218, 25-32. doi: 10.52638/rfpt.2018.413.
- MARSY G., VERNIER F., BODIN X., CUSICANQUI D., CASTAINGS W., TROUVÉ E. (2020). Monitoring mountain cryosphere dynamics by time lapse stereo photogrammetry. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-2-2020, 459-466. doi: 10.5194/isprs-annals-V-2-2020-459-2020.
- MORINO C., CONWAY S.J., BALME M.R., HELGASON J.K., SÆMUNDSSON Þ., JORDAN C., HILLIER J. ARGLES T. (2021). The impact of ground-ice thaw on landslide geomorphology and dynamics: two case studies in northern Iceland. *Landslides*, 18 (8), 2785-2812. doi: 10.1007/s10346-021-01661-1.
- MORINO C., CONWAY, S., PHILIPPE M., PEIGNAUX C., SVENNEVIG K., LUCAS A., NOBLET A., ROBERTI G., BUTCHER F. COLLINS-MA J. (2023). Permafrost molards as an analogue for ejecta-ice interactions at Hale Crater, Mars. *Icarus*, 391, 115363. doi: 10.1016/j.icarus.2022.115363.
- MOUREY J. (2019). *L'alpinisme à l'épreuve du changement climatique. Évolution géomorphologique des itinéraires, impacts sur la pratique estivale et outils d'aide à la décision dans le massif du Mont Blanc*. Thèse de doctorat, USMB, 334 p.
- MOUREY J., MARCUZZI M., RAVANEL L., PALLANDRE F. (2019). The effects of climate change on high mountain environments - Evolution of mountaineering routes and their conditions of use in the Mont-Blanc massif over half a century. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 51(1), 176-189. doi: 10.1080/15230430.2019.1612216.
- MOUREY J., LACROIX P., DUVILLARD P.-A., MARSY G., MARCE M., MALET E., RAVANEL L. (2022). Multi-method monitoring of rockfall activity along the



- classic route up Mont Blanc (4809 m.a.s.l.) to encourage adaptation by mountaineers. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 445-460. doi: 10.5194/nhess-22-445-2022.
- NOETZLI J., HOELZLE M., HAEBERLI W. (2003). Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: a GIS-based approach to determine critical factors. *Proceedings of the Eighth International Conference on Permafrost*, July 2003, Zurich, Switzerland. A.A. Balkema Publishers, Vol. 2, 827-832.
- 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*, 112, F02S13. doi:10.1029/2006JF000545
- PELLET C., BODIN X., DELALOYE R., KAUFMANN V., NOETZLI J., THIBERT E., KELLERER-PIRKLBAUER A. (2021). Rock glacier kinematics. *BAMS - State of the climate in 2020*, S44-S45. doi: 10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1.
- PENNA I.M., MAGNIN F., NICOLET P., ETZELMÜLLER B., HERMANN R.L., BÖHME M., KRISTENSEN L., NÖEL F., BREDAL M., DEHLS J.F. (2023). Permafrost controls the displacement rates of large unstable rock-slopes in subarctic environments. *Global and Planetary Change*, 220, 104017. doi: 10.1016/j.gloplacha.2022.104017.
- 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*, 35, L10502. doi:10.1029/2008GL033424.
- RAVANEL L. (2010). *Caractérisation, facteurs et dynamiques des écoulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, 322 p.
- RAVANEL L. (2020). *Les versants de haute montagne sous forçage climatique: dynamiques géomorphologiques et impacts sur les risques et les pratiques dans le massif du Mont Blanc*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, USMB, 354 p.
- RAVANEL L., DELINE P. (2008). La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc): évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 4, 261-272. doi: 10.4000/geomorphologie.7444.
- RAVANEL L., ALLIGNOL F., DELINE P., GRUBER S., RAVELLO M. (2010a). Rock falls in the Mont-Blanc massif in 2007 and 2008. *Landslides*, 7, 493-501. doi: 10.1007/s10346-010-0206-z.
- RAVANEL L., DELINE P., JAILLET S. (2010b). Quantification des éboulements/écroulements dans les parois à permafrost de haute montagne: quatre années de relevés laser terrestres dans le massif du Mont-Blanc. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 192, 58-65.
- 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*, 21 (2), 357-365. doi: 10.1177/0959683610374887.
- RAVANEL L., DELINE P. (2013a). A network of observers in the Mont Blanc massif to study rockfalls in high alpine rockwalls. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 36, 151-158. doi 10.4461/GFDQ.2013.36.12.
- RAVANEL L., DELINE P., LAMBIEL C., VINCENT C. (2013b). Instability of a highly vulnerable high alpine rock ridge, the Arête inférieure des Cosmiques (Mont Blanc massif, France). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 95, 51-66. doi:10.1111/geoa.12000.
- RAVANEL L., MAGNIN F., DELINE P. (2017a). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of the Total Environment*, 609, 132-143. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.055.
- RAVANEL L., MALET E., DUVILLARD P.-A., MAGNIN F., DELINE P., GUILLET G., TROILO F., POGLIOTTI P., MORRA DI CELLA U., BEUTEL J., GRUBER S. (2017b). Instrumentation thermique et cinématique des parois à permafrost du massif du Mont Blanc. In: MALET E., ASTRADE L. (dir.), *Monitoring en milieu naturel: retours d'expériences en terrains difficiles. Collection EDYTEM*, 19, 27-38. 978-2-918435-11-2.
- RAVANEL L., DUVILLARD P.-A., JABOYEDOF M., LAMBIEL C. (2018). Recent evolution of an ice-cored moraine at the Gentianes Pass, Valais Alps, Switzerland. *Land Degradation and Development*, 29, 3693-3708. doi: 0.5194/esurf-4-103-2016.
- 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*, 1-17. doi: 10.1017/jog.2023.15.
- RICO I., MAGNIN F., MORENO J.I.L., SERRANO E., ALONSO-GONZÁLEZ E., REVUELTO J., HUGHES-ALLEN L., GÓMEZ-LENDE M. (2021). First evidence of rock wall permafrost in the Pyrenees (Vignemale peak, 3,298 m a.s.l., 42°46'16"N/0°08'33"W). *Permafrost and Periglacial Processes*, 32 (4), 673-680. doi: 10.1002/ppp.2130.
- RUIZ L., BODIN X. (2015). Analysis and improvement of surface representativeness of high resolution

- Pléiades DEMs: Examples from glaciers and rock glaciers in two areas of the Andes. In: Jasiewicz J., Zwoliński Zb., Mitasova H., Hengl T. (dir.), *Proceedings of the Geomorphometry for Geosciences 2015 Conference*, Poznań, 223-226.
- SALZMANN N., NOETZLI J., HAUCK C., GRUBER S., HOELZLE M., HAEBERLI W. (2007). Ground surface temperature scenarios in complex high-mountain topography based on regional climate model results, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112, F02S12. doi: 10.1029/2006JF000527.
- SCHMIDT J.U., ETZELMÜLLER B., SCHULER T.V., MAGNIN F., BOIKE J., LANGER M., WESTERMANN S. (2021). Surface temperatures and their influence on the permafrost thermal regime in high-Arctic rock walls on Svalbard. *The Cryosphere*, 15, 2491-2509. doi: 10.5194/tc-15-2491-2021, 2021.
- SCHOENEICH P., BODIN X., KRYSIECKI J.-M., DELINE P., RAVANEL L. (2010). *Permafrost in France. Report n° 1*. PermaFrance network, Grenoble, Institut de Géographie Alpine, 68 p.
- STROZZI T., CADUFF R., JONES N., BARBOUX C., DELALOYE R., BODIN X., KÄÄB A., MÄTZLER E., SCHROTT L. (2020). Monitoring Rock Glacier Kinematics with Satellite Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing*, 12 (3), 559. doi: 10.3390/rs12030559.
- SVENNEVIG K., KEIDING M., KORSGAARD J., LUCAS A., OWEN M., POULSEN M.D., PRIEBE J., SØRENSEN E.V., MORINO C. (2023). Uncovering a 70-year-old permafrost degradation induced disaster in the Arctic, the 1952 Niiortuut landslide-tsunami in central West Greenland. *Science of The Total Environment*, 160110. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160110.
- THIBERT E., BODIN X. (2022). Changes in surface velocities over four decades on the Laurichard rock glacier (French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 33, 323-335. doi: 10.1002/ppp.2159.
- VIVERO S., BODIN X., FARIÁS-BARAHONA D., MACDONELL S., SCHAFFER N., ROBSON B.A., LAMBIEL C. (2021). Combination of Aerial, Satellite, and UAV Photogrammetry for quantifying Rock Glacier Kinematics in the Dry Andes of Chile (30°S) Since the 1950s. *Frontiers in Remote Sensing*, 2, 784015. doi: 10.3389/frsen.2021.784015.