



SCIENCE

Figure 1 : le complexe de glaciers rocheux du vallon de la Route (Hautes-Alpes). Les contrastes d'éclairage révèlent nettement les indices que l'on peut observer sur les versants et dans les vallons en présence de glaciers rocheux. En apparence, une accumulation de blocs rocheux, un éboulis, mais en réalité une masse de glace et de débris mélangés dont l'évolution sur le long terme (plusieurs milliers d'années) produit des paysages à l'esthétique indéniable...
© Xavier Bodin

LES GLACIERS ROCHEUX DÉSTABILISÉS DES ALPES FRANÇAISES : QUELLES RÉPONSES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Xavier Bodin, chargé de recherche CNRS, laboratoire EDYTEM (CNRS / USMB), le Bourget-du-Lac,
Philippe Schoeneich, professeur à l'UGA, laboratoire PACTE (CNRS / IEP / UGA), Grenoble,
Marco Marcer, chercheur à la Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, Arctic DTU, Sisimiut 3911, Greenland

Connus par les scientifiques depuis le début du XX^e siècle seulement, les glaciers rocheux ont fortement intrigué les géomorphologues par leur morphologie singulière et par les questions qu'ils soulèvent quant à leur formation, leur composition ou encore leur rôle dans l'érosion et le transfert, sur le long terme, des sédiments. Leur déstabilisation, que l'on commence seulement à comprendre, suggère que le permafrost dont les glaciers rocheux sont constitués se dégrade face au réchauffement en cours, laissant craindre de nouveaux risques pour les vallées de montagne.

PERMAFROST ET GLACIERS « ROCHEUX » : QUELQUES NOTIONS

Glaciers... rocheux ? Derrière cette terminologie étrange se cachent des formes que l'on peut couramment observer dans les vallons des Alpes françaises, pour peu que l'on prenne la peine de s'élever suffisamment haut sur les versants de montagne (figure 1, ci-dessus).

Nichés en général au pied de parois qui les alimentent en débris rocheux et en neige, et donc en glace, les glaciers rocheux y trouvent des conditions suffisamment froides pour que le terrain reste gelé en permanence, à quelques mètres de profondeur. Ainsi cimentés par ce permafrost riche en glace, ces tas de cailloux se déforment et acquièrent

une morphologie très reconnaissable, avec leur front et leurs rebords faits d'un talus raide et bien marqué (figure 2). Les « bourrelets » et les sillons témoignent de la plasticité de ce mélange de glace et de cailloux dont l'épaisseur est généralement comprise entre 15 et 40 m.

Installés dans les paysages alpins depuis le retrait des grands glaciers quaternaires (vers 10-15 000 ans avant notre ère), plus de 3000 glaciers rocheux ont été répertoriés en France, dont certains peuvent atteindre 2 km de long et s'étalent parfois jusque dans les forêts. Toutefois, seuls les plus récents sont actuellement actifs et se déforment par fluage de la glace :



les mouvements mesurés sur ces derniers varient de quelques centimètres à plusieurs mètres par an, pour une taille qui est en général inférieure à 1 km. À l'inverse des glaciers « normaux », une fois la glace des glaciers rocheux disparue et donc les mouvements arrêtés, la forme générale se maintient quasiment à l'identique dans le paysage, la végétation envahissant progressivement le terrain stabilisé, mais la morphologie reste clairement visible.

Depuis le début des années 2000, et dans un contexte où les conséquences du réchauffement climatique bousculent de plus en plus fortement nos sociétés, les questionnements scientifiques se focalisent plus particulièrement sur les réponses géomorphologiques des glaciers rocheux face au climat, et notamment sur les impacts sur les risques naturels en montagne d'une part et sur l'hydrologie d'autre part.

Parmi les avancées récentes, l'inventaire cartographique complet des glaciers rocheux, établi par reconnaissance sur les couvertures photographiques aériennes de l'IGN, a permis de mieux comprendre les facteurs qui influencent leur distribution : altitude, rayonnement solaire, mais aussi géologie et enneigement. Ces données ont aussi permis de modéliser la distribution spatiale du permafrost (une carte en

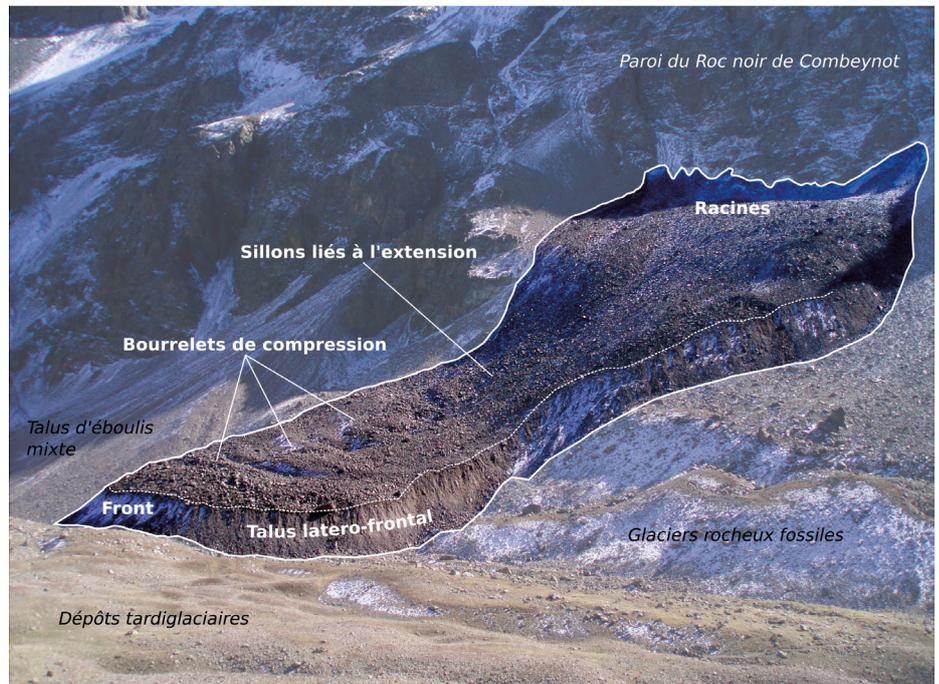


Figure 2 : les principales caractéristiques morphologiques d'un glacier rocheux. Situé sous la paroi nord du Roc noir de Combeynot (Hautes-Alpes), le glacier rocheux de Laurichard se développe sur 200 m de dénivelé et 500 m de long, depuis les racines (où se crée le mélange glace/débris rocheux) jusqu'à son front, à 2450 m d'altitude. Les sillons et les bourrelets expriment la déformation visco-plastique du permafrost riche en glace, et la raideur et la « fraîcheur » des talus latéraux et frontaux dénotent quant à elles l'activité des mouvements. Le glacier rocheux actuel recouvre des formes anciennes, issues de phases climatiques plus fraîches au cours du Quaternaire, mises en place il y a probablement 8 ou 10 000 ans, après le retrait des grands glaciers. - © Xavier Bodin

ligne du permafrost de l'ensemble des Alpes est disponible à ce lien¹), dont les glaciers rocheux sont des indicateurs de présence : plus de 500 km² de versants sont ainsi concernés dans les Alpes françaises, deux fois plus que la superficie des glaciers ! Et une partie non négligeable de ce permafrost est susceptible d'être en voie de dégradation, c'est-à-dire de se rapprocher de 0°C et de voir sa glace fondre.

Les travaux menés ces dernières années nous permettent de mieux comprendre les conséquences de cette évolution, enclenchée probablement depuis la fin du Petit Âge glaciaire (vers 1850) et amplifiée par l'accélération du réchauffement des trois dernières décennies.

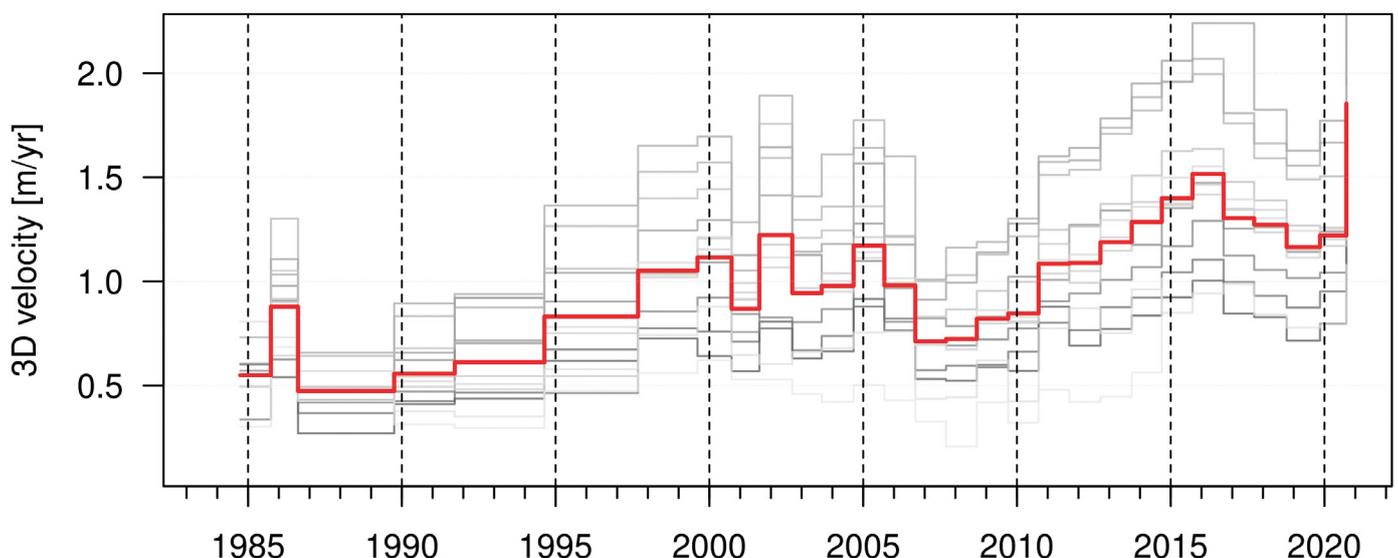


Figure 3 : évolution des vitesses 3D (planimétrie et altimétrie) du glacier rocheux de Laurichard. Ces courbes sont produites à partir des données recueillies annuellement sur une trentaine de blocs rocheux dont la position est mesurée précisément chaque mois de septembre. La ligne rouge correspond à la moyenne des blocs individuels représentés en gris. - © Permafance

1 (s.d.). Alpine Permafrost Index Map (APIM). Université de Zurich, département de géographie : https://www.geo.uzh.ch/microsite/cryodata/PF_map_explanation.html

ACCÉLÉRATION ET DÉSTABILISATION : UNE TENDANCE MARQUÉE DES DEUX DERNIÈRES DÉCENNIES

L'un des premiers impacts du réchauffement sur les glaciers rocheux est l'accélération de leurs vitesses d'écoulement, observée depuis une vingtaine d'années (Kääb et al., 2007). Sur le glacier rocheux de Laurichard, près du col du Lautaret (Hautes Alpes, figure 2), qui est suivi depuis presque quarante ans, les vitesses moyennes sont ainsi passées d'une cinquantaine de cm par an dans les années 80 à environ 1m/a dans les années 2000, après quoi elles ont constamment dépassé ce seuil pour atteindre 1,5 m/a en 2015 puis 1,85 m/a en 2020 (figure 3)...

Dans les Alpes françaises, des signes de déstabilisation, comme des fractures ou des crevasses, ont été relevés sur une cinquantaine de glaciers rocheux, soit près de 10 % de tous les glaciers rocheux actifs de la région

Si ce comportement est aussi observé sur la plupart des glaciers rocheux pour lesquels de telles mesures sont disponibles, certains sites voient également d'autres phénomènes, parfois spectaculaires, se développer. Ainsi, en 2006, l'effondrement d'une partie du glacier rocheux du Bérard, au-dessus de Barcelonnette, avait alerté à la fois les gestionnaires des risques et les scientifiques sur la déstabilisation des glaciers rocheux (Bodin et al., 2016). Plus récemment, la lave torrentielle qui a endommagé les infrastructures de la station de ski de Valcenis en 2015 a montré que des phénomènes complexes peuvent résulter de la déstabilisation de glacier rocheux et se propager largement vers l'aval à l'occasion d'épisodes orageux.

Dans les Alpes françaises, des signes de déstabilisation, comme des fractures ou des crevasses, ont été relevés sur une cinquantaine de glaciers rocheux, soit près de 10 % de tous les glaciers rocheux actifs de la région (Marcer et al., 2019). **L'un des exemples les plus impressionnants est celui qui se développe sur le versant ouest du sommet de Pierre Brune, dans le massif de la Vanoise (figure 4), où les vitesses**

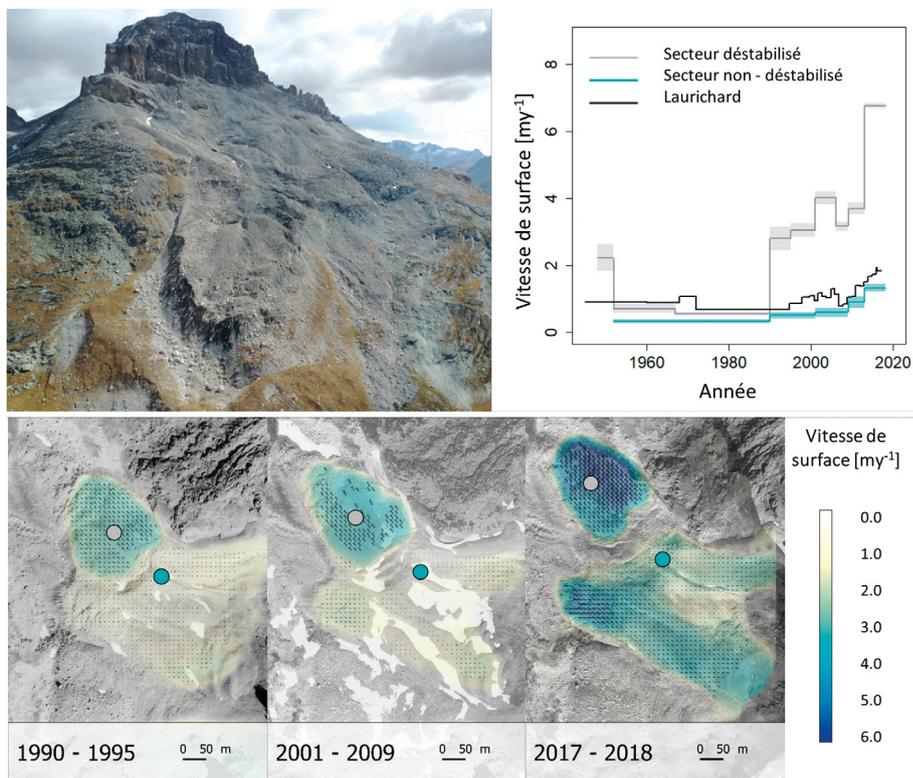


Figure 4 : le glacier rocheux déstabilisé de Pierre Brune, en Vanoise. En haut à gauche, une vue aérienne du site, avec la langue qui s'est détachée de la masse principale du glacier rocheux à la faveur d'une cassure transversale sur toute la largeur. Cette cassure et les mouvements forts de la langue se distinguent clairement sur les trois cartes du bas qui montrent les champs de vitesses à la surface pour trois périodes. Le graphique en haut à droite présente quant à lui l'évolution moyenne des vitesses des deux parties du glacier rocheux de Pierre Brune, ainsi que du glacier rocheux non déstabilisé de Laurichard pour comparaison. - © Marco Marcer

atteignent actuellement 8 m/a dans le secteur le plus rapide, qui correspond à une partie du glacier rocheux littéralement coupée de ses racines à l'amont. Si les prémices de la déstabilisation semblent s'observer dès les années 50, une amplification du phénomène a clairement eu lieu à partir des années 90, accompagnée d'une accélération des vitesses mesurées en surface. Une analyse détaillée de tous les glaciers rocheux déstabilisés des Alpes françaises et de leur évolution depuis les années 50 suggère que **l'augmentation des températures de l'air, et donc des températures du permafrost, a joué un rôle majeur dans les phénomènes observés, bien que chaque site ait une réponse différente, en fonction notamment de la topographie (Marcer et al., 2021).**

QUELLES ÉVOLUTIONS À L'AVENIR ?

Nous venons de le voir, la dégradation du permafrost en montagne a déjà des répercussions sur le fonctionnement des versants, et des conséquences par exemple en termes de risques naturels. Quelles sont toutefois les évolutions à attendre, et quels seront les impacts pour les activités, et plus généralement nos sociétés ? Si les connaissances ont progressé ces dernières années, notamment sur la distribution des glaciers rocheux et leurs dynamiques, il n'en reste pas moins que le fonctionnement physique de ces « tas de cailloux pleins de glace » reste peu compris. Les efforts réalisés récemment en modélisation mécanique (Cicoira et al., 2020) suggèrent que l'eau, de plus en plus présente dans le sol gelé à mesure que celui-ci s'approche du point de fusion, est certainement un élément critique dans la déformation des glaciers rocheux. La destruction du terrain lorsque les glaciers rocheux se déstabilisent provoque par ailleurs une augmentation des échanges d'eau et d'énergie avec l'atmosphère, susceptible d'amplifier les mécanismes de déstabilisation.

La question est donc complexe, mais les risques réels, expliquant



Figure 5 : le front du glacier rocheux du Dérochoir, qui surplombe de façon abrupte la vallée de l'Arve au niveau des Houches, déverse ses matériaux dans des ravines provoquant régulièrement des laves torrentielles. Le site est caractéristique d'une situation à risque, ici du fait de la connexion directe entre le front du glacier rocheux et le torrent, et est surveillé par les scientifiques et les services gestionnaires de la RTM-ONF. - © Xavier Bodin

l'engagement d'acteurs tel que la Direction générale pour la prévention des risques, au sein du ministère de l'Écologie, qui soutient depuis plusieurs années un « Programme d'action pour la prévention des risques d'origine glaciaire et périglaciaire ».

Bodin, X., Krysiecki, J.-M., Schoeneich, P., Le Roux, O., Lorier, L., Echelard, T., Peyron, M., Walpersdorf, A., 2016. The 2006 collapse of the Bérard Rock Glacier (Southern French Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 28, 209–223. <https://doi.org/10.1002/ppp.1887>

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* n/a, 1–15. <https://doi.org/10.1002/ppp.2090>

Kääb, A., Frauenfelder, R., Roer, I., 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change* 56, 172–187. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.005>

Marcer, 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. *Nature Communications Earth & Environment* 2, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00150-6>

Marcer, 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. <https://doi.org/10.5194/tc-13-141-2019>