

Adaptation des accès aux refuges de haute montagne face au changement climatique : le cas de l'Envers des Aiguilles dans le massif du Mont-Blanc

Adapting high-mountain refuge access in a changing climate: the Envers des Aiguilles case study in the Mont-Blanc massif

Vincent OLIVA¹, Edgar CHAVE¹, Jacques MOUREY², Pierre-Allain DUVILLARD³, Lucas DAVAZE⁴, Antoine GIRARD*^{1,5}

1 Géolithe, Crolles, France

2 CEN, Annecy, France

3 Naga Geophysics, Chambéry, France

4 Mediation Climat, Château-Bernard, France

5 Laboratoire Pacte, Grenoble, France

** antoine.girard@geolithe.com*

RESUME : Le changement climatique induit une évolution rapide des itinéraires glaciaires, dégradant ou complexifiant fortement les conditions d'accès à certains refuges. Inscrite dans le projet transfrontalier Prévrisk-CC mené à l'échelle de l'espace Mont-Blanc, cette étude se focalise sur l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles. Elle s'appuie sur une méthode structurée en trois phases. La première phase, basée sur des analyses géomorphologiques et des modélisations glaciologiques à l'horizon 2040, permet d'identifier des secteurs clés susceptibles de connaître de fortes évolutions morphologiques. La deuxième phase, fondée sur des expertises de terrain et une sectorisation de l'itinéraire, conduit à la définition de deux scénarios d'adaptation contrastés de l'accès au refuge. La troisième phase repose sur une analyse multicritère de ces scénarios, mettant en évidence des compromis entre différentes options d'aménagement, en vue de leur opérationnalisation. L'article décrit cette démarche et met en évidence l'intérêt d'une approche intégrée associant données scientifiques et scénarios opérationnels pour anticiper les besoins futurs d'aménagement en haute montagne.

ABSTRACT: Climate change is driving rapid transformations in glacial environments, significantly degrading or complicating access to several high-mountain refuges. Within the cross-border Prévrisk-CC project conducted across the Mont Blanc region, this study focuses on the access route to the Envers des Aiguilles refuge. The work follows a three-phase methodological framework. The first phase, based on geomorphological analyses and glaciological modelling with a 2040 horizon, aims to identify key areas likely to undergo significant morphological changes. The second phase, relying on field investigations and route sectorization, leads to the definition of two contrasting adaptation scenarios for future access to the refuge. The third phase consists of a multicriteria assessment of these scenarios, highlighting the trade-offs between different adaptation options and supporting their operational feasibility. The article presents this approach and emphasizes the relevance of an integrated framework combining scientific data and operational scenarios to anticipate future infrastructure needs in high-mountain environments.

Mots-clés : Adaptation au changement climatique ; Accès aux refuges ; Recul glaciaire ; Déstabilisations rocheuses ; Scénarios prospectifs.

1 INTRODUCTION : CONTEXTE GENERAL DU PROJET

À la jonction de trois pays européens (France, Suisse, Italie), le massif du Mont-Blanc constitue un territoire au patrimoine naturel et culturel de tout premier ordre. Il est notamment l'un des massifs les plus fréquentés du monde pour la pratique de l'alpinisme, récemment classée au patrimoine culturel immatériel de l'humanité (Ministère de la Culture, 2019). Comme tous les milieux de haute montagne, ce massif subit de manière particulièrement rapide et visible les effets du changement climatique (Haeberli *et al.*, 2010 ; Beniston *et al.*, 2018). Celui-ci se traduit notamment par l'accélération du recul glaciaire (The GLAMBIE Team, 2025), la dégradation du permafrost (Magnin *et al.* 2023), la déstabilisation des versants ou encore la modification du cycle de l'eau (Ravel *et al.*, 2017). Cette dynamique entraîne une évolution rapide des itinéraires d'alpinisme glaciaires (Cailhol *et al.*, 2025), qui dégrade ou complexifie fortement les conditions d'accès à certains refuges (Mourey & Ravel, 2017).

Bien que les accès aux refuges aient toujours été affectés par de nombreuses problématiques inhérentes au milieu de la haute montagne (recul glaciaire, instabilité des moraines, déstabilisations rocheuses, variation des pentes, etc.), le changement climatique accentue et accélère la plupart de ces dynamiques, interrogeant la pérennité des itinéraires et les aménagements à prévoir. Pour le maître d'ouvrage, les enjeux portent principalement sur le maintien et l'optimisation d'accès estivaux pérennes avec des aménagements limités, ainsi que sur la prise en compte des évolutions des pratiques de l'alpinisme et des contraintes d'exploitation des refuges.

Dans ce cadre, l'étude présentée s'inscrit dans le projet ALCOTRA-Prévis-Risk-CC (Prévention des risques et Changement Climatique) visant à améliorer la compréhension des processus à l'origine des risques naturels en haute montagne et à soutenir des actions locales d'adaptation et de résilience. Notre travail porte en particulier sur l'évolution de l'accès à huit refuges – sept dans le massif du Mont-Blanc et un dans le massif des Aiguilles Rouges – afin de caractériser les évolutions morphologiques en cours et d'identifier les travaux à réaliser pour adapter ces itinéraires à moyen terme, tout en limitant leur impact sur la biodiversité et le paysage.

Dans cet article, nous réalisons un focus sur l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles (2493 m), qui illustre particulièrement bien les dynamiques d'évolution du terrain et les besoins d'adaptation des accès. Les phénomènes étudiés concernent exclusivement l'accès pédestre estival entre la gare du Montenvers et l'arrivée au refuge. Les aléas pouvant

concerner directement le refuge ne sont pas pris en compte. L'aléa avalanche n'est pas étudié.

2 CAS D'ETUDE : L'ACCES AU REFUGE DE L'ENVERS DES AIGUILLES

Le refuge de l'Envers des Aiguilles est situé en rive gauche de la Mer de Glace (Fig. 1).

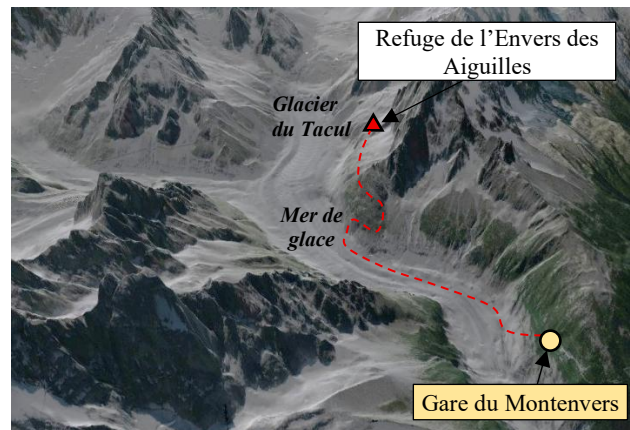


Figure 1 : Section aval du bassin de la Mer de Glace et de l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles

Le début de l'itinéraire se fait classiquement depuis la gare du Montenvers, d'où l'on rejoint le glacier soit par la nouvelle télécabine (ouverte en 2024), soit par un cheminement dans les dalles moutonnées (type via ferrata). Le cheminement se poursuit ensuite directement sur la Mer de Glace, où l'itinéraire évolue au fil des saisons en fonction des conditions glaciaires de surface (crevasses, bédrières, couverture détritique, enneigement).

Cet itinéraire a connu plusieurs évolutions liées au recul de la Mer de Glace. Le sentier d'origine passait d'abord à l'aplomb du glacier de la Thendia sans aménagement particulier. À partir des années 1990 en lien avec l'abaissement progressif du glacier, des échelles et câbles sont installés pour franchir les dalles rocheuses devenues trop raides et hautes. Depuis les années 2000 environ, les échelles doivent être prolongées chaque année sur ce tronçon. En 2018, l'itinéraire est déplacé d'environ 200 mètres vers le sud pour éviter une moraine devenue raide et instable. Au fil du temps, la hauteur des équipements a engendré un accroissement de la technicité de l'accès.

L'itinéraire actuel quitte le glacier à environ 1900 m d'altitude et remonte un ensemble de dalles de roches moutonnées sur une centaine de mètres de dénivellé. Le sentier se poursuit alors en balcon, passant sous plusieurs aiguilles rocheuses, puis sous le glacier de Trélaporte, avant d'aboutir au refuge situé à 2493 m d'altitude. (Fig. 2).

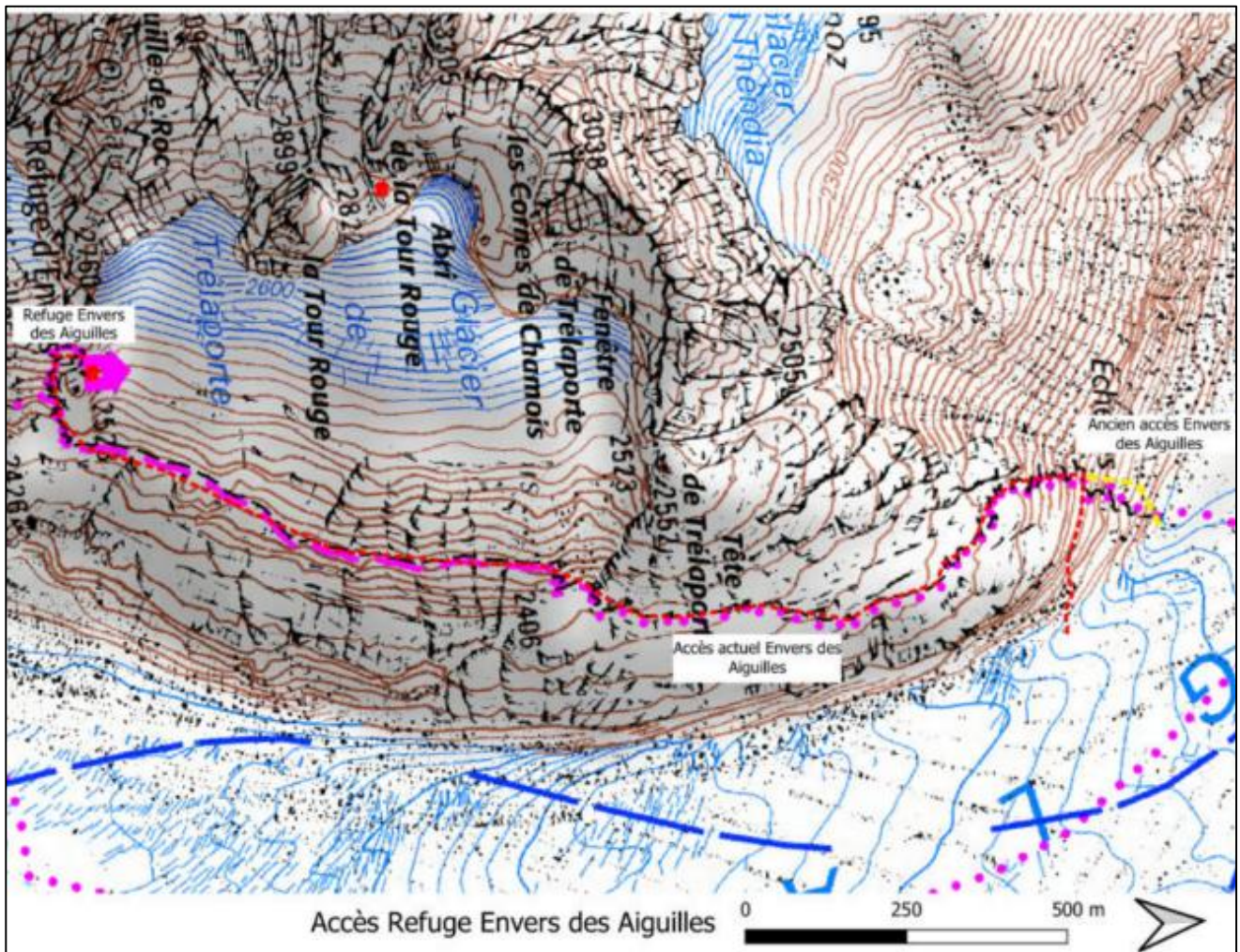


Figure 2 : Tracé de l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles depuis la Mer de Glace.

Cet itinéraire constitue aujourd'hui l'unique voie d'accès au refuge. Il emprunte des secteurs où les interfaces glacier-rocher et les terrains morainiques évoluent rapidement sous l'effet du changement climatique. Les terrains de formations concernant cet accès sont en grande majorité composés de granit, d'éboulis de pente et de moraines. Il importe donc d'en analyser les impacts potentiels sur les conditions d'accès, ainsi que d'examiner les scénarios d'adaptation susceptibles d'assurer une continuité d'accès dans les prochaines décennies.

3 UNE DEMARCHE EN TROIS PHASES

La méthodologie mise en œuvre repose sur trois phases complémentaires. La phase 1 consiste en une synthèse multi-phénomène permettant de caractériser de manière prospective les évolutions glaciologiques et géomorphologiques attendues à l'horizon 2040. La phase 2 porte sur l'identification des secteurs sensibles, les contraintes d'accessibilité et les options d'adaptation envisageables en utilisant les données de

la phase 1 et en réalisant des reconnaissances de terrain. Une cartographie des aléas et une sectorisation ont été réalisées. La phase 3 consiste enfin en une analyse multicritère visant à évaluer les avantages et inconvénients des scénarios alternatifs proposés.

3.1 Phase 1 : Analyse prospective des variations glaciologiques et géomorphologiques

La première phase consiste en des modélisations glaciologiques et analyses géomorphologiques à l'horizon 2040, réalisées afin d'identifier les secteurs susceptibles de subir d'importantes variations morphologiques et d'anticiper les conséquences du retrait glaciaire.

3.1.1 Les évolutions glaciaires

Du fait du temps de réponse glaciaire au changement climatique, de l'ordre de plusieurs dizaines d'années pour la Mer de Glace (Peyaud et al., 2020 ; Zekollari et al., 2020), les variations d'épaisseurs de glace ont



Figure 3 : Épaisseurs modélisées du glacier de la Mer de Glace en 2040. Le contour rouge correspond à la délimitation du glacier en 2022 obtenu à partir du jeu de données GLIMS (Raup et al., 2007). Les épaisseurs de glace ont été modélisées à partir des épaisseurs actuelles (Millan et al., 2022) et s'étendent entre 0 (blanc) et plus de 400 m (bleu foncé). Le socle rocheux sous glaciaire a été estimé pour cette étude et est représenté en marron clair. Le fond de carte correspond à un cliché Google Satellite.

été modélisées sans prise en compte de plusieurs scénarios climatiques. La méthode utilisée se base sur une hypothèse de poursuite des fontes de surface récentes d'ici 2040 et a été validée sur d'autres zones englacées (Cook et al., 2023, Rabatel et al., 2023). L'amincissement moyen a été obtenu par différence de modèle numérique de terrain entre 2012 et 2022, et calculé par Berthier et al. (2024). Fortement déficitaire, cette période contient les années les plus chaudes jamais enregistrées (2022, 2015, 2020 par intensité décroissante), dont 2022 a été exceptionnelle. Les épaisseurs de glace nécessaires pour permettre la modélisation ont été obtenues par la combinaison d'images satellites et d'acquisitions radar de terrain (Millan et al., 2022).

Au niveau de l'accès actuel de l'Envers des Aiguilles, les pertes d'épaisseurs pourraient atteindre 100 m d'ici 2040. Cet abaissement de la surface augmente considérablement les marges périglaciaires et accentue les pentes autour du glacier, compliquant la sortie du glacier. Il convient de rappeler que cette modélisation ne prend pas en compte une intensification du changement climatique (en cours) et doit donc être considérée comme une estimation moyenne-optimiste. Cette approche permet de produire une modélisation prospective de la Mer de Glace à l'horizon 2040 (Fig. 3).

Afin de rendre compte des amincissements modélisés, un profil transversal a également été réalisé. Il permet d'apprécier l'agrandissement des marges périglaciaires (entre 2020 et 2040) sur la zone

actuelle d'accès au refuge ou de potentiels futurs accès (Fig. 4).

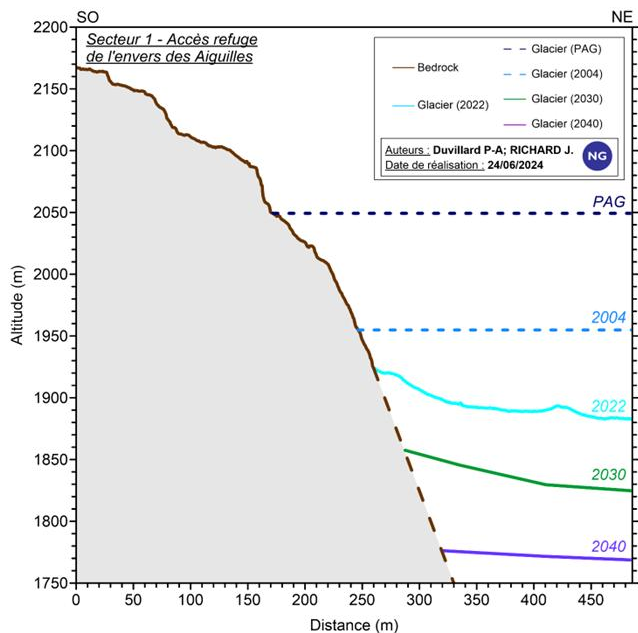


Figure 4 : Transect de l'évolution de l'épaisseur du glacier et de la géomorphologie des accès à l'Envers des Aiguilles.

Ces modélisations permettent d'anticiper un amincissement de la surface glaciaire libérant les moraines latérales et agrandissant les marges périglaciaires tout en limitant les possibilités d'accès hors du lit du glacier. Cette perte d'épaisseur à l'horizon 2040 pourrait atteindre 100 m au niveau du profil de l'Envers des Aiguilles. Les échelles d'une hauteur actuelle d'environ 80 m passeraient à 180 m en l'espace de deux décennies.

3.1.2 Les évolutions périglaciaires

Un travail de cartographie des marges glaciaires a été réalisé en s'inspirant de la légende géomorphologique de l'UNIL (Université de Lausanne), largement reconnue, comme en témoignent les multiples travaux de recherche qui l'utilisent (Messedi et al., 2021). Cette cartographie permet de mettre en évidence les zones de prospection possibles pour la réalisation de scénarios opérationnels (Fig. 5).

Sur cette base, des transects ont été réalisés permettant d'appréhender le recul glaciaire et les évolutions potentielles des secteurs récemment désenglacés. Une analyse diachronique des différents secteurs a également été réalisée (Fig. 6).

Ces éléments permettent de montrer que les abaissements du glacier auront comme conséquences principales le raidissement des moraines latérales, générant des zones fortement instables, et l'allongement des hauteurs de substratum rocheux.

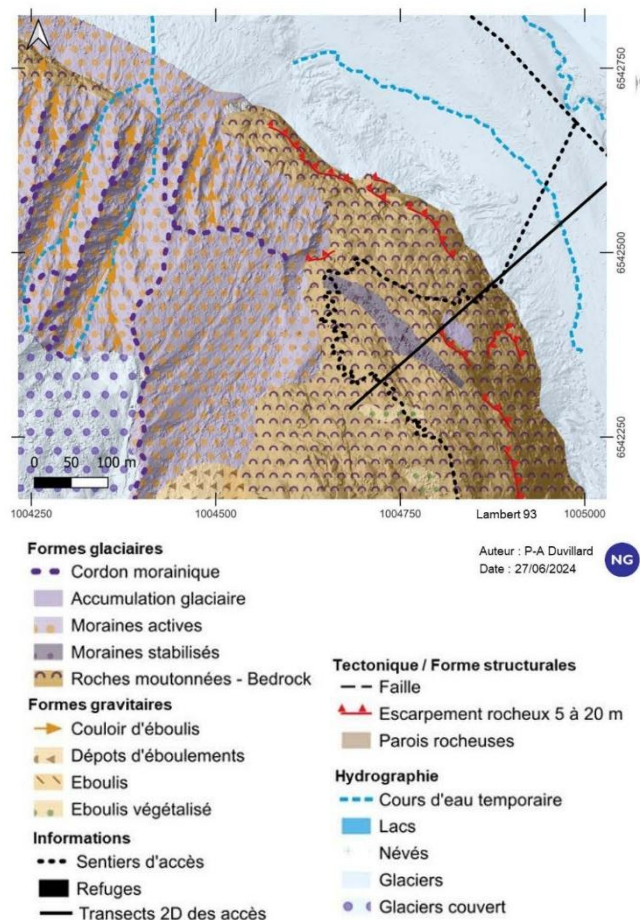


Figure 5 : Carte géomorphologique à haute résolution de l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles.

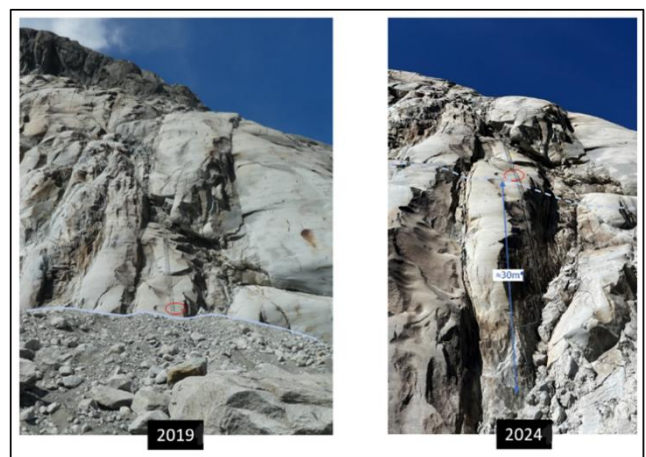


Figure 6 : Analyse diachronique de l'évolution morphologique au droit des échelles d'accès au refuge (entre 2019 et 2024).

Une synthèse des processus glaciaires et géomorphologiques liés au changement climatique engendrés et pouvant affecter l'accès actuel a alors été réalisée (Fig. 7).

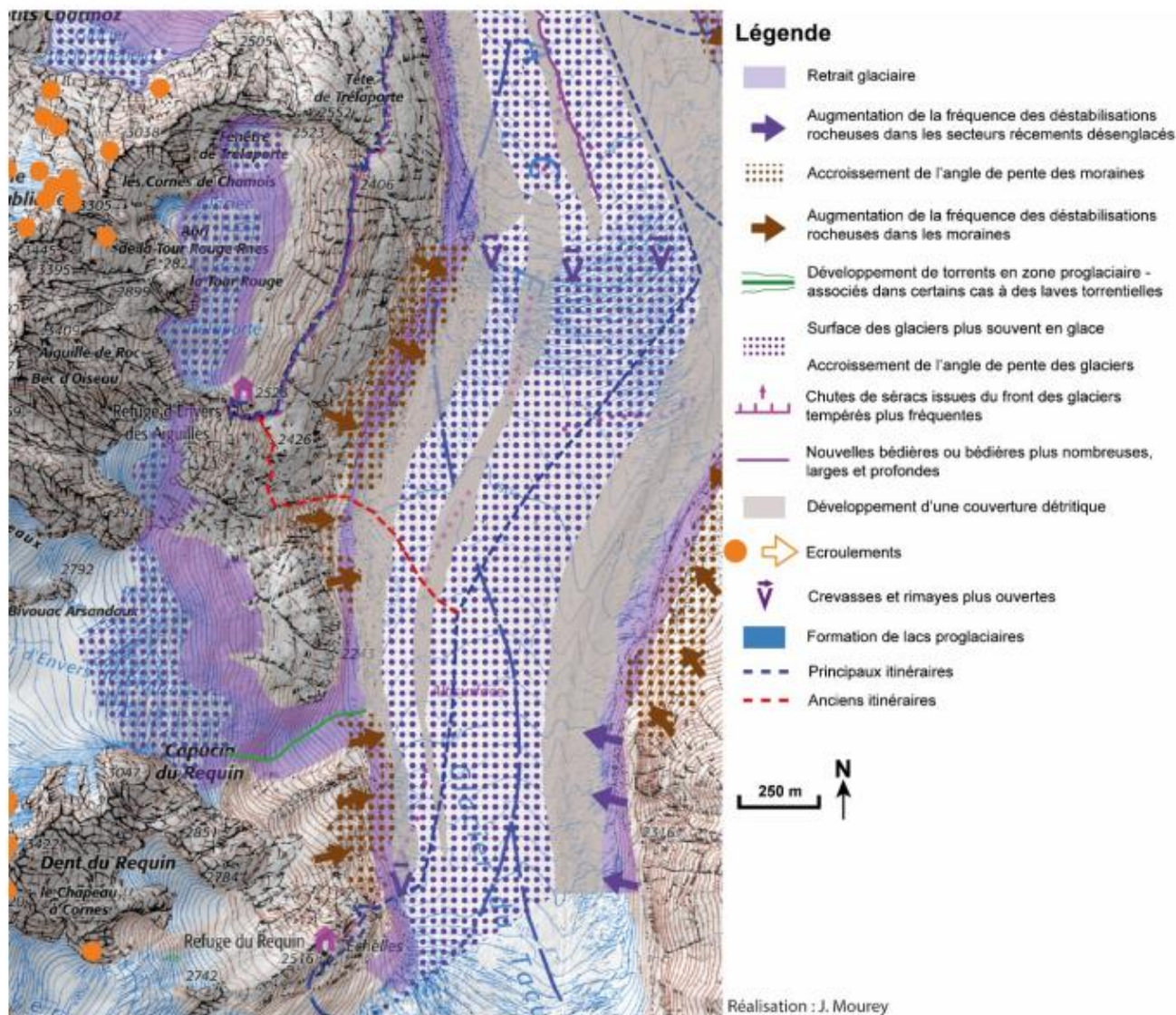


Figure 7 : Cartographie thématique des principaux processus qui affectent l'itinéraire d'accès à l'Envers des Aiguilles.

Les processus géomorphologiques les plus significatifs concernent les secteurs de transition glacier-versant. Le retrait glaciaire fait apparaître différents types de terrains – substratum rocheux plus ou moins fracturé, tills et moraines – dont les conséquences sont variables : les zones rocheuses peuvent devenir raides, lisses et difficiles à parcourir, avec l'apparition de substratum fracturé pouvant conduire à des éboulements, tandis que les tills et moraines constituent des terrains instables, évolutifs, pouvant générer éboulements et glissements. L'angle de pente des moraines est en constante évolution et expose les cheminements à des éboulements et à des difficultés accrues liées aux modifications rapides de la morphologie du versant. Des éboulements ou écroulements peuvent enfin se produire en contexte de permafrost, hors contexte glaciaire en fonction de facteurs géographiques (altitude et orientation du

versant) locaux, ou encore en lien direct avec le retrait glaciaire.

L'ensemble des résultats de la phase 1 montre ainsi une évolution marquée des zones glaciaires et périglaciaires, entraînant une modification progressive des conditions d'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles. Le retrait glaciaire accentue la présence des moraines actives et des dalles rocheuses mises à nu comme zones sensibles pour les itinéraires, tandis que la dégradation du permafrost renforce les phénomènes de déstabilisation rocheuse. L'analyse confirme que les transitions glacier-versant des itinéraires historiques ont été tracées avec bon sens en évitant autant que possible les secteurs morainiques, mais les évolutions morphologiques observées augmentent la difficulté technique et les risques pour les pratiquants. Les cartographies produites dans cette phase

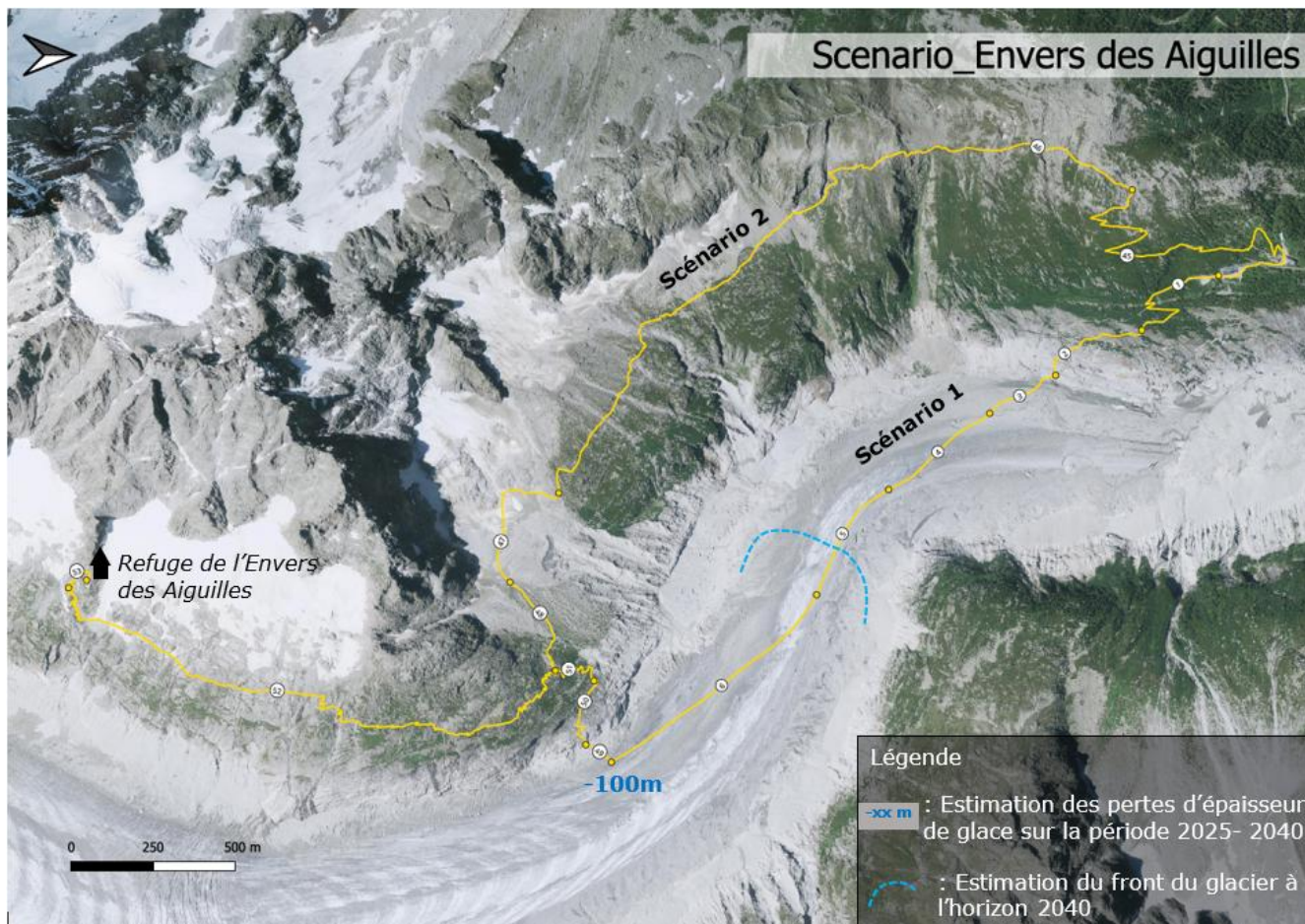


Figure 8 : Cartographie des scénarios proposés pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles.

constituent une base solide pour la définition des scénarios d'adaptation élaborés en phase 2.

3.2 Phase 2 : Reconnaissances de terrain et conception d'itinéraires alternatifs

La deuxième phase repose sur un couplage des éléments techniques issus de la phase 1 avec une expertise de terrain réalisée durant l'été 2024, aboutissant à une sectorisation de l'itinéraire. Pour chaque section, une synthèse morphologique est établie, accompagnée de l'identification des principaux aléas présents et du relevé du contexte environnemental local, incluant les espèces végétales et animales observées. Les aléas glaciaires et les éboulements rocheux sont classés en fonction de la fréquence des éboulements ou des chutes de séracs et de l'exposition pour les alpinistes. La présence de crevasses est relevée lorsqu'elle peut constituer un problème pour ces derniers. Une analyse de l'évolution à l'horizon 2040 est également réalisée pour chaque section : l'aléa n'est pas réactualisé mais considéré comme au moins équivalent à l'aléa actuel, et souvent plus important au niveau des transitions glacier-versant du fait du retrait glaciaire.

Ces analyses ont permis d'envisager deux scénarios d'accès pour rejoindre le refuge de l'Envers des Aiguilles (Fig. 8).

Le premier scénario propose le maintien de l'accès actuel par la Mer de Glace et ses échelles. La principale zone susceptible d'évoluer à l'horizon 2040 réside au niveau des échelles, à l'interface moraine/substratum rocheux où les pertes d'épaisseurs de glace nécessitent une adaptation continue (ajout d'équipement, modifications d'itinéraire...). À l'heure actuelle, la couverture détritique demeure peu problématique, mais le retrait glaciaire attendu – de l'ordre de 100 m d'ici 2040 – rendra l'accès aux échelles nettement plus complexe.

Le second scénario envisage la création d'un nouvel itinéraire par le Signal et le glacier de la Thendia. Le tracé envisagé démarre depuis le chemin menant au Signal, longe l'arête des Charmoz, traverse le glacier de la Thendia et rejoint le sentier actuel en balcon, évitant ainsi la progression sur la Mer de Glace. Il présente une moindre difficulté technique, mais il est plus coûteux et traverse des secteurs soumis à des évolutions rapides.

Le glacier de la Thendia est en effet susceptible de reculer d'environ une centaine de mètres d'ici 2040, ce

qui entraînera un raccourcissement marqué du replat et un accroissement de la pente. La traversée pourrait alors se faire dans un terrain plus escarpé, voire sur les dalles rocheuses situées autour de 2250 m, ce qui nécessitera une adaptation périodique du sentier et la mise en place d'équipements.

Le tracé est également exposé à la face nord des Grands Charmoz, où le permafrost est encore bien présent (Fig. 9).

La dégradation progressive du permafrost devrait s'accompagner d'une accentuation de la fréquence des éboulements. La base de données existante montre d'ailleurs un nombre important d'événements dans cette face, et les reconnaissances de terrain confirment la présence de roches très fracturées. L'atteinte du sentier est donc déjà probable et deviendra plus marquée sous l'effet combiné du retrait glaciaire et de la dégradation du permafrost.

La dégradation du permafrost, le recul glaciaire et l'évolution des moraines constituent ainsi les principaux enjeux de ce second scénario d'accès.

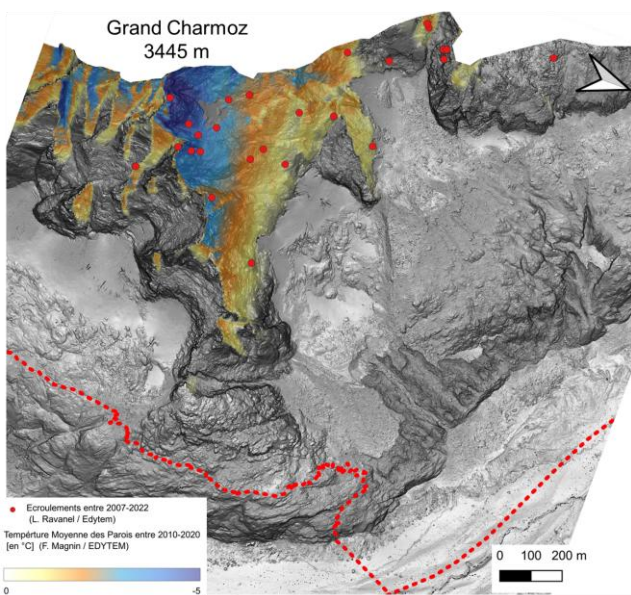


Figure 9 : Modélisation du permafrost actuel et écoulements observés entre 2007 et 2022 pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles.

3.3 Phase 3 : Analyse multicritère des scénarios

La troisième phase consiste en une analyse multicritère des scénarios. Chacun présente des caractéristiques et des contraintes spécifiques qu'il s'agit d'examiner.

Cette analyse repose sur sept critères, certains couramment mobilisés dans les études géotechniques, d'autres propres à notre cas d'étude : les coûts de réalisation et de maintenance du chemin d'accès, sa difficulté technique pour les alpinistes, le temps

nécessaire pour le parcourir, son évolution envisagée pour l'horizon 2040, son impact sur la biodiversité et, enfin, son exposition aux risques naturels. Chacun de ces critères est évalué sur une échelle de 1 à 4, assortie d'un code couleur (Tab. 1).

Tableau 1 : Analyse multicritère des scénarios envisagés pour l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles.

Scénarios	1. Maintien de l'accès existant		2. Création d'une variante d'accès	
	1	2	3	4
Réalisation	Peu coûteux	✓	Peu coûteux	✓
	Coûteux		Coûteux	
Maintenance	Peu coûteux	✓	Peu coûteux	✓
	Coûteux	✓	Coûteux	
Difficulté technique	Facile	✓	Facile	✓
	Difficile	✓	Difficile	
Temps de parcours	1h à 2h	✓	1h à 2h	✓
	6h à 8h	✓	6h à 8h	
Evolution à l'horizon 2040	Faible	✓	Faible	✓
	Élevée	✓	Élevée	
Impact sur la biodiversité	Faible	✓	Faible	✓
	Élevé		Élevé	
Exposition aux risques naturels	Très faible	✓	Très faible	✓
	Très forte		Très forte	

L'analyse ne met pas en évidence la domination nette de l'un des deux scénarios sur l'autre : chacun renvoie à des compromis distincts, dont quatre principaux sont explicités ci-après. Notons toutefois que ce tableau constitue une représentation datée, construite à partir de projections, et qu'il est susceptible d'être réajusté à mesure que les évolutions effectives se préciseront.

3.3.1 Court terme vs long terme

À court terme, le maintien de l'accès existant (scénario 1) apparaît moins coûteux que la création

d'une variante (scénario 2), nécessitant des aménagements initiaux plus importants. Sur le long terme, les évolutions anticipées sont néanmoins plus importantes pour le scénario 1, fortement contraint par le retrait rapide de la Mer de Glace, qui imposera des interventions récurrentes sur les échelles et les zones de transition. Le scénario 2 sera, lui, marqué par une évolution du glacier de la Thendia avec un recul glaciaire et un accroissement de la pente au niveau du glacier. Cette zone située sous les Grands Charmoz sera également probablement affectée par des éboulements en contexte de permafrost.

3.3.2 Accessibilité vs exposition aux risques

Le scénario 2 offre une meilleure accessibilité, avec une difficulté technique moindre et un temps de parcours plus faible. Il expose toutefois les usagers à des risques plus importants, notamment aux chutes de blocs issues de la face nord des Grands Charmoz. Cet accès reste très incertain au regard des modélisations réalisées et des évolutions à attendre sur le secteur de la Thendia.

3.3.3 Adaptation des infrastructures vs protection de la biodiversité

Le scénario 2 ouvre la possibilité d'une adaptation des équipements de haute montagne, mais implique la création d'un nouvel itinéraire sur des zones encore peu anthropisées. Le scénario 1, à l'inverse, concentre les interventions sur un tracé existant. Ce compromis renvoie à une stratégie d'aménagement intégrant la préservation des milieux naturels.

3.3.4 Prévisibilité vs variabilité des évolutions

Les aléas affectant le scénario 1 sont principalement liés au retrait glaciaire, un processus suivi et documenté, donc relativement prévisible à l'horizon 2040. Le scénario 2 est soumis à des phénomènes plus irréguliers, en particulier la dégradation du permafrost dans la face nord des Charmoz, susceptible de générer des éboulements difficiles à anticiper.

Face à ces différents compromis, le choix entre les deux scénarios relève d'un processus de décision des maîtres d'ouvrage mené dans un contexte d'incertitude lié à l'évolution des milieux glaciaires et périglaciaires. Ce choix suppose la capacité à tenir ces compromis dans le temps, à travers un suivi régulier des terrains, une adaptation continue des aménagements et une réévaluation périodique au regard de l'évolution du glacier et du permafrost. Ces processus de décision et les arbitrages qu'ils impliquent, encore peu documentés (Girard, 2025), dépassent le cadre de la présente étude. Soulignons enfin que d'autres facteurs sont également à

considérer, tels que l'évolution de la fréquentation du refuge, les transformations des pratiques de l'alpinisme, et l'émergence de nouveaux profils de clientèle.

4 CONCLUSION

Cette étude sur l'adaptation de l'accès au refuge de l'Envers des Aiguilles met en évidence une évolution rapide des zones glaciaires et périglaciaires à l'horizon 2040, avec un rôle déterminant des transitions glacier-versant et de l'instabilité des moraines. Elle a abouti à l'élaboration de deux scénarios opérationnels, chacun évalué à partir d'une analyse multicritère, de manière à outiller les décisions des maîtres d'ouvrage.

Au-delà de ces résultats, l'étude se distingue par une démarche combinant modélisations scientifiques et approches naturalistes, permettant de proposer un cadre structurant pour répondre aux besoins d'aménagement en haute montagne. Cette méthode apparaît reproductible pour d'autres refuges confrontés à des problématiques similaires et souligne l'intérêt d'articuler données scientifiques et exigences opérationnelles dans une perspective d'adaptation et de résilience face au changement climatique. Elle met également en évidence l'importance des incertitudes associées à ces évolutions, qui constituent encore des enjeux de recherche pour la communauté scientifique.

Enfin, le cas de l'Envers des Aiguilles montre que l'adaptation repose rarement sur des solutions optimales. Les maîtres d'ouvrage doivent arbitrer entre différentes options comportant toutes des avantages et des inconvénients. L'étude souligne ainsi la complexité inhérente à la prise de décision en milieu de haute montagne, dans un contexte marqué par de fortes incertitudes, ainsi que la nécessité d'une réévaluation régulière des choix d'aménagement au regard de l'évolution des conditions glaciaires et périglaciaires.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Communauté de communes de la Vallée de Chamonix Mont Blanc pour sa confiance dans ce projet, les laboratoires EDYTEM et IGE pour la mise à disposition de leurs données de recherche, ainsi que l'entreprise Hydrétudes pour la problématique torrentielle du vallon de Bérard.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., ... & Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current

- state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759–794.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Berthier, E., Lebreton, J., Fontannaz, D., Hosford, S., Munoz Cobo Belart, J., Brun, F., Andreassen, L. M., Menounos, B., & Blondel, C. (2024). The Pléiades Glacier Observatory: High resolution digital elevation models and ortho-imagery to monitor glacier change [Preprint]. *EGUsphere*.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-250>
- Cailhol, X., Ravanel, L., & Mourey, J. (2025). Mapping climate-change-related processes affecting most frequented routes by French mountain guides. *Geographica Helvetica*, 80(4), 527–544.
<https://doi.org/10.5194/gh-80-527-2025>
- Cook, S., Juvet, G., Millan, R., Rabatel, A., Zekollari, H., & Dussaillant, I. (2023). Ice loss in the European Alps until 2050 using a fully assimilated, deep-learning-aided 3D ice-flow model. *ESS Open Archive*.
<https://doi.org/10.22541/essoar.168882076.67731971/v1>
- Girard, A. (2025). Quelle place pour les approches du facteur humain dans la gestion des risques naturels gravitaires ? In M. Jaboyedoff, J.-P. Malet, & C. Bertrand (Eds.), *Recueil des résumés du colloque « Journées Aléas Gravitaire, JAG2025 »* (p. 79). Université du Val d'Aoste, Aoste, Italie, 23–25 octobre 2025.
<https://hal.science/hal-05438526>
- The GlaMBIE Team. (2025). Community estimate of global glacier mass changes from 2000 to 2023. *Nature* 639, 382–388.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08545-z>
- Haerberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M., & Phillips, M. (2010). Mountain permafrost: Development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology*, 56(200), 1043–1058.
<https://doi.org/10.3189/002214311796406121>
- Magnin, F., Ravanel, L., Ben-Asher, M., Bock, J., Cathala, M., Duvillard, P.-A., Jean, P., Josnin, J.-Y., Kaushik, S., Revil, A., & Deline, P. (2023). 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*, 111(2).
<https://doi.org/10.4000/rga.11644>
- Messedi, A. G., Ben Fraj, T., Ben Ouezdou, H., Clivaz, M., Comisso, C., Lambiel, C. & Reynard, E. (2021). De la carte géomorphologique à la carte géotouristique : Proposition et application d'une méthode de représentation cartographique par SIG. *Géomorphologie*, 27(1), 69–87.
<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.15394>
- Millan, R., Mouginot, J., Rabatel, A. et al. (2022). Ice velocity and thickness of the world's glaciers. *Nat. Geosci.* 15, 124–129.
<https://doi.org/10.1038/s41561-021-00885-z>
- Ministère de la Culture. (2019). *L'alpinisme inscrit sur la Liste représentative du patrimoine culturel immatériel de l'humanité* [Communiqué de presse].
<https://www.culture.gouv.fr/presse/communiqués-de-presse/L-alpinisme-inscrit-sur-la-Liste-representative-du-patrimoine-culturel-immateriel-de-l-humanite>
- Mourey, J., & Ravanel, L. (2017). Évolution des itinéraires d'accès aux refuges du bassin de la Mer de Glace (massif du Mont Blanc, France). *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 105(4).
<https://doi.org/10.4000/rga.3780>
- Peyaud, V., Bouchayer, C., Gagliardini, O., Vincent, C., Gillet-Chaulet, F., Six, D., & Laarman, O. (2020). Numerical modeling of the dynamics of the Mer de Glace glacier, French Alps: Comparison with past observations and forecasting of near-future evolution. *The Cryosphere*, 14(11), 3979–3994.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-3979-2020>
- Rabatel, A., Ducasse, E., Millan, R., & Mouginot, J. (2023). Satellite-derived annual glacier surface flow velocity products for the European Alps, 2015–2021. *Data*, 8(4), 66.
<https://doi.org/10.3390/data8040066>
- Raup, B. H., Kaab, A., Kargel, J. S., Bishop, M. P., Hamilton, G. S., Lee, E., Rau, F., Paul, F., Soltesz, D., Singh Khalsa, S. J., Beedle, M., & Helm, C. (2007). Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project. *Computers & Geosciences*, 33(1), 104–125.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.05.015>
- 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*, 609, 132–143.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2020). On the imbalance and response time of glaciers in the European Alps. *Geophysical Research Letters*, 47(2), e2019GL085578.
<https://doi.org/10.1029/2019GL085578>