



HAL
open science

Les montagnes fondent et s'effondrent

Ludovic Ravanel

► **To cite this version:**

Ludovic Ravanel. Les montagnes fondent et s'effondrent. Pour la science, 2021, 526, pp.58-65. hal-03455448

HAL Id: hal-03455448

<https://hal.science/hal-03455448>

Submitted on 29 Nov 2021

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

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

Les montagnes fondent... et s'effondrent !

Le réchauffement climatique a une conséquence spectaculaire. Il accélère un phénomène millénaire : la déstabilisation des parois rocheuses de haute montagne.

LUDOVIC RAVANEL

Chercheur CNRS au laboratoire EDYTEM (Environnement, dynamique, territoire, montagne) de l'université Savoie-Mont-Blanc et du CNRS.



L'écroulement de l'éperon Tournier survenu en 2017. De la glace massive, visible dans le haut de la cicatrice après l'événement a été échantillonnée et datée : cela faisait plus de quatre mille ans qu'elle maintenait la cohésion de la montagne !

Dans le massif des Écrins, un glacier domine le vallon du Grand Tabuc, proche du Monêtier-les-Bains. Le jeudi 17 septembre 2020 vers 19 heures 45, tous les habitants de la commune entendent un énorme bruit, avant d'apercevoir un imposant nuage de poussière : un pan de montagne s'est effondré au-dessus du Tabuc.

Jean-Marie Rey, maire du village et guide de haute montagne, demande au PGHM, le peloton de gendarmerie de haute montagne, que connaissent et apprécient les montagnards, d'aller faire un état des lieux en hélicoptère. « Les gendarmes m'ont rapporté que les dépôts sont très importants, qu'il reste encore énormément de blocs en équilibre précaire et que dans les fissures qui subsistent, il y a de la glace, ce qui confirme que nous avons affaire à un cas de dégel du permafrost », déclare-t-il ensuite à Radio d'ici.

Dans la foulée, jugeant les risques d'écroulement trop importants, Jean-Marie Rey prend un arrêté interdisant l'accès au vallon à partir de 2 100 mètres d'altitude. Bien lui en prend : le 20 décembre 2020 – en plein hiver ! – un nouvel effondrement, semble-t-il quatre fois plus volumineux, achève de remplir le vallon d'énormes blocs de roche !

À l'échelle du monde, l'écroulement de tout un pan de montagne n'est pas rare aujourd'hui : dans le Caucase, dans les Alpes néo-zélandaises ou européennes, dans les Rocheuses, les Andes et l'Himalaya, de plus en plus de parois s'effondrent et engendrent des dépôts rocheux. Les géomorphologues emploient le terme d'« écroulement », dès que la déstabilisation d'une paroi produit au moins 100 mètres cubes de dépôt – soit le volume d'un cube de 4,6 mètres de côté. Ce qui

est arrivé au Monêtier-les-Bains – la zone du dépôt de septembre y couvre 15 000 mètres carrés – illustre les proportions énormes qu’atteignent les grands écroulements et rappelle ceux qui se sont produits dans la décennie 2010 sur l’un des pics du massif de la Bernina, entre l’Italie et la Suisse.

Le pic en question, le piz Cengalo, est situé à côté du piz Badile (3 308 mètres), célèbre chez les Alpinistes et proche du piz Bernina (4 049 mètres), le point culminant des Alpes orientales. Ses faces nord-est et nord-ouest dominant le village suisse de Bondo, dans le canton des Grisons. En décembre 2011, un écroulement y produisit un dépôt de 1,5 million de mètres cubes. D’autres suivirent, moins volumineux, en 2012, 2016 et le 21 août 2017. Puis, deux jours après ce dernier, une avalanche rocheuse mobilisa quelque 3,1 millions de mètres cubes, engendrant une série de grandes coulées boueuses, qui atteignirent le village de Bondo, heureusement déjà évacué grâce à un système d’alerte installé après l’événement de 2011. Mais huit alpinistes et randonneurs, sortis dans la montagne, perdirent la vie.

Qu’est-ce qui déclenche ces écroulements de plus en plus nombreux depuis une vingtaine d’années ? Pour des montagnards comme Jean-Marie Rey, leur cause principale est claire : c’est le réchauffement du pergélisol (ou permafrost, en anglais), cette partie de la surface terrestre qui reste gelée en profondeur. Encore faut-il le prouver et mieux comprendre le phénomène, d’où les travaux menés par l’équipe *Morphodynamiques* du laboratoire EDYTEM (Environnement, dynamique, territoire, montagne), de l’université Savoie-Mont-Blanc et du CNRS.

LA DÉGRADATION DU PERGÉLISOL DÉSTABILISE LES PAROIS

C’est là en effet l’une des conséquences les plus directes, mais les moins connues du réchauffement climatique : il y a moins de pergélisol. Il se trouve surtout dans les régions polaires, où il couvre pas moins de 22,79 millions de kilomètres carrés – soit 23,9 % des terres émergées ! – mais les hautes montagnes du globe en recèlent aussi. Les conséquences de sa réduction deviennent plus sensibles chaque année, en termes d’émissions de méthane en Arctique, mais aussi d’altération de la lithosphère en montagne.

Plus précisément, le pergélisol correspond à tous les matériaux lithosphériques de surface – sol, roche, formations superficielles, etc. – dont la température reste négative pendant au moins deux années consécutives, en présence ou non de glace. Lorsque la température monte et selon le type de terrain et la pente, sa dégradation favorise nombre de processus géomorphologiques, tels l’accélération des glaciers rocheux, ou la déstabilisation d’éboulis et de moraines, etc. Certains d’entre eux sont rapides et donc potentiellement très destructeurs pour les installations humaines : c’est évidemment le cas des glissements de terrain ou encore des laves torrentielles, ces avalanches de boues et de roches extrêmement puissantes qui se déclenchent brusquement en haut de certaines pentes déstabilisées. Dans l’Arctique, où le comportement du pergélisol affecte oléoducs, gazoducs, mines, installations militaires et autres infrastructures, son étude a commencé dès les années 1940, mais dans les Alpes, il a fallu attendre les années 1970.

C’est en effet pendant cette décennie que les recherches sur le pergélisol alpin ont débuté dans l’équipe de Wilfried Haeberli, de l’université de Zurich. À l’époque, on parlait peu encore de changement climatique, de sorte que l’idée d’une relation entre la dégradation du pergélisol et l’instabilité d’un versant paraissait osée. On s’attendait en effet a priori à ce que des parois rocheuses soient... solides. D’ailleurs les premières études des écroulements rocheux ne permirent pas de tirer des conclusions claires sur les processus à l’œuvre. Toutefois, plus le temps a passé plus l’impression que quelque chose de majeur était en train d’affecter les montagnes s’est renforcée partout dans le monde. En France, deux épisodes marquants déclenchèrent les recherches sur les processus géomorphologiques associés à l’évolution du pergélisol.

Le premier fut l'été caniculaire de 2003. Ses conséquences conduisirent en effet à une véritable prise de conscience, tant les alpinistes furent confrontés à de nombreuses chutes, à des crevasses bien plus ouvertes qu'avant sur les glaciers, tandis que le désenglacement des faces nord entraînait une multiplication dangereuse des écroulements...

Le deuxième se produisit deux ans plus tard sur les Drus, deux célèbres pics du massif du Mont-Blanc. L'événement se déroula en quatre phases : à la fin de la matinée du 29 juin, un premier écroulement eut lieu, suivi de deux autres en début d'après-midi avant que, la nuit suivante, le pilier Bonatti entier ne s'effondre ! Le 30 juin au matin, une poussière grise recouvrait le paysage sur des dizaines de kilomètres carrés, jusqu'au fond de la vallée de Chamonix, laissant à nu une grande cicatrice de 700 mètres de haut en lieu et place du célèbre pilier. En tout, huit itinéraires de courses classiques avaient disparu. À Chamonix, l'émotion fut forte, car, en alpinisme, cet énorme pilier granitique était emblématique depuis sa première ascension, en 1955, par l'Italien Walter Bonatti.

Il fallait se rendre à l'évidence : une évolution notable de la haute montagne était en cours. Pour l'appréhender, l'analyse de larges corpus de données semblait nécessaire. Au laboratoire EDYTEM, avec Florence Magnin et Philip Deline, nous avons entrepris de réaliser cette tâche pour le massif du Mont-Blanc en recensant de la façon la plus complète possible les écroulements anciens et actuels afin de mieux évaluer la fréquence et l'intensité de ces événements.

RECENSER LES ÉCROULEMENTS

À partir de 2005, nous nous sommes attachés à recenser quasi systématiquement les écroulements anciens et actuels dans le massif et nous nous sommes particulièrement intéressés à l'ensemble du versant nord des aiguilles de Chamonix, où se trouvaient les Drus. Visibles depuis le centre-ville de la capitale historique de l'alpinisme, ces aiguilles contribuent à son environnement grandiose et sont médiatisées depuis longtemps. Ce point est important, car il implique qu'elles sont documentées depuis les débuts de la photographie de montagne dans les années 1850. La comparaison de plusieurs centaines de photographies nous a ainsi permis de couvrir la période allant de la fin du Petit Âge glaciaire (vers 1860) à aujourd'hui. À partir des modifications de la couleur et de la topographie des parois, nous avons ainsi pu mettre en évidence plusieurs dizaines d'événements, établissant leurs dates, les lieux d'écroulement, la topographie des secteurs affectés et les volumes concernés.

De 1862 à 2010, se sont donc succédé quelque 75 écroulements de 500 à 65 000 mètres cubes (hors celui du pilier Bonatti de juin 2005). Une très bonne corrélation existe entre ces événements et la survenue dans les Alpes de périodes chaudes. La plupart se sont produits au cours des dernières décennies, celles de l'accélération du réchauffement climatique. Les étés très chauds – ceux de 1947, de 1976, de 1983 – furent accompagnés de nombreux écroulements. Mais c'est pendant l'été caniculaire de 2003 qu'ils se sont produits avec la plus grande fréquence, sans que de fortes précipitations ou des séismes ne puissent l'expliquer. Ces résultats renforçaient la théorie de Walter Haeberli attribuant un rôle central au pergélisol dans la déstabilisation des parois rocheuses.

Il fallait cependant le vérifier par une étude plus précise. Nous avons alors recensé systématiquement l'ensemble des écroulements survenus dans le massif du Mont-Blanc au cours du seul été 2003 en nous servant d'une image satellitaire datant de la fin de l'été. Plus tard, à partir de 2007, nous avons documenté l'ensemble des écroulements se produisant tout au long de l'année dans les deux tiers centraux du massif à l'aide du réseau d'observateurs constitué de guides, de gardiens de refuges et d'alpinistes, que nous avons mis en place. En tout, 182 écroulements ont été décrits pour 2003 et plus d'un millier depuis 2007.

Ces écroulements concernent avant tout ce que l'on nomme la « couche active », c'est-à-dire l'épaisseur maximale de roche dégelant chaque année. C'est en tout cas ce que la comparaison des

événements des étés caniculaires de 2003 et 2015 nous suggère. Exceptionnellement élevés, les nombres de déstabilisations de parois pendant ces étés furent assez similaires. Le volume total mobilisé en 2015 (170 000 mètres cubes) est cependant environ la moitié de celui mobilisé en 2003 (304 000 mètres cubes). De même, le volume moyen des écroulements de 2015 (1 100 mètres cubes) est à peu près la moitié du volume moyen de ceux de 2003 (2 000 mètres cubes).

Cette constatation s'explique aisément : la première canicule, celle de 2003, avait déstabilisé de nombreuses masses rocheuses, que la deuxième, celle de 2015, n'a, dès lors, pas pu affecter. En d'autres termes, les événements de 2015 se sont produits après le « nettoyage » des parois les plus instables en 2003.

Les cicatrices laissées en 2003 indiquent que la couche active était particulièrement épaisse cette année-là d'après des mesures que nous avons faites sur l'aiguille du Midi (3 842 mètres). L'épaisseur de la couche active est l'un des paramètres clés du phénomène d'écroulement, car son augmentation accroît les risques de déstabilisation des parois. Cette forme de dégradation du pergélisol a constitué le déclencheur des centaines d'écroulements des étés 2003 à 2015.

Comment exactement ? Lorsque le pergélisol se réchauffe, la glace interstitielle vieille de plusieurs milliers d'années présente dans les fractures de la roche n'assure plus son rôle de ciment, ni celui d'obturation des fractures, ce qu'elle fait à plus basse température. Résultat : le « béton de glace » fracturé laisse circuler dans la roche de l'eau liquide, donc « chaude » (à plus de 0 °C). En 2015, cela pourrait avoir joué un rôle non négligeable en dégradant davantage la glace et en augmentant la pression hydraulique dans la roche. Comme les gendarmes du PGHM l'ont fait au Monêtier-les-Bains, on observe régulièrement la présence de glace dans les cicatrices des écroulements. Cela suggère que l'écroulement a emporté l'ensemble de la couche active du pergélisol, et s'est arrêté à une profondeur où la glace-ciment subsiste mais se dégrade.

L'ÉVOLUTION DU PERGÉLISOL À L'ORIGINE DES ÉCROULEMENTS

Nous avons aussi montré que dans le massif du Mont-Blanc, le pergélisol occupe de 45 à 80 % des 86 kilomètres carrés de parois ayant une pente supérieure à 40 degrés (valeur à laquelle la plupart des gens cessent d'être à l'aise debout). Il est sans doute présent dans les secteurs dont la structure le favorise à partir de 1 900 mètres d'altitude en face nord et de 2 400 mètres en face sud. Quoi qu'il en soit, sa présence est quasiment continue à partir de 2 600 mètres en face nord et de 3 000 mètres en face sud et totale au-delà de 3 600 mètres, quelle que soit l'exposition au soleil.

Afin d'évaluer la répartition et l'évolution du pergélisol sous la surface, nous avons mesuré la température au fond des trois forages de 10 mètres de profondeur creusés en 2009 dans les parois de l'aiguille du Midi. Nous avons ainsi appris que les variations de la température de la couche active – qui mesure de 1,8 à plus de 6 mètres d'épaisseur – et du pergélisol – qui est « froid » ou « tempéré », sont en grande partie dues à la topographie, selon que celle-ci facilite plus ou moins l'écoulement des eaux ; en revanche, les variations de la température profonde sont plutôt régies par les flux thermiques latéraux. Nous avons en outre noté qu'une couche de neige de plus de 60 centimètres refroidit les faces ensoleillées et réchauffe les faces à l'ombre ; si en revanche elle est de moins de 60 centimètres, elle refroidit toutes les parois, quelle que soit leur exposition. L'enneigement influence donc l'épaisseur de la couche active !

Puisque nous connaissons mieux la distribution actuelle du pergélisol alpin, nous avons tenté de modéliser ce que pourrait être sa répartition d'ici à la fin du siècle compte tenu des scénarios climatiques proposés par le GIEC en 2013 (ils seront certainement réévalués à la hausse dans le prochain rapport d'août 2021 !). Nous avons utilisé pour cela la carte de la température probable à la surface des parois du massif du Mont-Blanc, afin de fixer les conditions initiales de la température de surface ; ensuite, nous nous sommes servis d'une équation décrivant la conduction thermique dans la

roche et avons pris en considération les processus de gel et de dégel dans les fractures du substrat rocheux afin de modéliser les séries climatiques allant de 1850 (connu) à 2100 (à prédire).

UNE DÉSTABILISATION ÉCLAIRÉE PAR DES MODÉLISATIONS

Quelles conclusions principales ressortent de cet exercice ? Pour commencer, le fait que la perturbation thermique induite par le changement climatique depuis la fin du Petit Âge glaciaire (du XIVe à la fin du XIXe siècle) est, d'après notre modèle, sensible jusqu'à 60-70 mètres de profondeur, d'où la déstabilisation possible de pans entiers de montagne comme au piz Cengalo en 2018 ; ensuite le fait qu'à la fin du xxie siècle, seulement quelques secteurs à pergélisol subsisteront au coeur des sommets évasés au-dessous de 3 300 mètres d'altitude avec toutes les modifications de morphologie des montagnes que cela suppose ; finalement, selon le scénario le plus pessimiste du GIEC (pour le moment !), le pergélisol disparaîtrait au moins jusqu'à 4 300 mètres d'altitude dans les faces sud et dans les sommets étroits ayant moins de 3 850 mètres d'altitude. Étant donné que le mont Blanc culmine à 4 808 mètres, on voit bien que nos montagnes comportent beaucoup de parties hautes susceptibles d'être déstabilisées.

Or, dans les seules Alpes françaises, près d'un millier d'éléments d'infrastructures – refuges, remontées mécaniques, structures associées, etc. – sont implantés sur du pergélisol. Plusieurs d'entre elles ont déjà subi des dommages en contexte de paroi. En août 1998 par exemple, le refuge des Cosmiques, situé à 3 613 mètres d'altitude dans le massif du Mont-Blanc, s'est vu déstabilisé après un écoulement rocheux ayant mobilisé 600 mètres cubes directement sous le refuge. Il a donc fallu se livrer à de nombreux travaux de renforcement de son assise.

Compte tenu du degré d'anthropisation élevé de certains massifs de haute montagne – au premier chef les Alpes ! – et de l'accélération du changement climatique, l'intensification des recherches sur le pergélisol – indicateur pertinent du réchauffement climatique – est une nécessité. Pas seulement dans massif du Mont-Blanc : tous les massifs de haute montagne du monde connaissent des évolutions comparables. Or, pour le moment, très peu de travaux de recherche sont menés hors des Alpes sur les écoulements de parois.

BIBLIOGRAPHIE

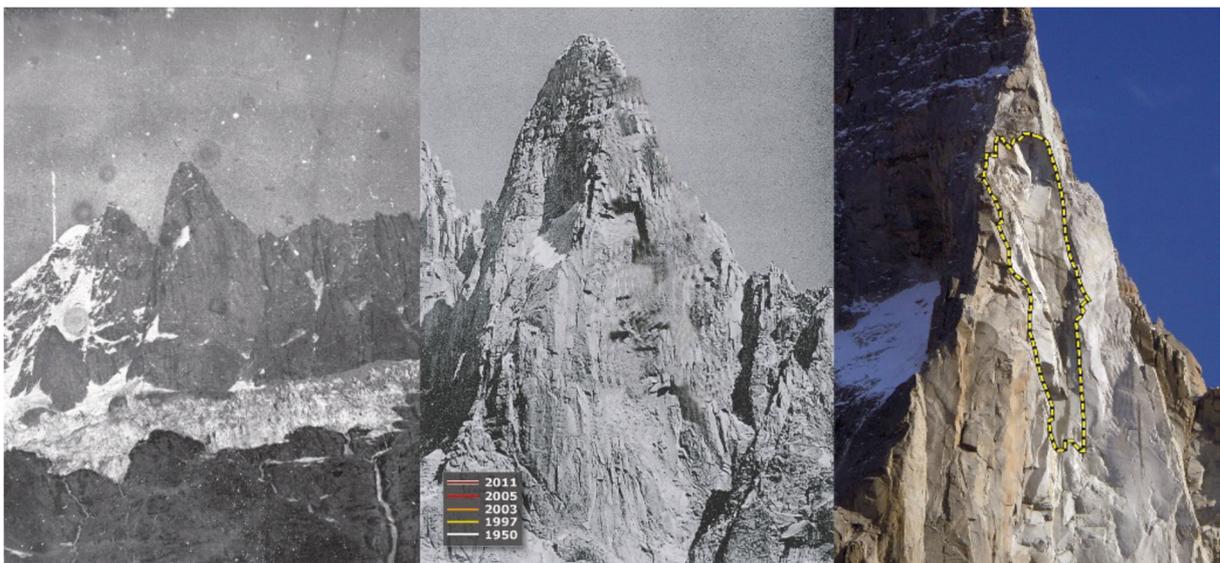
P.-A. Duveillard et al., Qualitative risk assessment and strategies for infrastructure on permafrost in the French Alps, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 189, article 103 311, 2021.

J. Mourey et al., 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*, vol. 51(1), pp. 176-189, 2019.

X. Gallach et al., Timing of rockfalls in the Mont Blanc massif (western Alps). Evidences from surface exposure dating with cosmogenic ¹⁰Be, *Landslides*, vol. 15, pp. 1991-2000, 2018.



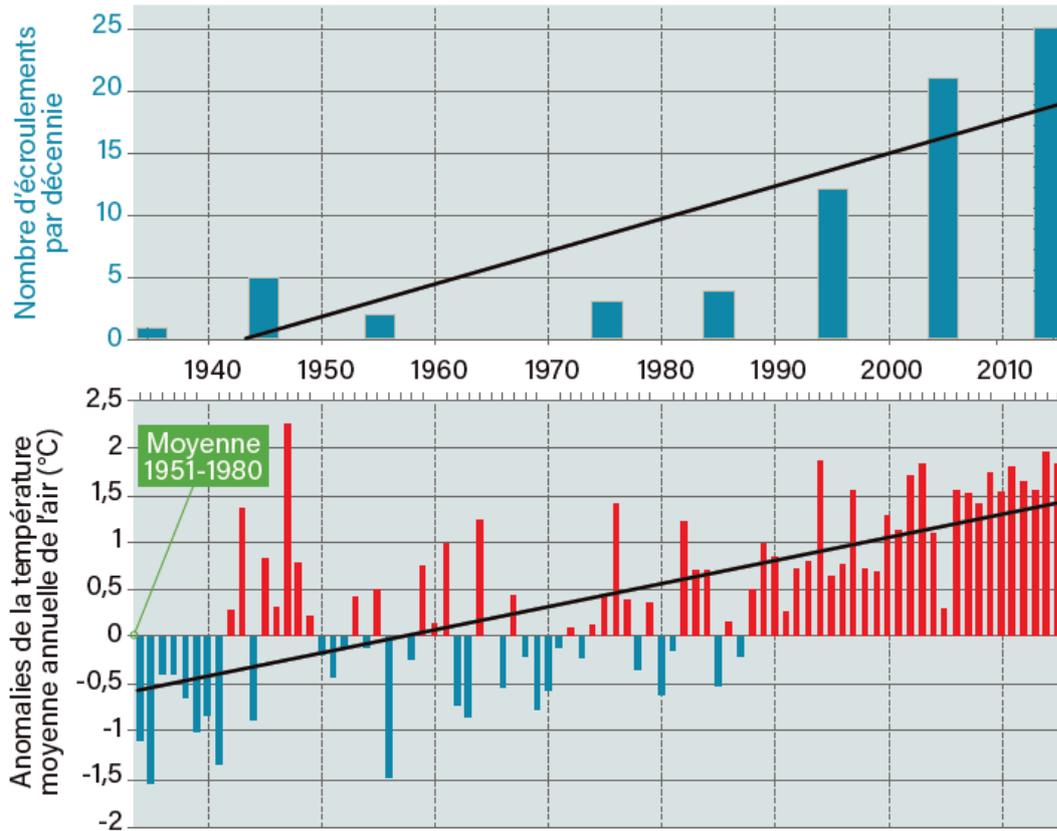
Le 23 août 2017, une énorme avalanche rocheuse s'est formée au piz Cengalo, un sommet de 3 369 mètres d'altitude du massif de la Bernina en Suisse. En A, l'écroulement de 3,1 millions de mètres cubes de roche du versant nord-est du piz Cengalo sur le glacier Vadrec dal Cengal. En B, la même paroi après l'écroulement. En C, l'avalanche rocheuse a dévalé le fond du Val Bondasca. En D, le village de Bondo, situé à l'altitude de 800 mètres après le passage de la coulée boueuse et qu'une centaine de bâtiments ont été détruits ou endommagés. Ph. Coll M. Phillips – SLF Davos.



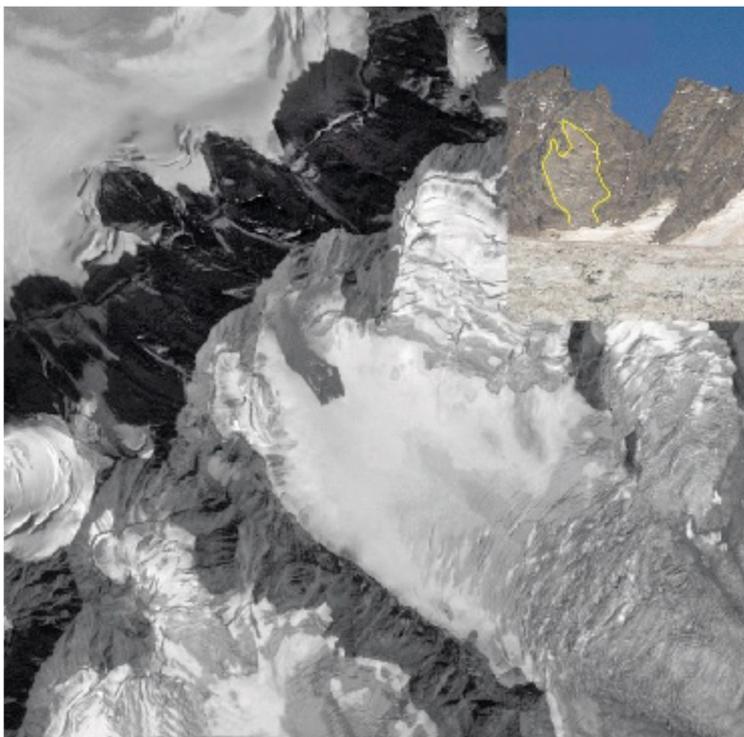
Des écroulements rocheux se sont succédé sur la face ouest des Drus au cours du temps, avant l'effondrement du pilier Bonatti. À gauche, un daguerréotype montre l'état de ces pics en 1854. Au milieu, les derniers écroulements notables datés ; à droite, l'empreinte laissée par l'un d'entre eux.



Les glaciers rocheux sont un exemple de forme associée au pergélisol : ils consistent en une masse de blocs rocheux et de glace mélangés qui fluent le long de certains versants. Ici, celui du Laurichard, dans le massif du Combeynot, dans les Hautes-Alpes, qu'étudie le laboratoire EDYTEM. Ph. X. Bodin.



L'évolution du nombre d'éroulements constatés sur la face ouest des Drus et sur le versant nord des aiguilles de Chamonix entre 1930 et 2010, mise en regard des anomalies de la température (par rapport à la moyenne 1951-1980) pendant la même période.



L'éroulement de la pointe du Domino pendant l'été 2003, sur le versant italien du massif du Mont-Blanc, reconnu à partir de son dépôt sur le glacier de Pré-de-Bar, visible sur une image prise par le satellite SPOT-5 le 22 août 2015.