

## **15. Écroulements rocheux et dégradation du permafrost en haute montagne – Philip DELINE (Laboratoire EDYTEM, CNRS/Université de Savoie)**

L'étude de la relation entre les éboulements rocheux en haute montagne et la dégradation du permafrost sous l'effet du changement climatique doit prendre en compte trois problèmes spécifiques :

- Le permafrost étant un état thermique, sa présence ne peut pas être attestée simplement « à l'œil nu » contrairement à celle des autres phénomènes de haute montagne (glaciaires, avalancheux, torrentiels, etc.), en particulier dans les parois rocheuses (alors que les formations superficielles peuvent présenter des formes qui témoignent de la présence du permafrost, telles que les glaciers rocheux). La prise en compte du permafrost implique tout d'abord de préciser sa localisation, sa distribution en profondeur et son évolution dans le temps.
- Il s'agit ensuite de préciser la relation entre l'occurrence des écroulements et l'éventuelle dégradation du permafrost (qui se manifeste en particulier par la mise au jour et/ou la fonte de la glace présente dans les fissures des parois rocheuses).
- Concernant les écroulements eux-mêmes, il convient de déterminer si ces phénomènes sont plus fréquents aujourd'hui que par le passé et si leur magnitude augmente ou non, en tenant compte des possibles biais qui pourraient résulter de l'intérêt croissant qu'on leur porte et de l'amélioration continue des moyens d'observation.

### **1. Reconstitution des écroulements passés depuis 150 ans dans le massif du Mont-Blanc**

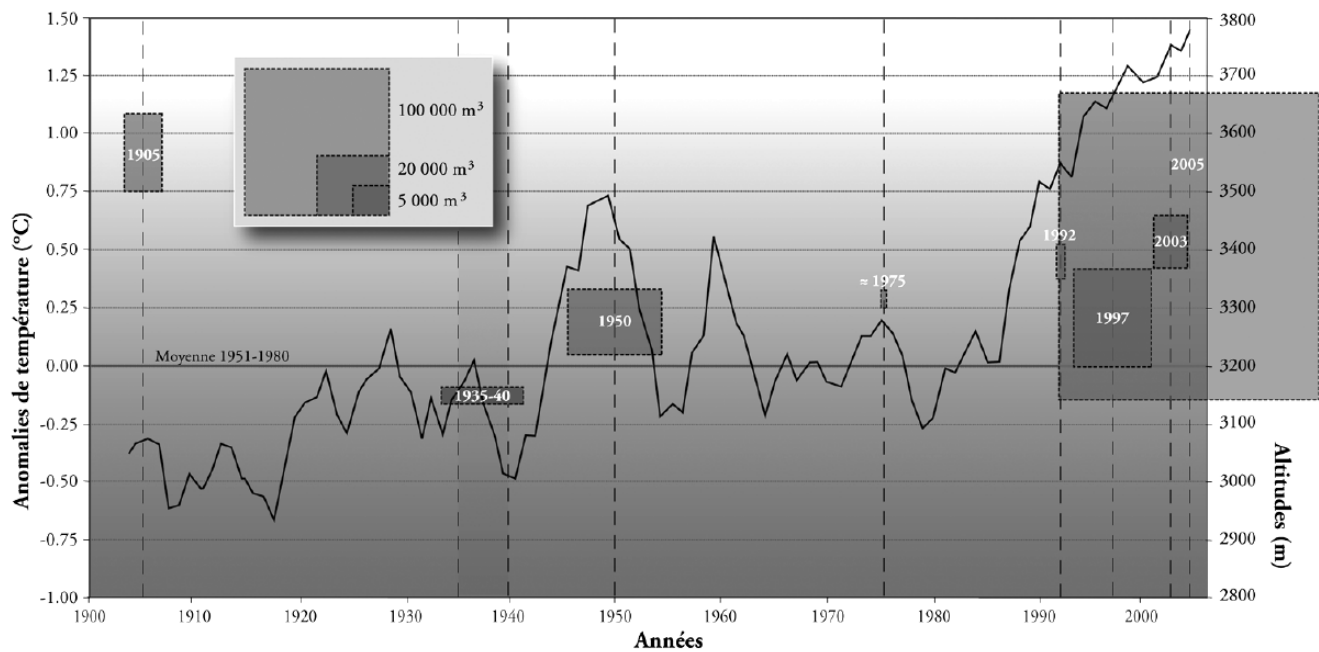
Le laboratoire EDYTEM travaille sur ces thèmes de recherche à partir des observations et des analyses menées depuis plusieurs années dans le massif du Mont-Blanc. L'une des méthodes employées pour l'étude des écroulements en haute montagne qui permet de s'affranchir des possibles biais d'observation est l'utilisation non pas des seuls témoignages historiques mais des photographies. Cette méthode a été mise en œuvre sur deux secteurs pour lesquels le large corpus de photographies historiques disponible offre une couverture temporelle à peu près continue depuis 150 ans : la face ouest des Drus et le versant nord des Aiguilles de Chamonix. Ces clichés (plusieurs centaines) permettent de remonter jusqu'à 1860, période de l'avènement de la photographie de montagne, qui correspond à la fin du Petit Âge Glaciaire.

L'observation et la comparaison de ces photographies complétées par des mesures de terrain ont permis de répertorier une cinquantaine d'événements depuis la fin du Petit Âge Glaciaire jusqu'à aujourd'hui. Ces événements se sont produits pour l'essentiel au cours des soixante dernières années, avec des volumes variables, de plusieurs centaines à plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup>.

Cette analyse a permis de mettre en évidence deux périodes principales qui se caractérisent par une fréquence accrue des écroulements : une première période à la fin des années 1940 et au début des années 1950, puis une seconde à partir des années 1980.

La première période présente une activité qu'on ne retrouve pas au cours des périodes antérieures, puisque pendant près d'un siècle, depuis la fin du Petit Âge Glaciaire jusqu'au milieu du XXe siècle (1947 pour les Aiguilles de Chamonix et 1950 pour les Drus), pratiquement aucun éboulement ne s'était produit – mis à part un petit écroulement au Drus déclenché par un séisme en 1905.

La fréquence des écroulements a ensuite très fortement diminué au cours des années 1970, avant d'augmenter à nouveau jusqu'à atteindre une fréquence particulièrement marquée au cours des deux dernières décennies, en particulier dans le secteur des Aiguilles de Chamonix (où le nombre d'événements est plus important) mais aussi sur la face ouest des Drus (avec une augmentation des volumes liée à la succession d'événements qui ont conduit à l'écroulement du pilier Bonatti en juin 2005 ; Fig. 39).



**Fig. 39.** Évolution de la température moyenne annuelle de l'air dans les Alpes et du volume et de la fréquence des écoulements rocheux dans la face ouest des Drus entre 1905 et 2005. Les quadrilatères en tireté représentent les différents écoulements (Ravel et Deline, 2008).

Il y a donc une **forte corrélation entre l'occurrence de ces événements depuis 150 ans et les périodes les plus chaudes observées à Chamonix** au XXe siècle (l'été et l'année 1947 étant le second été le plus chaud – après celui de 2003 – et l'année la plus chaude enregistrés depuis 1934) et au début du XXIe siècle, en particulier au cours des deux dernières décennies qui présentent la plus forte augmentation des températures moyennes (Fig. 40).

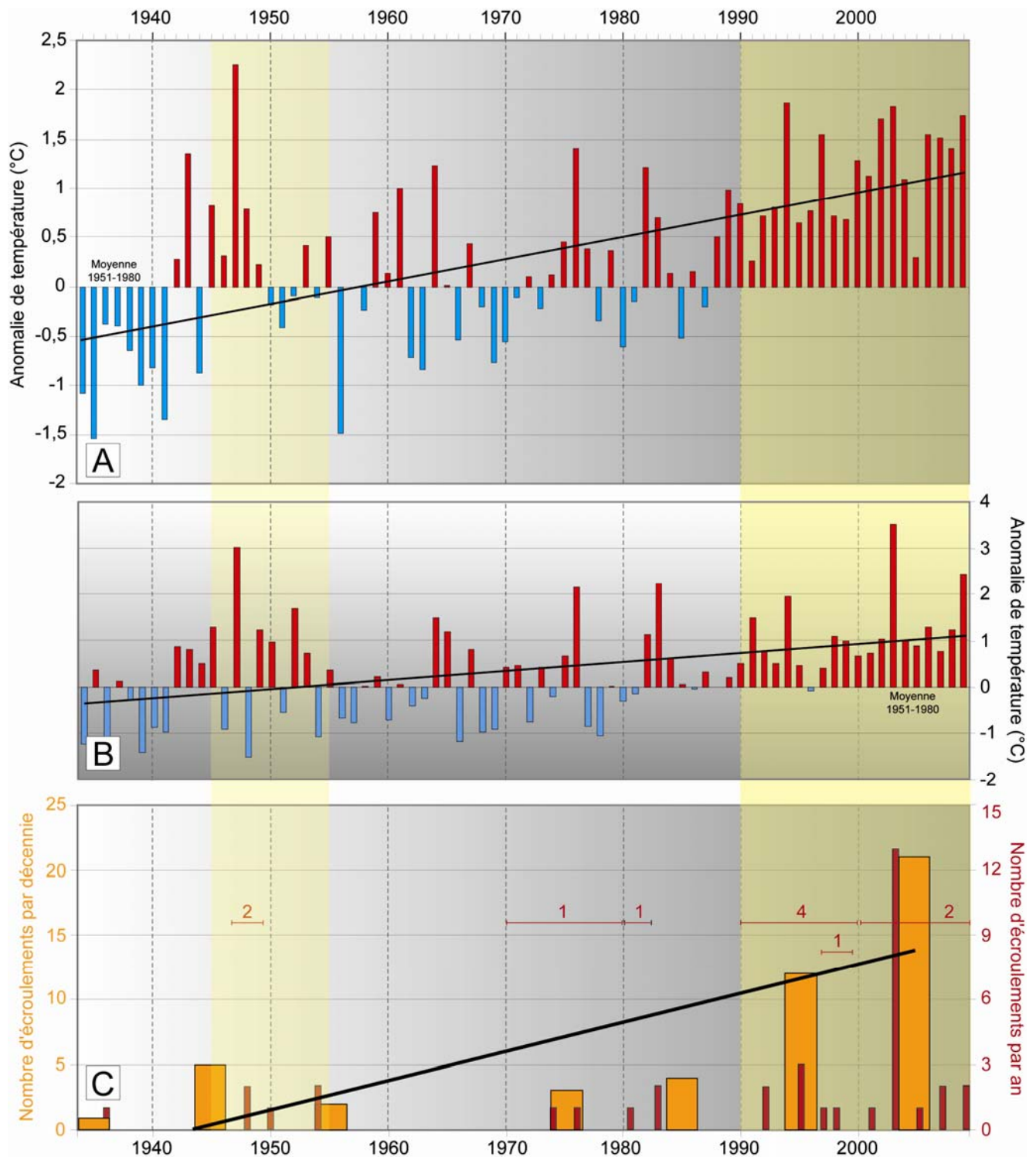
## 2. Etude des écoulements actuels

Cette approche sur photographies est complétée par un **réseau d'observateurs** constitué de guides et de gardiens de refuges, mis en place depuis 2005 en collaboration avec les collègues valdôtains dans le cadre du projet Alcotra *PERMAdataROC* et qui se poursuit dans le cadre du projet Espace Alpin *PermaNET*. L'intérêt d'un tel réseau d'observation provient de son caractère systématique et repose évidemment sur sa pérennité. Ce réseau est pleinement fonctionnel depuis 2007 sur les versants français (chamoniard) et italien du massif du Mont Blanc.

Entre 22 et 72 événements se sont produits chaque été entre 2007 et 2009 – une trentaine d'événements non encore analysés ont été répertoriés pour 2010. Là encore, on observe une étroite correspondance entre l'occurrence de ces écoulements et les périodes chaudes (par exemple entre le 10 août et début septembre en 2009, et pendant les trois premières semaines de juillet 2010).

En outre, l'exploitation de l'imagerie satellitaire (SPOT) de l'été 2003 a permis de relever 182 écoulements sur l'ensemble du massif dont 152 situés dans le secteur couvert par le réseau d'observateurs, c'est-à-dire deux fois plus qu'au cours de l'année 2009 très active.

Bien que la série d'observation soit assez courte, on retrouve donc pour un **pas de temps beaucoup plus court** la relation mise en évidence sur les derniers 150 ans entre l'occurrence des écoulements en haute montagne et les conditions climato-météorologiques dans lesquelles ils s'inscrivent.



**Fig. 40.** Evolution comparée du climat à Chamonix-Le Bouchet (1040 m) et des écoulements rocheux de la face ouest des Drus et du versant nord des Aiguilles de Chamonix (données météorologiques : Météo-France). **A** : anomalie des MAAT par rapport à la moyenne 1951-1980 ; **B** : anomalie des températures moyennes des trois mois les plus chauds (juin-juillet-août ou juillet-août-septembre) par rapport à la moyenne 1951-1980 ; **C** : nombre d'écroulements par an et par décennie. Traits noirs : tendances (régressions linéaires, décennale pour C) ; barres avec nombre en C : écoulement non datés précisément (Ravel, 2010).

Par ailleurs, ces observations sur ces pas de temps séculaire et annuel sont complétées par des relevés par laser-scanning effectués dans l'ensemble du massif avec une périodicité annuelle sur une douzaine de parois type dont certaines sont équipées de capteurs de température de la roche. Ces relevés permettent de repérer les secteurs affectés par des écoulements et d'évaluer leur volume en vue de mieux comprendre ces processus et leurs relations avec l'évolution des températures mesurées sur les parois.

L'ensemble de ces observations s'articule avec une étude du permafrost lui-même développée sur le site de l'Aiguille du Midi dans le cadre du projet *PermaNET*, qui comprend notamment des mesures en continu des températures dans la roche pour étudier leur réponse au forçage climatique-météorologique aux différents pas de temps.

## Références bibliographiques

- Ravel L., 2010. *Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont Blanc*. Thèse Université de Savoie, 326 pp.
- Ravel 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.

## Discussion

C. Peisser : Il est intéressant de constater que, contrairement aux autres types de phénomène pour lesquels on n'observe pas véritablement de tendance nette, il y a dans le cas présent une corrélation qui semble assez évidente avec l'évolution des températures, qui est aussi le seul paramètre météorologique présentant une tendance univoque dans les Alpes. Peut-on dire que l'augmentation des températures implique une augmentation de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes ?

P. Deline : Oui concernant la fréquence, mais nous ne disposons pas encore d'assez d'éléments quant à l'intensité.

J. Liévois : C'est quand il fait chaud que les cailloux tombent ! Mais ce n'est pas parce qu'il y a une tendance moyenne au réchauffement climatique qu'il y a plus de chutes de blocs...

F. Berger : Pour apporter un élément d'information dans le domaine des chutes de pierres en général (pas spécifiquement en haute montagne), le Cemagref a réalisé une analyse des fiches événement produites par le service RTM de Haute-Savoie depuis 1989, tous secteurs et gammes d'altitude confondus. Malgré les biais que ce type d'analyse peut comporter du fait du facteur humain (variabilité de la sensibilité des observateurs et du taux de remplissage des fiches), deux dates qui présentent une rupture de pente dans la « tendance » observée entre 1989 et 2006 ressortent clairement : l'année 1999 (caractérisée par un hiver assez froid) et l'année 2003 (l'année de la canicule), pour lesquelles on observe un nombre accru de fiches événements, laissant supposer l'existence d'un lien de cause à effet entre le facteur climatique et l'augmentation du nombre de fiches. Par contre, le volume unitaire de ces événements reste le même et **c'est donc la fréquence du phénomène qui varie, plutôt que son intensité**. En matière de gestion préventive des risques de chutes de pierres, cette évolution pose donc la **question de la fréquence du phénomène de référence** (plutôt celle de son volume) à prendre en compte pour dimensionner les structures de protection.

F. Gillet : Il faut souligner la différence entre ces zones qui ne sont pas à température moyenne négative et les Drus ou les Aiguilles de Chamonix qui sont des secteurs à permafrost et qui présentent une sensibilité particulière aux vagues de chaleur, du fait de la fonte de la glace présente dans les fissures qui contribuait à leur cohésion.

A. Lescurier : On peut cependant remarquer qu'une grande partie des éboulements observés sur les routes provient de zones affectées par les phénomènes de gel-dégel.

R. Mayoraz : Il s'agit de phénomènes très différents ! On a vu qu'en Suisse les années 2003, 2004 et 2005 ont plutôt connu une diminution du nombre de chutes de pierres dans les zones situées à « basse altitude », tandis que dans les zones de permafrost on a observé une augmentation des instabilités dans

les parois rocheuses (chutes de blocs) et les formations superficielles (fluage des glaciers rocheux) au-dessus de 3200-3300 m d'altitude. Il est donc **fondamental de toujours bien préciser de quel type de phénomène on est en train de parler** lorsqu'on présente ce type de résultats.

F. Berger : En effet et cela rejoint les problèmes de communication entre les résultats repris éventuellement de manière simpliste par les décideurs politiques et l'interprétation qu'en donnent les scientifiques au regard de la qualité des observations et de la nature des données disponibles.

F. Gillet : Il serait intéressant de relier les observations évoquées par F. Berger avec les situations météorologiques pour mieux analyser l'effet des alternances gel-dégel en fonction de l'altitude et mettre en évidence les facteurs prépondérants dans le déclenchement des chutes de pierres.

F. Berger : Cela rejoint le problème de mise à disposition des données...

J. Liévois : On constate (même si on a encore du mal à le quantifier) que plus les périodes de gel sont longues, plus on aura de chutes de pierres au moment du dégel. Il est possible que les chutes de pierre aient été plus nombreuses à la suite d'hivers particulièrement rigoureux ayant causé de longues périodes de froid, comme ce fut le cas au printemps qui a suivi l'hiver 2004-2005 au cours duquel on a connu une période très froide avec des températures de l'ordre de  $-10^{\circ}\text{C}$  pendant 6 semaines.

F. Gillet : La durée des vagues de froid est en effet un paramètre très important : plus elles sont longues et plus l'onde de froid pénètre en profondeur, ce qui permet de mobiliser des volumes plus importants lors du dégel.

P. Deline : À ce propos, le volume des écroulements observés dans le massif du Mont-Blanc est très variable, jusqu'à  $260\,000\text{ m}^3$  en juin 2005 aux Drus. D'autres événements importants se sont produits dans la période récente, en particulier dans ce massif. Par exemple, un très gros écroulement s'est produit sur son versant italien dans le secteur de la Brenva le 18 janvier 1997, c'est-à-dire au cœur de l'hiver à un moment exempt d'alternance gel-dégel. Les profondeurs de niche d'arrachement, de plusieurs dizaines de mètres, peuvent être éventuellement reliées à une dégradation lente du permafrost en profondeur, sur lequel on n'a pas de connaissances bien établies pour le moment, mais simplement des hypothèses sur l'effet de la circulation d'eau en profondeur, qui permettrait l'advection rapide de chaleur et pourrait avoir des effets déstabilisants importants. Ainsi, dans le cas beaucoup plus récent de l'écroulement du 24 décembre 2008 du Mont Crammont près de Courmayeur, où un volume de plus de  $500\,000\text{ m}^3$  est descendu jusqu'à la Doire, cet écroulement s'est produit sur un versant qui culmine à 2650 m d'altitude seulement (la niche d'arrachement est située entre 2400 et 2650 m d'altitude), dont on ne pensait pas a priori qu'il pouvait contenir un permafrost – malgré son exposition nord. Cependant sa modélisation réalisée avec l'Université de Zurich suggère que, du fait de la grande inertie thermique et de la sortie récente (à l'échelle géologique) du Petit Âge Glaciaire, la température de la roche est probablement de  $-1^{\circ}$  à  $-2^{\circ}\text{C}$  à l'emplacement de la niche d'arrachement. Cette température à la limite du « permafrost chaud » pourrait expliquer le déclenchement de cet écroulement à cet endroit, alors que l'analyse géomorphologique des cordons morainiques d'âge tardiglaciaire situés au pied de la paroi et conservés pendant tout l'Holocène montre qu'aucun autre écroulement d'un volume du même ordre ne s'est produit dans ce secteur depuis 12 000 ans.

J.-D. Rouiller : En 2003 « ce sont de gros paquets qui sont partis », parce que de la glace située dans des fissures assez profondes a fondu, tandis que lors d'un été normal, l'onde de chaleur n'a pas le temps d'atteindre cette profondeur. Ainsi au Cervin où les petits écroulements sont récurrents, le compartiment rocheux qui s'est décroché cet été là fut comparativement énorme. On peut donc probablement conclure que plus les étés seront chauds plus il y aura d'éboulements de grande importance.

P. Deline : Oui, typiquement la couche active mesurée en Suisse par le réseau PERMOS entre 3000 et 3500 m d'altitude s'est approfondie de 0.5 m – voire parfois de plusieurs mètres – en 2003 par rapport aux autres années !