



Le soleil a réchauffé la glace et offre à François Damilano une ascension agréable de ce free-standing des Dolomites.

# RECHERCHE ITINÉRAIRE SCIENTIFIQUE AU CŒUR DES CASCADES DE GLACE

Texte : François Damilano et Jérôme Weiss  
Photos : © Monica Dalmasso, sauf photos avec mention

# Recherche

**Le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble a mené depuis 2008 une étude fondamentale pour mieux connaître les cascades de glace et leur formation. Après un premier hiver de mise en place et deux hivers d'observations et de prélèvements, les premières observations sont aujourd'hui publiées.**

**Le guide François Damilano, et Jérôme Weiss, directeur de recherche au CNRS, qui ont participé à cette étude, nous en présentent le contexte et nous font part de ces résultats.**

## **Le contexte par François Damilano**

Comment se forment les cascades de glace ? Leur couleur a-t-elle une relation avec leur solidité ? Comment réagit ce type de glace aux sollicitations des grimpeurs et aux variations de température ? Aucun de nous n'a abordé l'escalade en cascade de glace sans se poser un jour ou l'autre quelques questions existentielles sur ce terrain aléatoire et capricieux. Seule, l'expérience de la pratique a permis de formaliser certains usages à défaut de règles intangibles. Au-delà de nos a priori, quelle est la réalité physique ou mécanique de ce terrain de jeux ?

### **Une équipe pluridisciplinaire**

Face aux sollicitations récurrentes des élèves de l'ENSA lors de ses interventions, le glaciologue Luc Moreau témoigne de l'absence de support scientifique. Si la neige ou la vie des glaciers font l'objet de nombreuses recherches depuis plus de trente ans, aucune étude systématique ni publication n'existe sur le milieu spécifique des cascades de glace. Sous l'égide de la Fondation Petzl, un groupe de travail pluridisciplinaire se constitue alors autour de deux scientifiques de pointe du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble (LGGE). Maurine Montagnat, coordinatrice du projet, est chargée de recherche au CNRS et s'est intéressée dans ce travail à l'étude des microstructures de la glace, révélatrice du mode de formation des cascades. Jérôme Weiss, directeur de recherche au CNRS, s'est quant à lui penché sur l'aspect mécanique de l'étude qui conditionne la fin de ces structures. Ces deux têtes bien faites sont par ailleurs des alpinistes confirmés et des habitués des manip en milieu hostile... Bien connu des guides, Luc Moreau fait évidemment partie de l'aventure en apportant son savoir faire sur la « glace en mouvement ».

Avec mon compère Didier Lavigne, nous complétons le noyau de cette équipe comme « guides à tout

faire », partageant notre expérience du terrain et assurant l'encadrement sur sites.

### **Une étude fondamentale**

D'un point de vue scientifique, ce terrain est « neuf », uniquement balisé par les observations empiriques des grimpeurs. Les chercheurs abordent donc l'étude d'un point de vue « fondamental », c'est-à-dire sans finalité économique ou pratique déterminée. Rappelons que pour un domaine n'ayant pas encore été étudié, il n'est pas envisageable d'engager une recherche appliquée sans aborder au préalable les connaissances globales, et donc fondamentales. Cette approche nous a paru, à nous les guides particulièrement, enrichissante. Notre challenge de grimpeur étant alors de transmettre un maximum de savoir acquis par l'expérience sans enfermer l'information dans des visions préconçues ou purement utilitaires. Il a d'abord fallu apprendre à se dégager de l'obsession de résultat et ouvrir les portes de notre terrain de prédilection avec un regard rafraîchi !

La première phase du travail a donc consisté à formaliser et hiérarchiser les questionnements, mettre au point les protocoles d'observations et confectionner des outils spécifiques. La deuxième phase, l'étude terrain proprement dite, s'est échelonnée sur trois hivers. Reste maintenant le travail d'exploitation des résultats, de mise en forme et de confrontation aux connaissances existantes, et de divulgation.

Aujourd'hui, la première phase d'analyse précédemment citée donne lieu à des publications scientifiques dont le Journal du CNRS, Journal of Glaciology. Pour la revue « Guides », Jérôme Weiss nous livre les grandes lignes de son étude portant sur l'aspect mécanique, probablement la plus signifiante pour notre pratique sur le terrain.



Figure 1 - Prélèvement au carottier dans la cascade "Nuit blanche", bassin d'Argentière

## L'étude par Jérôme Weiss

Pour que des cascades de glace se forment à partir de ruissellements ou de résurgences, il faut qu'il fasse froid! Jusque-là, le sens commun semble respecté... Mais, à partir de cette considération triviale, on serait tenté, intuitivement, d'en déduire que plus les températures sont basses, plus les conditions sont favorables à la pratique de la cascade.

Est-ce si simple? Quelles sont les conditions climatiques à privilégier, ou, au contraire, à éviter? Au-delà du ressenti et de l'expérience des grimpeurs et des guides, qu'est-ce qu'une étude scientifique peut nous apprendre à ce propos? C'est à ces questions que nous allons tenter de répondre en partie dans cet article à partir d'études de terrain menées entre 2008 et 2010, corroborées par quelques considérations plus théoriques.

Il n'existait, avant notre travail, aucune étude scientifique publiée au sujet de ces cathédrales de glace. Nous avons eu ainsi le privilège de nous aventurer en terrain vierge,

avec comme conséquence que la cartographie dressée sur le sujet demeure partielle et préliminaire. Néanmoins, les résultats obtenus permettent déjà de dégager certaines idées clés résumées ici. Cela nous a aussi obligé à mettre au point des protocoles de mesures originaux, et de réduire le champ d'investigation à un groupe de cascades témoins afin de valider la démarche expérimentale et d'obtenir des données statistiques sans faire varier trop de paramètres simultanément. C'est principalement sur les cascades de glace dominant le glacier d'Argentière, en particulier « Nuit-Blanche » et « Shiva Lingam », que s'est concentrée cette première étude, avec, tout au long des trois hivers, la mise en place :

- 1) d'appareils photos fixes captant 6 images par jour à intervalles réguliers
- 2) de prélèvements à partir d'un carottier portatif spécialement développé pour cette étude (figure 1)
- 3) de capteurs de pression interne et de température (de la glace!) au cœur d'une colonne free-standing, permettant d'analyser l'évolution des efforts mécaniques subis par la structure au cours de la saison, en lien avec l'évolution des



Figure 2 - Étude d'impact par indenteur

températures de l'air « sous abri » et de la glace

- 4) d'étude d'impact par indenteur (outil permettant de reproduire la frappe du piolet) (figure 2).

Ces mesures nous ont permis de suivre ces cascades témoins au cours de leur vie, depuis leur naissance progressive jusqu'à leur décès, souvent brutal! Nous nous sommes essentiellement focalisés sur des structures verticales, les plus sensibles en termes de risques « objectifs ». Reprenant le vocabulaire entériné par la pratique des grimpeurs, on distingue une stalactite, fixée au rocher uniquement en son sommet, d'un free-standing, colonne de glace ancrée à ses deux extrémités, ou d'un cigare, collé au rocher sur toute sa longueur (figure 3). Ces différences sont importantes lorsqu'il s'agit d'estimer le comportement mécanique en fonction des conditions climatiques.

### Une formation progressive

À partir du suivi photographique, des relevés de température de l'air et de la glace, ainsi que des

prélèvements effectués, nous avons constaté que ces structures verticales se forment par agrégation de très nombreuses stalactites d'un diamètre variant de quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres et dont le mécanisme de formation est très proche de celui des stalactites de calcite se formant sur le toit des grottes calcaires. La structure globale obtenue ainsi est complexe, parcourue de canaux et de conduits le long desquels l'eau liquide peut s'écouler (Figure 4).

La phase de formation, assez progressive, est clairement liée au cumul des températures négatives depuis le début de saison: comme prévu, plus il fait froid, plus les cascades se forment! Toutefois, cette évolution n'est pas linéaire, et après une croissance rapide en début de saison, celle-ci sature ensuite (environ au bout d'un mois pour les cascades étudiées). Ceci s'explique par le pouvoir isolant de la glace: lorsque l'épaisseur de glace est suffisamment importante, celle-ci isole l'eau liquide circulant au sein de la structure, le long des conduits cités précédemment, du froid extérieur, et le volume de glace n'augmentera plus que très lentement, sauf à ce que des fractures apparaissent permettant à l'eau liquide de résurger en surface.

Figure 3 : - Dernière longueur de "Nuit-Blanche"  
(a) Janvier 2008, structure free-standing.  
(b) Février 2009, année très favorable, le free-standing est devenu... un cigare colle au rocher...



### Une fin souvent brutale

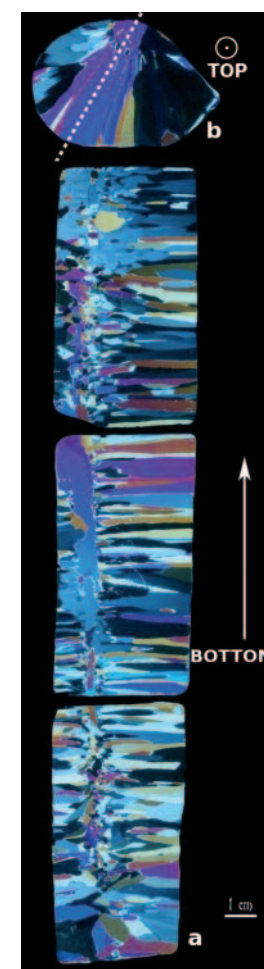
Si la naissance d'une cascade est progressive, sa fin, en particulier pour des structures verticales comme les stalactites ou les free-standings, est souvent brutale, ce qui pose d'évidents problèmes de sécurité! Le suivi photographique met en évidence l'initiation puis la propagation souvent très rapide de fractures horizontales au niveau du point d'ancrage supérieur de la structure. Dans le cas de structures décollées du rocher (stalactite et free-standing), cela entraîne souvent leur effondrement, comme nous l'avons observé pour « Shiva Lingam » en 2008 et 2009 (Figure 5).

L'initiation et la propagation de fractures sont la conséquence d'efforts mécaniques en traction (on

parle de « contraintes ») qui « tirent » sur la glace jusqu'à son point de rupture. Plusieurs mécanismes génèrent de telles contraintes dans les cascades, mais lesquels sont à l'origine de ces effondrements?

- Le poids propre de la structure est la première source de contraintes, toujours présente. Pour les stalactites comme les free-standings, ceci génère des efforts de traction maximum juste sous le point d'ancrage sommital, là où l'on observe les ruptures! Toutefois, un calcul très simple indique que les contraintes ainsi engendrées sont bien trop faibles pour atteindre la limite de rupture de la glace, et le poids d'un grimpeur sera encore plus négligeable. Là n'est donc pas l'explication. Il est à noter aussi que pour un cigare collé au rocher sur sa longueur, ces contraintes auront quasiment disparues.

Figure 4 : Coupe en lumière polarisée d'une stalactite de glace, révélant la structure des cristaux (cliché D. Richalet)



- La seconde source potentielle de contraintes mécaniques est liée aux cycles gel-dégel. Comme chacun sait, la phase solide de l'eau, la glace, a la particularité d'être moins dense que l'eau liquide: c'est pourquoi les icebergs ou la banquise flottent. Si les cycles de gel-dégel ont lieu dans un milieu confiné, comme dans ces conduits et poches au sein des structures, de fortes contraintes peuvent apparaître localement. Essayer d'entrouver

une bouteille en verre remplie d'eau dans votre congélateur!

En fin de saison 2008 et 2009, lors d'épisodes climatiques relativement doux où la température de l'air variait entre quelques degrés au-dessus de zéro le jour, et quelques degrés en dessous la nuit, nous avons pu observer grâce à nos capteurs installés dans « Nuit-Blanche » des variations brutales des contraintes internes se produisant chaque jour vers 10h du matin, et vers 6h du soir. Il s'agit vraisemblablement de la signature de ces cycles gel-dégel, corroborée par le fait que la température de la glace, d'une fraction de degré en dessous de 0 °C la nuit, montait à la température du point de fusion (0 °C) entre 10h et 18h. Toutefois, ces fluctuations de contraintes peuvent se produire un peu partout dans la structure, sont très locales, et ne semblent pas déclencher de ce fait une fracturation et un effondrement général, comme nous

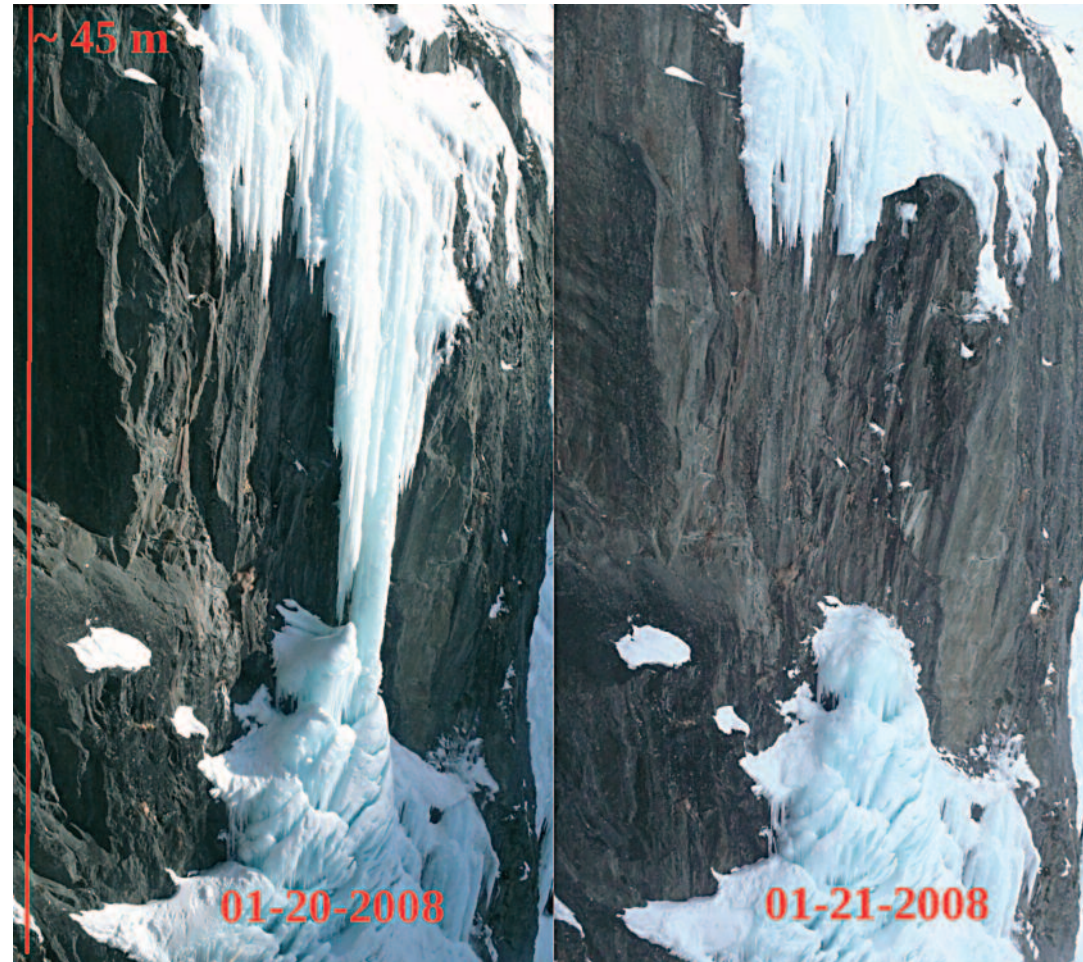
l'avons constaté lors de notre étude.

- Le dernier mécanisme générateur d'efforts mécaniques, lié à la contraction/dilatation thermique de la glace, est le plus important, et le plus dangereux! Comme la quasi-totalité des solides, la glace se dilate lorsqu'on la réchauffe, et se contracte lorsqu'on la refroidit. Imaginons maintenant une colonne free-standing sous l'effet d'un refroidissement important. La colonne aura alors tendance à se raccourcir, ce qui est impossible du fait des points d'attache en haut et en bas. Le résultat de ce conflit sera la mise en tension verticale de toute la structure. Ces contraintes de traction, se superposant aux efforts liés au poids, engendreront des tensions maximales sous le point d'encrage sommital qui ne sont, cette fois-ci, pas négligeables. Un calcul très approximatif indique qu'une chute de 2 °C de la température de la glace peut suffire à atteindre la limite à rupture connue à partir d'essais mécaniques en laboratoire, et ainsi, théoriquement, déclencher la rupture brutale et l'effondrement de la cascade!

Cette estimation plutôt inquiétante est néanmoins un peu exagérée car elle suppose une chute de température instantanée, sans tenir compte de la vitesse de refroidissement. Dans la réalité, ce dernier sera plus lent, d'une part parce que la chute des températures de l'air n'est jamais immédiate, d'autre part car, du fait du caractère isolant de la glace, la glace située en profondeur se refroidira avec un décalage dans le temps, et plus lentement, que les couches extérieures. Cette notion de vitesse est capitale: en effet, si l'on cherche à « tirer » sur la glace lentement, elle se déformera de manière plastique, sans fissures ni ruptures. La transition entre ce comportement dit ductile (« mou ») et un comportement fragile (« cassant ») est connue. Re-formulée pour ce qui nous concerne, elle correspond à un refroidissement de l'air aux alentours de 6 à 8 °C par heure, ce qui n'est pas inhabituel au cours d'un hiver, en particulier en altitude.

La mise en tension d'une colonne free-standing a pu être mesurée par nos capteurs lors

Figure 5 -Écroulement du free-standing de Shiva lingam dans la nuit du 20 au 21 Janvier 2008, suite à un refroidissement brutal de 15°C (clichés L. Moreau)



d'épisodes de refroidissement brutaux, tant sur le free-standing terminal de « Nuit-Blanche » en 2008 que sur celui de « Rovenaud » dans le Valsavarenche en 2010. À l'inverse, des périodes de refroidissement important, p.ex. de 5 °C pour la température de la glace, mais réparti sur 5-6 jours, ne mettent pas en tension la structure de manière significative. Plus spectaculaire encore, le scénario de « mort subite » suggéré plus haut a été observé sur « Shiva lingam » en 2008 comme en 2009. L'après-midi du 20 janvier 2008, il fait +6 °C à 2100 m d'altitude et Shiva est bien là. Un refroidissement brutal a lieu dans la nuit : à 8 h 30 le lendemain matin, il fait -9 °C, et « Shiva » n'existe plus ! (Figure 5).

Le mécanisme décrit plus haut est indépendant de la température initiale, et les données recueillies au cours de cette étude sont trop limitées pour juger si des températures élevées au départ, bien au-dessus de 0 °C, sont un facteur aggravant ou non.

Paradoxalement, les stalactites, structures pourtant d'apparence plus frêle, seront a priori moins sensibles à ces effets de contraction thermique. N'étant pas ancrées à leur base, elles pourront se déformer plus librement sous l'effet d'un refroidissement et donc limiter la mise en tension. Toutefois, dans ce cas comme dans celui des cigares, ou même des cascades moins raides posées sur un socle rocheux, des contraintes de traction apparaîtront quand même en surface du fait des différences de température entre la glace froide en contact avec l'air ambiant, et celle en profondeur, plus isolée thermiquement. Des fissures pourront apparaître de ce fait, en particulier lors de la frappe d'un grimpeur avec ses piolets.

Notons finalement qu'un réchauffement brutal sera moins critique, car il générera des efforts de compression défavorables à l'initiation et la propagation de fractures.

## Quelques clés de lecture du milieu

Comme souligné par François dans son introduction, l'étude avait au départ des objectifs de nature fondamentale, sans penser aux applications immédiates. En particulier, il ne s'agissait pas d'établir une échelle de risque à l'image de ce qui a été développé depuis de nombreuses années pour les avalanches de neige. Ceci nécessiterait en effet, a minima, de monter un réseau d'observation beaucoup plus important, couvrant une gamme de sites, d'orientations, d'altitudes très large, puis de le maintenir sur plusieurs saisons avant de pouvoir valider, éventuellement, une telle approche : ce n'est pour l'instant pas à l'ordre du jour.

Néanmoins, les données recueillies lors de cette étude, même préliminaires, peuvent, nous l'espérons, fournir quelques clés simples d'interprétation du milieu ou des conditions, et une aide éventuelle à la décision pour les grimpeurs. Résumons ceci en quelques grandes catégories de conditions climatiques (essentiellement, l'évolution des températures) :

- Même si nous n'avons pas étudié spécifiquement cet aspect lors de l'étude, une période prolongée (plusieurs jours) de températures douces, au-dessus de 0 °C, y compris la nuit, est défavorable, ce qui est assez intuitif. En effet, de telles conditions peuvent entraîner un décollement de la glace du socle rocheux par ruissellement d'eau liquide à l'interface glace/roche, avec des risques de déstabilisation importants.

- Par contre, une succession de journées assez douces, jusqu'à environ 5 °C maximum, entrecoupées de nuits relativement fraîches (quelques degrés en dessous de 0 °C) permettant d'éviter le décollement généralisé, semble être une situation plutôt favorable. En effet, si ces conditions sont associées à des contraintes internes liées aux cycles gel-dégel, celles-ci restent très locales et ne semblent pas déstabiliser les structures. De plus, une glace « chaude », dont la température reste toujours proche de 0 °C, aura un comportement très ductile (« plastique ») peu favorable à la propagation de fractures, en particulier lorsque le grimpeur frappe la glace

avec ses piolets, donnant ainsi une impression rassurante de « glace sorbet ».

- Si les froids intenses sont favorables à la formation des cascades de glace, ils ne sont pas forcément favorables à la grimpe. En particulier, des refroidissements brutaux, de plusieurs degrés par heure pendant plusieurs heures, par exemple lors de l'arrivée d'un front froid venu du Nord, doivent donner l'alerte. Ils engendrent en effet des efforts de tension dans les structures sous l'effet de la contraction thermique de la glace qui peuvent, dans certains cas, déclencher l'effondrement spontané de structures, en particulier free-standing. De plus, une glace froide sera fragile, c'est-à-dire favorable à la propagation des fractures, que ce soit de manière spontanée, ou sous l'effet de la frappe des piolets, avec la possibilité d'un effondrement déclenché par le grimpeur lui-même.

Les structures de type stalactite ou cigare sont a priori un peu moins sensibles à ce type de conditions, même si des contraintes d'origine thermique apparaissent entre une glace « froide » en surface et une glace « chaude » en profondeur.

- Les refroidissements plus lents, étalés sur plusieurs jours, et/ou des périodes de froid plus stables sont a priori moins critiques, les efforts mécaniques induits par la contraction lente de la glace pouvant alors être relaxés par la plasticité. Toutefois, dans ces conditions, la glace sera très fragile et cassante sous les coups de piolets du grimpeur. De plus, la base de données recueillie dans les Alpes lors de ce travail s'avère trop limitée pour explorer des conditions de température réellement basses (disons, en dessous de -20 °C) durablement, conditions que l'on peut rencontrer l'hiver dans d'autres parties du globe comme en Amérique du Nord.

Ces quelques clés de lecture demeurent partielles, et ne remplaceront jamais, on s'en doute, l'expérience acquise au cours de la pratique. Nous nous sommes focalisés sur les conditions de température « sous abri », sans aborder le rôle éventuel d'autres paramètres comme l'orientation de la cascade et donc son



insolation, vraisemblablement important par l'intermédiaire de la température de radiation, celui des précipitations, probablement moins déterminant d'après nos analyses très partielles, ou encore celui des paramètres hydrologiques comme le débit d'eau accessible pour alimenter la cascade. Une analyse plus poussée tenant compte de ces différents paramètres nécessiterait de varier les sites de mesures, y compris hors des Alpes, et de pérenniser ces dernières sur de nombreuses saisons.

Une extension intéressante serait également une confrontation des conclusions de cette étude avec les retours et témoignages de terrain venants des guides, des services de secours, ou des pratiquants en général, ceci afin d'enrichir la base de données ou de soulever certaines problématiques non abordées au cours de cette étude.

Les lecteurs intéressés par une analyse plus détaillée peuvent s'adresser à l'auteur [weiss@lgge.obs.ujf-grenoble.fr](mailto:weiss@lgge.obs.ujf-grenoble.fr) ou à Maurine Montagnat [maurine@lgge.obs.ujf-grenoble.fr](mailto:maurine@lgge.obs.ujf-grenoble.fr) pour obtenir une copie des articles scientifiques (en anglais) rédigés sur le sujet. Nous sommes également intéressés par d'éventuels témoignages et retours de terrain qui pourraient corroborer (ou non!) les quelques principes et idées résumées plus haut.

#### Remerciements :

Ce travail a bénéficié du support logistique de la Société d'Electricité d'Eosson S.A. et de la Compagnie du Mont-Blanc. Nous avons utilisé des données météorologiques de l'observatoire GLACIOCLIM du CNRS-INSU, et du Centro Funzionale de la Region Autonome du Val d'Aoste.

## Le LGGE

Le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement a bâti sa renommée scientifique sur l'étude du climat et de la composition de l'atmosphère. Si les régions polaires arctiques et antarctiques sont des terrains d'action privilégiés du laboratoire grenoblois depuis maintenant 50 ans, son expérience s'étend à toutes les zones de montagne (glaciers andins et alpins, pollution des vallées alpines) ainsi qu'à des approches fondamentales de la neige et la glace... Autant d'études qui contribuent à la mise en perspective scientifique d'enjeux fondamentaux de nos sociétés: effet de serre, variabilité du climat, bilan de masse de la cryosphère, pollution à l'échelle globale ou régionale, risques glaciaires.

Plus d'infos sur : [www-lgge.ujf-grenoble.fr](http://www-lgge.ujf-grenoble.fr)

## La fondation Petzl

Créée en 2006, la fondation Petzl a pour mission de porter des projets en lien avec les métiers du groupe Petzl (évolution en milieu vertical). Elle soutient ainsi des projets d'organismes à but non lucratif qui œuvrent pour l'intérêt général: prévention et sensibilisation à la sécurité, préservation de l'environnement, soutien à la recherche fondamentale.

Plus d'info sur : [www.fondation-petzl.org](http://www.fondation-petzl.org)