



***Pôle Alpin d'Etudes et de Recherche  
pour la Prévention des Risques Naturels***



## **Séminaire technique**

# **Gestion des risques d'origine glaciaire et périglaciaire**

Organisé par le PARN avec le soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement – Direction Générale de la Prévention des Risques

**12-13 mars 2012**  
Grenoble – World Trade Center

## **Document préparatoire**



## Contexte - Objectifs

Du fait de la forte énergie de relief des versants sur lesquels ils se produisent, les aléas d'origine glaciaire et périglaciaire sont en général difficilement prévisibles et potentiellement très destructeurs. Ces aléas sont relativement rares, mais le contexte actuel de changement climatique pose de nombreuses questions sur leur évolution potentielle.

La situation de crise engendrée en 2010 par la découverte de la poche d'eau sous le glacier de Tête Rousse (Haute-Savoie) a renforcé un constat déjà établi suite à la gestion de la vidange du lac glaciaire de Rochemelon (Savoie, 2004) : en dépit de programmes scientifiques et techniques récents sur le thème du risque d'origine glaciaire et périglaciaire, les organismes en charge de la gestion du risque sont encore assez largement démunis face à un certain nombre de questions ou situations spécifiques liées à l'évolution des milieux de haute montagne (glaciers et marges proglaciaires, zones récemment déglacées, permafrost).

D'autre part selon un récent rapport de l'OCDE (OECD 2007\*), dans les Alpes européennes, « les effets les plus nets des changements climatiques sur les risques naturels concernent les zones glaciaires et le pergélisol. Dans une perspective nationale, les dommages associés à ces dangers ont des implications économiques limitées étant donné que les régions touchées sont généralement isolées et très peu peuplées. Ces dommages ont en revanche beaucoup plus d'importance pour les communautés locales et peuvent aussi avoir des conséquences négatives indirectes pour l'industrie du tourisme. »

Dans ce contexte, la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du ministère en charge de l'écologie souhaiterait pouvoir **établir à court terme un programme d'actions à conduire pour l'amélioration de la gestion des risques** d'origine glaciaire et périglaciaire. L'objectif de ce séminaire est de rassembler tous les éléments permettant d'établir ce programme. Il s'agit donc :

- d'une part de faire le point sur les connaissances, les méthodes et les pratiques afin d'identifier et hiérarchiser les manques et les points de blocages existants ;
- d'autre part de **proposer des pistes de réflexion/de travail** qui permettraient de faire évoluer la situation.

En réunissant pendant deux jours les scientifiques, les techniciens et les responsables administratifs en charge de cette question, non seulement français mais aussi suisses et italiens, le séminaire entend capitaliser les différentes pratiques alpines et les avancées méthodologiques récentes. Les présentations, très synthétiques, s'attacheront à faire ressortir des problématiques (prise de recul par rapport à la description des cas), toujours orientées vers la notion de gestion des risques. Elles serviront à alimenter les discussions, auxquelles il est laissé une très large place. Chaque participant est invité à **prendre part activement aux échanges**, qui devraient permettre de faire émerger des solutions applicables dans le cadre français.

Le présent document a pour objectif de rassembler de façon synthétique différents éléments aujourd'hui disponibles pour alimenter la réflexion sur la problématique de la gestion des risques d'origine glaciaire et périglaciaire, afin de rendre les échanges qui pourront avoir lieu lors du séminaire les plus riches et fructueux possibles. Il reprend pour partie des éléments d'un rapport réalisé en 2005 par le CEMAGREF sur l'état des lieux de la caractérisation et gestion des risques d'origine glaciaire.

\* OECD (2007): *Climate change in the European Alps, adapting winter tourism and natural hazard management*, Shardul Agrawal, Editor

## A. Les différents phénomènes générateurs de risques d'origine glaciaire et périglaciaire

On distingue trois grands types de phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire générateur de risques.

### 1. Phénomènes résultant de l'écoulement plus ou moins brutal d'eau sous forme liquide momentanément stockée au niveau de l'appareil glaciaire ou périglaciaire

Ces phénomènes, dénommés GLOFs par les anglophones pour Glacial Lake Outburst Flood, se caractérisent par le fait qu'ils sont rares mais extrêmement destructeurs. En effet, les vidanges de lacs glaciaires ou de poches d'eau sont susceptibles de produire, en fonction des volumes mis en jeu et de la brutalité de la vidange, des crues se propageant dans le réseau hydrographique à l'aval du glacier. Ces crues sont susceptibles d'avoir un caractère torrentiel marqué, avec des transports de sédiments à des concentrations importantes (par charriage voire laves torrentielles), dès lors que les stocks de sédiments mobilisables sont importants et que les écoulements ont l'énergie suffisante pour les mettre en mouvement et les transporter. On recense depuis 25 ans seulement quelques événements ayant nécessité des interventions (travaux de vidange).

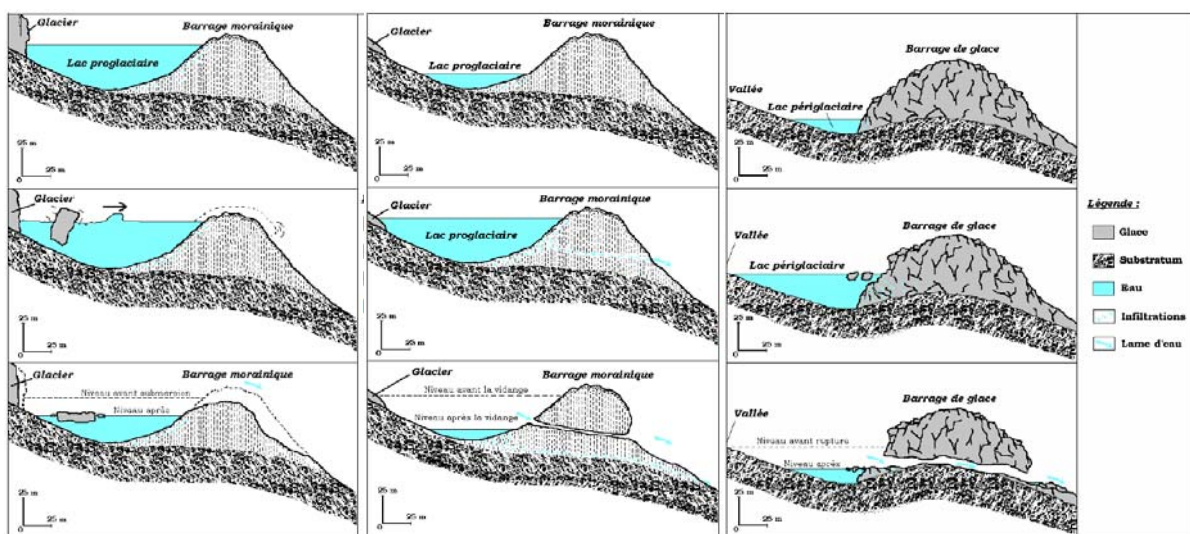
On distingue plusieurs catégories de phénomènes selon le type de stockage de la masse d'eau.

#### 1.1. Rupture ou vidange brutales de lacs glaciaires et périglaciaires

Alimentés par les eaux de fonte et les précipitations, des lacs peuvent se former au front d'un glacier, généralement à la suite du recul de celui-ci (lac proglaciaire) ou sur la surface du glacier (lac supraglaciaire).

Les lacs thermokarstiques se rencontrent sur des zones de permafrost. Eléments caractéristiques des paysages arctiques, il en existe seulement quelques exemples dans les Alpes. Ils remplissent des dépressions et des affaissements de terrain dus au tassement du sol consécutif de la fonte de la glace du pergélisol.

Ces lacs sont susceptibles de se vidanger brutalement.



Surverse,

renard,

décollement

Les vidanges peuvent être dues à l'ouverture d'une brèche ou à la rupture du barrage naturel qui ferme le lac, barrage constitué de glace et/ou de matériaux morainiques. Elles peuvent également être consécutives à la chute brutale dans le plan d'eau d'un volume important de glace (« vêlage »), de rochers (éboulement), de sol (glissement de terrain), ou de neige (avalanche), générant une surverse du barrage naturel si le « run-up » est suffisant.

En terme de gestion des risques, les questions se posent autour de

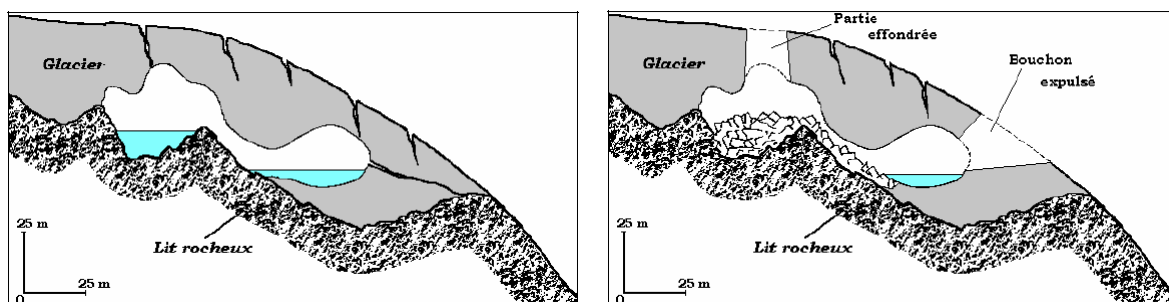
- leur détection : ils sont visibles, mais comment les repérer à temps, peut-on en rater (campagnes systématiques ? utilisation des nouvelles techniques satellitaires\*)
- leur caractérisation : évolution du volume d'eau, stabilité du barrage...
- les risques induits à l'aval : extension de l'écoulement en cas de vidange brutale\*, systèmes d'alerte...

Exemples (voir Partie B. Description de cas pour la description détaillée de chaque exemple, p. 9) :

- Lac proglaciaire d'Arsine, 1986
- Lac supraglaciaire de Rochemelon, 2005
- Lac supraglaciaire/thermokarstique de Chauvet (Ubaye, 04)
- Lac Effimero, glacier du Belvédère (Mont Rose, Alpes italiennes), juin 2003
- Grindelwaldgletscher (BE, Suisse), mai 2008
- Glacier et glacier rocheux de Gruben (vallée de Saas, Valais, Suisse)
- Lac du Gorner (Gornersee, Valais Suisse)

## 1.2. Vidange de poches d'eau intra-glaciaires

Si le phénomène résultant à l'aval est le même que pour la vidange de lacs glaciaires, la différence majeure en terme de gestion des risques est que la formation de la poche intra-glaciaire n'est pas visible. La détection de ce type de phénomène est donc particulièrement difficile et reste probablement la principale question au cœur de la gestion des risques.



Exemples :

- Glacier de Tête-Rousse (Haute-Savoie), juillet 1892, été 2010
- Minstigergletscher (Valais, Suisse), 8 août 2008

\* Frey, H., C. Huggel, F. Paul and W. Haeberli (2010) - Automated detection of glacier lakes based on remote sensing in view of assessing associated hazard potentials. *10th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography*, pp261-272.

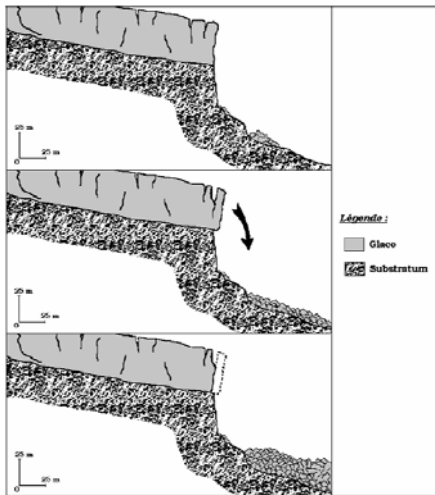
## 2. Phénomènes résultant du mouvement gravitaire de masses d'eau sous forme solide (glace) qui se détachent du glacier

Les chutes de glace peuvent générer des dégâts directs dans les zones aval : destruction de chalets, infrastructures, peuplements forestiers, randonneurs... Elles peuvent également avoir des conséquences indirectes, telles que le déclenchement d'avalanches, ou la formation d'écoulements torrentiels si la masse de glace vient à faire barrage temporaire à un écoulement.

Les questions de gestion des risques se posent en terme de prévision de la rupture : modélisation<sup>†</sup>, processus différents selon la température du glacier, influence de la topographie du bedrock (radar ?).

### 2.1. Chutes de séracs

Un sérac est un bloc de glace de grande taille formé par la fracturation d'un glacier, liée à une rupture de pente de la roche sous-jacente ou à la présence d'une falaise (glacier suspendu). Une « chute de sérac » décrit l'écroulement soudain d'un ou plusieurs séracs. De nombreuses chutes de séracs menacent les alpinistes lors de leurs ascensions glaciaires en zone de haute montagne.



Seuls quelques cas isolés présentent des risques pour les fonds de vallée. Le phénomène direct de chute de glace peut être amplifié en hiver s'il déclenche une avalanche de neige.

En termes de prévision des risques, les questions principales qui se posent sont alors celles du volume et de la fréquence des ruptures de séracs ainsi que des caractéristiques des avalanches engendrées (neige+glace).

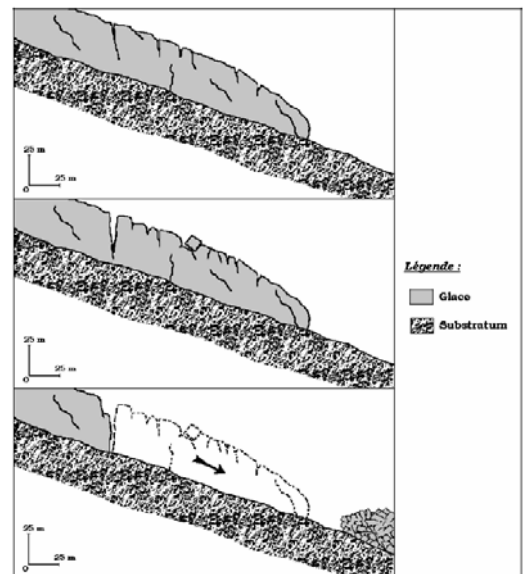
#### Exemples :

- Séracs de Tacconnaz, vallée de Chamonix (Haute-Savoie)
- Glacier Whymper, séracs des Jorasses, Vallée d'Aoste

### 2.2. Ruptures de glacier

Dans certaines conditions, toute une partie de glacier peut s'écrouler brutalement. Ces ruptures peuvent, entre autre, être dues à des circulations ou accumulations d'eau à la base du glacier, ou à un réchauffement de la base du glacier (passage d'un glacier froid à un glacier tempéré).

Les Alpes comptent quelques catastrophes liées à ce type de phénomènes, notamment en Suisse. Le plus gros événement connu (4 millions de m<sup>3</sup>) a eu lieu le 11 septembre 1895, lorsqu'une large part du glacier



Ref: <sup>†</sup>Faillietaz, J., D. Sornette, M. Funk (2011) Numerical modelling of a gravity-driven instability of a cold hanging glacier: reanalysis of the 1895 break-off of Altelsgletscher, Switzerland - *Journal of Glaciology*, Vol. 57, No. 205, 2011



Altets (Oberland bernois) s'écroula, ravageant l'alpage situé à l'aval et tuant 6 personnes et 170 vaches. Un des plus tragiques est la rupture du glacier Allalin en 1965, qui tua 88 ouvriers sur le site de construction du barrage de Mattmark.

La première prévision de rupture a été réalisée en 1973 sur le glacier suspendu du Weisshorn, qui menace régulièrement le village de Randa (Valais).

#### Exemples récents :

- Glacier de la Jungfrau : le 17/02/2011, 500 000m<sup>3</sup> de glace se détachent de la partie frontale du glacier suspendu ; le nuage de poussière atteint le fond de vallée et remonte le versant opposé. Source : <http://glaciology.ethz.ch/inventar/news/news20110217.html>

- Glacier du Weisshorn, 2005 : exemple de prévision de rupture

### 3. Phénomènes périglaciaires

Dans un contexte d'évolution climatique, les phénomènes d'origine périglaciaires sont aujourd'hui à prendre en compte de façon aussi importante que les phénomènes strictement d'origine glaciaire. On entend par là les phénomènes consécutifs à la fonte du pergélisol (ou permafrost), ces sols qui contiennent de la glace susceptible de retourner à l'état liquide sous l'effet du réchauffement, mais aussi les instabilités des secteurs récemment désenglacés suite au retrait glaciaire.



#### 3.1. Déstabilisation de glaciers rocheux :

Un glacier rocheux est une masse de débris rocheux mélangés à de la glace se déplaçant à très faible vitesse (quelques centimètres à quelques mètres par an) sur un versant. L'activité des glaciers rocheux est dépendante des conditions climatiques, et les travaux scientifiques les plus récents montrent que, dans les Alpes, ils semblent avoir réagi par une accélération à l'augmentation des températures au cours des deux dernières décennies. Certains glaciers rocheux présentent des signes de déstabilisation plus ou moins importants, signes probables de la dégradation du pergélisol qu'ils contiennent.

Les risques liés aux glaciers rocheux sont jusqu'à maintenant plutôt rares mais peuvent être de plusieurs types :

- Chutes de blocs au front du glacier rocheux, qui peuvent menacer des itinéraires de montagne (sentiers, passages d'alpinistes) ;
- Accélération des mouvements, qui peuvent poser des problèmes de stabilité pour des infrastructures, en particuliers dans les domaines skiables

Exemple : glacier rocheux de Bellecombe, (station des Deux-Alpes, Isère)

- Ecoulement d'une partie du glacier rocheux

Exemple : glacier rocheux de Bérard, La Condamine-Châtelard (04)



### 3.2. Déstabilisation de parois rocheuses

Les phénomènes d'éroulements rocheux peuvent avoir deux types d'origines différentes liées à l'évolution des zones périglaciaires :

#### Par dégradation du permafrost

Dans les Alpes, le permafrost est présent dans les parois rocheuses à haute altitude (au-dessus de 3000 et 3500m respectivement dans les faces nord et sud). Sa dégradation, liée au changement climatique, est probablement une des plus importantes causes de déclenchement des éboulements et éroulements récents, présents et futurs. L'accélération de cette dégradation, suggérée par les différents scénarii de réchauffement climatique, peut engendrer une augmentation de la fréquence et de la magnitude de ces phénomènes.

Dans les Alpes, les chutes de blocs et éboulements (<0.1 M m<sup>3</sup>) en haute montagne génèrent des risques pour les nombreux alpinistes et randonneurs qui sont présents toute l'année, mais aussi pour les infrastructures tels que les téléphériques, les trains et routes de montagne et les stations de ski.

Les éboulements en masse ou éroulements (> 0.1-1 M m<sup>3</sup>) en haute montagne donnent souvent lieu à des avalanches de roche et glace : l'incorporation de neige et de glace dans les matériaux rocheux peut fluidifier la masse en mouvement et menacer les habitants des vallées à de grandes distances des zones de départ.

#### Exemples :

- Kolka-Karmadon, Ossétie du Nord, 2002
- Mont Rose face Est, Italie, 2005 et 2007

#### Par retrait glaciaire

Le retrait glaciaire engendre une décompression mécanique dans les parois encaissantes des auges glaciaires, d'où le déclenchement possible de mouvements gravitaires d'ampleur et de vitesse variables.

Exemple : éroulement de Schlossplatte, Alp Bäregg (Oberland bernois), 2006-2009.

#### Réf. :

Deline P., Chiarle M., Curtaz M., Kellerer-Pirklbauer A., Lieb G.K., Mayr V., Mortara G., Ravel L. (2011). Chapter 3: Rockfalls. In Schoeneich P. et al. (eds): *Hazards related to permafrost and to permafrost degradation*. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8, p. 67-105.

Deline, P., 2009. Interactions between rock avalanches and glaciers in the Mont Blanc massif during the late Holocene. *Quaternary Science Reviews* 28 (11-12), 1070-1083.

Ravel L., F. Allignol, P. Deline (2010) Rock falls in the Mont-Blanc massif in 2007 and 2008. *Landslides* 7, 493-501.

### 3.3. Laves torrentielles

Les laves torrentielles sont des processus complexes, influencés par de nombreux facteurs.

Dans le contexte glaciaire, des laves torrentielles peuvent être directement déclenchées par des phénomènes décrits plus hauts, notamment les vidanges de lacs.

L'évolution des zones périglaciaires peut également influencer de plusieurs manières l'occurrence de ces phénomènes, tant en magnitude qu'en fréquence. Toutefois l'incidence exacte de ces influences est encore mal connue.

Dans les zones récemment désenglacées, les dépôts superficiels qui sont accumulés dans la marge proglaciaire ou les moraines dont s'est aujourd'hui retiré (pour tout ou partie) le front des glaciers forment des accumulations détritiques non consolidées, non végétalisées



et comportant une grande proportion de matériaux fins. Ils représentent des stocks sédimentaires aisément mobilisables (incisions lors de précipitations orageuses, glissements, ...) et susceptibles d'alimenter des laves torrentielles puissantes et destructrices.

Ex. : déstabilisation de moraine Ghiacciaio del Mulinet dans le Val di Lanzo, Septembre 1993, lave torrentielle sur Forno Alpi Graie (4 km à l'aval).

La dégradation du permafrost est susceptible d'alimenter les bassins torrentiels en matériaux provenant soit des parois rocheuses, soit des glaciers rocheux soit du sol gelé rendu mobilisable par la fonte de la glace interstitielle. (voir Inventaire des bassins torrentiels en Haute-Savoie).

Ex. : lave torrentielle du Durnand (affluent de la Dranse) en amont de Martigny (Valais, Suisse) le 25 juillet 2006.

Réf. :

Zischg A., Curtaz M., Galuppo A., Lang K., Mayr V., Riedl C., Schoeneich P. (2011). Chapter 2: Permafrost and debris-flows. In Schoeneich P. et al. (eds): *Hazards related to permafrost and to permafrost degradation*. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8, p. 29-66.

Chiarle, M., Iannotti, S., Mortara, G., Deline, P., (2007). Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change* 56, 123–136.

Enfin, les réactions en chaîne et les combinaisons de risques (chutes de blocs déclenchant des inondations par vidange de lacs glaciaires ou des avalanches) sont également possibles.





## B. Description de cas

Les retours d'expérience sont des éléments très importants pour capitaliser les connaissances et les savoir-faire dans un domaine où l'expérience reste limitée du fait de la faible occurrence des phénomènes. Certains événements remarquables sont bien documentés, mais de nombreuses autres données sont dispersées dans les services (glaciologues, géographes, RTM, Cemagref-Irstea...).

Ce chapitre décrit sommairement une série de cas qui illustrent tous les types de phénomènes décrits précédemment.

### Vidange de lacs

#### Lac proglaciaire d'Arsine, 1986 :

Ce petit lac, apparu dans les années 50, à la suite du retrait du glacier, s'était développé progressivement au fil des années à l'intérieur de moraines épaisses et bien étanches. En 1985, le volume du lac atteignait 800 000 m<sup>3</sup> et le niveau du lac n'était plus qu'à 2 mètres de la moraine. A la lumière des expériences des lacs péruviens, le débordement de l'eau sur la moraine ne pouvait conduire qu'à une catastrophe : la moraine se serait érodée très rapidement et la vidange du lac aurait déversée 800 000 m<sup>3</sup> d'eau dans la vallée de la Guisane. De nombreuses habitations, du village du Casset jusqu'à Briançon, étaient concernés. Le Laboratoire de Glaciologie de Grenoble avertit le préfet et le service de Restauration des Terrains en Montagne fit conduire des travaux de génie civil au printemps de 1986 afin d'abaisser le niveau du lac et d'écarter le danger.

(d'après synthèse Alpes-Climat-Risques : [http://www.obs.ujf-grenoble.fr/risknat/projets/alpes-climat-risques/pages/commentaires/vincent\\_C1.html](http://www.obs.ujf-grenoble.fr/risknat/projets/alpes-climat-risques/pages/commentaires/vincent_C1.html))

#### Réf. :

Richard, D, and Gay, M (eds.) (2004) *D4: Monitoring of the most representative glaciers: Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions*. Glaciorisk deliverables: Fifth Framework programme, 1-23. [http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/sec6\\_GLACIORISK\\_D4.pdf](http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/sec6_GLACIORISK_D4.pdf)

#### Lac supra-glaciaire de Rochemelon (Haute-Maurienne, Savoie), 2005 :

(d'après la synthèse Alpes-Climat-Risques)

Le lac épiglaciaire de Rochemelon, formé de façon naturelle à la surface du glacier à 3200m d'altitude, n'a cessé de s'accroître de 1980 à 2004, avec la fonte du glacier. Le volume du lac est passé de 150 000-200 000 m<sup>3</sup> en août 2001 à 450 000 m<sup>3</sup> en septembre 2003 puis 650 000 m<sup>3</sup> en août 2004. Jusqu'en 2004, le col rocheux de Novalèse, qui coupe la frontière franco-italienne, constituait un exutoire naturel du lac glaciaire par lequel se déversait l'eau de fonte le long du versant italien, permettant au lac de garder un niveau constant.

Le lac et le glacier de Rochemelon avaient fait l'objet d'une étude dans le cadre du programme européen Glaciorisk (2001-2003). Malheureusement, à la fin du programme financé par l'Europe, les études ont été abandonnées (décembre 2003). Face à l'évolution inquiétante du lac, le LGGE de Grenoble, a décidé de faire une campagne d'observations (bathymétriques et topographiques) le 31 août 2004 afin de faire le point sur la situation.

La poursuite de l'évolution naturelle de ce lac allait conduire au risque d'une vidange brutale, partielle ou totale, susceptible d'affecter à l'aval plusieurs communes françaises ou italiennes. L'épaisseur du col glaciaire qui forme barrage a diminué de 1.3 m/an de juin 2002 à août 2004 avec un maximum en 2003, la revanche entre le col glaciaire et le niveau du lac n'étant plus



que de 1,5 m le 31 août 2004 et de 80 cm le 17 septembre. Deux scénarios de déversements s'avéraient possibles : déversement total côté français par rupture du verrou (ou digue) glaciaire ou déversement partiel côté italien par rupture d'un embâcle d'icebergs qui seraient venus obstruer l'écoulement permanent du lac vers l'Italie par le col rocheux de Novalèse.

Suite à cette campagne, le LGGE a averti les autorités publiques (rapports à la mairie de Bessans et à la préfecture de Savoie) des risques d'une vidange brutale du lac (et des conséquences pour les habitants des vallées en aval) et la nécessité de vidanger, au moins partiellement, le lac de toute urgence.

Une réunion à la préfecture avec le sous préfet, la direction de la protection civile, le service du RTM, le Cemagref, le conseil Général et le LGGE (23 septembre 2004) a permis d'envisager différentes possibilités pour vidanger le lac. L'opposition des autorités italiennes sur l'éventualité d'une ouverture du seuil rocheux (versant italien) a conduit vers une solution du côté glaciaire (français). Ainsi, des opérations de siphonage (conduits sous la responsabilité du RTM de Savoie) ont été effectuées entre octobre et novembre 2004 afin d'abaisser le niveau du lac. Le niveau a été baissé de 5.60 m et le siphon actuel ne permet pas d'aller au delà, à cause de la pression atmosphérique. Finalement, le lac a été vidangé totalement au cours de l'été 2005.

Les études menées sur le lac à l'occasion du programme Glaciorisk ont fait gagner un temps précieux sur les prises de décision au moment le plus critique. La crise a cependant souligné au moins trois points en matière de connaissance :

- l'intérêt, dans ce genre de problématique, et dans la mesure du possible, de se donner des moyens d'investigation à hauteur nécessaire pour appréhender très en amont et avec une précision suffisante pour une traduction en décisions opérationnelles, l'ensemble du phénomène et son évolution, avant d'entrer en crise. Il a en effet fallu compléter en pleine crise certaines investigations que le programme Glaciorisk n'avait pu mener à terme.
- l'intérêt d'assurer, déjà en amont des phénomènes puis pendant la gestion de crise, une vraie continuité entre la connaissance scientifique, son transfert aux autorités et sa traduction en mesures opérationnelles.
- l'intérêt d'une coordination scientifique entre plusieurs laboratoires de recherche sur un sujet de cette nature.

Au-delà, la pérennité de la vidange sous glaciaire semble désormais bien acquise, même en tenant compte des déformations inéluctables tant internes qu'externes du glacier. En effet, celui-ci n'étant désormais a priori plus adhérent au rocher tout le long du sous-écoulement provoqué, la conduite ainsi formée n'a quasiment plus aucune chance de se refermer (température du sol, courant d'air l'été qui agrandit la cavité, poche d'air l'hiver quand la neige bloque les orifices amont et aval). L'avenir nous le dira, mais quand bien même le lac aurait tendance un jour à se reformer, il finirait soit par rouvrir son passage dans la neige obstruant la bédrière, soit l'abaissement naturel du verrou glaciaire qui se poursuit ne lui autoriserait d'année en année qu'une capacité de plus en plus limitée. Le site ne fait donc plus l'objet que d'une surveillance réduite simplement pour s'assurer du bon fonctionnement de la vidange naturelle.

Le coût total de l'opération de vidange depuis 2004, environ 390.000 € TTC (donc non comprises toutes les dépenses d'appui impliquées pendant la gestion de la crise et diverses dépenses annexes), paraît finalement très raisonnable une fois mis en parallèle avec le coût des ouvrages menacés, ne serait-ce que le premier pont sur la RD902, sans même parler de l'inquiétude pour les populations.



Données, méthodes utilisées : Observations de terrain: suivi photographique et topographique (levé au télémètre laser et au GPS) + sondages radar dans le cadre du programme européen Glaciorisk (2001-2003) + mesures bathymétriques en 2005 sondages radar.

Réf. :

Laïly B. *Le lac épiglaciaire de Rochemelon. De la crise 2004 à la vidange contrôlée 2005. Note de synthèse.* RTM, 2006, 79 p

Vincent, C., S. Auclair and E. LeMeur (2010) Outburst flood hazard for glacier-dammed Rochemelon lake (France), 56. *Journal of Glaciology*, 56, (195) 91-100.

Lac Effimero, glacier du Belvédère (Mont Rose, Alpes italiennes), juin 2003 :

Un lac supra-glaciaire s'est développé en septembre 2001 sur le glacier du Belvédère, probablement en conséquence d'une pression d'eau glaciaire accrue ou d'autres processus liés à la crue du glacier. Pendant l'hiver 2001/2002 le bassin du lac s'est agrandi. A la mi-juin 2002 un lac exceptionnellement grand, de presque 150 000 m<sup>2</sup> avec un volume de 3 millions de m<sup>3</sup>, a été observé. Le village de Macugnaga, 2,5 km à l'aval était alors menacé par une possible vidange brutale du lac (par rupture du barrage de glace). Plusieurs scénarios furent identifiés, le plus catastrophique figurant une vidange brutale déclenchée par un écroulement de roche/glace provenant de la falaise qui surplombe le lac. En juillet 2002, le Département Italien de Protection Civile décida une série de mesures d'urgence dont il prit la responsabilité : cartographie du risque d'inondation, restriction d'accès à la zone et fermeture de remontées mécaniques, surveillance visuelle et mesures de différents paramètres, mise en place d'une procédure d'alerte et d'évacuation, installation d'un système de pompage (débit 200 l/s).

Le risque de vidange brutale a été réduit de manière significative par le pompage de l'eau jusqu'à la diminution de moitié du volume du lac. Une vague de froid début juillet 2002 a significativement réduit l'apport d'eau de fonte. Combinée avec le drainage sous-glaciaire naturel et le pompage, elle a aidé à stabiliser puis à diminuer lentement le niveau du lac.

Au printemps 2003, la grande dépression à l'emplacement du lac s'est rapidement remplie de nouveau avec l'eau de fonte, atteignant un volume semblable à celui observé fin juin 2002. Entre le 18 et le 20 juin 2003, une vidange du lac s'est produite, d'un volume total de 2,3 millions m<sup>3</sup>. Si elle n'a pas engendré de dégâts du fait de son volume limité, elle a montré qu'un lac supra-glaciaire sur le glacier du Belvédère a le potentiel pour une inondation catastrophique. Avec un volume de 3 millions de m<sup>3</sup>, on peut s'attendre à un débit maximal de l'ordre de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s en cas de rupture de barrage de glace. Le bassin versant du cours d'eau glaciaire Torrente Pedriola en particulier comporte une quantité de débris mobilisables apparemment suffisante pour le déclenchement d'une lave torrentielle par une inondation glaciaire.

Le lac Effimero et le glacier du Belvédère ont fait l'objet de nombreuses mesures pendant et après la crise de 2002, en particulier dans le cadre du projet Glaciorisk.

Réf. :

Richard, D, and Gay, M (eds.) (2004) *D4: Monitoring of the most representative glaciers: Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions.* Glaciorisk deliverables: Fifth Framework programme, 1-23. [http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/sec6\\_GLACIORISK\\_D4.pdf](http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr/sec6_GLACIORISK_D4.pdf)

Chiarle, M. and G. Mortara (2008) Geomorphological impact of climate change on Alpine glacial and periglacial areas - Examples of processes and description of research needs - *INTERPRAEVENT 2008 – Conference Proceedings*, Vol. 2

Haeberli, W., Käab, A., Paul, F., Chiarle, M., Mortara, G., Mazza, A., Deline, P. & Richardson, S. (2002). A surge-type movement at Ghiacciaio del Belvedere and a developing slope instability in the east face of Monte Rosa, Macugnaga, Italian Alps. *Norsk Geografisk Tidsskrift–Norwegian Journal of Geography* Vol. 56, 104–111. Oslo. ISSN 0029-1951.



### Grindelwaldgletscher (Oberland, canton de Bern, Suisse), mai 2008 :

Dans les années passées, le retrait d'une partie du glacier de Grindelwald (Unterer Grindelwaldgletscher) a provoqué l'apparition d'une large dépression, dans laquelle un lac est apparu pour la première fois en 2006. Le lac est alimenté chaque année par l'eau de fonte et se draine généralement une première fois au printemps/ début d'été. L'énergie thermique stockée dans l'eau du lac, combinée à la pression hydrostatique contribue à la formation durant l'été de chenaux à la base du corps glaciaire, qui finissent par recouper le chenal de drainage basal du glacier. La circulation d'eau augmente rapidement le diamètre du chenal et une grande quantité d'eau est drainée sur une courte période dans la gorge et le torrent Lütschine jusque dans le lac Brienersee. L'élargissement du tunnel sous-glaciaire et la vidange peuvent être progressifs (comme par exemple en juillet 2008) ou beaucoup plus brutal comme en mai 2008, avec 4 vagues successives qui ont causé des inondations à l'aval.

Afin d'éviter des inondations importantes, un tunnel de drainage d'environ 2x4,4 mètres et 2 km de long a été creusé en 2009. Ce tunnel permet de réduire le volume du lac à 120 000 m<sup>3</sup> (comparé au volume de 2,5 Mio m<sup>3</sup> avant les travaux de construction du tunnel). Même en cas de vidange brutal des 120 000 m<sup>3</sup>, il n'y aura pas de dommages aux villages à l'aval. Le tunnel offre non seulement la possibilité de gérer la vidange du lac, mais peut aussi être utilisé comme voie de passage pour transporter des engins sur la zone du glacier, par exemple pour entretenir le chenal de drainage en cas d'obstruction.

Le coût des travaux se monte à 15 millions de francs suisses.

#### Ref. :

Synthèse d'après *Examples of Climate Change - Adaptation and mitigation in geo-hazards risk management in the Alps*, projet AdaptAlp, WP6

([http://www.adaptalp.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=363:topic-state-of-the-art-risk-management&catid=148:work-package-6-risk-management-a-risk-prevention&Itemid=138](http://www.adaptalp.org/index.php?option=com_content&view=article&id=363:topic-state-of-the-art-risk-management&catid=148:work-package-6-risk-management-a-risk-prevention&Itemid=138))

<http://glaciology.ethz.ch/inventar/glaciers/ungrindelwald.html> (en allemand)

[www.gletschersee.ch](http://www.gletschersee.ch) (en allemand, archives des événements et des travaux, nombreuses photos)

### Lac du Gorner (Gornersee, Valais Suisse) :

Le lac de gouttière Gornersee, se forme annuellement au printemps et s'écoule en été. Chaque année 1,5 millions de m<sup>3</sup> d'eau de fonte alimentent le lac. Au cours du siècle passé, les vidanges ont atteint des débits de 100 m<sup>3</sup>/s, causant régulièrement des dégâts dans la vallée de Zermatt. Une station de mesure située à 1 km du front du glacier enregistre les débits toutes les heures depuis 1970.

Ref. : Huss M., Bauder A., Werder M., Funk M., Hock R. Glacier-dammed lake outburst events of Gornersee, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 2007, Vol. 53, N° 181, p. 189-200.

### Glacier et glacier rocheux de Gruben (vallée de Saas, Valais, Suisse) :

Les lacs glaciaires et périglaciaires de la région de Gruben (glacier et glacier rocheux), sont instrumentés pour suivre l'évolution des risques de vidange. Des vidanges du lac n°3 ont eu lieu en 1958, 1968, 1970 et 1971, pour un volume total de 170 000m<sup>3</sup> d'eau ; elles ont mobilisé des sédiments issus des moraines (volume 400 000m<sup>3</sup>), occasionnant de sérieux dommages dans la commune de Saas Balen (2 Millions CH Francs).

Pour les lacs proglaciaires, les moraines barrant les lacs ont été renforcées par injection de béton ; le lac n°3 et le lac thermokarstique (n°5) ont été drainés par un chenal artificiel en 1995. Au total un investissement d'environ 20 millions CHF a été nécessaire pour les actions contre de possibles vidanges brutales de ces lacs.

Source: <http://glaciology.ethz.ch/inventar/download/gruben.pdf>



Réf. : Käab, A. and Haerberli, W. (2001): Evolution of a high mountain thermokarst lake in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 33(4), 385-390. <http://folk.uio.no/kaeab/publications/aaar.pdf>

### Lac Chauvet (Ubaye, 04)

Situé en face Nord du Massif du Chambeyron, le Glacier du Fond de Chauvet est l'unique représentant des « glaciers de vallon » dans les Alpes du sud. Il occupe le fond d'un vallon suspendu entre 2850 et 3160 m. Avec sa superficie de 15 ha, il est le résidu couvert de blocs d'un appareil qui fut au "Petit Age de glace" un des plus importants des Alpes méridionales. Ce glacier est en fait un "glacier noir" entouré d'un "glacier rocheux" qui est un mélange de pierre, de rochers et de terre gelés en permanence. Dans le vallon de Chauvet, les températures permettent la présence d'un sous-sol gelé en permanence (pergélisol) car l'isotherme 0°C est actuellement situé à 2 400 m d'altitude.

Aujourd'hui, le glacier est en recul, libérant une vaste marge pro-glaciaire à faible pente : le Plan de Chauvet. Actuellement le glacier du Fond de Chauvet s'est réfugié dans le fond du vallon entre 2 820m et 3160 m d'altitude.

La première originalité de ce glacier tient dans la vaste étendue remplie de glaces mortes (800 m de long) formant le Plan de Chauvet et le versant Nord de l'Aiguille du Chambeyron. Le second point d'intérêt est constitué par les vidanges, de types crue brutale, qui trouvent leur origine dans les eaux de fusion glaciaire et qui dévastent le vallon de Chauvet jusqu'à l'Ubaye. Périodiquement des poches d'eau se forment au niveau du cryokarst. Celles-ci conjuguées avec la fonte de la neige et les précipitations constituent un lac "supraglaciaire" qui s'évacue par des vidanges glaciaires soudaines, dévastant tout sur son passage, en véritable "chasse d'eau".

Depuis 1930, 6 vidanges se sont produites dont les plus récentes 1997 et 2008. Le 25 juillet 1997 et le 17 juillet 2008, 80000 m<sup>3</sup> d'eau se sont écoulés dans la pente arrachant tout et déposant près de 40000 m<sup>3</sup> de terre, arbres dans l'Ubaye l'obstruant en partie, provoquant un risque d'embâcle et débâcle très dangereux pour les installations situées à l'aval (camping, ponts etc.).

Le glacier de Chauvet a été étudié dans la cadre du projet Glaciorisk. D'autre part, des prospections scientifiques ont commencé en 2009, en partenariat entre l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg et l'Etat, pour connaître la profondeur et la composition du glacier. Elles devraient être poursuivies pour connaître la nature du verrou (roche, glace, pergélisol...), estimer sa solidité, et ainsi estimer une probabilité de rupture. En 2010 une étude de stabilité du barrage du glacier rocheux a été réalisée par une étudiante en master 1 de l'EOST de Strasbourg. En complément, un levé Lidar aérien permettrait de connaître et quantifier les possibilités de dépôt de matériaux le long du chenal de vidange. Ceci permettrait d'en déduire une estimation du volume de matériaux qui pourrait atteindre la confluence avec l'Ubaye, en cas de vidange brutale.

Source : <http://eost.u-strasbg.fr/seolane/ubaye/?voir=debacle>

### Réf. :

Buckel, C. 2010. *Etude de la stabilité du glacier rocheux du Fond de Chauvet*. Mémoire de stage, Master 1 'Sciences de la Terre', Université de Strasbourg, Strasbourg, France, 38p. et annexes. [\[pdf\]](#)

Assier, A., Evin, M. 1995. Cryokarst et vidanges glaciaires au glacier de Chauvet. (Haute-Ubaye, Alpes Françaises du Sud). In: Griselin, M. (Ed): *Actes du 3è Symposium International 'Cavités glaciaires et cryokarst en régions polaires et de haute montagne'*. Annales Littéraires de l'Université de Besançon, Série Géographie, 561(34), pp. 83-87. [\[pdf\]](#)

Evin, M. 1990. Les risques naturels dans un espace montagnard: la Haute-Ubaye. *Revue de Géographie Alpine*, 78(1): 175-192. [\[pdf\]](#)



## Vidange de poches d'eau intraglacière

### Glacier de Tête-Rousse, été 2010

En 1892, la rupture brutale d'une poche d'eau du glacier de Tête Rousse affecta la commune de Saint Gervais (Haute-Savoie, France), causant 175 décès et d'énormes dégâts. Suite à cet événement, une galerie fut creusée afin de drainer la langue du glacier. Cette galerie a été régulièrement entretenue tout au long du 20<sup>e</sup> siècle.

En 2004, le service RTM 74 voulu savoir si cette galerie de surveillance était toujours utile et méritait de continuer à être entretenue. La question fut posée aux glaciologues du LGGE, qui lancèrent une campagne de prospection géophysique en collaboration avec d'autres scientifiques (LTHE, LGIT, 2007-2009). Les mesures radar mirent en évidence une anomalie qui nécessita d'être caractérisée plus précisément. Fin 2009, la méthode RMP (Résonance Magnétique des Protons) révéla une poche d'eau de 60 000 m<sup>3</sup> sous pression. En mars 2010, le LGGE alerta le préfet de la Haute-Savoie et le maire de St Gervais d'un risque possible de vidange brutale.

Après de nouvelles études complémentaires qui confirmèrent le risque, les autorités décidèrent conjointement en juillet de mettre en place un plan de sécurité : (1) des opérations de forage et pompage d'une part pour drainer artificiellement la poche d'eau et (2) dans le même temps un système de protection civile incluant un système d'alerte et un plan d'évacuation géré par le SDIS. La population était régulièrement informée par des réunions ; 3500 personnes étaient concernées. D'après les études historiques de 1892, les gens disposaient de 10 à 30 minutes pour évacuer selon leur lieu d'habitation le long du torrent.

Le service de Protection Civile (SIDPC) coordonna la « cellule de gestion de crise ». Mi-août le système d'alerte était opérationnel. Une information appropriée, précise et régulière à la population (habitants et touristes) évita la panique. Les opérations de pompages commencèrent le 10 août et la pression chuta rapidement ; une nouvelle crainte émergea une fois les premiers milliers de mètres-cubes pompés avec succès, liée au possible effondrement du toit de la cavité. Les scientifiques furent à nouveau sollicités pour donner des réponses en urgence, en modélisant le comportement de la cavité. Dans le même temps la gendarmerie fut mobilisée pour mettre en place un système de surveillance en continu sur le glacier et déclencher l'alerte en cas de besoin.

Finalement, début octobre 2010, 48 000 m<sup>3</sup> d'eau avaient été évacuée et le risque éliminé.

Ainsi en 2010 une éventuelle catastrophe, similaire à celle de 1892, a pu être évitée grâce à (1) une collaboration étroite entre tous les acteurs impliqués dans le cycle de gestion des risques et (2) la mémoire vivante d'un événement ancien. Ce cas peut donc être considéré comme un exemple de bonne pratique de gestion intégrée des risques.

### Réf. :

Patriarca, E., P. Tournaire (2010) Menace sur St Gervais. Ed. Catapac, 105p.

Vincent, C., S. Garambois, E. Thibert, E. Lefebvre, E. LeMeur and D. Six (2010) Origin of the outburst flood from Tête Rousse glacier in 1892 (Mont-Blanc area, France). *Journal of Glaciology*, 56, (198) 688-698.

Gagliardini O., F. Gillet-Chaulet, G. Durand, C. Vincent and P. Duval (2011). Estimating the risk of glacier cavity collapse during artificial drainage: the case of Tête Rousse Glacier. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10505, doi:10.1029/2011GL047536

Legchenko, A., M. Desclotres, C. Vincent, H. Guyard, S. Garambois, K. Chalikakis, and M. Ezerski (2011), 3D magnetic resonance imaging for groundwater, *New J. Phys.*, in press.

Vincent, C., M. Desclotres, S. Garambois, A. Legchenko, H. Guyard, E. Lefebvre, and A. Gilbert (2011), A potential catastrophic subglacial lake outburst flood avoided in the Mont Blanc area, *Geophysical Research Letter*, submitted.



### Minstigerletscher (Valais) 8 août 2008

Par un après-midi de très beau temps, une lave torrentielle de 30 000 m<sup>3</sup> atteint le village de Münster et provoque des dégâts matériels ; elle provient de la rupture brutale d'une poche d'eau de 15 000 m<sup>3</sup> formée dans le glacier de Minstiger.

Source : <http://glaciology.ethz.ch/inventar/news/news20080821.html>

### Glacier de Frébouge (Val Ferret, Italie)

Vidange de poche d'eau intraglacière à deux reprises en juillet 2003 au front du glacier de Frébouge, à l'aval immédiat duquel elle a engendré d'importantes laves torrentielles.

Réf. : Deline P., Chiarle M., Mortara G. (2004): "The July 2003 Frébouge debris flows (Mont Blanc Massif, Valley of Aosta, Italy). Water pocket outburst flood and ice avalanche damming". *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 27, 107-111.

## **Chutes de séracs et de ruptures de glaciers**

### Séracs de Taconnaz (Haute-Savoie)

Les chutes de séracs de Taconnaz menacent une zone habitée dans la vallée de Chamonix. Elles présentent un risque lorsque le manteau neigeux hivernal, à l'aval de la chute, est instable. Elles peuvent alors déclencher une avalanche de neige et de glace et descendre jusqu'en bas de la vallée comme ce fut le cas en 1988, 1999 et en 2006. L'examen des dépôts de l'avalanche a montré, à chacun de ces événements, des proportions très significatives de glace.

Cette chute de séracs, le débit de glace, la fréquence et les volumes de glace mis en jeu, ont été étudiés par le LGGE au cours du projet Glaciorisk. Des études se poursuivent, notamment dans le cadre du projet GlariskAlp, avec le LGGE (mesures photogrammétriques aériennes et au sol, radar au sol et héliporté) et le VAW Zürich (mesures micro-sismiques). En outre, une étude sur le régime thermique du glacier est engagée dans le cadre du programme européen Acqwa (2008-2012).

### Réf. :

Le Meur, E. and C. Vincent (2006) Monitoring of the Taconnaz ice fall (french Alps) using measurements of mass balance, surface velocities and ice cliff position. *Cold Regions Science & Technology*, 46, (1) 1-11.  
Gay et al. (en cours de publi)

### Séracs des Jorasses – Glacier Whymper (Vallée d'Aoste, Italie) :

Le glacier Whymper est un glacier suspendu, situé sur le versant sud des Grandes Jorasses (massif du Mt-Blanc). Des avalanches de neige et de glace, déclenchées par des chutes de glace, menacent le village de Planpincieu et l'activité anthropique du fond de la vallée (Val Ferret). Le sérac des Grandes Jorasses a été étudié à partir de 1996, suite à la formation de grosses crevasses dans la masse de glace suspendue. En 1997, le SLF (Institut de Recherche Neige et Avalanches, Davos) et le VAW - ETH Zurich ont développé le premier concept de sécurité pour le village, selon plusieurs scénarios basés sur le monitoring du glacier et l'étude des phénomènes d'avalanche. Fin juin 1998, la quasi-totalité du glacier Whymper s'est écroulée (environ 150 000 m<sup>3</sup>) et l'avalanche de glace s'arrêta seulement 500m au-dessus de la route de la vallée.



Des études pour comprendre la dynamique d'écroulement des séracs, ont été entamées dans le cadre du WP 5 du projet Interreg IIIB Espace alpin « ClimChAlp » et se poursuivent notamment dans le cadre du projet GlariskAlp.

Le glacier Whympet s'est reformé et a aujourd'hui une topographie similaire à celle de 1998. Les études sont donc d'autant plus importantes pour les gestionnaires du territoire qui peuvent y trouver une base scientifique pour en améliorer la prévision et permettre une meilleure prévention. Les SLF et VAW ont amélioré le concept de sécurité en considérant plusieurs scénarios de volume de chute de glace. Les différents scénarios d'avalanche de glace ont été simulés. Les mesures de sécurité nécessaires ont été définies en fonction du niveau local de risque d'avalanche et du volume potentiel de chute de glace. Le glacier suspendu est suivi en continu par un système comprenant une station totale, des stations GPS, des capteurs sismiques et des observations visuelles. Ce concept de sécurité amélioré est opérationnel depuis 2009. Aucune chute de sérac dangereuse n'a eu lieu depuis.

#### Réf.:

- Margreth, S., J. Faillettaz, M. Funk, M. Vagliasindi, F. Diotri, M. Broccolato (2011) Safety concept for hazards caused by ice avalanches from the Whympet hanging glacier in the Mont Blanc Massif - *Cold Regions Science and Technology* 69, 194–201.
- R Fallourd, F Vernier, Y Yan, E Trouvé, Ph Bolon, J-M Nicolas, F Tupin, O Harant, M Gay, G Vasile, L Moreau, A Walpersdorf, N Cotte, J-L Mugnier, (2010) Alpine glacier 3D displacement derived from ascending and descending TerraSAR-X images on Mont-Blanc test site. EUSAR 2010 Proceedings, Aachen, Germany, 556–559

#### Glacier du Weisshorn, 2005

Le glacier suspendu de la face est du Weisshorn (Valais, Suisse) menace régulièrement le village de Randa. Depuis 1636, 19 cas d'avalanches déclenchées par des chutes de glace ont causé un total de 51 morts. En 1973, le glacier a été l'objet de la première prévision de rupture réussie (Flotron, 1997). En 2005 deux ruptures successives impliquèrent des volumes respectifs de 120 000 m<sup>3</sup> et 400 000 m<sup>3</sup>. La VAW-ETHZ a suivi et mesuré les mouvements de surface et l'activité sismique pendant 25 jours, jusqu'à 3 jours avant la rupture. L'analyse de l'activité sismique a permis d'identifier différents régimes d'évolution du processus de rupture et plusieurs types de signaux précurseurs. Si les difficultés techniques liées à l'instrumentation en milieu glaciaire parviennent à être surmontées, ces résultats sont un premier pas vers un diagnostic en temps-réel des phénomènes de rupture de glace.

Ref.: Faillettaz, J., D. Sornette and M. Funk. 2011. Icequakes coupled with surface displacements for predicting glacier break-off. *J. Glaciol.*, 57(203), 453–460.

### Destabilisation de glacier rocheux

#### Glacier rocheux de Bérard - La Condamine-Châtelard (04)

Le glacier rocheux de Bérard, situé dans le massif de Parpaillon (Alpes du Sud), fait 250 m de long et 100 m de large. A la fin de l'été 2006, la partie frontale s'effondra complètement en quelques semaines. Un volume total d'environ 1,7 millions de m<sup>3</sup> de matériaux (glace et débris rocheux) s'est répandu sur 13 ha sur une pente moins raide 150 m à l'aval et a été repris par une lave torrentielle. Des signes de déstabilisation étaient déjà visibles en 2004, avec la formation d'une crevasse transversale de 80m de long. Il s'agit actuellement du seul cas connu d'écroulement de glacier rocheux dans les Alpes. Il pose donc de nombreuses questions sur les facteurs qui ont favorisé son évolution. Les mesures pour comprendre les causes de la rupture comprennent une étude du régime thermique de la surface du sol, une





étude des déplacements horizontaux et verticaux et une campagne de prospection géophysique (tomographie électrique et sismique).

Ce cas est à rapprocher du cas du Cerro Las Tortolas (Andes, Chili) : l'écroulement du glacier rocheux en novembre 2006 a couvert 0.12 km<sup>2</sup>, et une part importante des matériaux a été canalisée dans une gorge générant un flux hyper-concentré de neige, glace, eau et débris rocheux sur une distance de 3 km.

Dans les 2 cas, la topographie convexe du terrain a pu favoriser une déstabilisation progressive du glacier rocheux ; le déclenchement des mouvements peut coïncider avec un apport massif d'eau de fonte et de précipitations.

Réf. :

Krysiecki, J.-M. 2008. *La rupture du glacier rocher du Bérard (Massif du Parapailon, Alpes-de-Haute-Provence, 04) : un cas de dégradation du pergélisol de montagne ?*. Mémoire de Master 2 'Evaluation et Gestion de l'Environnement et des Paysages de Montagne', Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 139p. [\[pdf\]](#)

Krysiecki J.-M. (2009). Rupture du glacier rocheux du Bérard (Alpes de Haute Provence) : analyses géomorphologiques et premiers résultats du suivi mis en place sur le site. *Environnements Périglaciaires*, n°16, 65-78.

Schoeneich P., Dall'Amico M., Deline P., Zischg A., eds (2011). *Hazards related to permafrost and to permafrost degradation*. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. On-line publication ISBN 978-2-903095-59-8. Downloadable on: [www.permanet-alpinespace.eu](http://www.permanet-alpinespace.eu)

### Glacier rocheux de Bellecombe, station des Deux-Alpes (Isère)

La stabilité du glacier rocheux de Bellecombe représente un enjeu économique important puisqu'elle concerne des installations du domaine skiable des Deux-Alpes (pylônes du télésiège et gare d'arrivée). Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, le risque que peut faire courir l'évolution du permafrost n'est pas négligeable. A titre préventif, lors de travaux sur les installations en 2005, un certain volume de permafrost a été remplacé par du tout-venant. La totalité de la glace n'a cependant pas été enlevée et son suivi est donc essentiel vis-à-vis des infrastructures implantées à sa surface.

Les méthodes de prospection géophysique utilisées sur ce site depuis 2007 ont pour but de définir les limites du glacier rocheux. Les méthodes de tomographie électrique et sismique permettent de détecter le glacier rocheux mais ne permettent pas une estimation précise de l'épaisseur englacée. Des études menées en 2010-2011 ont montré que les méthodes géoradar sont efficaces, sous certaines conditions, pour déterminer la structure interne du glacier rocheux jusqu'au substratum. Les méthodes utilisant les ondes de surface (sources actives ou passives) ont un intérêt pour la description de la couche active, couche la plus facilement mobilisable en cas d'évolution.

Réf. : Cadet H., O. LeRoux, L. Lorier, P. Schoeneich, J.M. Krysiecki (2011) Emploi de méthodes géophysiques calibrées par des forages pour l'étude et le suivi du permafrost sur la station des Deux Alpes – Rapport de synthèse, Projet PGRN 2010, 24p.

## Ecroulement rocheux

### Kolka-Karmadon, Ossétie du Nord, 2002

Le 20 septembre 2002, une avalanche de roche et glace, suivie d'une lave torrentielle, tue plus de 150 personnes dans la vallée de Genaldon/Kardamon, massif du Kazbek (Ossétie du Nord, Caucase Russe). Initié sur les flancs du Dzhimarai-Khokh (4780m) le phénomène concerne une instabilité de masse rocheuse dans une zone de permafrost mais aussi un glacier polythermal suspendu. Le volume total déplacé s'élève à environ 100 Mo m<sup>3</sup> et comprend de



la roche, de la glace, de la neige et de l'eau. La vitesse d'écoulement incroyablement rapide (jusqu'à 300 km/h) et la distance parcourue particulièrement longue (18km + 15 km de lave torrentielle) en font un cas extraordinaire de risque d'origine glaciaire et périglaciaire impliquant de multiples facteurs.

Réf. : Haeberli W., Huggel C., Kääb A., Zraggen-Oswald S., Polkvoj A., Galushkin I., Zotikov I., Osokin, N. (2004). The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. *Journal of Glaciology*, 50: 533-546.

#### Écroulement de Schlossplatte, Alp Bäregg (Oberland bernois), 2006-2009

Depuis 1860, la langue du glacier de Grindelwald s'est retirée de 1,6 km et le fond de la vallée s'en est trouvé enfoncé de 200m. L'absence de pression de glace sur les parois rocheuses encaissantes a déclenché le démantèlement de 2 Mio m<sup>3</sup> de roche, qui depuis 2006 donne lieu à de spectaculaires éboulements/écroulements (« éboulements de l'Eiger »). Ces écroulements successifs ont totalement fait disparaître en 2009 le sentier menant à la cabane Bäregg (Bäregghütte).

<http://www.gletschersee.ch/index.cfm/treeID/21>

#### Mont Rose (Alpes italiennes), 2005 et 2007

La face Est du Mont Rose, qui s'étend de 2200 m à plus de 4600 m d'altitude, a fait l'objet de deux avalanches spectaculaires de neige et glace en 2005 et 2007.

L'événement de 2005 est une avalanche de glace (1.1 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), qui est partie d'un raide glacier se terminant à 3500 m et a atteint le pied de la face où un lac s'était formé en 2002 et avait été drainé en 2003 (voir cas du Lac Effimero). Si le lac avait toujours existé, l'avalanche aurait pu générer une vague avec des effets catastrophiques pour la commune de Macugnaga en aval. L'avalanche c'est produite de nuit, ce qui a probablement évité de toucher des touristes qui passent souvent dans la journée sur l'alpage qui a été touché.

L'événement de 2007 est une avalanche rocheuse provenant de la paroi à environ 4 000 m d'altitude, à proximité du sommet de la face est du Mt Rose. Environ 0.3 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de roche ont atteint le pied de la pente, à nouveau à l'emplacement du lac supraglaciaire disparu.

Réf.: Huggel, C., N. Salzmann, S. Allen, J. Caplan-auerbach, L. Fischer, W. Haeberli, C. Larsen, D. Schneider and R. Wessels (2010) Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability - *Phil. Trans. R. Soc* Vol. 368, issue 1919, 2435-2459



## C. Les projets récents sur la thématique, inventaires et réseaux existants

### Glaciorisk (2001-2003)

#### Suivi et prévention de futurs désastres glaciaires - Survey and prevention of extreme glaciological hazards

Programme européen FP5 - 5ème PCRD

Le projet de recherche GLACIORISK a duré trois ans, de 2001 à 2003 et a étudié les catastrophes d'origine glaciaire en Europe. Les objectifs spécifiques du projet étaient d'identifier, de suivre et de prévenir les phénomènes catastrophiques d'origine glaciaire afin de mieux évaluer les risques potentiels dans un contexte climatique et socioéconomique en évolution. Pour ce faire, le projet a fédéré et intégré les travaux d'experts de l'ensemble de l'Arc alpin. Plusieurs modules d'activités ont été élaborés, chacun se déroulant à l'intérieur de divers pays et institutions, par exemple le Cemagref (France), l'Institut fédéral suisse de technologie de Zurich, l'Université de Salzbourg (Autriche), la Societa Meteorologica Sualpina (Italie). Les modules d'activités du projet comprenaient la plupart des étapes conduisant à l'adaptation aux changements climatiques, depuis la collecte de données jusqu'à l'analyse économique et les aides à la décision.

Dans un premier temps, le projet a fourni des informations sur les phénomènes glaciaires à risque grâce à une base de données donnant accès aux expériences passées dans l'ensemble des régions concernées. L'étude a été axée sur les phénomènes liés aux crues de rupture de lacs glaciaires (GLOF), à la stabilité des glaciers, aux avalanches liées aux chutes de sérac et au changement dans la longueur des glaciers. Le projet visait à sensibiliser l'opinion aux risques glaciaires en diffusant des informations au grand public et aux utilisateurs finaux. Outre la réalisation d'une vidéo sur les risques glaciaires, différents atlas de glaciers à risques ont été publiés pour plusieurs pays.

Les divers risques glaciaires ont également été étudiés par les scientifiques pour permettre de mieux comprendre les phénomènes et d'améliorer la capacité de prévision et d'atténuation de ces risques. Un bilan des connaissances préexistantes à l'échelle mondiale et des expériences de terrain dans les Alpes a été réalisé. Des simulations numériques des glaciers et des risques ont été effectuées pour accroître notre compréhension des conditions de déclenchement, de l'ampleur et de la fréquence des phénomènes, étudier la sensibilité aux changements climatiques et augmenter la capacité de prévision des phénomènes. Le but ultime de cette opération était d'effectuer un zonage des risques et d'établir des cartes de risques. Cependant, les divers processus déterminant l'incidence de ces risques, notamment les systèmes hydrologiques sous-glaciaires, étant aujourd'hui mal connus, l'équipe de recherche n'a pas été en mesure de tracer des cartes de risques. Néanmoins, le projet a débouché sur des lignes directrices pour l'évaluation des risques. Ces lignes directrices, qui portent sur l'élaboration de scénarios de risques, d'estimations des dommages potentiels et d'un inventaire des mesures de précaution, sont ensuite soumises aux parties prenantes dans un atelier consacré à l'évaluation des risques. Un deuxième atelier est ensuite organisé avec des décideurs et des spécialistes des risques pour évaluer les mesures préventives.

Un cadre d'analyse des risques a été mis au point à l'occasion de ce processus pour rendre ces informations aussi exploitables que possibles par les décideurs et pour permettre l'évaluation des mesures tout en intégrant divers scénarios et la perception des risques par la population concernée. Sur la base du rapport coût-efficacité, les résultats prennent en compte les données sur les changements climatiques et la perception du risque par le public, d'où la possibilité pour les décideurs de fixer les priorités en conséquence. Pour le canton du Valais, Suisse, une



planification des mesures de protection a été établie pour les 10 glaciers présentant les plus grands risques et différentes mesures de protection ont été envisagées sous l'angle de leur rapport coûts/efficacité : il ressort de l'analyse que l'application de stratégies de surveillance et de prévention est plus rentable que la construction d'infrastructures coûteuses telles que des galeries de drainage et des dispositifs de protection des routes et des voies ferrées.

Ref.: Richard, D. and M. Gay (2003), GLACIORISK Final report - Survey and Prevention of Extreme Glaciological Hazards in European Mountainous Regions. Téléchargeable sur : <http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>

La base de données sur les phénomènes glaciaires, Gridabase, est toujours en ligne mais n'a pas été mise à jour depuis la fin du projet.

<http://www.nimbus.it/glaciorisk/gridabasemainmenu.asp>

Détail des partenaires, des résultats et livrables dans la base projets Risknat :

<http://www.risknat.org/baseprojets/ficheprojet.php?num=4&name=GLACIORISK>

## **Le Haut-Rhône et son bassin versant montagneux : pour une gestion intégrée de territoires transfrontaliers (2002-2007)**

INTERREG III A France-Suisse « Haut Rhône »

Le volet 1 « Changement climatique, paysages et sociétés humaines » comprend notamment un rapport « Aléas naturels en zone de pergélisol et détection des risques, Alpes valaisannes, Suisse ; Le glacier rocheux du Ritigraben, Mattertal ; Le versant périglaciaire de Tsarmin, Val d'Arolla »

Partenaires : Canton du Valais, Institut de la Montagne

Ref.: Dupont C. et Pigeon P., 2007. Le Haut-Rhône et son bassin versant montagneux : pour une gestion intégrée de territoires transfrontaliers. Rapport de synthèse, projet Interreg IIIA France-Suisse. Institut de la Montagne, Le Bourget-du-Lac (Savoie, France), 120 p. <http://www.institut-montagne.org/Le-Haut-Rhone-et-son-bassin>

## **PermadataROC (2006-2008)**

**Elaboration d'une base de données et expérimentation de méthodes de mesure des mouvements gravitaires et des régimes thermiques des parois rocheuses à permafrost en haute montagne**

Projet Interreg IIIA Alcotra n° 196, dont les principaux résultats sont les suivants :

- Echange de compétences et de connaissances entre techniciens, chercheurs et responsables des régions concernées sur la thématique de la dégradation du permafrost de parois et des mouvements gravitaires associés ; mise en place d'un réseau d'observateurs pour l'inventaire des éboulements et écoulement en haute montagne (massif du Mont Blanc) ;
- Installation d'instruments de mesure du régime thermique dans les parois rocheuses de haute altitude et mise au point de méthodes de traitement des données ;
- Utilisation de méthodes et équipements innovants (laserscan, photogrammétrie, détection acoustique) pour le suivi de l'instabilité des parois rocheuses de haute altitude difficilement accessibles.

Site du projet : <http://www.fondazionemontagnasicura.org/multimedia/permadataroc/>

Résumé des partenaires, des résultats et livrables dans la base projets Risknat :

<http://www.risknat.org/baseprojets/ficheprojet.php?num=24&name=PERMAdataROC>



## PermaNET (2008-2011)

### Longterm Permafrost Monitoring network

Interreg IV (European Territorial Cooperation) Espace Alpin 2007-2013

<http://www.permanet-alpinspace.eu/home.html>

Principaux résultats :

(1) Réseau de surveillance du permafrost dans l'Espace Alpin

PermaNET rassemble les données des sites les plus importants de surveillance du permafrost et les compile dans un réseau standardisé. Sur les sites clé, de nouvelles stations de surveillance ont été installées et instrumentées.

(2) Distribution du permafrost dans les Alpes

Un des objectifs principaux de PermaNET est de fournir une carte de distribution du permafrost des Alpes. Cette carte est constituée de deux jeux de données combinés : l'inventaire des preuves de permafrost et une carte modélisée de la distribution du permafrost.

(3) Aléas naturels liés au permafrost

Le projet évalue plusieurs méthodes de détection et de surveillance des mouvements de terrain liés au permafrost et fait des recommandations pour la gestion des risques dans les zones affectées par l'actuelle dégradation du permafrost. (WP6, voir détails ci-dessous)

(4) Permafrost et changement climatique

La haute altitude et les régions de haute altitude sont généralement reconnues comme étant particulièrement sensibles aux effets du changement climatique. Une large proportion du permafrost dans les Alpes européennes, par exemple, est au point de fusion ou proche de celui-ci et est donc très sensible au réchauffement atmosphérique.

(5) Permafrost et gestion de la ressource en eau

Il y a toujours peu de connaissance sur l'impact du changement climatique sur le permafrost alpin et comment la fonte accrue de la glace du permafrost modifie les caractéristiques des écoulements et la qualité de l'eau des sources alpines.

Réf. : Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., (2011): PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesis report. INTERPRAEVENT Journal series 1, Report 3. Klagenfurt.

Le Work Package 6 a traité des relations entre le permafrost et les aléas naturels dans les conditions de changement climatique. Un état de l'art a été réalisé sur les aléas naturels liés au permafrost et la dégradation du permafrost. Les 4 chapitres traitent (1) des glaciers rocheux, (2) des laves torrentielles, (3) des écroulements rocheux et (4) des mouvements superficiels du sol et leurs dégâts aux infrastructures. Chaque chapitre résume les connaissances actuelles sur ces processus et leur relation avec le changement climatique, et est illustré par plusieurs cas d'étude récents dans les Alpes. Ces cas d'études montrent la grande variété d'effets sur les infrastructures dans les zones de haute montagne.

Les processus liés au permafrost et à sa dégradation n'influencent pas les aléas sur de larges zones. Cependant, dans certains cas ils peuvent avoir une influence remarquable sur les situations de risques. La première étape dans chaque activité de zonage est de se référer à la carte de distribution du permafrost. Si celle-ci montre une possible présence de permafrost sur le site étudié, il est recommandé d'utiliser les méthodes de détection du permafrost telles que décrites dans le guide PermaNET. Si le permafrost est avéré, des méthodes de surveillance spéciales soutiennent l'analyse des processus. Afin d'évaluer les approches opérationnelles pour la détection et la surveillance des mouvements de terrain et des températures du sol dans les zones de permafrost, 6 fiches de méthode ont été réalisées (dGPS, GPR, DInSAR, ERT,



TLS et photogrammétrie terrestre). Chaque fiche résume les principes de base de la méthode et liste les applications possibles et les principaux résultats, possibilités et limites.

Les 4 chapitres d'état de l'art ainsi que les 6 fiches méthodes sont téléchargeables sur le site du projet : <http://www.permanet-alpinespace.eu/products.html>

## GlariskAlp (2010-2013)

### Risques glaciaires dans les alpes occidentales

Programme de Coopération Territoriale Européenne (Alcotra France/Italie) 2007/2013 - Mesure 2.2 - Prévention des risques naturels.

<http://www.fondazionemontagnasicura.org/fr/glariskalp.aspx>

Le projet GlaRiskAlp a été créé pour donner des réponses pratiques et théoriques aux risques causés par le retrait des glaciers dans les Alpes occidentales lié au changement climatique. Ce retrait, commencé il y a un siècle et qui s'est accéléré, lors des deux dernières décennies, accroît le nombre, l'intensité et la fréquence de certains aléas naturels des zones glaciaires et périglaciaires, qui menacent des populations et des biens dont la vulnérabilité a beaucoup augmenté avec le développement (urbanisation, tourisme, transports...) de cette région de montagne très anthropisée.

Afin de développer un aménagement du territoire efficace et pour améliorer la gestion des risques dans les zones alpines, il est nécessaire que ces phénomènes soient mieux pris en compte, tout en améliorant nos connaissances. Le projet GlaRiskAlp s'occupe de ces dynamiques en réunissant différentes organismes français et italiens qui s'occupent d'étudier la montagne et ses aléas (7 partenaires : Université de Savoie - Laboratoire LISTIC, CNRS - Laboratoires EDYTEM, GIPSA-Lab et LGGE, Fondation Montagne Sûre, ARPA Vallée d'Aoste, CNR-IRPI Torino).

Pour mettre en œuvre les mesures de prévention et protection nécessaires, les autorités gestionnaires des risques ont besoin d'un inventaire actualisé des aléas récents d'origine glaciaire, d'une meilleure compréhension des processus actuels, et de scénarios d'évolution à 5 et 10 ans des aléas actuels et potentiels.

L'objectif du projet est de traiter des deux aspects complémentaires suivants :

- Reconnaissance, à l'échelle des Alpes occidentales (Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Piémont, Vallée d'Aoste), (i) des types d'aléas engendrés par le retrait glaciaire, (ii) des secteurs récemment désenglacés et (iii) des aléas actuels et potentiels caractérisant ceux-ci.

Les résultats attendus comprendront entre autre :

- 1) Inventaire des glaciers actuels et récents
  - 2) Typologie des aléas (dans le prolongement de Glaciorisk 2002)
  - 3) Reconnaissance des secteurs favorables aux aléas
- Etudes détaillées sur des sites-pilotes pour mieux comprendre des processus encore mal connus et proposer des parades : suivi de la dynamique des chutes de séracs (sites-pilotes de Taconnaz et des Grandes Jorasses, massif du Mont Blanc), des poches d'eau intra-glaciaires (site-pilote de Tête Rousse, massif du Mont Blanc), des glaciers (site-pilote d'Argentière, massif du Mont Blanc) et des secteurs récemment désenglacés (sites-pilotes dans le massif du Mont Blanc, le haut Val de Rhêmes et le Val d'Orco).



## Inventaires et réseaux existants

Les questions qui se posent autour de l'observation des phénomènes glaciaires et périglaciaires (inventaires, cartographie) sont nombreuses : Faut-il tout observer ? Sinon quels critères définir ? Quelles méthodes de détection préférer ? Comment assurer l'exhaustivité des inventaires ? Leur mise à jour ? Leur pérennité.

Les exemples recensés ci-dessous peuvent permettre d'apporter des éléments de réponse.

### Pergélisol en Suisse

La Suisse a participé aux projets PACE (Permafrost and Climate in Europe, 1997-2000) et Glaciorisk, mais a également constitué depuis 2002 le réseau Pergélisol Monitoring Switzerland (PERMOS) dont la mission est d'assurer un suivi scientifique à long terme de l'évolution du pergélisol dans les Alpes suisses. Les activités du projet PERMOS sont notamment la collecte de données concernant la couverture neigeuse et la température du sol, et le forage de puits dans les zones de permafrost. En outre, des photos aériennes complètent les données de terrain, de façon à obtenir une vue plus exhaustive des changements spatiaux.

<http://www.permos.ch>

S'appuyant sur ces efforts, l'Office Fédéral de l'Environnement suisse (OFEV) a récemment dressé une carte du pergélisol en Suisse, laquelle a été mise à la disposition des cantons afin que ces informations soient intégrées dans les cartes de risques et les activités d'aménagement du territoire : <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/06140/06149/index.html?lang=fr>.

### Pergélisol en France

Le réseau PermaFRANCE représente la contribution française au réseau alpin PermaNET ainsi qu'au réseau mondial GTN-P, le Global Terrestrial Network for Permafrost. L'objectif du réseau PermaFRANCE est l'observation et le suivi non seulement du permafrost, mais à terme aussi du gel saisonnier et des cycles gel/dégel, de façon à appréhender l'ensemble des processus liés au gel. Le premier rapport du réseau est paru en juin 2010.

Réf. : Schoeneich, P., Bodin, X., Krysiecki, J.M., Deline, P., et L. Ravel (2010) *Permafrost in France - Report n°1 - PermaFrance Network*, ed. Institut de Géographie Alpine, Grenoble.

### Bassins torrentiels en Haute-Savoie

Dans le cadre du projet PermaNET, un inventaire systématique des bassins torrentiels affectés par des aléas liés au permafrost a été réalisé en 2008 sur le département de la Haute-Savoie, en collaboration avec le service RTM

L'étude a consisté :

- d'une part à inventorier tous les événements ou la présence de glace a été observée ou suspectée dans la zone de formation de la lave torrentielle ;
- d'autre part à développer une approche à plusieurs niveaux : tous les bassins versants situés dans la zone potentielle de permafrost, selon la carte de distribution du permafrost, ont été sélectionnés. La présence de dépôts superficiels montrant des caractéristiques d'écoulement a ensuite été étudiée par orthophotos. Seuls les bassins montrant un potentiel de débris significatif dans la ceinture de permafrost ont été finalement retenus et ont donné lieu à une cartographie géomorphologique par orthophoto.

Ainsi, 10 bassins versants avec des aléas potentiels liés au permafrost ont été identifiés et classés en 3 classes d'aléa.



Réf. : Garcia, S., 2008. *Rapport d'étude sur les risques liés à la dégradation du pergélisol dans les bassins torrentiels du département de la Haute-Savoie*. Rapport de stage, Institut de Géographie Alpine, Université de Grenoble + Service RTM Haute-Savoie.

### **Inventaire des glaciers rocheux des Hautes-Alpes**

Réf. : Bouvet, P., R. Charvet et A. Riguidel (2011) *Les glaciers-rocheux dans les Hautes-Alpes : inventaire, cartographie et risques associés* Rapport RTM 05- Octobre 2011.

### **Réseau d'observation des éboulements/écroulements du massif du Mt Blanc**

Opérationnel depuis 2007, le réseau, porté par des scientifiques du laboratoire Edytem, comprend une trentaine de guides de haute montagne français et italiens, ainsi que des gardiens de refuge et des équipes de secours en montagne. En complément, des posters pédagogiques et un site web invite les alpinistes à envoyer leurs propres observations.  
<http://edytem.univ-savoie.fr/eboulements>

### **Inventaire des glaciers des Alpes occidentales**

Produit issu du projet Glaciorisk, en cours (à compléter)

Réalisation et mise à jour d'un inventaire de l'état actuel des glaciers des Alpes français et piémontais, qui sera lié au cadastre valdôtain ;

Réalisation d'une cartographie des zones désenglacées (du Petite Age de Glace à 1985) et récemment désenglacées (de 1985 à 2010), avec distinction entre les zones rocheuses et les formations de surface.

### **Inventaire des glaciers dangereux Suisse**

Le canton du Valais, qui compte 676 glaciers couvrant presque 15% du territoire, a mandaté en 1998 l'institut de génie hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) du polytechnicum de Zürich (ETHZ) d'établir un inventaire des glaciers dangereux.

Dans le cadre du projet Glaciorisk, cet inventaire a été étendu à l'ensemble de la Suisse.

Réf. : Raymond, M., M. Wegman und M. Funk (2003) Inventär gefährlich Gletcher in der Schweiz. VAW Mitteilungen n°182, Zürich.

Depuis, cet inventaire est régulièrement mis à jour ; en particulier en Valais, des survols par hélicoptère des glaciers dangereux sont effectués chaque année, complétés par des missions de terrain si besoin.

L'inventaire est désormais accessible en ligne : <http://glaciology.ethz.ch/inventar>. Il décrit chaque glacier suisse pour lesquels des événements ayant causé des dégâts ont été recensés ou pour lesquels un risque potentiel a été reconnu : il comporte actuellement au total 84 glaciers, parmi lesquels 53 sont identifiés comme pouvant potentiellement produire des dégâts dans les 10 à 20 prochaines années.

La synthèse des événements passés montre que depuis 1595, au moins 440 personnes sont mortes dans 21 catastrophes glaciaires recensées (un événement tous les 20 ans, ou un mort/an. Au moins 141 événements ont causé des dégâts matériels : 40 événements ayant coupé une voie importante de communication, 35 ayant touché une ou plusieurs maisons d'habitation permanente, 72 ayant provoqué des dégâts matériels à diverses installations (prises d'eaux, chemins de fer, bâtiments et terrains agricoles, etc.). Dans chaque cas, les événements connus sont documentés avec la littérature disponible, des cartes et des photos.





En plus de la classification des glaciers selon leur potentiel de risque et des événements passés, le site web fourni des informations sur les types d'aléas glaciaires et sur la gestion des risques.

<http://glaciology.ethz.ch/inventar/index.html>

### **Cadastre des glaciers – Région Autonome Vallée d'Aoste**

La Base de données est totalement dédiée aux "Glaciers Valdotains" avec des informations sur l'extension actuelle et historique des appareils glaciaires, des données de base, des signalements des événements liés à l'environnement glaciaire, des données spécifiques pour certains types de glaciers et une section photographique divulgatrice.

Le développement de la base de données des glaciers est un projet de plusieurs années lancé par le Département du Territoire, Environnement et Ressources Hydriques et par le Département du Système Informatif ; il est géré activement par la Fondation Montagne Sûre avec la consultation scientifique et méthodologique de l'Université de Milan - Département Sciences de la Terre "Ardito Desio" - Group de Recherche "Glaciologie" (curateur d'autres « Banche dati regionali »), dans l'optique de réaliser un produit correspondant aux standards nationaux et internationaux et tout particulièrement à ceux du "World Glaciers Inventory". Donc, le cadastre des glaciers est aussi bien un instrument de divulgation, en syntonie avec les critères scientifiques internationaux, qu'un instrument de connaissance du territoire, à travers lequel est possible, par exemple, d'évaluer les pertes d'extensions et des volumes des zones glaciaires et de conséquence sur les pertes en ressource hydrique.

L'inventaire est mis à jour grâce à un survol par hélicoptère chaque année des glaciers surveillés. Le réseau des guides de haute montagne de la Vallée d'Aoste est également sollicité pour alimenter les observations de terrain.

<http://www.fondazionemontagnasicura.org/fr/cadastre-glaciers-vallee-d-aoste.aspx>

### **GAPHAZ – Working Group on Glacier and Permafrost Hazards in Mountains**

GAPHAZ est un groupe de travail international, existant depuis 2004, qui regroupe des scientifiques de l'International Association of Cryospheric Sciences (IACS) et de l'International Permafrost Association (IPA) sur le thème des aléas glaciaires et périglaciaires en haute montagne.

Ses objectifs sont :

- Améliorer la communication scientifique internationale sur les aléas liés aux glaciers et au permafrost
- Réaliser des états de l'art sur les aléas liés aux glaciers et au permafrost en haute montagne
- Travailler à un meilleur transfert d'information et une meilleure communication entre les scientifiques et les acteurs locaux
- Etablir des recommandations pour les agences nationales et internationales, les autorités responsables de la gestion des risques et les bureaux privés
- Agir comme point central d'information pour les médias internationaux durant les crises importantes.

<http://www.mn.uio.no/geo/english/research/groups/remotesensing/projects/gaphaz/index.html>

Une base de données des phénomènes mondiaux est en ligne sur le site (pas à jour)



## D. Eléments de réflexion sur la gestion préventive

La « gestion préventive » des risques d'origine glaciaire et périglaciaire nécessite de pouvoir mettre en œuvre les principes de prévention des risques et de gestion de crise. Forts d'une collaboration déjà éprouvée, les pouvoirs publics (Etat, collectivités territoriales, opérateurs) et la communauté scientifique et technique ont l'opportunité d'élaborer, en mode projet, une doctrine liant leurs objectifs de sauvegarde des populations et d'amélioration de la connaissance du risque d'origine glaciaire et périglaciaire et de ses effets.

Les 7 piliers de la prévention des risques constituent un point d'entrée dans la mise en place d'une méthodologie de réflexion, si possible, en réseau avec les ministères chargés des risques et des crises.

### 1) Connaissance des phénomènes, de l'aléa et du risque

Mieux connaître les phénomènes et les mécanismes mis en jeu à partir de la recherche et de l'analyse des événements passés (archives, études, enquêtes, retours d'expérience...).

- inventorer les sites à risque et les communes concernés
- décrire le risque et ses conséquences prévisibles pour les personnes, les biens et l'environnement
- établir la chronologie des événements et des crises connus
- exposer les mesures de prévention et de sauvegarde prévues pour limiter les effets du risque

#### Points de discussion :

##### Détection

- ✓ En est-on capable ? Si la réponse est évidemment oui pour les lacs, et dans une moindre mesure pour les ruptures de glaciers, il n'en va pas de même pour les poches d'eau. Les chutes de séracs, comme les écroulements rocheux, sont également plus complexes à anticiper.
- ✓ Est-elle suffisante ? La question reste à trancher pour les lacs : est-on sûr avec les dispositions actuelles de ne pas passer un jour à côté de l'apparition et de l'agrandissement d'un lac, dans un contexte pouvant laisser imaginer une multiplication de ces manifestations ? Qu'en est-il pour les autres manifestations, chutes de séracs, évolutions de la longueur des glaciers, poches (pour autant que la question se pose...) et phénomènes périglaciaires ?
- ✓ Est-elle suffisamment précoce ? D'abord que signifie pour les différentes formes de phénomènes « suffisamment précoce » ? Il sera sans doute nécessaire, pour répondre à cette question, d'avoir précisé les mesures (de prévention, de protection) qu'il est possible ou qu'il serait souhaitable de prendre en fonction du type de phénomène, et les délais en découlant.
- ✓ Quelles sont les techniques mobilisables pour la détection ? Lesquelles convient-il d'utiliser en fonction du type de phénomène ? Comment convient-il de les combiner le cas échéant ? Lesquelles conviendrait-il de développer davantage ?
- ✓ Faut-il systématiser l'observation ? Sur quels glaciers, quelles zones périglaciaires ? Avec quels protocoles ? Avec quelle organisation ?

##### Analyse du risque



- ✓ Pour la compréhension des processus, les compétences sont-elles toutes bien identifiées (glaciologie et dynamique glaciaire, géologie / géomorphologie et mouvements gravitaires / évolution du permafrost) ?
- ✓ Ou en est la capacité de modélisation ?
- ✓ Beaucoup de questions encore du domaine de la recherche : comment les intégrer dans l'analyse de risque ?

## 2) Information préventive

Répondre à l'exigence légale d'information du citoyen de développer une culture par le biais des pouvoirs publics et de leurs partenaires.

- mobiliser les niveaux de diffusion des supports d'information préventive : préfet de département, maire, vendeur ou bailleur de biens immobiliers
- rendre le citoyen acteur de la prévention et de sa sécurité (acquisition de la connaissance du risque et application des consignes de comportement)
- ...

## 3) Prise en compte des risques dans l'aménagement du territoire et l'urbanisme

Réduire l'exposition au risque ainsi que la vulnérabilité des biens et des personnes en inscrivant le risque dans les documents d'urbanisme (PPRN)

Points de discussion :

- ✓ A-t-on les moyens de tenir compte de ce genre de situations dans la réalisation des zonages réglementaires ?
- ✓ De quels types d'étude faut-il disposer pour cela ?
- ✓ A quel moment faut-il les engager pour en disposer le moment venu ?

## 4) Suivi et surveillance - Vigilance

Anticiper le phénomène et pouvoir alerter les populations à temps par l'utilisation de dispositifs d'analyses et de mesures intégrés dans un système d'alerte de la population.

- anticiper un événement
- évaluer son intensité
- déterminer les moyens d'alerte des autorités et d'information de la population
- ...

Points de discussion :

- ✓ De quelles techniques et méthodes de suivi dispose-t-on aujourd'hui pour suivre l'évolution de phénomènes détectés, en fonction du type de phénomène ?
- ✓ Quelles informations ces techniques et méthodes fournissent-elles ? Sont-elles suffisantes pour permettre de réagir en cas d'aggravation du phénomène (risque imminent) ?
- ✓ Peut-on élaborer des « protocoles de suivi types » adaptés aux grands types de phénomènes (et à adapter bien sûr à chaque cas particulier) ?



- ✓ Comment s'organise le suivi des situations détectées à l'heure actuelle, avec quels acteurs et quelles interactions ? Est-ce satisfaisant ? Que faudrait-il améliorer ?
- ✓ Quelles sont les pistes de recherche qui paraissent prometteuses, et à quel terme, pour permettre un meilleur suivi (ou un suivi facilité) des phénomènes glaciaires en question ?

## 5) La réduction de la vulnérabilité

Organiser la coordination entre les pouvoirs publics concernés par le risque et la communauté scientifique et technique pour atténuer les dommages en réduisant, soit l'intensité de certains aléas, soit la vulnérabilité des enjeux.

- travaux de réduction de la vulnérabilité
- travaux de sécurisation du site et des bâtiments alentour
- ...

### Points de discussion :

- ✓ Y a-t-il des possibilités de protéger des zones potentiellement exposées grâce à des travaux ?
- ✓ Quels types de travaux (ouvrages, pompages, etc.) ?
- ✓ Sait-on évaluer l'efficacité de ces travaux (rapport coût/bénéfice) ?

## 6) Préparation à la gestion de crise

Assurer la formation des acteurs de la prévention et de la gestion de crise et de la population concernée pour laquelle une information quotidienne doit être envisagée.

- établir un annuaire des services et personnels ressources, notamment dans le cadre d'une mission de conseils et d'assistance
- élaborer une procédure de sauvegarde des populations
- inclure le risque glaciaire et ses effets dans les programmes de formation
- réaliser des exercices pour les acteurs institutionnels incluant la population et les médias
- ...
- 

### Points de discussion :

- ✓ Elaborer une procédure d'alerte : qui alerte qui ?
- ✓ Quels sont les critères de déclenchement de l'alerte : observations, déclenchements de seuil...
- ✓ Qu'est-ce que cela déclenche : évacuation, fermeture de voies, travaux... ?



## 7) Retour d'expérience

Organiser et concevoir une méthodologie de recueil, d'analyse et de partage des événements pour améliorer la prévention du risque et la gestion de crise analyse détaillée d'un événement

- recueil des éléments
- suivi des dommages occasionnés
- sauvegarde de la mémoire

...

### Points de discussion :

- ✓ Comment organiser la capitalisation des évènements ?
- ✓ Quelles données existent, lesquelles systématiser, lesquelles capitaliser ?