



COMITE FRANCAIS DE GEOLOGIE DE L'INGENIEUR ET DE L'ENVIRONNEMENT  
AVEC LE CNAM (ICENER GEOTECHNIQUE)

Sites internet : [www.CFGI-geologie.fr](http://www.CFGI-geologie.fr) et [www.cnam.fr/geotechnique](http://www.cnam.fr/geotechnique)

# INVITATION

**jeudi 31 janvier 2013**

**à 14 h 00**

**au Conservatoire National des Arts et Métiers  
292, rue St-Martin - 75003 Paris  
(Amphi Jean Prouvé, accès 11)**

## **Instabilités et travaux en haute montagne**

*Responsables de la séance : Guilhem DEVEZE (EDF) et Denis FABRE (CNAM)*

14 h00 : Introduction

14 h10 : **Travaux de reconstruction du captage du torrent sous-glaciaire de la Mer de Glace**

**François VAYSSE**

(Electricité de France, Service Géologie Géotechnique, Aix-en-Provence)

14 h50 : **Risques naturels liés aux lacs glaciaires: les exemples récents dans les Alpes françaises, au glacier de Tête Rousse (Mt Blanc ) et au glacier de Rochemelon (Vanoise).**

**Christian VINCENT**

(Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement, UJF, Grenoble)

15 h30 : **Les dynamiques géomorphologiques liées à l'instabilité des glaciers rocheux : vers l'émergence de nouveaux aléas ?**

**Xavier BODIN**

(EDYTEM, Université de Savoie, Le Bourget-du-Lac)

16h10 : **Problématique des fondations d'ouvrages sur permafrost dans les stations de sport d'hiver**

**Lionel LORIER et Héloïse CADET**

(SAGE - A.D.R.G.T, 38610 Gières)

16h50 : **Etude des risques de rupture de lacs glaciaires (région du Khumbu – Népal)**

**Didier LEMARECHAL et Franck MACHET**

(Alpes-Ingé, 38660 St-Pancrasse)

17h30 : Discussion générale

## Introduction

Cette séance développe la problématique des risques glaciaires et périglaciaires et des travaux géotechniques qu'elle peut susciter dans le contexte du changement climatique en haute montagne.

### **Travaux de reconstruction du captage du torrent sous-glaciaire de la Mer de Glace**

**François VAYSSE**

Electricité de France, Service Géologie Géotechnique : [francois.vaysse@edf.fr](mailto:francois.vaysse@edf.fr)

L'aménagement hydroélectrique des Bois, près de Chamonix, a été mis en service en 1973. D'une puissance de 42 MW, il produit annuellement 15 GWh, soit la consommation d'une ville de 50 000 habitants. Le torrent sous-glaciaire de la Mer de Glace est partiellement dérivé à l'aide d'un captage sous le glacier - à la cote 1490 NGF, c'est à dire 1 km en aval du Montenvers - et d'un réseau de galeries souterraines.

Le fort recul de la langue glaciaire durant la décennie 2000 a conduit Electricité de France à engager dès 2005 des études pour pérenniser le captage pour plusieurs décennies.

Ces études ont notamment compris une campagne de géophysique de surface en 2006 2007 pour localiser le tracé du torrent sous plus de 100 m de glace. Le projet retenu consistait à reconstruire la prise d'eau à l'amont ; il nécessitait par conséquent le creusement de plus de 1000 m de galeries au rocher pour atteindre la zone du futur captage. Ces travaux de creusement se sont déroulés pendant les années 2008 à 2011. La prise d'eau "historique" a été ensevelie lors d'un gros orage en juin 2009. Le nouveau captage sous glaciaire a été opérationnel en avril 2011; il se situe à 1560 NGF, à l'aplomb du Montenvers.

L'exposé présente les particularités de ce projet, qui a mis en œuvre un panel de techniques et de compétences diversifiées : géologues, géophysiciens, glaciologues, mineurs et spécialistes de haute montagne. Il s'attache particulièrement aux difficultés rencontrées pour la localisation du torrent sous-glaciaire, qui a nécessité plusieurs rameaux de galeries de reconnaissances supplémentaires, plusieurs centaines de mètres de galeries dans la glace (creusées à la lance à eau chaude, se refermant avec des vitesses pouvant atteindre 20 cm/j), des reconnaissances radar depuis la surface, des sondages remontant depuis les galeries au rocher et des essais de traçage. Il illustre également quelques particularités locales, comme les écaillages par décompression brutale des parois de certaines galeries ou encore l'extrême abrasivité des eaux.

### **Risques naturels liés aux lacs glaciaires: les exemples récents dans les Alpes françaises, au glacier de Tête Rousse (Mt Blanc ) et au glacier de Rochemelon (Vanoise).**

**Christian VINCENT**

Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE),  
CNRS/UJF Grenoble : [christian.vincent@ujf-grenoble.fr](mailto:christian.vincent@ujf-grenoble.fr)

Entre 2009 et 2010, une poche d'eau d'un volume d'environ 65000 m<sup>3</sup> a été détectée dans le glacier de Tête Rousse grâce à une combinaison de méthodes géophysiques mises en oeuvre conjointement par trois laboratoires grenoblois (LGGE, ISTERre-ex LGIT et LTHE). C'est la première fois qu'une poche d'eau intra-glaciaire de cette importance était ainsi détectée dans un glacier alpin avant une rupture. Cette poche représentait une menace pour St Gervais, avec un volume à peu près équivalent à celui qui avait provoqué la catastrophe de 1892 (175 morts). Trois mille personnes étaient potentiellement menacées en 2010. Nous avons alors alerté les autorités publiques le 13 juillet 2010 et préconisé la vidange artificielle de cette poche d'eau. Des décisions immédiates ont conduit à des opérations de pompage entre août et octobre 2010.

Au cours des deux dernières années, cette cavité s'est remplie à nouveau et elle a dû être pompée en octobre 2011 et octobre 2012. Nous analysons le régime thermique du glacier qui constitue la cause de la rétention de l'eau sous glaciaire et les mécanismes de remplissage de la poche.

En septembre 2004, le LGGE a alerté la préfecture de Savoie suite à des observations sur le glacier de Rochemelon en Vanoise qui montraient que le lac supraglaciaire formé à la surface de ce glacier allait déborder et représentait une menace pour les habitants de la Haute Maurienne. Ce lac a été vidangé en partie

en octobre 2004, puis totalement au cours de l'été 2005. Au cours de la vidange, nous avons mené une étude sur les mécanismes d'érosion de la glace par l'eau.

## **Les dynamiques géomorphologiques liées à l'instabilité des glaciers rocheux : vers l'émergence de nouveaux aléas ?**

**Xavier BODIN**

EDYTEM, UMR 5204 CNRS/Université de Savoie, Le Bourget du Lac: [xavier.bodin@univ-savoie.fr](mailto:xavier.bodin@univ-savoie.fr)

Ces dernières années, des déstabilisations plus ou moins importantes de glaciers rocheux ont été observées dans différentes chaînes de montagne du monde. Par leur ampleur, leur cinématique et la complexité des processus impliqués, ces phénomènes soulèvent la question de leur dangerosité pour les infrastructures et les activités humaines.

Indicateurs de la déformation d'un permafrost sursaturé en glace affectant les formations superficielles, les glaciers rocheux s'observent sur de très nombreux versants des montagnes peu ou pas englacées, des Alpes aux Andes, en passant par l'Himalaya et l'Alaska. Il est admis que leur écoulement se fait généralement par fluage du mélange glace/débris, souvent accompagné d'un cisaillement basal. Les vitesses mesurées en surface varient de quelques cm/a à 1-2 m/a, et la morphologie caractéristique des glaciers rocheux est faite d'une succession de rides concentriques, arquées dans le sens de la pente, l'ensemble étant délimité par des rebords latéro-frontaux raides et bien marqués. Une accélération généralisée des vitesses d'écoulement des glaciers rocheux a été observée sur les glaciers rocheux mesurés dans les Alpes au cours de la décennie 90, avec un double pic autour de 2001-2004. Ce comportement laisse penser que les paramètres climatiques, ainsi que les variations saisonnières nivo-hydro-météorologiques, influencent fortement la dynamique des glaciers rocheux. Les rares mesures et modèles physiques suggèrent par ailleurs que de nombreux glaciers rocheux pourraient être au point de fusion, impliquant la présence d'une part non négligeable d'eau liquide au sein du permafrost.

Les premiers signes géomorphologiques de déstabilisation de glaciers rocheux ont été rapportés par Kaufmann & Ladstaedter (2003), dans les Alpes autrichiennes et par Kääh et al. (2007) dans les Alpes suisses. Ces auteurs ont constaté l'ouverture, depuis plusieurs années, voire décennies, de fractures dans le corps de glaciers rocheux, perpendiculaires au sens d'écoulement, s'accompagnant parfois d'une avancée rapide du front et d'un affaissement de la partie amont. Dans certains cas, une déstructuration de la partie frontale a également été observée, conduisant à une morphologie chaotique et mettant à jour des tranches de glace au travers de la masse fracturée des glaciers rocheux (Roer et al., 2008). En 2006, deux effondrements partiels de glaciers rocheux, très similaires en termes de dynamiques et de morphologie consécutive, ont eu lieu, l'un dans les Alpes françaises et l'autre dans les Andes semi-arides du Chili : plusieurs millions de m<sup>3</sup> de matériaux rocheux mélangés à de la glace ont été mis en mouvement, puis déposés sous forme de monticules de type "dirt-cones" et remobilisés en partie par des laves torrentielles.

En nous basant, d'une part sur les mesures et observations disponibles pour caractériser la dynamique récente des glaciers rocheux, et d'autre part sur les deux cas chiliens et français, nous analysons les mécanismes qui traduisent l'instabilité des glaciers rocheux et proposons des pistes de réflexion pour tenter d'en saisir les causes, ainsi que les conséquences en termes de risques.

## **Problématique des fondations d'ouvrages sur permafrost dans les stations de sport d'hiver**

**Lionel LORIER et Héroïse CADET**

SAGE - A.D.R.G.T, 38610 Gières ([l.lorier@sage-ingenierie.com](mailto:l.lorier@sage-ingenierie.com))

Le permafrost est un terrain de sub-surface, sol ou rocher, dont la température est négative sur toute une année au moins. Les glaciers rocheux, mélange de glace et débris, sont une des occurrences les plus reconnaissables du permafrost. Dans l'arc alpin, la surface de permafrost est estimée à environ 1300 km<sup>2</sup> dont 70% se situe entre 2400 et 3000 mètres d'altitude. Les zones vulnérables à ces altitudes sont principalement les stations de ski. De plus, le réchauffement climatique implique une dégradation du permafrost. Ces transformations augmentent les aléas naturels, touchant en particulier les zones de montagne. C'est pourquoi de plus en plus de désordres provoqués par des mouvements liés au permafrost ont

été constatés en station de ski.

Pour mieux considérer les risques à l'amont, il est nécessaire d'améliorer la connaissance de ces phénomènes, ce qui implique une méthodologie adaptée, des suivis réguliers, et la définition de solutions préventives ou de confortement pour les fondations des ouvrages d'altitude.

Le projet de recherche piloté par l'A.D.R.G.T. (Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain) soutenu par la Fondation MAIF sur « les risques induits par le permafrost alpin » comportait le suivi sur 3 années (2007-2010) de 4 sites des Alpes françaises, dont 2 en station de sports d'hiver (Les Deux-Alpes, Orelle). Cette étude souligne l'importance des mesures (température, déplacements, grandeurs géophysiques) pour déterminer les caractéristiques des glaciers rocheux. Une méthodologie de prospection pour caractériser de tels sites a été proposée. Elle combine des études géomorphologiques, des prospections électriques, sismiques et géoradar, des forages avec mesures de températures. En effet, les suivis de température ont montré l'importance du couvert neigeux et de la couche active qui joue le rôle protecteur d'isolant en été.

Le projet MAIF a permis d'initier d'autres études en liaison notamment avec le laboratoire PACTE, (Philippe Schoeneich, UMR 5194 CNRS/Université Joseph Fourier, Grenoble), en particulier par la réalisation des premiers forages français instrumentés à travers le permafrost sur le domaine skiable de la station des Deux-Alpes (Isère).

La problématique des fondations reposant sur du permafrost reste un sujet mal connu dans le contexte alpin ; des données existent dans la littérature mais elles concernent essentiellement le permafrost de type arctique en situation de masses très importantes et de relief très peu penté. Des méthodologies de conception, de surveillance et surtout de confortement restent à établir, notamment pour les fondations des gares et pylônes de remontées mécaniques.

La SAGE (Société Alpine de Géotechnique) a été confrontée à ce type de problématique sur plusieurs stations de ski depuis plusieurs années et a proposé des solutions de confortement qui seront présentées ici. Dans le contexte actuel d'un changement climatique plus spécialement marqué pour les zones montagneuses, tout chantier dans les Alpes au-dessus de 2500 m doit comporter une étude spécifique prenant en compte le permafrost.

## **Etude des risques de rupture de lacs glaciaires (région du Khumbu – Népal)**

**Didier LEMARECHAL et Franck MACHET**

Alpes-Ingé, 38660 St-Pancrasse : [didier.lemarechal@alpes-inge.com](mailto:didier.lemarechal@alpes-inge.com)

Depuis 2007, les conséquences du réchauffement climatique dans les massifs de haute altitude (Himalaya, Andes, Alpes...) sont constatées et ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Une de ces conséquences est l'accélération de la fonte des glaciers, qui est à l'origine de la formation d'un nombre croissant de lacs pro- ou péri-glaciaires.

Notre présentation porte sur la première partie d'une action de recherche soutenue par la fondation PETZL dans la région du Khumbu au Népal sur le phénomène nommé GLOF (Glacial Lake Outburst Flood) correspondant à des ruptures de ce type de lacs d'altitude.

Ces dernières années en Himalaya, il a été recensé un GLOF tous les 3 à 10 ans, avec de très forts impacts humains et matériels sur les villages, cultures, ponts et passerelles situés à l'aval à des distances de plusieurs dizaines de kilomètres.

Afin de mieux caractériser le phénomène de GLOF et de pouvoir ainsi définir de manière plus précise le risque représenté par ces lacs, nous présenterons en particulier :

- l'analyse de deux événements passés,
- l'étude préliminaire de deux lacs actuellement dangereux,
- une première estimation des travaux adaptés au contexte népalais .

La finalité de ces études est de supprimer ce fort risque pour les populations montagnardes et les himalayistes, en proposant des outils de diagnostic simplifiés et des solutions techniques qui pourraient être transposées à de nombreux autres sites. Les travaux devront permettre d'atteindre cet objectif avec peu de moyens en matériel, mais une importante main-d'œuvre laquelle est disponible dans les hautes vallées du Népal.