



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



Prévention des Risques d'Origine Glaciaire et Périglaciaire (ROGP)

Synthèse des connaissances et des pratiques¹

Rédaction : Boudières Vincent et Peisser Carine, PARN²
Janvier 2013

Ce travail a bénéficié du soutien du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (Direction Générale de la Prévention des Risques)

¹ Cette synthèse est associée au document « Plan de propositions d'actions scientifiques et techniques, pour une meilleure prévention des risques d'origine glaciaire et périglaciaire. »

² Avec relecture demandée aux acteurs scientifiques et techniques concernés au sein du réseau du PARN, et avec les retours et contributions de : X.Bodin & P.Deline (Edytem), S.Garambois (Isterre), D.Richard (Irstea), P.Schoneich (PACTE).



Introduction

En mars 2012, s'est tenu un séminaire technique « Gestion des risques d'origine glaciaire et périglaciaire ». Organisé par le PARN avec le soutien du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement – Direction Générale de la Prévention des Risques, il a rassemblé pendant deux jours les scientifiques, les techniciens et les responsables administratifs en charge de cette question, non seulement français mais aussi suisses et italiens, afin de capitaliser les différentes pratiques alpines et les avancées méthodologiques récentes.

Les présentations et les discussions qui ont suivi ont été d'une très grande richesse et ont permis d'une part de brosser l'état des lieux des connaissances et des pratiques, d'autre part de faire ressortir les lacunes et les points de blocage, et enfin de proposer certaines pistes de réflexion / de travail qui permettraient de faire évoluer la situation. Ces résultats ont donné lieu à une première synthèse, validée par l'ensemble des participants.

Cette synthèse ainsi que toutes les présentations des intervenants, avec l'accord de leur auteur, sont en ligne sur le site du PARN : www.risknat.org/risques-glaciaires-et-periglaciaires

Toutefois, à l'issue du séminaire, des approfondissements semblaient nécessaires dans les différents domaines vis-à-vis desquels les débats n'ont pas apporté suffisamment de matière : prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme, alerte, information préventive, étude de la vulnérabilité, approches systémiques et complexes Le PARN a donc, dans un second temps, consulté un certain nombre d'acteurs³ qui n'étaient pas présents lors de la première phase, afin d'intégrer leur réflexion au panorama de la gestion des ROGP et d'enrichir la synthèse issue du séminaire.

C'est l'ensemble de ce travail de capitalisation qui est présenté ici.

Pour chacun des 6 piliers de la prévention des risques, ainsi que pour les 2 items complémentaires qui prennent en compte le passé et le futur, ce document propose une synthèse des connaissances et pratiques, d'une part scientifiques et d'autre part opérationnelles, en différenciant lorsque cela est nécessaire les risques d'origine glaciaire (associés aux glaciers blancs) et ceux d'origine périglaciaire (associés au permafrost). Il met en avant les préoccupations des différents acteurs, les difficultés et points de blocage rencontrés.

Les 6 piliers de la prévention des risques majeurs⁴ :

- 1- La connaissance des risques**
- 2- La surveillance, la prévision, la vigilance et l'alerte**
- 3- L'éducation et l'information préventive des citoyens**
- 4- La prise en compte des risques dans l'aménagement**
- 5- La réduction de la vulnérabilité, la protection**
- 6- La résilience et la mise en sûreté**

³ Au delà des acteurs scientifiques et techniques ayant apporté leur contribution au séminaire de mars 2012, des entretiens complémentaires ont été réalisés auprès des personnes et organismes suivants : DDT 74 : A.Stephan et G.Serpette, IRMA : F.Giannocarro, EDYTEM : P.Pigeon, RTM : O.Marco et P.Bouvet, PACTE-LATTS : L.Creton Cazanave.

⁴ Tels que déclinés dans le cadre de la politique de prévention des risques majeurs du Ministère de l'environnement : www.developpement-durable.gouv.fr



Auxquels s'ajoutent des axes complémentaires :

7- La mémoire et le retour d'expérience

8- L'adaptation aux impacts attendus du changement climatique

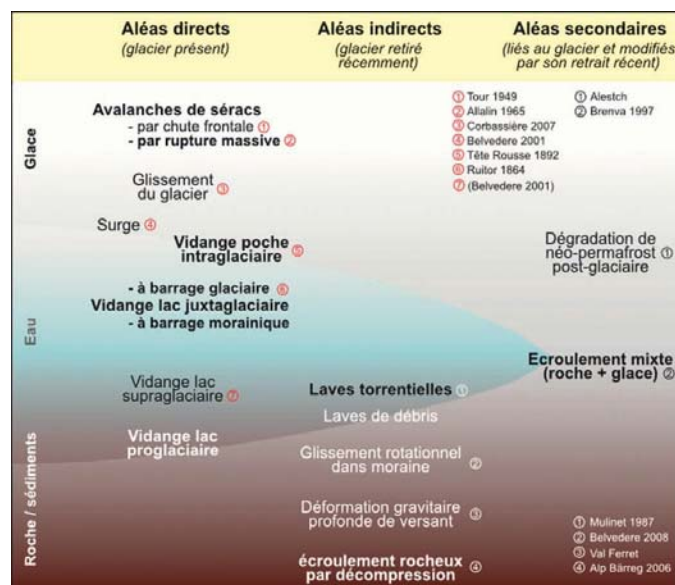
Introduction – Présentation des phénomènes

Les phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire sont de nature variée. On peut les distinguer en trois grands types de phénomènes générateurs de risques.

- Phénomènes résultant de l'écoulement plus ou moins brutal d'eau sous forme liquide momentanément stockée au niveau de l'appareil glaciaire ou périglaciaire
 - o Rupture ou vidange brutales de lacs glaciaires et périglaciaires
 - o Vidange de poches d'eau intra-glaciaires
- Phénomènes résultant du mouvement gravitaire de masses d'eau sous forme solide (glace) qui se détachent du glacier
 - o Chutes de séracs
 - o Ruptures de glacier
- Phénomènes gravitaires plus ou moins brutaux d'origine périglaciaire dus à la dégradation du permafrost
 - o Déstabilisation de glaciers rocheux
 - o Déstabilisation de parois rocheuses
 - o Laves torrentielles
- Mouvements superficiels dus au mouvement ou à la fusion de glace du sol
 - o Mouvements des glaciers rocheux
 - o Affaissements et effondrements thermokarstiques

Leur description succincte ainsi que des exemples de cas en France et à l'étranger sont consultables dans le Document préparatoire au séminaire (PARN 2012, en ligne).

Une typologie un peu différente des aléas a également été proposée dans GlaRiskAlp (2013).

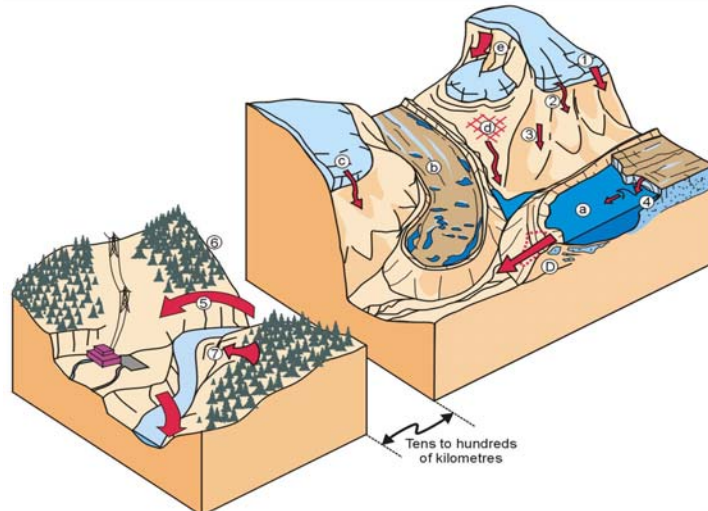


Typologie des aléas glaciaires (et partiellement périglaciaires)

Spécificités des ROGP

Les risques d'origine glaciaire et périglaciaire sont le résultat de **phénomènes naturels très variés**, impliquant des matériaux différents, dont les conséquences sont très différentes :

- Vidange de lacs et poches d'eau ;
- Chutes de séracs et rupture de glaciers ;
- Mouvements de glaciers rocheux (de la déformation aux fluctuations amplifiées et à la rupture) ;
- Eboulements rocheux et instabilités de secteurs déglacés.



La variété des phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire et leurs conséquences (d'après Reynolds, 2002).

Leurs manifestations à l'aval sont également très variées, d'autant que les interactions entre différents phénomènes et les relais de processus tant dans l'espace que dans le temps sont courants : phénomène torrentiel brutal non lié à un événement météorologique (pour les ruptures ou vidanges de lac et poches d'eau, naturelles ou elles-mêmes déclenchées par un éboulement), avalanches de glace (chute de séracs ou rupture de glacier), avalanches de neige (déclenchées par une chute de sérac, de glacier ou de blocs rocheux).

Une **faible fréquence d'occurrence** de la plupart des phénomènes, souvent combinée avec une **forte intensité** tend à en faire des **aléas majeurs**.

Une des spécificités des ROGP tient à la **multiplicité des possibles effets en cascade** dans une chaîne complexe de processus, dont l'intensité est souvent amplifiée par l'énergie du relief. Contrairement à l'essentiel des types d'aléas naturels que l'on a l'habitude de gérer, ils nécessitent la prise en compte intégrée d'aléas couplés, dont la caractérisation est complexe et mal définie jusqu'à présent.

Les processus peuvent interagir entre eux et avec d'autres parties du système géomorphologique. Des « scénarios du pire » sont possibles et se sont déjà produits. Les principales catastrophes ont résulté d'effets en cascade plutôt que d'un phénomène unique. Par exemple une avalanche de glace ou un écroulement rocheux qui tombe dans un lac produit une onde qui peut mener à la rupture du barrage morainique, entraîner une vidange brutale et une lave torrentielle, qui peut elle-même faire barrage sur une rivière en aval.



Ex1 : Lac de Nostetuko (Colombie britannique), 1983

Lac formé au front du glacier Cumberland, retenu par une moraine de tills : 6,5 millions de m³ d'eau s'en sont brusquement échappés par une brèche dans le barrage due à l'onde produite par une avalanche de glace détachée du front du glacier.

Ex 2. Kolka-Karmadon, Ossétie du Nord (Caucase Russe), 2002

Une instabilité de masse rocheuse, dans une zone de permafrost sur les flancs du Dzhimarai-Khokh (4780 m) couplée à une rupture de glacier polythermal suspendu, déclenche une avalanche de roche et glace, qui se transforme en lave torrentielle et tue plus de 150 personnes dans la vallée de Genaldon/Karmadon. Le volume total déplacé s'élève à environ 100 M m³ et comprend de la roche, de la glace, de la neige et de l'eau. Les vitesses d'écoulement sont incroyablement rapides (jusqu'à 300 km/h) et les distances parcourues particulièrement longues (18km + 15 km de lave torrentielle).

Ex 3. Las Tortolas, Chili (Andes centrales semi-arides), 2006

Entre 2 et 3 millions de m³ de matériaux (glace et débris rocheux) se sont détachés d'un glacier rocheux, à 4500 m d'altitude sur les flancs du Cerro Las Tortolas (6120 m) (Iribarren & Bodin, 2010). La masse effondrée s'est déposée sur un replat 250 m plus bas, mais a ensuite été remobilisée par une lave torrentielle de forte ampleur (levées de plusieurs m de haut) qui a parcouru 7km. Bien que parcourue de nombreuses pistes d'exploration minière, la région est peu occupée et aucun dégât n'a été déploré. Un volume sans doute 2 à 4 fois plus important du glacier rocheux montre actuellement des signes importants de déstabilisation.

Ces couplages d'aléas ont plusieurs grandes implications :

- Les phénomènes résultants ne sont souvent pas liés aux couplages classiques avec les phénomènes météorologiques : une lave torrentielle déclenchée par la rupture d'une poche d'eau ou la vidange d'un lac ne fait pas suite à un épisode pluvieux ; une avalanche déclenchée par une chute de séracs ou un éboulement rocheux d'altitude ne suit pas forcément une forte chute de neige.
- Les distances entre l'origine du phénomène et ses conséquences dans les vallées peuvent être considérables : le risque est donc moins « visible » (sauf dans certains cas comme par exemple à Taconnaz, dans la vallée de Chamonix, où le glacier est à la vue de tous), il y a une moindre conscience du risque.
- Les incertitudes à tous les stades de la chaîne des processus sont considérables. En fait les incertitudes subissent elles-mêmes l'effet cascade et s'amplifient tout au long de la chaîne des processus.

Une autre spécificité des risques d'origine glaciaire et périglaciaire est leur **caractère évolutif** sous l'influence des changements climatiques. Si certaines poches d'eau ou lacs glaciaires sont récurrents et créent des débâcles périodiques (ex. la « Tine » de Trient ou le lac du Gorner), d'autres aléas sont liés à une configuration particulière des appareils glaciaires (ex. lacs de barrage glaciaire, chutes de séracs) ou apparaissent suite à la modification du régime thermique du glacier ou du sol (ex. détachement de glaciers suspendus, écroulements rocheux). Or la taille des glaciers et les régimes thermiques évoluent fortement avec le réchauffement climatique.



Il s'ensuit que l'expérience historique n'est souvent d'aucun secours pour anticiper ce genre de risques, puisque des aléas historiquement connus peuvent ne plus exister, et qu'à l'inverse des phénomènes pour lesquels il n'existe aucun antécédent historique peuvent apparaître. La principale conséquence en est que les approches classiques de gestion des risques, fondées sur le couple intensité/fréquence et le zonage, à partir de la connaissance des phénomènes passés, ne sont souvent pas pertinentes et dans la plupart des cas difficilement applicables. Elles doivent être complétées par de nouvelles approches tenant compte de l'évolution du phénomène.



Pilier1 - Connaissance des risques

La connaissance des risques s'appuie sur celle de l'aléa d'une part et des enjeux exposés d'autre part.

Pour les aléas, cette connaissance repose, outre sur les analyses d'événements passés qui sont assez limités dans le cas des ROGP puisque ces phénomènes sont rares et évolutifs, sur les études de compréhension des mécanismes, et sur les études techniques conduisant à la production de cartes d'aléas (extension et intensité des phénomènes).

Il existe à ce jour des inventaires récents des milieux glaciaires (GlaRiskAlp) et périglaciaires (PermaNET), qui ne vont toutefois pas, dans la majorité des cas, jusqu'à l'identification des aléas.

Ainsi, il n'existe pas à proprement parler de cartes d'aléas pour les phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire.

Le dernier inventaire des situations à risque date de 2003 (Glaciorisk).

Le séminaire technique ROGP a montré que d'une façon générale il reste un travail important à accomplir sur la méthodologie d'identification des sites à risque ou supposés comme tels, sur la base de certains indices à définir précisément.

A l'heure actuelle cette identification n'a été possible que dans quelques cas particuliers.

Par exemple dans le cas de Rochemelon, c'est la visite fortuite des scientifiques du LGGE qui a permis de découvrir l'imminence du risque.

Pour les phénomènes visibles en surface (lacs, chutes de séracs ou glaciers, instabilités de glaciers rocheux), l'identification de l'aléa peut se faire « à temps » par suivi visuel de l'évolution ou imagerie satellite avec détection de mouvement. L'identification est beaucoup plus problématique dans le cas des poches d'eau intra-glaciaires ou des instabilités de parois rocheuses.

Une ample gamme de techniques de caractérisation des aléas glaciaires et périglaciaires a été développée récemment. Pour la plupart, ces techniques ne peuvent s'appliquer que dans les cas d'aléas ponctuels préalablement identifiés. Il s'agit essentiellement de bathymétrie pour l'évaluation des volumes d'eau des lacs, méthodes radar et RMP pour la définition de la géométrie des poches d'eau, suivi de déplacements, de vitesses et d'activité micro-sismique pour les instabilités de glaciers et de glaciers rocheux, capteurs thermiques et suivi par laserscan et photogrammétrie pour les instabilités de parois rocheuses.

La liste de ces méthodes n'est pas exhaustive. Parmi celles qui ont été mobilisées sur le massif alpin français, beaucoup sont en cours de développement. Des recherches sont donc encore nécessaires pour arriver d'une part à mieux comprendre les processus, d'autre part à mieux caractériser les phénomènes.



A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

Le projet GlaRiskAlp a édité fin 2012 un inventaire des glaciers des Alpes occidentales avec leurs extensions actuelle et ancienne, ainsi qu'une cartographie géomorphologique des secteurs déglacés (marges proglaciaires).

Une typologie des aléas en contexte de retrait glaciaire a été élaborée, prenant en compte non seulement les aléas d'origine directement glaciaire, mais également ceux qui résultent de la configuration géomorphologique actuelle des secteurs récemment déglacés

Ces documents peuvent servir de base à l'identification de phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire.

a. Risques d'origine glaciaire

Inventaires :

GlaRiskAlp propose un inventaire des lacs d'origine glaciaire qui sont apparus depuis la fin du PAG (Petit Âge Glaciaire), en particulier depuis les années 1980. Cet inventaire est associé à une base de données sur le type de lac, sa superficie, ses caractéristiques principales, dont sa date d'apparition lorsqu'elle est disponible.

Les secteurs favorables à l'apparition de nouveaux lacs glaciaires sont déterminés.

Il n'existe pas d'inventaire complet à jour pour les autres types de phénomènes (dernières données Glaciorisk, 2004).

Compréhension des processus

Les études récentes sur des sites « pilotes » (Tête Rousse, Taconnaz ou Rochemelon en France ; Belvédère, Jorasses, Weisshorn en Italie et Suisse) ont fait progresser la compréhension des processus de formation et d'évolution des lacs, poches d'eau, chutes de séracs et ruptures de glaciers.

Mais de façon générale le niveau de compréhension demande encore à être approfondi et des études sont encore nécessaires pour aboutir à des résultats transférables en pratique.

b. Risques d'origine périglaciaire

Grâce en particulier au projet PermaNET, les éléments suivants sont disponibles :

- Un réseau de suivi du permafrost en France et dans l'Espace Alpin : PermaNET rassemble les données des sites les plus importants de suivi du permafrost et les compile dans un réseau standardisé. La composante française du réseau est constituée par l'observatoire PermaFRANCE.

- Une **carte de distribution du permafrost** dans les 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.

- Un état de l'art sur les aléas naturels liés au permafrost et la dégradation du permafrost : (1) glaciers rocheux, (2) laves torrentielles, (3) écroulements rocheux et (4) mouvements superficiels du sol et leurs dégâts aux infrastructures. Chacun des 4 chapitres 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.

- Des fiches techniques sur les méthodes de détection du permafrost et un manuel pour les méthodes de suivi. Chaque fiche (dGPS, GPR, DInSAR, ERT, TLS et photogrammétrie terrestre, respectivement mesures des températures de surface, en forage, etc.) résume les principes de base de la méthode et liste les applications possibles et les principaux résultats, possibilités et limites.

- Un guide de recommandations pour l'évaluation des aléas. 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.

GlaRiskAlp propose également, grâce à un outil SIG, une évaluation de la prédisposition aux aléas des secteurs englacés et récemment déglacés :

- les secteurs susceptibles d'être affectés par des écroulements rocheux du fait de la décompression postglaciaire correspondent aux parois rocheuses subverticales qui étaient englacées au PAG. Ils sont déterminés en routine dans le SIG par la superposition de l'extension du glacier à cette époque et la cartographie des parois. Une analyse structurale fine (lithologie, tectonique) permet ensuite manuellement d'affiner le zonage.
- Une utilisation simplifiée de la méthode Bonnet-Staub permet de déterminer «l'aptitude à la génération de laves » de débris dans les marges proglaciaires. Un indice de propension à produire des laves de débris est élaboré en prenant en compte les deux principaux facteurs de prédisposition, angle de pente et volume de till mobilisable. Il permet de définir trois classes d'aptitude à la génération de laves de débris : faible, moyenne et forte.

Pour la compréhension des mouvements gravitaires en haute montagne, des méthodes et équipements innovants ont été développés dans le cadre du projet PERMAdataROC (laserscan, photogrammétrie, détection acoustique).

Pour le recueil d'observation, un Réseau d'observation des éboulements/écroulements dans le massif du Mont Blanc est opérationnel depuis 2007. Coordonné par des scientifiques du laboratoire EDYTEM, il comprend une trentaine de guides de haute montagne français et italiens, ainsi que des gardiens de refuge et des membres des équipes de secours en montagne. En complément, des posters pédagogiques dans les refuges et un site web invitent les alpinistes à envoyer leurs propres observations.

Dans le cadre du réseau PermaFRANCE, plusieurs glaciers rocheux sont suivis en termes de température du sol et de mouvements superficiels et font l'objet d'investigations géophysiques, dans le but de mieux comprendre les liens entre climat et dynamique de déplacement.

c. Blocages

De l'avis unanime des scientifiques, il reste un énorme besoin de faire progresser la compréhension des processus (nombreux et variés), en termes de variables mais aussi de



mécanismes ; des avancées sur la compréhension en particulier des mécanismes de formation sont nécessaires afin d'améliorer les possibilités d'aide à la détection des situations à risque : beaucoup de questions sont toujours du domaine de la recherche, qu'il faut continuer à faire progresser.

D'autre part les laboratoires de recherche étudient les risques uniquement en marge de leurs activités ; les chercheurs ne sont de ce fait pas facilement mobilisables lorsque des phénomènes glaciaires et périglaciaires générateurs de risque se manifestent et qu'il faut intervenir rapidement pour gérer la crise. Par ailleurs, les compétences et les moyens financiers consacrés aux risques d'origine glaciaire et périglaciaire sont parfois précaires (par exemple en particulier, les ressources allouées au suivi et à la surveillance, autant des sites dangereux que des sites pilotes dont l'évolution est considérée comme représentative).

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

Le séminaire et les entretiens complémentaires ont mis en évidence que la connaissance des ROGP est généralement faible dans les services opérationnels et techniques, sauf cas particuliers d'un service déjà confronté à un cas. Les services soulignent le **manque de partage de l'information**, détenue pour l'essentiel par les scientifiques, tant sur le plan des méthodes que des résultats. Le fait de connaître le risque potentiel sur leur territoire leur paraît pourtant nécessaire pour permettre une anticipation des réactions.

Un autre constat est que la caractérisation des aléas, dans les cas qui se sont présentés, est toujours accompagnée de beaucoup d'incertitudes, et qu'il serait illusoire de croire qu'il sera possible dans le futur de toutes les éliminer.

a. Risques d'origine glaciaire

A l'exception des cas particuliers de Rochemelon et de Tête Rousse, aucune démarche n'a été entreprise par les services pour aller véritablement vers la connaissance des risques glaciaires.

Des préoccupations existent au niveau de certaines accumulations d'eau qui modifient le régime des cours d'eau (ex. Mer de Glace).

b. Risques d'origine périglaciaire

Un inventaire systématique des bassins torrentiels affectés par des aléas liés au permafrost a été réalisé en 2008 au sein du service RTM de la Haute-Savoie. L'étude a porté essentiellement sur la susceptibilité des zones potentielles de permafrost à la formation de la lave torrentielle. Ainsi, 10 bassins versants avec des aléas potentiels liés au permafrost ont été identifiés et classés en 3 classes d'aléa.

Dans les Alpes du Sud, les services RTM et l'IGA ont réalisé un inventaire et une description des glaciers rocheux des départements des Hautes-Alpes et des Alpes de Haute Provence.

Ce travail a aussi permis de préciser, pour tous les glaciers rocheux, si des situations à risque pouvaient leur être associées. D'abord en précisant les différents scénarios potentiellement



générateurs de risques (mouvements lents, affaissements, mouvements rapides, ruptures brutales, débâcles, ...) et, ensuite, en notant tous les descripteurs utiles (sur le corps, sur le front, sur les lacs ou sur les dépressions) et permettant de distinguer, pour chaque glacier rocheux, les scénarios réalistes et les scénarios irréalistes.

Au bilan et à ce jour, il a été mis en évidence deux sites à risques particuliers en lien avec des glaciers rocheux dans les Alpes de Haute Provence. Il n'a pas été mis en évidence de risques particulièrement évidents en lien avec les glaciers rocheux des Hautes-Alpes.

Sur 51 sites (avec 95 glaciers rocheux), il est apparu utile soit de mener des réflexions ou des investigations complémentaires, soit de mettre en place des suivis plus fréquents.

Synthèse des méthodes de connaissance des aléas (détection et compréhension)

	Inventaire observation systématique des phénomènes	Détection des sites à risques	Détection des phénomènes en cours d'apparition	Connaissance des processus
Lacs glaciaires / thermokarstiques	A jour 2012 GlaRiskAlp Inventaire glaciers (Vallée d'Aoste) Pris en compte dans l'inventaire des glaciers rocheux (04 et 05)	Inventaire Gridabase (sites où des phénomènes historiques sont connus) => n'est plus à jour Faisabilité à étudier et méthodologie à définir dans le cas général (retrait du front derrière la moraine...) [Inventaire et cartographie des marges proglaciaires GlaRiskAlp]	Relativement facile - Techniques satellitaires - Images orthophotogrammetriques	Formation Géométrie : Bathymétrie Stabilité du barrage (érosion par l'eau)
Poches d'eau intraglacières	Pas possible à ce jour	Inventaire Gridabase => n'est plus à jour Indices de prédisposition ?	Très difficile dans le cas général (radar terrestre, local) Suivi de l'évolution de poches repérées possible.	Compréhension formation : Régime thermique : mesures + modélisation Topographie sous-glaciaire : radar Futur : Etudes hydro
Chutes de séracs	Inventaire des glaciers GlaRiskAlp mais sans inventaire des phénomènes	Inventaire Gridabase => n'est plus à jour Faisabilité à étudier et méthodologie à définir dans le cas général (glaciers suspendus...)	Possible Observation Téledétection et Téledétection satellitaire	Mesures d'accumulation, vitesses d'écoulement, topographie du socle rocheux (Radar), épaisseurs de glace (forages), permettent progressivement de préciser les volumes et la fréquence des ruptures de séracs, sur un site donné. Suivi de l'écoulement glaciaire par InSAR (GlaRiskAlp)



Rupture de glacier	Inventaire des glaciers GlaRiskAlp mais sans inventaire des phénomènes	Inventaire Gridabase => n'est plus à jour Faisabilité à étudier et méthodologie à définir dans le cas général (connaissance de la topographie du fond rocheux, passage glacier froid/tempéré...)	Possible Observation Techniques satellitaire, suivi de déplacements Activité sismique	Etude régime thermique glacier froid/tempéré Modélisation
Déstabilisation de glaciers rocheux	Inventaire 05 (avec risques associés), 04,06, Vanoise, Isère en partie, 74, Vallée d'Aoste	Méthodologie RTM (fonction du type d'aléa possible et d'enjeux à l'aval). Identification des mouvements par InSAR	Possible Etudes géomorphologiques (terrain + orthophotos + MNT) Interférométrie diff. (d-InSAR), pour glaciers rocheux avec vitesses élevées Carte en France à partir d'InSAR	Dynamique : déplacements / température Evolution du profil thermique Géométrie : imagerie 3D (photogrammétrie optique terrestre), Géophysique : Tomographie sismique / électrique, géoradar
Parois rocheuses	Projet PERMAdataROC	Suivi de parois pilotes dans le massif du Mont Blanc	Analyse d'images difficile car forte composante verticale des mouvements	Relation évolution température / rupture : études de température (capteurs, tomographie électrique) Modélisation
Instabilités de secteurs déglacés	GlaRiskAlp Inventaire laves torrentielles Hte-Savoie Inventaire glaciers (Vallée d'Aoste) : inventaires des secteurs récemment déglacés)	Etude de sites pilotes (Bionnassay-Tête Rousse en France, Haut Val de Rhêmes en Vallée d'Aoste)	Etudes géomorphologiques Images satellites optiques	Images satellites optique pour la caractérisation qualitative des matériaux déposés. (Etudes géotechniques classiques difficiles dans cet env.)



Pilier 2 - Surveillance, prévision, vigilance et alerte

La surveillance doit permettre d'anticiper un événement afin de pouvoir informer et alerter rapidement les autorités et la population et préparer la gestion de crise. Dans les cas favorables elle aboutit à une prévision de l'événement (délai d'occurrence et intensité).

Si la détection des ROGP est encore lacunaire comme l'a montré le chapitre précédent, une certaine gamme de techniques existe pour caractériser des aléas ponctuels préalablement identifiés. Il s'agit essentiellement de bathymétrie pour l'évaluation des volumes d'eau des lacs, de méthodes radar et RMP pour la définition des géométries des poches d'eau, de suivi de déplacements, de vitesses et d'activité micro-sismique pour les instabilités de glaciers, de suivi des températures et des vitesses en surface et dans des forages instrumentés, ou d'investigations géophysiques (ERT et géoradar) pour les glaciers rocheux, de capteurs thermiques et de suivi géodésique pour les instabilités de parois rocheuses.

Ces méthodes sont toujours en cours de développement et de nombreuses recherches sont encore nécessaires pour arriver d'une part à mieux comprendre les processus, d'autre part à mieux caractériser les phénomènes.

Mais, au-delà de la caractérisation des aléas, les possibilités de la surveillance à but d'alerte s'avèrent souvent limitées. En effet la pertinence de l'alerte et des possibilités d'anticipation qu'elle engendre dépend de la cinétique d'évolution des aléas et de la possibilité de suivre des signes précurseurs ; or pour les aléas d'origine glaciaire et périglaciaire, les types de cinématique peuvent être assez différents et les signes précurseurs, s'ils existent, ne sont pas toujours détectables (possibilités de prévisions de rupture pour certains glaciers instrumentés, évolutions potentiellement brutales pour les vidanges de poches d'eau, évolution progressive plus ou moins rapide pour les lacs glaciaires....).

D'autre part, pour autant que des méthodes existent, il n'y a pas aujourd'hui en France de « protocoles de suivi types » adaptés aux grands types de phénomènes.

En Suisse, certaines méthodologies ont été développées dans ce sens, par exemple pour le suivi des instabilités de glaciers (équipe de Funk et Failletaz, VAW-ETHZ). Dans les cas favorables la méthode aboutit à une prévision de rupture, dans un délai suffisant pour permettre une alerte aux populations.

Dans la majorité des cas, et ceci n'est pas propre aux ROGP, le passage de la surveillance des phénomènes à la phase d'alerte reste un point extrêmement délicat de la chaîne de gestion des risques, avec une position assez « inconfortable » à la fois pour le scientifique et pour le technicien. La définition des seuils d'alerte est d'ailleurs un point qui n'a pas été abordé véritablement lors du séminaire ; les scientifiques comme les services opérationnels considèrent majoritairement ne pas disposer à ce jour d'assez d'éléments pour se positionner.



A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

Les cas où une surveillance a été nécessaire en France sont rares (Rochemelon, Arsine, Tête Rousse, Taconnaz).

Dans chacun des cas, la confrontation avec le cas a donné lieu à des développements de méthodes, la recherche scientifique avançant donc directement en fonction des besoins de terrain (cas de la méthode RMP ou de la modélisation de cavité à Tête Rousse).

Le détail des méthodes de suivi et des capacités scientifiques de passage à l'alerte apparaît dans le tableau « *Méthodes de suivi / surveillance des aléas et questions liées au passage à l'alerte* ».

La question des seuils, qui définissent le passage du suivi à l'alerte, demeure pour la majorité des phénomènes un domaine de recherche encore très vaste.

Si des éléments de réponse ont déjà pu être apportés pour la définition des seuils de rupture de séracs ou de glacier, la question n'est pas tranchée pour les poches intra-glaciaires (seuil = volume eau+glace qui une fois arrivé dans le lit du torrent peut engendrer un problème en aval) ni pour les ruptures de glaciers rocheux (si la relation entre la température du sol et les variations de vitesse de déplacement a pu être établie, le faible nombre de cas connus et le manque de connaissances sur la rhéologie des mélanges glace-débris empêchent encore d'établir des seuils).

En rapport avec ces différents aspects, la pérennisation de dispositifs de suivi sur le long terme apparaît également fondamentale afin d'améliorer les connaissances sur les interactions entre le climat et les phénomènes glaciaires et périglaciaires.

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

Le problème du manque de partage de l'information par les scientifiques, déjà évoqué dans le chapitre précédent, est à souligner à nouveau ici. En effet au sein des services, un défaut de connaissance engendre automatiquement un défaut de vigilance. Il est donc important que l'information sur la connaissance de phénomènes potentiels soit bien portée à connaissance suffisamment en amont.

Enfin, le passage de la surveillance à l'alerte implique également les autorités responsables de la sécurité civile pour la transmission de l'alerte aux populations, ce qui requiert une collaboration importante entre ces instances.

Pourtant, les liens entre les services techniques / opérationnels et la sécurité civile (SIDPC) sont très variables. L'expérience montre que les liens établis « en temps de crise », lors de la gestion d'un événement particulier, tendent à perdurer et qu'il s'instaure alors des habitudes de travail en commun.



Méthodes de suivi / surveillance des aléas et questions liées au passage à l'alerte

	Suivi	Passage à l'alerte Seuil d'alerte Critères de décision
Lacs glaciaires / thermokarstiques	Evolution du volume du lac : bathymétrie, satellite Stabilité du barrage : méthodes géotechniques	Avant la vidange : niveau du lac / barrage : selon type de barrage ? Au moment de la vidange : détecteur, du type détecteur de lave torrentielle
Poches d'eau intraglaciers	Evolution du volume d'eau : RMP Modélisation de cavité	Avant la vidange : Seuil de remplissage de la cavité ? Au moment de la vidange : détecteur, du type détecteur de lave torrentielle
Chutes de séracs	Mesures photogrammétriques => suivi évolution géométrie Mesures topographiques (station totale) GPS Mesures micro-sismiques Mesures de vitesses d'écoulement Suivi InSAR	Méthode de prévision de rupture (Funk, Failletaz et al.): détection de l'accélération ; seuil de vitesse délai : env. 1 semaine/quelques jours
Rupture de glacier	Suivi de déplacements Mesures micro-sismiques Mesures de température Suivi InSAR	Méthode de prévision de rupture (Funk, Failletaz et al. 2011): environ 1 à 2 semaines avant. Prévision pas toujours possible.
Déstabilisation de glaciers rocheux	Caractérisation de la géométrie : géophysique (tomographie sismique / électrique, géoradar) Suivi de déplacements : imagerie terrestre optique 3D Suivi InSAR Forage instrumenté	Pas de cas réalisé Ouverture de crevasses Accélération au-delà de la variabilité interannuelle
Parois rocheuses	Capteurs thermiques, laserscan, photogrammétrie, détection acoustique	Pas de cas réalisé



Pilier 3 – Education et information préventive

On constate généralement que la **culture du risque** autour des phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire est plutôt **plus limitée** que pour d'autres types d'aléas connus de façon plus classique en montagne. L'éloignement des vulnérabilités par rapport aux zones de départ et la faible fréquence d'occurrence de ce type d'événement peuvent expliquer ce constat. Pourtant, le contexte de changement climatique rend important le besoin d'améliorer cette culture, de façon générale mais de manière plus accentuée encore pour les phénomènes à cinétique rapide (ex. rupture de glacier).

Pour ce qui concerne l'information réglementaire, en 2012 les ROGP ne sont pas encore intégrés en tant que tels dans l'information préventive sur les risques majeurs :

- Le portail de la prévention des risques majeurs (prim.net) ne fait pas mention des ROGP ;
- Il n'existe pas de dossier d'information du Ministère (qui existe par exemple pour les mouvements de terrain),
- Il n'y a pas de volet spécifique ROGP dans les documents d'information (DDRM, DICRIM, information locataire/acheteur).

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

Si l'éducation du risque, la sensibilisation et la communication font l'objet de quelques programmes de recherche (ex. Cap-Haz-Net dans le 7^e PRCD), le traitement dans ces thématiques des risques montagne est relativement rare.

Et dans les quelques programmes identifiés (ex. Biber Berti dans le projet Interreg IVB AdaptAlp), les phénomènes traités sont les avalanches, les laves torrentielles et crues rapides, les mouvements de terrain et instabilités rocheuses : rien n'apparaît sur les phénomènes glaciaires et périglaciaires.

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

Au sein des services techniques / opérationnels, on note globalement une absence de culture du ROGP, ou tout du moins une culture insuffisante. Il y a un besoin important d'informer, d'éduquer les techniciens, nécessaire pour être mieux prêt à réagir, et ce pour tous les différents types de phénomènes glaciaires et périglaciaires.

Pour ce qui est de l'information préventive réglementaire, dans le contexte actuel de réchauffement climatique et de possible accentuation des phénomènes ces prochaines années, un projet est en cours à la DGPR pour intégrer cet aléa dans les documents d'information préventive (DDRM, DICRIM).

Information / communication en temps de crise

Etant donné l'ampleur potentielle des catastrophes que peuvent engendrer les ROGP, la communication en temps de crise est un point particulièrement sensible pour d'une part être sûr de toucher toutes les populations concernées mais d'autre part éviter les phénomènes de panique liés à une communication mal maîtrisée.



Là encore il n'existe pas de « protocole standard » ; cet aspect est géré au cas par cas par les cellules de crise.

Par exemple pour la crise de 2010 de Tête Rousse, dans le cadre du plan de sauvegarde des populations (alerte et évacuation autonome vers des points de rassemblement), la sensibilisation de la population aux risques encourus, aux solutions offertes et aux gestes réflexes à adopter a été un enjeu important pour que le dispositif de sauvegarde puisse être opérationnel. Le Maire et le Préfet ont souhaité à la fois développer des actions d'information locales et engager une communication maîtrisée par le biais des médias.

Au-delà de cet exemple, c'est de façon récurrente la question de ce qu'il est possible / souhaitable de communiquer qui se pose. Pour les phénomènes à cinétique rapide, qui laissent très peu de temps de réaction à partir du déclenchement de l'alerte, il semble indispensable de communiquer sur tous les scénarios possibles, même avec des connaissances parcellaires, entachées de beaucoup d'incertitude.

Pilier 4 - Prise en compte du risque dans l'aménagement

Afin d'assurer la maîtrise de l'urbanisation et du bâti, l'outil réglementaire de prise en compte des risques naturels dans l'aménagement est le PPRN, qui a pour objectif de réduire l'exposition au risque ainsi que la vulnérabilité des biens et des personnes.

Le contexte d'évolution climatique incite à intégrer dès aujourd'hui les aléas glaciaires et périglaciaires dans la réflexion sur l'aménagement du territoire, pour anticiper les situations de demain en fonction de l'évolution possible des phénomènes. Dans ce cadre, le PPR est le meilleur moyen pour empêcher des constructions nouvelles dans des secteurs qui pourraient être exposés, plus efficace que le PLU, qui lui est révisé plus régulièrement.

Mais les ROGP sortent souvent du cadre de ce document, en particulier de par leur faible fréquence d'occurrence et de leur caractère évolutif, ce qui pose un certain nombre de questions, auxquelles peu de réponses ont pu être apportées.

Ce chapitre reprend les principaux constats et éléments de réflexion.

Le zonage est un outil d'aménagement du territoire dans la durée. Il n'y a pas actuellement en France de cas connu pour lequel le risque glaciaire (ou d'origine glaciaire/périglaciaire) ait été pris en compte dans les documents d'aménagement du territoire. Nous pouvons toutefois citer, le cas de la vidange du lac du glacier du Belvédère (Piémont, Italie), qui a entraîné au niveau local des modifications dans le plan régulateur (intermédiaire entre le PPR et le PLU français) sur la commune de Macugnaga. En revanche, il n'y a pas eu suite à cet événement d'intégration de la question de l'aléa glaciaire dans les plans d'aménagement du territoire italien au niveau régional ou national.

Pour les phénomènes glaciaires et périglaciaires, il faut distinguer 3 situations de nature différente, pour lesquels les problèmes de zonage ne se posent pas de la même manière :

- (1) Dans le cas des phénomènes sur lesquels on peut agir sur l'aléa à la source pour faire disparaître le risque de manière fiable et durable (cas des glaciers d'Arsine, de Rochemelon et de Grindelwald), il n'est pas nécessaire de mettre en place un zonage. Noter que le problème de la durabilité est fondamental.
- (2) Pour des phénomènes sur lesquels il est possible d'agir à la source, mais pour lesquels il y a des incertitudes sur la solution retenue, sa fiabilité et sa durabilité (cas de Tête Rousse), la question de la mise en place d'un zonage peut se poser ;
- (3) Dans le cas des phénomènes pour lesquels il n'est pas possible d'agir sur l'aléa à la source, et qui sont trop importants pour envisager la réalisation d'ouvrages de protection (cas d'effondrements glaciaires importants, type Allalin et cas du glacier de Tacconnaz), il faut s'en préoccuper dès aujourd'hui, sans attendre que le phénomène soit plus précisément cerné, afin de cesser le plus rapidement et efficacement possible d'accroître la vulnérabilité du système.

Dans le cas de Tête Rousse, il a été suggéré dans un premier temps de ne pas intégrer ce risque dans le PPRN mais dans le PCS, puisqu'il reste un risque exceptionnel qui n'a pas vocation à être pris en compte en termes d'urbanisme. Cette position pourrait évoluer.



Ces éléments soulèvent de nombreuses questions.

En particulier, pour la prise en compte des ROGP dans le zonage, la faible fréquence d'occurrence des phénomènes amène à s'interroger sur la possibilité d'intégrer un événement plus que centennal. La notion même de fréquence de retour n'est pas pertinente dans de nombreux cas, dont l'intensité change avec le temps. Certains événements pourraient même être uniques. Ce type de réflexion rejoint celle actuellement en cours sur d'autres types de risques, notamment les inondations et avalanches, autour des événements extrêmes.

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

La problématique du zonage est de plus en plus présente dans certaines recherches liées à la caractérisation des aléas.

En effet, en dehors des considérations réglementaires, la réalisation technique du zonage est basée sur la caractérisation de l'aléa, avec dans le domaine des ROGP les 2 problèmes majeurs que sont la détection des phénomènes potentiels et les incertitudes associées à la caractérisation (voir § Connaissance du risque).

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

A l'heure actuelle, aucun zonage n'a intégré les ROGP.

D'un point de vue conceptuel, les possibilités techniques de zonage varient en fonction du type de phénomène, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

	Possibilité théorique de zonage du risque
Vidange de lacs glaciaires / thermokarstiques	Possible (extension), mais problème de la fréquence et de l'anticipation de situations nouvelles
Vidange de poche d'eau intraglacière	A priori pas possible, sauf dans les cas particuliers de formation récurrente Le problème majeur est celui de la détection
Chute de séracs	Difficile Scénarios Intégrer avec zonage avalanches ?
Rupture de glacier	Difficile Scénarios Intégrer avec zonage avalanches ?
Déstabilisation de glacier rocheux	Scénarios Cartographie de l'aléa difficile (estimation possible sur jugement expert de la chaîne de processus) ; apports possibles de la modélisation (dynamique de la masse en mouvement)
Déstabilisation de parois rocheuses	Problème de la fréquence
Instabilités de secteurs déglacés	Possible si des stocks sédimentaires ont été détectés en amont. Intégrer avec le zonage de l'aléa des laves torrentielles



Pourtant, même lorsque cela semble possible, les préoccupations des services opérationnels/ de l'Etat restent nombreuses.

En tant que commanditaire d'étude pour les PPRN, les services de l'Etat reconnaissent généralement ne pas être en mesure d'intégrer les phénomènes glaciaires et périglaciaires dans le cahier des charges des PPRN, car le plus souvent ils n'ont simplement pas connaissance des phénomènes potentiels.

Dans le cas où il y aurait connaissance, il n'y a généralement pas suffisamment d'éléments de caractérisation sur l'aléa pour le traduire de façon objective et pouvoir le défendre en termes de zonage : le caractère complexe de l'aléa (incluant notamment de fortes incertitudes sur les couplages phénomène glaciaire, avalanche, chute de sérac, crue torrentielle, instabilité,...) ainsi que l'absence de données sur les phénomènes historiques ou phénomènes de type centennal ne donnent pas les moyens de déterminer une enveloppe spatiale ni une occurrence et une intensité du phénomène retenu comme référence pour le zonage.

Enfin, il n'existe pas pour ce type de risques de doctrine réglementaire qui puisse permettre une traduction réglementaire du zonage.

Pas d'actualité, ne pas l'indiquer et un peu maladroit de rapprocher le risque glaciaire au risque cavité.



Pilier 5 - Réduction de la vulnérabilité et protection

Face aux ROGP comme aux autres risques naturels, la réduction de la vulnérabilité consiste à prendre des mesures pour réduire les conséquences négatives des aléas sur notre société. Il peut s'agir soit de réduire la probabilité d'atteinte des enjeux exposés ou l'intensité des phénomènes qui les atteignent (travaux de protection/ prévention : parades actives et parades passives, collectives ou individuelles), soit d'adapter les enjeux à leur exposition au risque afin de limiter les dommages.

De façon générale, la vulnérabilité des biens et des personnes, qu'il s'agisse de vulnérabilité physique, sociale, économique ou systémique, ne cesse de s'accroître dans les vallées alpines. Or le potentiel destructeur des phénomènes d'origine glaciaire et périglaciaire et de leurs couplages est important. Une seule catastrophe liée à cette dynamique peut faire de nombreux dégâts et victimes, et il est dans l'ensemble relativement difficile de s'en protéger structurellement. En cela les ROGP se rapprochent des thématiques de risque volcanique ou de tsunami ; de nombreux parallèles sont possibles en termes de réflexions sur la réduction des vulnérabilités.

Dans le cas général des ROGP, les enjeux ne sont pas situés à proximité immédiate de la source des phénomènes potentiellement impactant. La distance est souvent importante, tant horizontalement (plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres) que verticalement (dénivelés de plusieurs centaines de mètres à quelques milliers de mètres).

Toutefois si sur un plan spatial des distances sont observables, sur un plan temporel, la cinétique de certains phénomènes (vidange de poche d'eau, chute de sérac,...) peut avoir dans certains cas un impact très rapide sur les enjeux en aval (vulnérabilité physique des biens et des personnes).

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

Le point de vue des sciences humaines et sociales en matière de réduction de la vulnérabilité peut différer assez fortement ou a minima être très complémentaire des approches classiques plutôt techniques.

En effet, certaines équipes qui travaillent assez spécifiquement sur la vulnérabilité dans les régions de montagne, montrent que, en termes de réduction globale à long terme de la vulnérabilité, la réalisation de travaux de protection (parades actives et/ou passives) peut être contre-productive, puisqu'elle peut inciter (en l'absence de réglementation spécifique) à laisser augmenter les enjeux à l'aval des aléas et en cela augmenter progressivement le niveau de risque (Dupont et Pigeon, 2007).

Pour autant, il n'y a pas à ce jour d'étude spécifique des vulnérabilités face aux ROGP.

Dans le domaine des travaux de protections, les scientifiques participent à quelques actions distinctes sur les risques d'origine glaciaire / périglaciaire.

a. Risques d'origine glaciaire



L'effet des phénomènes glaciaires sur les ouvrages de protection à l'aval est globalement mal connu. Le manque de données sur les effets de la glace sur les ouvrages ne permet pas de prendre en compte ce paramètre dans le dimensionnement.

Les études actuellement en cours à l'Irstea sur le paravalanche de Tacconnaz ont entre autres pour objectif de mieux appréhender l'impact des chutes de séracs dans la conception des ouvrages de protection en précisant les effets de la masse neige+glace sur l'ouvrage (capteurs de pression installés dans le cadre du projet Dynaval).

b. Risques d'origine périglaciaire

Les études géophysiques sur le glacier rocheux de Bellecombe (station des Deux-Alpes, 38) permettent progressivement d'apporter des éléments sur la vulnérabilité des installations de domaines skiables face à l'évolution du permafrost et les stratégies pour la réduire (Cadet et al, 2011).

De même, le suivi de l'évolution du permafrost dans les parois rocheuses d'altitude a entre autre pour objectif d'anticiper les déstabilisations possibles d'infrastructure de montagne (refuges, remontées mécaniques ; Ravanel et al., 2013).

En Suisse, des travaux équivalents ont abouti à la publication d'un Guide pratique « Construire sur le pergélisol » (Bommer et al., 2010).

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

Travaux de protection possibles (voir détails par types de phénomènes dans le tableau suivant) :

Parades actives :

Certaines techniques existent pour réduire l'aléa, notamment dans certains cas identifiés de risques de vidange : pompages, galeries ou déversoirs de crues pour les lacs ; pompage après forage pour les poches d'eau intraglacières.

Si de tels travaux ont déjà été réalisés, les contraintes environnementales liées à l'environnement glaciaire ou périglaciaire (altitude, pente, météo, risques associés au glacier...) sont toujours très fortes et requièrent une grande technicité des méthodes, des outils et des équipes, que peu d'entreprises sont capables de rassembler.

Parades passives (protections collectives ou individuelles)

A l'exception du dispositif de Tacconnaz, compte tenu de l'ampleur des phénomènes potentiels, il y a globalement peu de cas où des ouvrages de protection passive sont envisageables.

Il existe actuellement une réelle **difficulté à trouver des entreprises capables d'assurer le travail dans des conditions de haute montagne**. En pratique, il n'existe pas aujourd'hui de liste d'entreprises qui ont l'expérience de ce type de travaux, ce qui peut rendre difficile la tâche des services opérationnels en charge de faire réaliser des travaux de réduction de la vulnérabilité.



De plus, les cas traités étant relativement peu nombreux, il y a à chaque fois une part importante **d'adaptation et d'innovation nécessaires**.

Ces difficultés sont amplifiées par le fait que **les techniciens ont peu l'habitude de capitaliser** leurs expériences.

Ces difficultés amènent à pointer, dans ce cadre, les **limites des marchés publics**, qui peuvent être inadaptés à ce type de demandes, non seulement pour les situations d'urgence mais également pour les travaux de recherche sur des temps plus longs.



Capacités de réaction face aux risques d'origine glaciaire et périglaciaire

	Parades (Travaux de protection)		Alerte	
	Actives	Passives	Capacité technique Déclenchement alerte	Temps de réaction
Vidange de lacs glaciaires / thermokarstiques	Possible Pompage ; galerie ; déverseur de crue	Techniques crues torrentielles (plage de dépôt, chenal d'écoulement) ?	Possible avec un suivi adapté Ex. Lac Effimero (Belvedere)	Court à très court selon le mécanisme de vidange et la distance propagation
Vidange de poche d'eau intraglacière	Possible dans certains cas pour les poches d'eau repérées (ex. forage + Pompage, contraintes fortes liées à l'env.)	Techniques crues torrentielles (toutefois demeure le problème = détection + très forte intensité)	Faible dans le cas général Possible pour poches d'eau repérées	Très court Ex Tête-Rousse : 10 à 30 min
Chute de séracs	non	Possible (techniques pare-blocs et paravalanches, ex. Taconnaz)	Possible Suivi topographique (station totale, GPS, InSAR) Suivi activité micro-sismique	? Dépend de la dynamique du glacier (jour)
Rupture de glacier	non	Possible selon importance de la rupture	Possible Suivi activité micro-sismique	1 à 2 semaines selon signes précurseurs ? Prévision pas toujours possible
Déstabilisation de glacier rocheux	Non	Possible selon importance et vitesse du phénomène (ex. glacier rocheux de Grueob, Suisse ; Roer et al., 2008)	Possible avec un suivi adapté Imagerie radar InSar et imagerie optique terrestre automatisée	Variable selon l'ampleur de la déstabilisation
Déstabilisation de parois rocheuses	Confortement envisageable à proximité des infrastructures	Techniques pare-blocs /merlons selon importance du phénomène		Quasi nul
Instabilités de secteurs déglacés		Techniques classiques glissement de terrain / laves torrentielles	Eventuellement Ex. laves torrentielles : si accumulation préalable d'un stock sédimentaire mobilisable	



Pilier 6 - Résilience et mise en sûreté

L'enjeu est dans cette partie de maintenir un niveau de fonctionnement de la société grâce aux capacités et à la souplesse du système permettant sa persistance.

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

En matière de risques naturels, qu'ils soient ou non d'origine glaciaire ou périglaciaire, la notion de résilience, c'est-à-dire la capacité d'un système à conserver, ou à reconstruire sa structure fondamentale en cas de perturbation, est étroitement liée à la notion de vulnérabilité. Or, comme l'a montré le chapitre précédent, il s'agit d'aspects qui ont été comparativement peu pris en compte au cours du XX^e siècle, dominé par la « culture de l'ingénieur » : cette approche repose sur l'idée que la catastrophe naturelle découle d'un processus physique, l'aléa, que l'expertise scientifique permet de mieux connaître, afin de proposer des solutions rationnelles et techniques pour le maîtriser, voire l'éradiquer, à un coût économiquement justifié (Sanseverino, 2009).

Récemment, les recherches sur les vulnérabilités et la résilience qui se sont développées dans le domaine des sciences humaines et sociales ont mis en évidence l'importance des facteurs anthropiques dans la « préparation à la catastrophe ».

Des projets de coopération tels que Cap-Haz-Net (caphaz-net.org) ou « Sites pilotes de gestion intégrée des risques naturels dans les Alpes » (CIMA POIA), ont mis en lumière certaines spécificités dans les régions de montagne : par exemple la vulnérabilité exacerbée des réseaux du fait des accès uniques dans les fonds de vallée. La prévention des risques naturels en montagne, par exemple par les mesures de structure (digues, paravalanches...), atteint probablement ses limites, du fait notamment de la multiplicité et de l'intensité des aléas.

Ces travaux tendent tous à conclure qu'il est important **de renforcer les capacités de résilience locale**.

D'autres travaux dans les vallées alpines montrent également l'influence négative que peut avoir la réalisation d'ouvrages de protection contre les risques : en diminuant auprès de la population la conscience du risque, en permettant à l'aval des ouvrages d'augmenter les enjeux, la diminution à court terme du niveau de risque peut entraîner une augmentation à long terme (Dupont et Pigeon, 2007). En recourant aux théories de la complexité et en visant leur application pragmatique, ils recommandent la mise en place des **politiques réactives**, qui permettent de prendre en compte rapidement les effets non prédictibles des politiques préalables, ou le manque de robustesse éventuel des outils de l'action publique antérieurs aux changements imprévus.

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles



Sur un plan opérationnel, les capacités locales de gestion de crise sont principalement basées sur le Plan Communal de Sauvegarde.

Or actuellement, non seulement beaucoup de petites communes n'ont pas les moyens humains, financiers, techniques... de mettre en place un PCS, mais aussi cet outil ne prend pas en compte spécifiquement les risques d'origine glaciaire et périglaciaire. Obligatoire dans les communes disposant d'un PPRN, il devrait pouvoir compléter / compenser certaines limites de mises en œuvre des PPRN (évoqué dans le Pilier 4), mais en pratique les communes ne disposent ni de la connaissance ni de la méthodologie associée aux ROGP.

A ce jour aucun PCS n'intègre un tel risque. Les seuls cas de plan de sauvegarde de la population face à un ROGP ont été mis en place en situation d'urgence (Rochemelon, Tête Rousse).

Dans les cas réalisés, une étroite collaboration entre tous les différents acteurs de la gestion du risque (scientifiques, techniques, décideurs, Protection Civile) a été une clé essentielle du succès du Plan de Sauvegarde.

Plusieurs éléments importants peuvent ressortir :

Logique d'un Plan de Sauvegarde

S'il n'existe pas de schéma type pour l'élaboration d'un Plan de Sauvegarde intégrant le « Risque d'origine glaciaire ou périglaciaire », la Sécurité Civile a davantage l'habitude de traiter les Plans Particuliers d'Intervention. La problématique des ruptures de barrage, par certains aspects, se rapproche de celle de certains ROGP (vidanges de lacs ou poches d'eau). Le dispositif de sauvegarde de la population associé aux PPI barrages peut donc être adapté aux situations de ROGP (comme cela a été le cas à St Gervais en 2010), avec la définition de zones touchées par l'onde de submersion :

- la zone de proximité immédiate (ZPI) pour laquelle le temps d'arrivée des flots est incompatible avec les délais de diffusion habituels de l'alerte par les autorités et où des moyens spécifiques d'alertes doivent donc être implantés, notamment des sirènes ;
- la zone d'inondation spécifique (ZIS) située en aval immédiat de la précédente et s'arrêtant en un point où l'élévation du niveau des eaux est de l'ordre de celui des plus fortes crues connues ;
- la zone d'inondation, située en aval de la précédente et où l'inondation est comparable à une inondation naturelle.

Dans ces cas-là, la logique « sécurité civile » tend à prendre en compte le scénario majorant, ce qui correspond avant tout à une orientation politique, dès lors qu'il y a des vies en jeu.

Alerte :



Lorsque l'alerte est techniquement possible (voir tableau « Capacité de réaction » page précédente), la transmission de l'alerte à la population est un élément primordial. Or les récents retours d'expérience ont montré les spécificités des vallées de montagne en la matière, où le relief empêche une bonne diffusion du son des systèmes d'alerte habituellement utilisés en plaine (son des « PPI-barrage »).

La Protection Civile de Haute Savoie a ainsi développé, testé et validé lors de la crise de Tête Rousse un son spécifique.

Mobilisation des experts

La mobilisation des experts scientifiques a été particulièrement importante sur les dernières situations auxquelles il a fallu faire face. En termes de résilience, cette capacité de réactivité quasi instantanée est essentielle. Or, du fait de l'organisation et des missions des laboratoires de recherche, elle ne va pas de soi, et pourrait s'avérer problématique en cas de crises potentiellement récurrentes (système d'expertise scientifique non stabilisé, peu de moyens consacrés, pas de chercheur « risque »...).

Communication en temps de crise

Etant donné l'ampleur potentielle des catastrophes que peuvent engendrer les ROGP, la communication en amont et pendant la crise est un point particulièrement sensible pour d'une part être sûr de toucher toutes les populations concernées mais d'autre part éviter les phénomènes de panique liés à une communication mal maîtrisée.

Là encore il n'existe pas de « protocole standard » ; cet aspect est géré au cas par cas par les cellules de crise.



Complément 1 - Retour d'expérience

En matière de ROGP, les possibilités de retours d'expérience, c'est-à-dire d'analyse détaillée d'un événement passé, sont relativement limitées du fait de la faible fréquence des phénomènes, voire de leur inexistence passée. L'importance de bien capitaliser sur les rares événements réalisés en est de ce fait accrue, afin d'en tirer au maximum les enseignements utiles pour améliorer la gestion de situations similaires le cas échéant.

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

En règle générale (à l'exception de certains REX opérationnels), le retour d'expérience ne relève pas du domaine scientifique. Mais en pratique les développements de méthodes réalisés lors de certaines situations de crise font l'objet de publications scientifiques qui participent grandement à la fois à la mémoire des événements et à la capitalisation de savoir-faire, en tout cas au moins pour les parties caractérisation et surveillance de l'aléa.

Les articles publiés à la suite des pompages à Tête Rousse (Vincent et al., 2012), de la vidange du lac du Belvédère (Kääb et al., 2004, Mortara & Tamburini 2009) ou de la prédiction de rupture du glacier du Weisshorn (Failletaz et al., 2011) en sont de bons exemples.

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

En Savoie, les 2 derniers cas de gestion de crise liés à des ROGP ont fait l'objet de retours d'expérience détaillés : celui de Rochemelon a été conduit par le service RTM, celui de Tête-Rousse par le SIDPC74.

Ces deux documents détaillés prennent en compte tous les aspects de la gestion de l'événement, de sa détection et sa surveillance à la réalisation des travaux de réduction de la vulnérabilité et aux mesures de sauvegarde des populations.

Etant donné l'intérêt de ce type de documents, peu courants comme cela a déjà été dit, la question de leur diffusion à un large réseau d'acteurs de la gestion des risques se pose.

Toutefois, de façon assez générale, on peut faire le constat que, dans le domaine de l'ingénierie des risques naturels, l'habitude de capitaliser les connaissances et l'expérience est, si ce n'est absente, du moins très insuffisamment développée. Chaque service a tendance à travailler avec ses propres méthodes et techniques, sur lesquelles il communique peu. Il y a globalement peu de publications, peu d'habitude de travail en réseau (pas d'échanges entre les entreprises privées ou autres sur les problèmes rencontrés).



Ce constat apparaît comme une faiblesse dans le cas de la réaction face aux ROGP, puisque les services se sentent pris au dépourvu lors de l'occurrence d'un phénomène, faute de pouvoir s'appuyer sur des expériences reconnues.

Le besoin se fait sentir de mieux **capitaliser les expériences sur des aspects très techniques et opérationnels de la gestion de ces risques spécifiques** : par exemple sur les techniques de forage dans la glace, quelles techniques ont déjà été testées, dans quelles conditions, quelles ont été les causes de succès ou d'échec (l'analyse des échecs représente souvent une source d'enseignement importante, à valoriser).

Complément 2 - Adaptation aux impacts attendus du changement climatique

Les glaciers et le permafrost alpins sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique en raison de leur proximité avec les conditions de fusion. En modifiant profondément la dynamique des glaciers et en dégradant durablement le permafrost présent dans les parois rocheuses et formations superficielles, ce réchauffement pourrait modifiera l'occurrence, la fréquence et l'intensité des ROGP. On attend globalement des fréquences d'occurrence de phénomènes accrues pour certains types de phénomènes (par ex. écroulements de parois de haute montagne), une modification de l'intensité de certains aléas (par ex. laves torrentielles liées au dégel du sol), l'apparition de nouveaux risques (par ex. chutes de glaciers suspendus, déstabilisations de glaciers rocheux), tandis que d'autres peuvent diminuer voire disparaître à terme (par ex. certaines chutes de séracs ou lacs glaciaires).

A. Etat des connaissances, préoccupations et investissements scientifiques

a. Risques d'origine glaciaire

Avec le réchauffement très marqué des glaciers froids de haute altitude, observé au cours des deux dernières décennies (Vincent et al., 2007), de nouvelles interrogations et inquiétudes apparaissent quant à la dynamique de certains glaciers : ainsi par exemple, si le glacier de Tacconnaz évolue vers un stade de glacier tempéré (température de 0°C à sa base) il pourrait être déstabilisé sur une surface importante et une rupture en masse du glacier pourrait se produire, concernant alors un volume beaucoup plus important que celui des chutes de séracs constatées (et surveillées) aujourd'hui.

Dans ce cas la caractérisation de la vulnérabilité à l'aval pourrait être fortement influencée par l'échelle de temps à laquelle elle est pensée : à court terme, prise en compte uniquement de la chute de séracs, à plus long terme (à définir par les scientifiques) prise en compte de la rupture du glacier.



Cette hypothèse reste à vérifier et une étude détaillée est encore nécessaire pour savoir si et quand cette zone glaciaire pourrait devenir tempérée dans le futur (Vincent, 2012, in GlaRiskAlp).

Dans d'autres cas l'évolution des températures pourrait faire évoluer favorablement le niveau d'aléa (cas possible à Tête Rousse). Mais là encore, le recul sur la problématique est encore trop faible et des études complémentaires demeurent nécessaires.

b. Risques d'origine périglaciaire

Les réseaux de suivi du permafrost mis en place progressivement (PermaNET, PermaFRANCE) commencent à être opérationnels et fournissent régulièrement des résultats, publiés sous forme de rapports annuels. Une forte sensibilité du permafrost aux variations climatiques est observée et influence les dynamiques superficielles.

Pour les instabilités de paroi rocheuse en altitude, des corrélations claires ont été établies entre l'augmentation des températures et l'activité d'éboulement et d'écroulement (augmentation très nette de la fréquence, moins de l'intensité, lien avec les épisodes chauds). On peut donc raisonnablement s'attendre dans le futur à des risques accrus liés à ces processus.

Pour les glaciers rocheux, un lien entre la température du sol et les variations de vitesse de déplacement est établi. Plusieurs cas d'accélération importante, pouvant aller jusqu'à la rupture, ont été observés et semblent s'être multipliés depuis quelques décennies (Haute-Savoie, Vanoise). Là aussi, on peut s'attendre dans le futur à une augmentation des vitesses et des cas de déstabilisation.

Dans les zones riches en glace enfouie (glace de permafrost ou glace morte de glacier dans les marges proglaciaires), plusieurs cas de formation de lacs thermokarstiques ou d'effondrements sont apparus récemment, et ont parfois révélé l'existence de glace enfouie dans des endroits où sa présence était inconnue. Ces phénomènes, au vu de leur potentiel de processus en cascade par vidange de lacs, pourraient constituer un risque émergent dans les zones de permafrost riche en glace.

B. Etat des pratiques, préoccupations et capacités de réponse opérationnelles

En tenant compte des constats posés par les scientifiques dans le contexte du changement climatique, la politique de prévention des risques d'origine glaciaire et périglaciaire doit impérativement prendre en compte les possibles évolutions dans un futur proche.



En effet, pour un phénomène détecté, les conséquences à l'aval peuvent dans de nombreux cas varier énormément en fonction de l'évolution à court, moyen ou long terme du phénomène.

Dans ce cadre, une piste de réflexion est de faire évoluer davantage les pratiques d'expertise vers des **approches par « scénarii générationnels »** qui figureraient les évolutions possibles à 30, 50, 100 ans. Pour anticiper les conséquences du changement climatique, une réflexion sur l'intégration de ces scénarii dans les documents réglementaires de zonage paraîtrait souhaitable.



Bibliographie partielle

- Bommer, C.; Phillips, M.; Keusen, H.-R.; Teyssie, P. (2010) : *Construire sur le pergélisol: Guide pratique*. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, WSL. 126 pages
- Cap-Haz-Net (2012): *Développer les capacités sociales face aux aléas naturels - vers des sociétés plus résilientes, projet du 7^e PCRD - WP 8 Aléas régionaux 2: aléas alpins* (rapport "Regional Hazard Workshop 2. Social capacity building for Alpine hazards")
http://caphaz-net.org/outcomes-results/CapHaz-Net_WP8_RHW-Alpine-Hazards.pdf
- 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), 120p.
- Faillietaz, J.,D. Sornette and M. Funk. (2011) *Icequakes coupled with surface displacements for predicting glacier break-off*. J. Glaciol., 57(203), 453–460.
- Glaciorisk (2004) - *Survey and prevention of extreme glaciological hazards in european mountainous regions*, compilé par D. Richard et M. Gay
(<http://glaciorisk.grenoble.cemagref.fr>)
- Glariskalp (2013) : *Risques glaciaires dans les Alpes Occidentales, programme Interreg Alcotra*, <http://www.fondms.org/glariskalp>
- Iribarren Anaconda P. & Bodin X. (2010) *Geomorphic consequences of two large glacier and rock glacier destabilizations in the Central Chilean Andes*. Geophy. Res. Abs., Vol. 12, EGU2010-7162, EGU General Assembly 2010, Vienna (Austria), April 2010
- Kääb A., Huggel C., Barbero S., Chiarle M., Cordola M., Epifani F., Haeblerli W. , Mortara G., Semino P., Tamburini A. and G. Viazzo (2004) *Glacier hazards at Belvedere glacier and the Monte Rosa east face, Italian Alps: processes and mitigation*. International symposium Interpraevent 2004 – Riva / Trient
- 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
- Mortara G., Tamburini A., eds, (2009) *Il Ghiacciaio del Belvedere e l'emergenza del Lago Effimero*. Regione Piemonte et SMS, 190 p
- Naaim, M., Faug, T. Naaim-Bouvet F. et N. Eckert (2010) *La modélisation au service de la conception des ouvrages de protection : étude du site avalancheux de Taconnaz*. Sciences Eaux et Territoires, la revue de l'Irstea, n°2 sept.2010.
- PARN (2012) *Document préparatoire au séminaire technique sur les risques glaciaires et périglaciaires* http://www.riskenat.org/risques-glaciaires-et-periglaciaires/document_preparatoire_seminaire_ROGP.pdf
- Patriarca, E., P. Tournaire (2010) *Menace sur St Gervais*. Ed. Catapac, 105p.
- PermaNET (2012) : programme Interreg Espace Alpin (www.permanet-alpinespace.eu/)



- Ravel L. (2009) *Evolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique*. Collection Edytem n°8.
- Ravel, L., Deline, P., Lambiel, C., Vincent, C. (2013) *Instability of a highly vulnerable high alpine rock ridge, the Arête inférieure des Cosmiques (Mont Blanc massif, France)*. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography. doi:10.1111/geoa.12000
- Richard, D., (2006) *Caractérisation des risques d'origine glaciaire : Etat des lieux, point de blocage, projets à promouvoir, CEMAGREF UR ETNA, convention MEDDE-DPPR, 31p*
- Roer I., Haeberli, W., Avian, M., Kaufmann, V., Delaloye, R., Lambiel, C., Kääh, A. (2008) *Observations and Considerations on Destabilizing Active Rockglaciers in the European Alps*. Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost, Fairbanks, July 2008
- Sanseverino-Godfrin V. (2009) *Risques naturels, vulnérabilité, résilience et droit dans un contexte de développement durable*. 20èmes JSE - Environnement entre passé et futur : les risques à l'épreuve des savoirs, Créteil.
- 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.SI
- SIDPC74 (2011) *Retour d'expérience - glacier de Tête-Rousse - Poche d'eau sous-glaciaire*.
- Strappazon G. (2011) : *La communication autour des risques majeurs : nouveaux acteurs, nouveaux enjeux, nouveaux discours*. Thèse de doctorat Sciences de l'information et de la communication , Université Stendhal, Grenoble
- Vincent, C., M. Descloitres, S. Garambois, A. Legchenko, H. Guyard, E. Lefebvre, and A. Gilbert (2012), *Detection of a subglacial lake in Glacier de Tête Rouse (Mont Blanc area)*, Journal of Glaciology, Vol. 58, No. 211, 13p.
- Vincent, C. ; Descloitres, M. ; Garambois, S. ; Legchenko, S. ; Guyard, H. ; Thibert, E. ; Gilbert, A. ; Karr, N. ; Tairraz, V., (2012), *Intraglacial water reservoir detected from a geophysical survey in 2010 and preventive measures to avoid a disaster*, Houille Blanche-Revue Internationale De L'Eau,(2), p. 34–41.