Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne engendré par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises

Pierre-Allain Duvillard, Ludovic Ravanel et Philip Deline

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rga/2816>

DOI : 10.4000/rga.2816

ISSN : 1760-7426

Traduction(s) :

Risk assessment of infrastructure destabilisation due to global warming in the high French Alps - URL : <https://journals.openedition.org/rga/2896> [en]

Éditeur :

Association pour la diffusion de la recherche alpine, UGA Éditions/Université Grenoble Alpes

Référence électronique

Pierre-Allain Duvillard, Ludovic Ravanel et Philip Deline, « Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne engendré par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 103-2 | 2015, mis en ligne le 01 septembre 2015, consulté le 08 décembre 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rga/2816> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rga.2816>

Ce document a été généré automatiquement le 8 décembre 2022.

Creative Commons - Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International
- CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne engendré par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises

Pierre-Allain Duvillard, Ludovic Ravel et Philip Deline

Introduction

- 1 Les Alpes sont particulièrement sensibles au réchauffement climatique : celui-ci y est deux à trois fois plus accusé qu'à l'échelle mondiale tandis que la cryosphère y est encore très développée (Haeberli et Beniston, 1998). La dégradation du permafrost alpin (réchauffement des terrains gelés en permanence) et le retrait des glaciers entraînent souvent des déséquilibres géomorphologiques au sein des parois rocheuses ou des formations superficielles, à l'origine de processus tels que les écroulements (volume > 100 m³), éboulements, chutes de blocs, glissements ou affaissements (Harris *et al*, 2009 ; Fischer *et al*, 2006). Au-delà des risques indirects pour les personnes et les infrastructures situées sur le parcours de masses en mouvement, ces processus sont à l'origine d'un risque direct de déstabilisation pour les infrastructures construites en haute montagne (Duvillard *et al*, 2015 ; Fabre *et al*, 2015 ; Dall'Amico *et al*, 2011 ; Ravel, 2010 ; Bodin *et al*, 2009).
- 2 Un nombre croissant de dommages est à déplorer sur les constructions avec des implications socio-économiques parfois lourdes. Ainsi, la déstabilisation du refuge des Cosmiques à Chamonix en 1998 par un écroulement rocheux nécessita des travaux de confortement au niveau des fondations (Ravel *et al*, 2013) tandis que l'affaissement de la gare amont du télésiège de Bellecombe aux Deux Alpes, construite sur un glacier rocheux, obligea à sa réimplantation durant l'été 2013 (Cadet et Brenguier, 2015). Cet

article se concentre sur les risques directs de déstabilisation d'infrastructures en haute montagne. Son objectif est de recenser ces infrastructures et, parmi elles, d'identifier les plus exposées afin de contribuer à la prévention des risques associés au réchauffement climatique dans une haute montagne alpine française fortement anthropisée. Ce travail de recherche s'intègre dans la continuité et l'application, en haute montagne, de travaux cherchant à caractériser les dommages potentiels imputables à des mouvements de terrain (van Westen *et al*, 2005 ; Leone *et al*, 1996 ; Leone, 1996) à travers la construction d'un indice de risque synthétique. La prévention des risques en lien avec les aléas de haute montagne est un domaine de recherche encore peu développé, à l'exception des avalanches (Bründl et Margreth, 2015) ou des débâcles de lacs glaciaires (Nussbaumer *et al*, 2014 ; Schaub *et al*, 2013).

- 3 Un recensement des infrastructures a été réalisé dans un Système d'Information Géographique (SIG) qui intègre plusieurs couches dont la carte APIM (*Alpine Permafrost Index Map* ; Boeckli *et al*, 2012) de distribution probable du permafrost et un inventaire des glaciers des Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (PAG ; Gardent, 2014) afin d'identifier les infrastructures présentes en contexte de permafrost probable et/ou de retrait glaciaire. Pour identifier les infrastructures les plus sensibles, un indice de risque a été construit. Il combine une caractérisation de l'aléa – le processus géomorphologique – et un diagnostic de la vulnérabilité. Enfin, une validation préliminaire de l'indice de risque a été effectuée à l'aide d'inventaires de dommages dans plusieurs secteurs des Alpes françaises.

Infrastructures de haute montagne dans les Alpes françaises

Les Alpes françaises

- 4 Sur le territoire français, les Alpes s'étendent entre le lac Léman et la mer Méditerranée sur un peu plus de 300 km et plus de 35 000 km². Ce territoire rassemble 3,5 % de la population française métropolitaine dans un espace économiquement très dynamique en particulier grâce au tourisme. La région Rhône-Alpes est la deuxième destination française en nombre de nuitées, tandis que les Alpes françaises comptent environ 200 stations de sport d'hiver.
- 5 Le tourisme alpin est ainsi largement orienté vers la pratique du ski : les quatre générations de stations développées successivement depuis le début du XX^e siècle sont le reflet d'un engouement presque continu qui s'est traduit par leur montée en altitude afin de leur assurer un bon enneigement. La fréquentation hivernale des remontées mécaniques des Alpes françaises des adhérents de *Domaines Skiables de France* est estimée à 575 millions de passages pour 47 millions de journées-skieur pour la saison 2012-13. Plus de 105 000 emplois dépendraient directement des domaines skiables des Alpes françaises.
- 6 Ces domaines totalisent plus de 3000 remontées mécaniques ☞ 40 à 50 nouvelles installations sont construites chaque année ☞ qui s'ajoutent à des dizaines de refuges et autres infrastructures (lignes électriques, dispositifs paravalanches, etc.). Toutes ne sont pas situées en haute montagne, considérée ici comme l'espace montagnard caractérisé par le permafrost et/ou le retrait glaciaire. Le permafrost des Alpes françaises concernerait environ 700 km² (Boeckli *et al*, 2012), soit 10 % des 6800 km²

situés au-dessus de 2000 m d'altitude. Les glaciers ne couvrent quant à eux que 4 % de cet espace, avec moins de 270 km² 52 % de la superficie englacée ayant disparu entre 1970 et 2009 tandis que ce retrait va s'accroissant (Gardent *et al*, 2014).

Recensement des infrastructures

- 7 Le recensement a été réalisé dans un SIG comprenant 15 couches d'information réparties en quatre ensembles principaux :
 - les infrastructures identifiées (points), localisées à l'aide de cartes topographiques et d'orthophotographies IGN et, éventuellement, d'autres documents (Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche), plans des pistes, etc. ;
 - l'inventaire des glaciers des Alpes françaises (extensions glaciaires en 2006-2009, 1967-1971 et à la fin du PAG), basé sur une digitalisation des glaciers sur les cartes topographiques ou orthophotographies et sur des observations géomorphologiques de terrain (Gardent *et al*, 2014). Des enveloppes de 25 m autour des emprises glaciaires de 1967-1971 et de 50 m autour de celles du PAG ont été créées dans le SIG pour prendre en compte la décompression des versants rocheux (Oppikofer *et al*, 2008) ou les glissements dans les moraines (Ravel et Lambiel, 2012) qui peuvent résulter du retrait glaciaire ;
 - les inventaires des glaciers rocheux dans les Alpes du Sud (Bornet *et al*, 2014) et la carte APIM qui présente un indice de probabilité de la présence actuelle de permafrost dans l'ensemble des Alpes selon les types de terrain et les conditions géomorphologiques rencontrées (Mair *et al*, 2011 ; Boeckli *et al*, 2012). Phénomène thermique, le permafrost n'est pas directement observable mais peut être détecté par des méthodes directes ou indirectes. La carte APIM de présence modélisée du permafrost a été calibrée par des relevés de formes et processus géomorphologiques associés au permafrost et/ou par la mesure d'indicateurs de permafrost (température, méthodes géophysiques, etc.) ;
 - les données générales d'information et de localisation telles que le maillage administratif de la France, les orthophotographies et les cartes topographiques IGN à l'échelle 1 : 25 000, et le Modèle Numérique de Terrain (MNT) ASTER GDEM v.2 de 2011.
- 8 Ce recensement a permis l'identification de 1769 infrastructures dans les secteurs à permafrost probable et/ou potentiellement affectés par le retrait glaciaire. L'application d'un indice de risque de déstabilisation doit permettre de classer ces infrastructures afin de reconnaître celles qui devront faire l'objet d'une attention particulière (études, suivi, réponses géotechniques).

Construction d'un indice de risque de déstabilisation

Quantifier le risque

- 9 Proposer un niveau de risque de déstabilisation pour les infrastructures de haute montagne nécessite une approche technique du risque. L'intérêt de cette approche est de pouvoir hiérarchiser les infrastructures vulnérables. Pour une infrastructure donnée (*e.g.* une gare, un pylône, un gazex), le risque de déstabilisation correspond au risque spécifique (Rs). Il peut être interprété plus largement comme une probabilité que l'événement « déstabilisation de l'infrastructure » se produise. Ici, le risque spécifique correspond à l'expression (Bell *et al*, 2004 ; van Westen *et al*, 2005 ; Leone, 1996 ; figure 1) :

$$Rs = (PD (D*V))$$

10 avec :

- **PD**, la probabilité d'occurrence d'une déstabilisation. L'aléa est exprimé par la probabilité d'occurrence d'une déstabilisation par la dégradation du permafrost et/ou le retrait glaciaire. PD dépend de facteurs passifs (Fp), c'est-à-dire de facteurs de « prédisposition » pouvant préparer une déstabilisation, et d'une probabilité de mise en œuvre de facteurs actifs (Pa) suffisants pour aboutir à une situation d'instabilité.
- **D**, le taux d'endommagement. La vulnérabilité (s.s.) est évaluée par le taux d'endommagement potentiel de l'élément exposé. Il est obtenu en utilisant une échelle d'intensité des dommages qui évalue les conséquences et la sensibilité des infrastructures en cas de mouvement de versant.
- **V**, l'indice de valeur unitaire. Les enjeux sont appréciés par un indice de valeur unitaire, qui traduit la valeur économique de fonctionnement d'une infrastructure. Cette classification des éléments inventoriés se fait au regard de la valeur financière (prix d'acquisition/construction) et/ou de la valeur d'exploitation (économique, fonctionnelle, stratégique).

Figure 1 - Les différentes composantes du risque de déstabilisation d'une infrastructure de haute montagne

Caractérisation de l'aléa

- 11 L'aléa fait référence à la probabilité d'occurrence d'un processus géomorphologique en raison de la dégradation du permafrost et/ou du retrait glaciaire, à court (quelques années) ou moyen terme (une à trois décennies). Les processus diffèrent selon la pente et le type de terrain (Harris *et al*, 2001). Ceux qui affectent le substratum rocheux (*e.g.* éboulements, écroulements) sont en partie contrôlés par la pente et la fracturation. Dans les formations superficielles, les processus (*e.g.* glissement, affaissement) sont

partiellement conditionnés par la pente, la granulométrie et la porosité. La valeur de l'aléa combine les divers facteurs passifs (Fp) et la probabilité que les facteurs actifs engendrent le dépassement du seuil conduisant à une déstabilisation (Pa) (figure 2).

Figure 2 - Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité de versant en haute montagne

Facteurs passifs (Fp)

- 12 Les facteurs passifs sont des paramètres présents de manière continue mais, le plus souvent, ils ne constituent pas les facteurs déclencheurs de la déstabilisation. Ils sont de deux types :

- l'angle de pente (P) des versants, évalué sur le MNT et/ou par le contexte géomorphologique (e.g. parois rocheuses à fortes pentes). Quatre catégories de pentes ont été retenues : faibles ($P < 15^\circ$), intermédiaires ($15^\circ < P < 36^\circ$), fortes ($36^\circ < P < 60^\circ$) ou très fortes ($P > 60^\circ$) ;
- la prédisposition géologique et géomorphologique à une instabilité en fonction du type de terrain. On peut distinguer deux catégories de terrains aux propriétés géomécaniques différentes : les formations superficielles, aux matériaux plus ou moins grossiers, et le substratum rocheux, composé de roches plus ou moins résistantes et fracturées. Une valeur qualitative permet de caractériser l'instabilité de ces formations et roches (tableau 1).

Tableau 1 - Prédisposition des formations superficielles et du substratum rocheux à une déstabilisation

■ Formes et formations superficielles		■ Substratum rocheux		Fracturation (densité)		
Type de terrain	Prédisposition	Type de roche		Réduite	Importante	Déstructuration
Remblais	Peu favorable			Assez favorable	Favorable	Favorable
Talus d'éboulis	Peu favorable			Peu favorable	Assez favorable	Favorable
Moraine et/ou tills	Assez favorable			Défavorable	Assez favorable	Favorable
Glaciers rocheux	Favorable			Défavorable	Assez favorable	Favorable
Dépôts d'écroulement	Peu favorable			Défavorable	Assez favorable	Favorable

- 13 L'évaluation quantitative de l'ensemble des facteurs passifs est possible par le croisement des paramètres au moyen d'une matrice (tableau 2). La possibilité de déstabilisation face aux facteurs passifs varie de 0 à 0.9 (0 : impossible ; 0.1 : quasi impossible ; 0.2 : improbable ; 0.4 : peu plausible ; 0.6 : probable ; 0.8 : très probable ; 0.9 : quasi certaine).

Tableau 2 - Matrice d'évaluation des facteurs passifs (Fp)

		Prédisposition géologique/géomorphologique			
		Défavorable	Peu favorable	Assez favorable	Favorable
Pente (P)	Faible	0	0.2	0.4	0.6
	Intermédiaire	0.1	0.4	0.6	0.8
	Forte	0.2	0.4	0.8	0.8
	Très forte	0.4	0.6	0.8	0.9

Facteurs actifs (Pa)

14 Il existe pour ce travail deux facteurs actifs, éventuellement combinés et sensibles au réchauffement climatique, pouvant conduire à une déstabilisation :

- la dégradation du permafrost, évaluée par une Probabilité de Déstabilisation liée à la dégradation du Permafrost (PDP). L'estimation de la présence de permafrost s'appuie sur la carte APIM. Compte tenu du niveau envisagé de dégradation du permafrost, une valeur correspondant à la probabilité de déstabilisation est associée à chaque type (tableau 3). Les valeurs maximales ont été placées dans les secteurs pouvant correspondre à un permafrost discontinu car, du fait d'une température généralement faiblement négative, il est probablement plus affecté par le réchauffement climatique actuel (Ravanel et Deline, 2008). Plus haut en altitude, le permafrost continu, généralement plus froid, est plus favorable à la stabilité des versants (Magnin *et al*, 2015). Ainsi, les mouvements de versant récents, mais également les déstabilisations d'infrastructures documentées ces dernières années, ont été principalement observées dans les secteurs à permafrost discontinu (*e.g.* télésiège de Bellecombe aux 2 Alpes ; Bodin *et al*, 2009). Quant au permafrost des plus basses altitudes (permafrost sporadique), son existence est due à des conditions géomorphologiques et topoclimatiques spécifiques qui le rendent moins sensible au réchauffement climatique en cours, d'où des déstabilisations possiblement beaucoup plus limitées (Scapozza *et al*, 2011).

Tableau 3 - Evaluation de la probabilité de déstabilisation du fait de la dégradation du permafrost

Indice de présence de permafrost			PDP	
Couleurs			Valeur	Signification
APTM	Classes	Signification		
		Permafrost présent dans presque toutes les conditions ¹	0.4	Peu probable
			0.6	Probable
		Permafrost présent principalement dans des conditions froides ²	0.8	Très probable
			0.6	Probable
			0.4	Peu probable
		Permafrost présent seulement dans des conditions très froides ³	0.2	Improbable

¹Permafrost continu; ²Permafrost discontinu; ³Permafrost sporadique

- le retrait des glaciers, qui induit une Probabilité de Déstabilisation liée au retrait Glaciaire (PDG) dans les secteurs récemment désenglacés, mais aussi dans les secteurs éventuellement affectés par une décompression post-glaciaire. L'appréciation de la probabilité de ces déstabilisations « paraglaciaires » (Ballantyne, 2013) s'appuie sur différentes enveloppes glaciaires, depuis la fin du PAG jusqu'à la période actuelle (figure 3). Par exemple, une enveloppe de 25 m autour des emprises glaciaires de 1967-1971 a été mise en place afin de prendre en compte les éventuelles instabilités déclenchées par le retrait des glaciers. A noter que les infrastructures actuellement implantées sur les glaciers sont adaptées à leurs mouvements.

Figure 3 - Evaluation de la probabilité de déstabilisation « paraglaciaire »

- 15 En cas de combinaison de ces deux processus, le croisement de PDP et PDG est réalisé par le biais d'une matrice associant une valeur quantitative aux différents scénarios qualitatifs (tableau 4).

Tableau 4 - Matrice d'évaluation des facteurs actifs (Pa) : le croisement de la Probabilité de Déstabilisation liée à la dégradation du Permafrost (PDP) et de la Probabilité de Déstabilisation liée au retrait Glaciaire (PDG).

		PDP				
		Quasi impossible	Improbable	Peu plausible	Probable	Très probable
PDG	Quasi impossible	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
	Improbable	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8
	Peu plausible	0.4	0.4	0.4	0.6	0.8
	Probable	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8
	Très probable	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Diagnostic de la vulnérabilité

- 16 La caractérisation de la vulnérabilité des infrastructures en cas de déstabilisation de leur terrain porteur nécessite la prise en compte du niveau d'endommagement potentiel des éléments exposés (la vulnérabilité s.s.) et de la valeur d'exploitation et/ou financière de ceux-ci (les enjeux).

La vulnérabilité s.s. (D)

- 17 Un taux d'endommagement (ou de vulnérabilité) potentiel peut être utilisé pour traduire l'interaction entre un phénomène naturel et un élément exposé en matière de mode et de niveau d'endommagement (Leone, 1996). Ce taux d'endommagement (D) peut être établi selon une échelle d'intensité des dommages (ID) en évaluant la sensibilité des infrastructures en cas de déstabilisation.

Figure 4 - Relation entre sensibilité des infrastructures et conséquences pour celles-ci en cas de déstabilisation (Boomer et al, 2010 modifié)

- 18 Dans un diagramme reliant sensibilité et conséquences (figure 4), les infrastructures exposées sont classées suivant une échelle d'intensité des dommages (ID) qui varie de I à IV. Ces quadrants traduisent les différents niveaux et modes d'endommagement des infrastructures exposées à des processus qui résultent de la dégradation du permafrost et/ou du retrait glaciaire (tableau 5). La quantification des modes d'endommagement repose sur la notion de taux d'endommagement (*i.e.* le degré de perte potentielle de l'infrastructure), dont la valeur est comprise entre 0.2 et 0.8.

Tableau 5 - Typologie des modes d'endommagement et taux d'endommagement potentiel des infrastructures (Leone et al, 1996, modifié).

ID	Mode d'endommagement	D
I	Dommages légers non structurels (gros œuvre non touché) Stabilité non-affectée	0.2
II	Fissuration Stabilité non-affectée	0.4
III	Fissuration des structures Stabilité affectée Déstabilisation partielle	0.6
IV	Fracturation des structures Stabilité générale remise en cause Déstabilisation importante	0.8

ID : Echelle d'intensité des dommages

D : Taux d'endommagement (degré de perte)

Les enjeux (V)

- 19 L'analyse de la vulnérabilité nécessite également une hiérarchisation des éléments exposés (ou enjeux) au regard de leur valeur financière (prix d'acquisition ou de construction) ou de la valeur d'exploitation (économique, stratégique, fonctionnelle) afin de déterminer l'importance de l'infrastructure pour l'exploitant. Un indice de valeur unitaire V de l'élément exposé permet de comparer les infrastructures. La connaissance de la valeur financière d'une infrastructure ou une estimation de sa capacité (accueil ou charge) permet d'apprécier plus précisément la valeur d'exploitation d'infrastructures similaires, mais la construction de cet indice indispensable pour considérer les enjeux reste emprunte de subjectivité (tableau 6).

Tableau 6 - Indice de valeur de différentes infrastructures

	Éléments exposés	Valeur financière (€) ¹	Valeur d'exploitation ²	V
Remontées mécaniques	Télesiege débrayable	7 500 000 €	Considérable	0.8
	Télesiege pince fixe	3 000 000 €	Intermédiaire	0.6
	Télésiège et Ropetow	500 000 €	Mineure	0.2
	Télécabine	8 000 000 €	Majeure	0.8
	DMC; Funitel; 3S (télécabine de grande capacité)	13 000 000 €	Exceptionnelle	0.9
	Téléphérique	-	Exceptionnelle	0.9
	Funiculaire	-	Exceptionnelle	0.9
	Ascenseur incliné	-	Considérable	0.6
Constructions	Refuge < 30 places	-	Considérable	0.6
	Refuge > 30 places	-	Majeure	0.8
	Refuge > 100 places	-	Exceptionnelle	0.9
	Restaurant	-	Considérable	0.6
	Abri	-	Mineure	0.2
	Chalet / Bâtiment	-	Intermédiaire	0.4
Dispositifs de défense et de protection contre les avalanches	Exploseur à gaz	80 000 €	Intermédiaire	0.4
	Câble transporteur d'explosifs	80 000 €	Intermédiaire	0.4
	Ouvrage charpenté	700 € / m	Mineure	0.2
	Ouvrage à vent	500 € / m	Mineure	0.2
	Galerie / Casquette / Tunnel pour voie de communication	30 000 € / m	Considérable	0.6
	Tourne / Digue / Mur d'arrêt	10 € / m ³	Mineure	0.2
	Etrave et dispositif freineur	250 € / m ³	Mineure	0.2
Réseaux	Route	-	Majeure	0.8
	Pylône ligne électrique de très haute tension	-	Exceptionnelle	0.9
	Antenne relais de communication	-	Considérable	0.6

¹Prix moyen ITT des remontées mécaniques en 2012 (*Montagne Leaders*, janvier/février 2013) et des équipements ou ouvrages paravalanches en 2004.

²Économique, stratégique, fonctionnelle.

Evaluation du risque spécifique

- 20 Le croisement entre la caractérisation de l'aléa et le diagnostic de la vulnérabilité permet la construction d'un indice de risque qui traduit le degré de risque de déstabilisation des infrastructures (tableau 7). Les infrastructures ont alors été classées selon un indice de risque allant de faible à très fort, accompagné d'une définition qualitative de la stabilité des infrastructures, de vraisemblablement stable à déstabilisation généralisée possible

Tableau 7 - Indice de risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne

		Aléa ¹					
		0.01	0.04	0.16	0.36	0.64	0.81
Vulnérabilité ²	0.01	0.0001	0.0004	0.0016	0.0036	0.0064	0.0081
	0.04	0.0004	0.0016	0.0064	0.0144	0.0256	0.0324
	0.16	0.0016	0.0064	0.0256	0.0576	0.1024	0.1296
	0.36	0.0036	0.0144	0.0576	0.1296	0.2304	0.2916
	0.64	0.0064	0.0256	0.1024	0.2304	0.4096	0.5184
	0.81	0.0081	0.0324	0.1296	0.2916	0.5184	0.6561

¹ Résultat de la probabilité d'occurrence d'une déstabilisation liée à la dégradation du permafrost et au retrait glaciaire (PD).

² Résultat du taux d'endommagement potentiel (D) multiplié par l'indice de valeur unitaire (V).

Risque spécifique (Rs)	Définition du risque	Définition du risque
Faible [0.0001 - 0.0016]	Infrastructure stable	Aucune analyse nécessaire.
Limité [0.0016 - 0.0256]	Faible déstabilisation possible	Analyse qualitative ³ conseillée.
Marqué [0.0256 - 0.1296]	Déstabilisation partielle possible	Réalisation d'une analyse qualitative ³ : appréciation d'expert, reconnaissance du terrain et analyse quantitative s'il n'existe pas de projet comparable.
Fort [0.1296 - 0.4096]	Déstabilisation considérable possible de l'infrastructure	Réalisation d'une analyse quantitative ⁴ limitée : appréciation par un ingénieur des paramètres, surveillance du sol de fondation et analyse quantitative s'il n'existe pas de projet comparable.
Très fort [0.4096 - 0.6561]	Déstabilisation généralisée possible de l'infrastructure	Surveillance indispensable de l'ouvrage : réalisation d'une analyse quantitative ⁴ très détaillée du sol de fondation sur le terrain et en laboratoire, appréciation indépendante d'expert (ingénieur de contrôle).

³ Analyse qualitative : modélisation analytique des mouvements sur la structure porteuse.

⁴ Analyse quantitative : modélisation numérique détaillée.

Application de l'indice de risque

- 21 L'application de l'indice de risque de déstabilisation que nous avons élaboré a permis de hiérarchiser les 1769 infrastructures de haute montagne dans les Alpes françaises en fonction de leur risque de déstabilisation. Elles sont très majoritairement situées dans les massifs de la Vanoise (59 %), des Ecrins-Oisans (19 %) et du Mont Blanc (5 %), et principalement concentrées dans les stations de ski de haute altitude de ces massifs, soit respectivement à Val d'Isère, Val Thorens, Tignes, La Plagne - Les Arcs, Les Deux Alpes, L'Alpe d'Huez - La Grave, et Chamonix (figure 5). 75 % de ces infrastructures sont des remontées mécaniques. 10 % des 1769 infrastructures sont caractérisées par un risque fort de déstabilisation. Aucune infrastructure n'est actuellement caractérisée par un risque très fort de déstabilisation.

Figure 5 - Répartition des infrastructures à risque dans les stations des Alpes françaises.

Validation préliminaire de l'indice de risque

- 22 L'indice de risque de déstabilisation des infrastructures a été confronté à trois inventaires détaillés de dommages dans les Ecrins, à Val Thorens et aux Arcs, ainsi qu'à des observations de terrain à La Plagne, Val d'Isère et Tignes. Cela a permis une première évaluation de la fiabilité de l'indice de risque. Il est validé par 10 infrastructures caractérisées par un risque fort qui présentent des dommages constatés ayant nécessité des travaux, mais d'autres inventaires détaillés de dommages sont nécessaires pour poursuivre la validation de l'indice.
- 23 Parmi les 15 infrastructures les plus à risques (caractérisées par un risque fort de déstabilisation), on retrouve les pylônes et la gare d'arrivée du télésiège de Bellecombe (Les Deux-Alpes) ainsi que le refuge des Cosmiques et la gare d'arrivée du téléphérique de l'Aiguille du Midi (Chamonix). Le cas du refuge des Cosmiques (figure 6) participe à valider l'indice dans la mesure où ses fondations ont été déstabilisées en 1998 suite à un écoulement rocheux (Ravanel *et al*, 2013).

Figure 6 - a : Les infrastructures du secteur de l'Aiguille du Midi (3848 m). b : Eroulement d'août 1998 sous le refuge des Cosmiques (ph. : A. Sage).

Discussion

- 24 Le travail présenté a permis d'identifier un grand nombre d'infrastructures potentiellement à risque dans la haute montagne alpine française. Néanmoins, ce travail souffre de différentes limites méthodologiques.
- 25 L'indice de risque pourrait par exemple être amélioré grâce à une meilleure interprétation de l'aléa. La distribution locale et l'état thermique du permafrost sont assez mal évalués. La couche APIM est le résultat d'une modélisation du permafrost sur un espace très vaste – l'ensemble des Alpes –, sa fiabilité est discutable et donc source d'erreurs dans l'évaluation de PDP. Le MNT ASTER GDEM v.2 peut être à l'origine d'une surévaluation de la pente des versants peu raides, et d'une sous-évaluation de la pente des versants très raides du fait de sa résolution à environ 27 m dans les Alpes. L'utilisation d'un MNT plus précis pourrait permettre d'affiner la pente des versants, améliorant ainsi la caractérisation des facteurs passifs.
- 26 Le diagnostic de la vulnérabilité (s.l.) devra être complété en prenant par exemple en compte les éventuels travaux de confortement que certaines infrastructures ont pu subir, ou les infrastructures récentes qui appliquent des solutions techniques de construction en haute montagne (très peu nombreuses). Cet axe de travail devrait permettre d'évaluer la capacité d'intervention des gestionnaires et ainsi la capacité de résilience face à la déstabilisation d'une infrastructure.

Conclusion

- 27 Cette étude s'inscrit dans une dynamique de prévention et de suivi des impacts du changement climatique dans la haute montagne alpine française. 1769 infrastructures ont été recensées et l'application d'un indice de risque de déstabilisation a permis de classer ces infrastructures selon un degré de risque variant de faible (159 infrastructures) à fort (185), voire très fort (0, actuellement). Une première validation de l'indice basée sur des inventaires et des observations de dommages a été entreprise. La réalisation de nouveaux inventaires de dommages permettra de déterminer si l'indice sous-évalue ou surévalue le risque. Une meilleure intégration de l'évolution géomorphologique des terrains sur lesquels sont implantées les infrastructures

permettra, dans le contexte de réchauffement climatique, de préciser les niveaux de risque, l'ampleur et les conséquences des déstabilisations potentielles.

BIBLIOGRAPHIE

- BALLANTYNE C.K., 2013 – « Paraglacial Geomorphology ». In : Elias S.A. (ed.) *The Encyclopedia of Quaternary Science*, vol. 3, pp. 553-565. Amsterdam : Elsevier.
- BELL R., GLADE T., 2004 – « Quantitative risk analysis for landslides-Examples from BÍldudalur », NW-Iceland. *Natural Hazards and Earth System Science*, 4 (1) : 117-31.
- BODIN X., DESVARREUX P., FABRE D., KRYSIECKI J.-M., GAY M., MARIE R., LORIER L., SCHOENEICH P., VALLON M., 2009 – « Analyse des risques induits par la dégradation du permafrost ». *Projet Fondation MAIF, Rapport Final*. ADRGT, 159 p.
- BOECKLI L., BRENNING A., GRUBER S., NOETZLI J., 2012 – « Permafrost distribution in the European Alps : calculation and evaluation of an index map and summary statistics ». *The Cryosphere*, 6 : 807-820. Doi :10.5194/tc-6-807-2012.
- BOMMER C., PHILIPS M., KEUSEN H., TEYSSEIRE P., 2010 – « Construire sur le pergélisol - Guide pratique ». Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf, 126 p.
- BORNET D., BODIN X., SCHOENEICH P., CHARVET R., BOUVET P., CAUBET D., ANDREIS N., RIGUIDEL A., 2014 – « Rock glaciers inventory in the Southern French Alps ». Conference proceedings of the 5th European Conference On Permafrost, Evora, juin 2014.
- BRÜNDL M. and MARGRETH S., 2015 – « Chapter 9 : Integrative Risk Management with the example of Snow Avalanches ». In : Haeberli W. and Whiteman C. et al (eds) : *Snow and Ice-Related Hazards, Risks and Disasters*. Amsterdam, Elsevier. 263-301.
- CADET H. and BRENGUIER O., 2015. – « The Bellecombes Rock Glacier Case Study, 2 Alpes, France ». In : Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Volume Eds.), « Climate Change and Engineering Geology » : 249-253. ISBN 978-3-319-09300-0, in : Lollino, G. (Series Ed.) /Engineering Geology for Society and Territory/, Proceedings of the IAEG 12th Congress, Torino, Septembre 2014.
- DALL'AMICO M., CARTON A., CREMONESE E., CURTAZ M., MORRA DI CELLA U., PARO L., PHILLIPS M., POGLIOTTI P., SCHOENEICH P., SEPPI R., ZAMPEDRI, G., ZUMIANI M., 2011. – « Chapter 4 : Local ground movements and effects on infrastructures ». 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. 107-147
- DUVILLARD P.-A., RAVANEL L., DELINE P., 2015 – « Risk assessment of infrastructure destabilization in context of permafrost in the French Alps ». In : Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Volume Eds.), « Climate Change and Engineering Geology » : 297-300. ISBN 978-3-319-09300-0, in : Lollino, G. (Series Ed.) /Engineering Geology for Society and Territory/, Proceedings of the IAEG 12th Congress, Torino, Septembre 2014.

FABRE D., CADET H., LORIER L., LEROUX O., 2015. – « Detection of permafrost and foundation related problems in high mountain ski resorts ». In : Lollino, G., Manconi, A., Clague, J., Shan, W., Chiarle, M. (Volume Eds.), « Climate Change and Engineering Geology » : 321-324. ISBN 978-3-319-09300-0, in : Lollino, G. (Series Ed.) /Engineering Geology for Society and Territory/, Proceedings of the IAEG 12th Congress, Torino, Septembre 2014.

FISCHER L., KÄÄB A., HUGGEL C. and NOETZLI, J., 2006 – « Geology, glacier retreat and permafrost degradation as controlling factors of slope instabilities in a high-mountain rock wall : the Monte Rosa east face », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 761-772, doi :10.5194/nhess-6-761-2006.

GARDENT M., 2014 – *Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire*. Thèse de doctorat en Géographie, Université de Savoie, 444 p.

GARDENT M., RABATEL A., DEDIEU J.-P., DELINE, P., 2014 – « Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s ». *Global and Planetary Change*, 120 : 24-37. Doi : 10.1016/j.gloplacha.2014.05.004

HAEBERLI W. and BENISTON, M., 1998 – « Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps ». *Ambio*, 27, p 258-265.

HARRIS C., DAVIES M.C.R., ETZELMULLER B., 2001 – « The assessment of potential geotechnical hazards associated with mountain permafrost in a warming global climate ». *Permafrost and periglacial processes*, vol. 12 : p. 145 - 156.

HARRIS C., ARENSEN LU., CHRISTIANSEN HH., ETZELMÜLLER B., FRAUENFELDER R., GRUBER S., HAEBERLI W., HAUCK C., HÖLZLE M., HUMMUM O., ISAKSEN K., KÄÄB A., KERN-LÜTSCHG MA., LEHNING M., MATSUOKA N., MURTON JB., NÖTZLI J., PHILLIPS M., ROSS N., SEPPÄLÄ M., SPRINGMAN SM., VONDER MÜHLL D., 2009 – « Permafrost and climate in Europe : monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. » *Earth-Sci. Rev.*, 92(3-4) :117-171

LEONE F., 1996 – *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. Thèse de doctorat de Géographie, Université Joseph Fourier, 286 p.

LEONE F., ASTE J.P., LEROI E., 1996 – « L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque ». *Revue de Géographie Alpine*, n° 1, tome 84 : p. 35-46.

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 Réseau d'observation du permafrost sur le long terme. *Rapport de synthèse. INTERPRAEVENT Série de publications 1, Rapport 3*. Klagenfurt.

MAGNIN F., DELINE P., RAVANEL L., NOETZLI J. and POGLIOTTI P., 2015 – « Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842 m a.s.l.) ». *The Cryosphere*, 9, 109-121, doi :10.5194/tc-9-109-2015.

NUSSBAUMER S., SCHAUB Y., HUGGEL C. and WALZ A., 2014 – « Risk estimation for future glacier lake outburst floods based on local land-use changes ». *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1611-1624, doi : 10.5194/nhess-14-1611-2014.

OPPIKOFE T., JABOYEDOFF M., KEUSEN H.R., 2008 – « Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps ». *Nature Geoscience*, 1 : p. 531-535.

RAVANEL L., DELINE P., 2008 – « La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du Petit Age Glaciaire ».

Géomorphologie, 4 : 261-272.

RAVANEL L., 2010 – *Caractérisations, facteurs et dynamiques des écroulements rocheux dans les parois à permafrost du massif du Mont-Blanc*. Thèse de doctorat en Géographie mention géomorphologie, Université de Savoie, 322 p.

RAVANEL L. et LAMBIEL C., 2012 – Evolution récente de la moraine des Gentianes (2894 m, Valais, Suisse) : un cas de réajustement paraglacière ? *Environnements périglaciaires*, 18 : 53-60.

RAVANEL L., DELINE P., LAMBIEL C. and VINCENT C., 2013 – « Instability of a high alpine rock ridge : the lower arête des Cosmiques, Mont-Blanc massif, France ». *Geografiska Annaler : Series A, Physical Geography*, 95 : p. 51-66. doi :10.1111/geoa.12000

SCAPOZZA C., LAMBIEL C., BARON L., MARESCOT L., REYNARD E., 2011 – « Internal structure and permafrost distribution in two alpine periglacial talus slopes, Valais, Swiss Alps ». *Geomorphology* 132(3-4), pp. 208-221.

SCHAUB Y., HAEBERLI W., HUGGEL C., KÜNZLER M. and BRÜNDL M., 2013 – « Landslides and new lakes in deglaciating areas : a risk management framework ». *Landslide Science and Practice*, vol. 7, DOI 10.1007/978-3-642-31313-4_5.

Van WESTEN C.J., van ASCH T.W.J., SOETERS R., 2005 – « Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult ? ». *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65 (2) : p. 167-184.

RÉSUMÉS

Dans le contexte du changement climatique actuel, les milieux de haute montagne sont soumis à de profonds bouleversements tels que la fonte des glaciers ou la dégradation du permafrost, à l'origine de mouvements de versant au sein des parois rocheuses comme des formations superficielles. Ces processus impliquent des risques directs de déstabilisation pour les infrastructures (refuges, remontées mécaniques, etc.). Dans un but de prévention de ces risques, un recensement des infrastructures de haute montagne dans les Alpes françaises a été réalisé à l'aide d'un Système d'Information Géographique constitué de plusieurs couches de données dont des cartes de la répartition potentielle du permafrost et de l'extension des glaciers depuis la fin du Petit Âge Glaciaire. 1769 infrastructures ont été identifiées dans des secteurs à permafrost probable et/ou éventuellement affectés par le retrait glaciaire. Un indice de risque a été construit afin d'identifier et classer les infrastructures potentiellement à risque. Il inclut une caractérisation de l'aléa et un diagnostic de la vulnérabilité. 10 % des infrastructures sont caractérisées par un risque fort de déstabilisation.

Due to ongoing global warming, high alpine environments are affected by significant changes, such as glacial retreat and permafrost warming, which can trigger mass movements in rock slopes or superficial deposits. These processes generate a risk of direct destabilisation for high mountain infrastructures (huts, cable cars, etc.). To help prevent such risks, an inventory of all the high mountain infrastructures in the French Alps was carried out using a Geographic Information System. This combined several data layers, including the Alpine Permafrost Index Map and glacier inventories since the end of the Little Ice Age. 1,769 infrastructures were identified in areas probably characterised by permafrost and/or possibly affected by glacier shrinkage. An index of destabilisation risk was constructed to identify and rank infrastructures at risk. This theoretical risk index includes a characterisation of hazards and a diagnosis of vulnerability. 10 % of the infrastructures were characterised by a high risk of destabilisation.

INDEX

Mots-clés : infrastructures de haute montagne, indice de risque, dégradation du permafrost, retrait glaciaire, Alpes françaises

Keywords : high mountain infrastructure, risk index, permafrost degradation, glacier shrinkage, French Alps

AUTEURS

PIERRE-ALLAIN DUVILLARD

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France.

IMSRN, Parc Pré Millet - 680 Rue Aristide Bergès, 38330 Montbonnot, France.

LUDOVIC RAVANEL

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France.

PHILIP DELINE

Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France.