

Extension spatiale du pergélisol dans les Alpes vaudoises; implication pour la dynamique sédimentaire locale

par

Christophe LAMBIEL¹, Eric BARDOU², Reynald DELALOYE³,
Philippe SCHUETZ¹ et Philippe SCHOENEICH^{4,1}

Résumé.—LAMBIEL C., BARDOU E., DELALOYE R., SCHUETZ P. et SCHOENEICH P., 2009. Extension spatiale du pergélisol dans les Alpes vaudoises; implication pour la dynamique sédimentaire locale. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 91.4: **-***.

Cet article présente une évaluation de la répartition spatiale du pergélisol dans les Alpes vaudoises et des types de dangers potentiels qui lui sont associés. La démarche suivie a tout d'abord consisté en la simulation numérique de l'extension du pergélisol dans les formations superficielles et les parois rocheuses sur la base de modèles existants. Les résultats obtenus montrent que le pergélisol se rencontre essentiellement dans 3 secteurs: le massif des Diablerets, la région Grand Muveran – Paneirosse et la partie amont du vallon de Nant. La présence de glaciers à des altitudes relativement basses, du fait de l'humidité du climat des Hautes Alpes Calcaires, réduit considérablement l'extension des accumulations sédimentaires potentiellement occupées par du pergélisol. Par contre, de nombreuses parois rocheuses sont situées à l'intérieur de la ceinture d'occurrence du pergélisol. L'analyse géomorphologique des secteurs concernés montre que, si le nombre de glaciers rocheux actifs/inactifs est extrêmement restreint, les dépôts morainiques datant du Petit Age Glaciaire et les diverses accumulations gravitaires et fluviales représentent des volumes sédimentaires localement importants. Dans certains cas, comme dans les dépôts du cirque du Dar ou le bastion morainique des Martinets, le ravinement est très important. L'évaluation de l'impact du pergélisol sur la dynamique des torrents et des parois montre enfin que la principale source de danger périglaciaire dans les Alpes vaudoises est le ravinement des accumulations sédimentaires.

Mots clés: Pergélisol, glaciers, formations superficielles, parois rocheuses, laves torrentielles, dangers naturels, cartographie géomorphologique, Hautes Alpes calcaires.

¹Institut de Géographie, Université de Lausanne

²Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque, Université de Lausanne

³Département de Géosciences, Géographie, Université de Fribourg

⁴Institut de Géographie Alpine, Université de Grenoble

Abstract.—LAMBIEL C., BARDOU E., DELALOYE R., SCHUETZ P. and SCHOENEICH P., 2009. Permafrost distribution in the Vaud Alps (Switzerland); implication for the local sedimentary dynamics. *Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 91.4: ***-***.

This paper presents an evaluation of the spatial distribution of permafrost in the Vaud Alps (Switzerland) and of the types of natural hazards which can be associated with it. The first step was the numerical simulation of the permafrost distribution in the sedimentary deposits and in the rock walls on the basis of existing models. The results show that permafrost is mainly present in the three sectors of the Diablerets massif, the Grand Muveran – Paneirosse region and the upper part of vallon de Nant. The presence of glaciers at relatively low altitudes, due to the humidity of the climate of the Hautes Alpes Calcaires, strongly reduces the area of sedimentary deposits in which permafrost may be present. On the other hand, numerous rock walls are located within the permafrost belt. In a second step, the geomorphological analysis has shown that there are very few active/inactive rock glaciers and that the moraine deposits of the Little Ice Age and the diverse gravitational and fluvial deposits constitute an important local sedimentary stock. In some cases erosion is very active, as for example in the deposits found in the cirque du Dar or the Martinets glacier moraines. Finally, the evaluation of the impact of permafrost on the dynamics of the torrents and of the rock walls has shown that the main source of periglacial hazards in the Vaud Alps is the gullyng of the sedimentary deposits.

Keywords: Permafrost, glaciers, sedimentary deposits, rock walls, debris flows, natural hazards, geomorphological mapping, Hautes Alpes calcaires.

INTRODUCTION

Le pergélisol (ou permafrost) désigne les terrains dont la température demeure inférieure ou égale à 0°C durant deux années consécutives au moins. Dans les régions montagneuses, cet état de gel permanent se rencontre aussi bien dans les parois rocheuses que dans les accumulations sédimentaires, comme les éboulis, les moraines ou les glaciers rocheux (HAEBERLI *et al.* 2006, NOETZLI *et al.* 2007, LAMBIEL & PIERACCI 2008). L'augmentation de la température de plus de 0.5°C par décennie depuis les années 1970 en Suisse provoque une dégradation du pergélisol, qui se manifeste par un épaississement du niveau actif (couche superficielle qui dégèle en été) et un réchauffement du terrain en profondeur (PERMOS 2009).

La dégradation du pergélisol peut avoir des conséquences diverses sur la stabilité des versants. Dans les formations superficielles, on peut s'attendre, suivant la morphologie locale, à une augmentation du stock sédimentaire non consolidé et à une augmentation de la déformation des sédiments gelés (KÄÄB *et al.* 2007), alors que, dans les parois rocheuses, une augmentation des chutes de blocs et, à terme, une déstabilisation des parois peuvent se produire (GRUBER & HAEBERLI 2007). En outre, le retrait actuel des glaciers laisse apparaître d'importantes surfaces de matériaux meubles non consolidés. Cette évolution laisse présager une possible augmentation des instabilités de terrain en haute montagne et/ou un déplacement des zones instables (HARRIS *et al.* 2009,

JOMELLI *et al.* 2009). D'une manière générale, l'alimentation des torrents en matériaux meubles peut s'en trouver modifiée. En conséquence la dynamique torrentielle pourrait changer localement au cours des décennies à venir. Dans la perspective d'une hausse marquée des températures atmosphériques et d'une possible augmentation des pluies extrêmes d'ici la fin du 21^e siècle (IPCC 2007), la prise en compte de la composante «permafrost» dans l'étude des dangers naturels pouvant affecter un territoire apparaît comme nécessaire pour la planification de mesures de protection.

Les études menées jusqu'à ce jour sur la géomorphologie périglaciaire dans le canton de Vaud sont sommaires. Parmi celles-ci, nous citerons l'étude de PHILLIPS (1993), sur la géomorphologie du Vallon de Nant, de SHOENEICH (1992, 1998), respectivement sur les glaciers rocheux fossiles des Préalpes vaudoises et sur les stades de retrait glaciaire dans les Préalpes Vaudoises, de PHILLIPS & REYNARD (1996) et WENKER (1997), sur la répartition du pergélisol dans le massif des Diablerets et enfin de REYNARD *et al.* (1999), sur l'étude des corps sédimentaires gelés autour de la cabane des Diablerets. PIERACCI (2006) a, quant à lui, étudié la répartition du pergélisol dans les éboulis de la région du Grand CHAVALARD (VS), dans des conditions topo-climatiques similaires à celles qui prévalent de l'autre côté de la limite cantonale (voir aussi PIERACCI *et al.* 2008). La présente étude a été effectuée dans le but de combler le déficit de connaissances relatives au domaine périglaciaire des Hautes Alpes Calcaires.

MODÈLE UTILISÉ

Les facteurs contrôlant la répartition du pergélisol dans les accumulations sédimentaires sont multiples. Si la température moyenne annuelle de l'air (contrôlée essentiellement par l'altitude) et le rayonnement solaire (contrôlé par l'exposition du versant et la topographie) sont les facteurs les plus influents, d'autres facteurs, tels que la neige (épaisseur, durée de l'enneigement) et les caractéristiques de la surface du sol sont également à prendre en considération. De plus, les accumulations sédimentaires poreuses sont souvent le lieu de mécanismes complexes de circulations d'air internes, qui peuvent, localement, conduire à la formation de pergélisols à basse altitude, comme dans les éboulis froids des versants nord-ouest et est du Mont d'Or (LAMBIEL 2006, MORARD *et al.* 2008). La combinaison de tous ces facteurs rend la distribution du pergélisol extrêmement complexe et discontinue. A l'heure actuelle, cette complexité est difficilement intégrable dans les modèles de simulation numérique de la répartition du pergélisol. Dans les formations superficielles, on se résout souvent à simuler la répartition potentielle du pergélisol, en fixant des seuils (altitudes) au-dessus desquels la présence de pergélisol est possible, respectivement probable. Ces altitudes peuvent être approximées en observant

la limite inférieure des glaciers rocheux inactifs, respectivement actifs, dans une région donnée. Plusieurs inventaires de glaciers rocheux ont été effectués dans les Alpes Valaisannes, notamment dans l'Entremont (DELALOYE & MORAND 1998) et dans la région Bagnes-Hérémence (LAMBIEL & REYNARD 2003). Ceux-ci ont montré que la limite inférieure du pergélisol variait très peu à l'échelle régionale, du fait de la faible variabilité régionale de la température moyenne annuelle de l'air. La proximité géographique des Hautes Alpes Calcaires et des Alpes Valaisannes nous autorise donc à utiliser les valeurs «valaisannes» pour simuler la répartition potentielle du pergélisol «vaudois». La limite inférieure d'occurrence du pergélisol possible est ainsi de l'ordre de 2400 m dans les versants nord et de 2600 m dans les versants sud. Pour la catégorie «pergélisol probable», ces limites peuvent être relevées d'environ 200 m.

Dans les parois rocheuses, la couverture de neige fortement réduite et la quasi absence de débris rocheux rend la présence de pergélisol directement dépendante de l'altitude, de l'orientation et de certaines propriétés de la roche comme l'albédo. La répartition du pergélisol y est donc, à priori, moins complexe. Les simulations proposées sont basées sur des températures enregistrées dans le rocher à une dizaine de centimètres de profondeur depuis 2005 dans deux sites des régions de Verbier et du Vallon de Réchy (Valais). Comme l'évolution des températures de la roche est en grande partie directement dépendante de l'évolution des températures de l'air, il a été possible de reconstituer les températures de la roche pour les périodes 1850-1985 et 1985-2006 en se basant sur les températures de l'air, 1850 marquant le début du réchauffement post Petit Age Glaciaire (PAG) et 1985 marquant le début de la période chaude dans laquelle nous nous trouvons aujourd'hui. Les limites proposées correspondent aux altitudes moyennes de l'isotherme 0°C de la roche pour ces deux périodes. Pour la période 1850-1985, la limite inférieure du pergélisol peut être située à environ 2600 m dans les versants nord et 3300 m dans les versants sud. Pour la période 1985-2006, cette limite remonte d'environ 200 m en altitude. Etant donné le temps de réaction relativement lent en profondeur, il faut considérer que la présence de pergélisol résiduel est possible au-dessous de la limite 1985-2006. Un réchauffement supplémentaire de 1.5 °C environ ferait remonter la limite inférieure du pergélisol en paroi rocheuse au-dessus des plus hauts sommets des Alpes vaudoises.

Les simulations de l'extension du pergélisol ont été effectuées à l'aide du logiciel ArcGIS et du MNT25 de swisstopo. L'identification automatique des parois a été obtenue en fixant un seuil de déclivité de la pente à 40°. En clair, toutes les pentes dont la déclivité est supérieure à 40° sont associées à des parois rocheuses. En dessous de ce seuil, on trouve les accumulations sédimentaires de tous types (moraines, éboulis, glaciers rocheux, etc.), ainsi que les zones rocheuses faiblement déclives.

EXTENSION DU PERGÉLISOL ET CARACTÉRISTIQUES GÉOMORPHOLOGIQUES

Etant données les altitudes, c'est essentiellement dans la région allant de la Dent de Morcles au massif des Diablerets que l'occurrence de pergélisol est la plus probable (figure 1). La simulation de l'extension du pergélisol dans ces secteurs a été complétée par une cartographie de la géomorphologie sur la base d'orthophotos. Seules les zones contenant d'importants volumes sédimentaires tels que les moraines, les glaciers rocheux ou les grands dépôts fluviaux susceptibles de présenter un danger potentiel ont été cartographiées. L'analyse géomorphologique s'est par ailleurs limitée aux altitudes supérieures à 2200 m environ, là où des indices de la présence de pergélisol sont susceptibles d'être rencontrés.

Le nombre élevé de glaciers dans la zone d'étude nécessite une remarque préliminaire. Diverses études ont montré que les marges proglaciaires nées du retrait glaciaire post PAG ne sont guère favorables à la présence de pergélisol (DELALOYE 2004). En effet, les glaciers, lors de leurs avancées, ont en général profondément remodelé la géomorphologie préexistante. Des perturbations thermiques (réchauffement du terrain) et mécaniques (déplacement d'éventuels glaciers rocheux vers l'aval, formant ce que l'on nomme moraines de poussée) ont pu contribuer à dégrader, voire détruire complètement des pergélisols préexistants. Aujourd'hui, c'est donc dans les bordures des marges proglaciaires que l'on peut s'attendre à trouver des sédiments gelés, comme par exemple des moraines de poussée, alors que, dans le centre du champ proglaciaire, le pergélisol est le plus souvent absent.

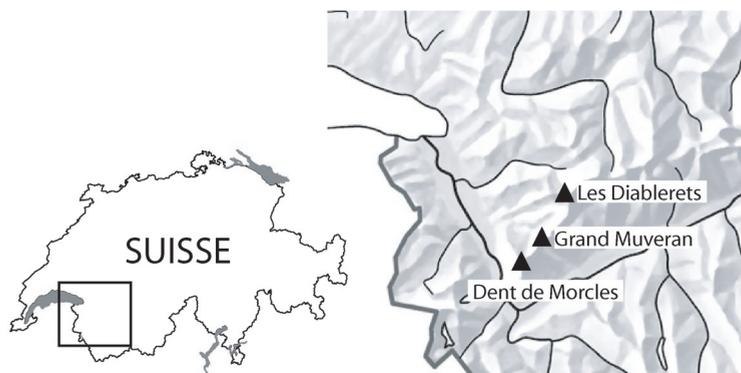


Figure 1.–Localisation de la zone d'étude.

1. Massif des Diablerets

1.1 Parois rocheuses

Le massif des Diablerets se caractérise par d'importantes barres de calcaires massifs, séparées par des vires plus ou moins développées. D'après le modèle

utilisé, les versants rocheux situés au nord du Sex Rouge semblent occupés par du pergélisol. Ceci est attesté par des observations de glace dans les fissures de la roche lors de la construction de la gare d'arrivée du téléphérique du Sex Rouge en août 1998 (comm. orale M. GIRARDIN, bureau PÉTIGNAT & CORDOBAZ). Le versant sud-ouest du Sex Rouge se trouve quant à lui en dessous de la ceinture du pergélisol (figure 2). L'état de gel permanent caractériserait les barres rocheuses dominées par l'Oldenhorn et le sommet sans nom situé au nord de ce dernier, à 2887 m, dans leurs orientations nord (nord-ouest à nord-est). Le pergélisol occuperait également l'intégralité des parois situées au nord-ouest du glacier des Diablerets, à l'amont du Mauvais glacier, et au nord de Tête Ronde (figure 3). Par contre, celles dominant Pierredar et Creux de Champ ne semblent pas concernées par le pergélisol, tout comme le versant nord-ouest de Culan.

1.2 Formations superficielles

Au-dessus de 2500 m, les pentes inférieures à 40° sont, dans l'ensemble, occupées par des glaciers. La conséquence en est une forte réduction de l'extension du pergélisol et donc le nombre très restreint de glaciers rocheux.

Cirque du Dar

C'est dans le Cirque du Dar et dans la région de la Cabane des Diablerets que le pergélisol semble le plus étendu (figure 2). Sa présence y est attestée par la mise à jour d'un béton de glace à 1 m de profondeur environ dans des matériaux sédimentaires excavés au cours de l'été 2000 à l'est du Sex Rouge, vers 2900 m d'altitude (comm. orale M. Girardin, bureau Pétignat & Cordobaz). Morphologiquement, le meilleur indice de la présence de pergélisol est le glacier rocheux d'Entre la Reille (figure 4, lettre a et figure 5A, flèche). Les mesures géoélectriques effectuées par REYNARD *et al.* (1999) ont mis en évidence la forte teneur en glace du glacier rocheux. Dans cette étude, des mesures ont également été effectuées dans les éboulis situés à l'est du glacier rocheux et en face de la Cabane des Diablerets, dans un versant orienté au nord-ouest (figure 4, b). Ces mesures ont montré que, d'une part, du pergélisol était présent au sein de ces éboulis et que, d'autre part, de la glace occupait la partie sommitale de l'éboulis de la cabane, signe possible de l'enfouissement et du regel de névés sous des matériaux éboulés.

Un minuscule glacier rocheux (ou protalus rempart) et quelques petits bombements situés dans les pentes nord-ouest du Cirque du Dar, à une altitude d'environ 2500 m, semblent attester l'existence de pergélisol dans le secteur (figure 4, c et figure 5B). La présence de névés pérennes au pied des parois, souvent dans la partie amont de certaines ravines, est également à relever (figure 5D). Dans certains cas, on observe de la glace en périphérie des névés, signe du regel de la neige détrempée. Ces névés gelés sont également des indicateurs de conditions de pergélisol.

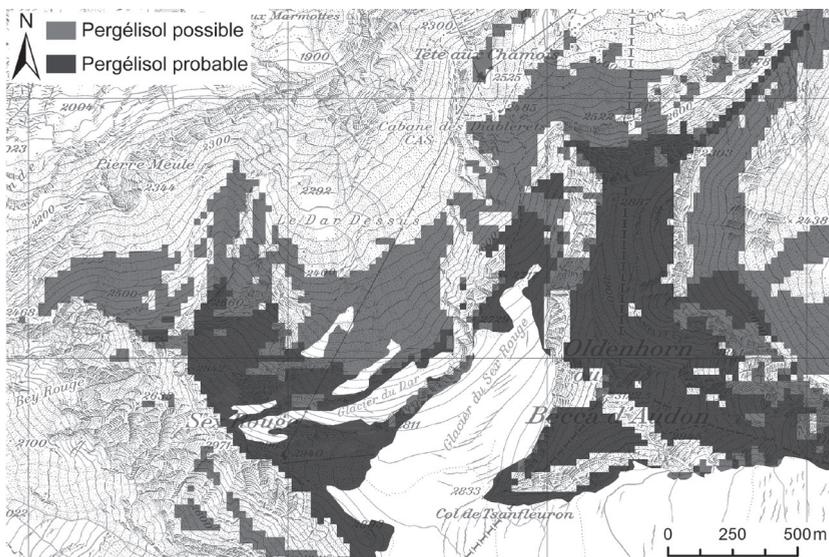


Figure 2.—Extension du pergélisol dans le secteur du Dar (massif des Diablerets). Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA100046).

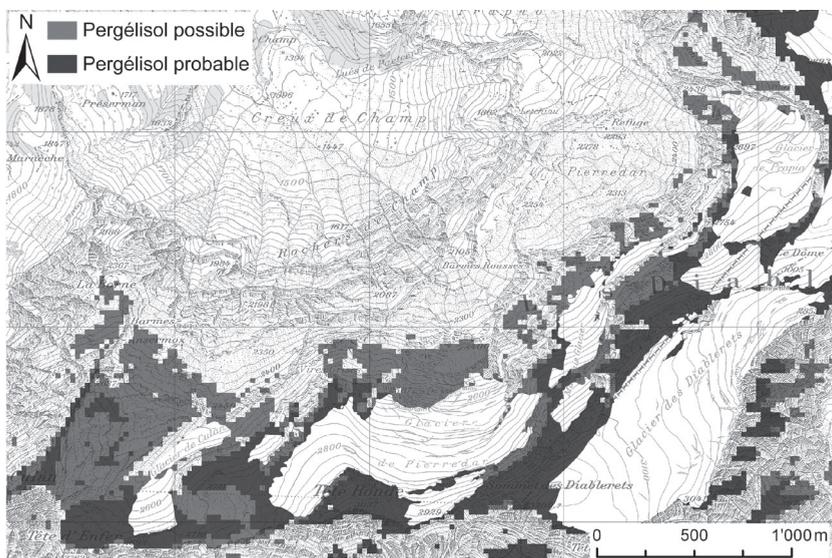


Figure 3.—Extension du pergélisol dans le secteur de Pierredar – Culan (massif des Diablerets). Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA100046).

L'accumulation sédimentaire située dans la partie aval du cirque (figure 4, d et figure 5C) correspond à une moraine latéro-frontale du glacier du Dar, qui témoigne de l'extension du glacier au Petit Age Glaciaire (SCHOENEICH, 1998). Aujourd'hui, le glacier du Dar, en fort retrait, est confiné aux premières pentes situées sous le Sex-Rouge. La zone comprise entre la moraine et le glacier - et plus largement une grande partie du cirque du Dar - est recouverte de matériaux sédimentaires d'origines diverses. Dans la partie amont des pentes, il s'agit essentiellement de blocs détachés des parois de l'Oldenhorn ou de la barre rocheuse reliant le Sex Rouge à la Tête aux Chamois. La frange intermédiaire est, quant à elle, caractérisée par des dépôts morainiques, gravitaires et fluviatiles indifférenciés. Ce secteur est traversé par de nombreuses ravines (figure 5D). La profondeur des incisions et la fraîcheur des dépôts situés dans la partie aval des pentes témoignent d'une activité érosive récente.

Ailleurs, les accumulations sédimentaires sont, dans l'ensemble, peu épaisses. La raison principale provient de la forte déclivité des pentes marneuses, qui sont peu favorables à l'accumulation des débris rocheux. C'est par exemple le cas du versant nord-ouest de l'Oldenhorn. La faible extension verticale des parois marneuses explique également la faible épaisseur de certains éboulis, comme par exemple dans le secteur de Pierre Meule.

Secteur de Pierredar

Dans le secteur de Pierredar, au-dessus de 2400 m, l'essentiel du versant est occupé par des barres rocheuses ou, là où la topographie le permet, par des glaciers (Pierredar, Mauvais Glacier, Prapio). Le lieu-dit Pierredar, où se concentrent les accumulations sédimentaires, se situe en dessous de la ceinture du pergélisol (figure 3). Un cône de glace en grande partie recouvert de débris rocheux est toujours présent aux pieds des parois (figure 6, a). Il est ceinturé de dépôts morainiques du PAG, dans l'ensemble peu épais. Des éboulis sont présents de part et d'autre de la marge proglaciaire. Ces matériaux sont partiellement ravinés et se retrouvent sous la forme d'accumulations fluviatiles en divers endroits. Les dépôts situés à l'aval du glacier de Pierredar correspondent à des accumulations morainiques PAG dudit glacier, partiellement recouvertes d'éboulis et fortement ravinées. Des crêtes morainiques sont présentes en rive gauche de la marge. Au-dessus des barres rocheuses surplombant Creux de Champ, un paquet morainique présente des dépressions qui pourraient s'apparenter à du thermokarst (dépressions dues à la fusion de glace dans le sédiment) (figure 6, b). Des suintements d'eau sont visibles à l'aval du dépôt. La présence de glace dans le sous-sol y est donc probable. Diverses accumulations morainiques sont encore à signaler ici et là à l'aval du Mauvais Glacier.

Secteur de Culan

L'épaisseur des dépôts est extrêmement faible dans le versant est du Culan. En revanche, le versant nord-ouest de Tête Ronde présente une géomorphologie

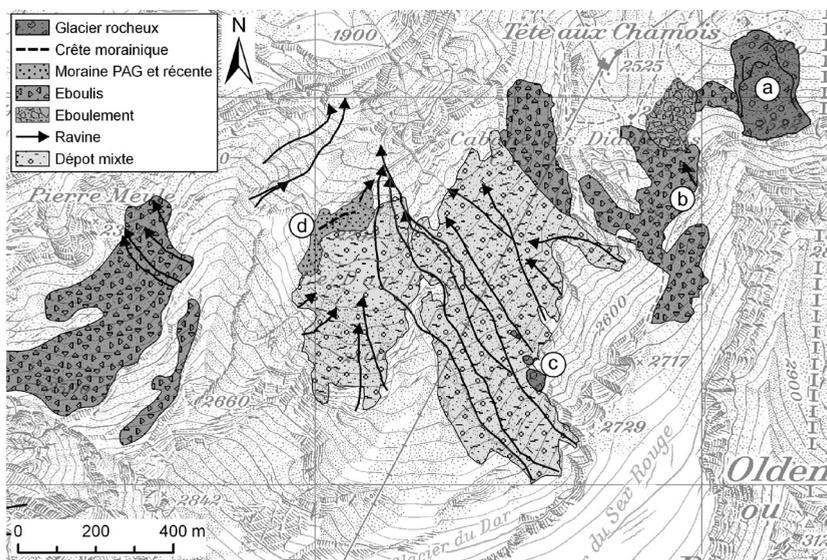


Figure 4.—Géomorphologie du secteur du Dar. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA100046).

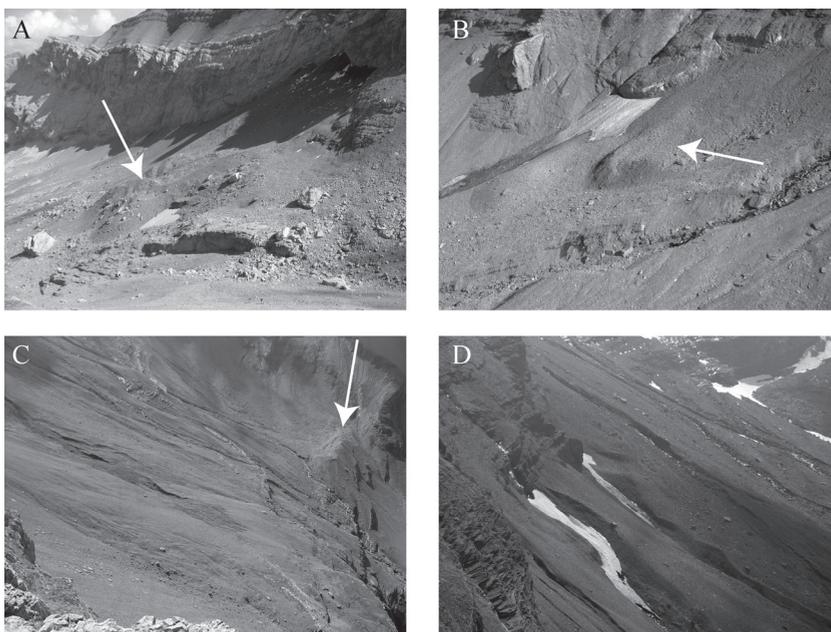


Figure 5.—A: Glacier rocheux d'Entre la Reille (lettre a sur figure 4). B: Protalus rempart dans le cirque du Dar (lettre c sur figure 4). C: Moraine latéro-frontale PAG du glacier du Dar (flèche, lettre d sur figure 4) et dépôts torrentiels dans la partie aval du cirque du Dar. D: Ravines dans la partie amont du cirque du Dar.

diversifiée. L'accumulation sédimentaire visible en bordure ouest du glacier de Pierredar s'apparente à une moraine de poussée, signe de la présence possible de glace interstitielle (figure 7, a). Juste à l'ouest, on trouve des débris rocheux disloqués sur place sous l'action de la gélifraction (manteau de débris), associés à des matériaux glaciaires et périglaciaires indifférenciés. Les glaciers de la région sont en grande partie couverts, signe de leur faible dynamique. Dans les portions aval du secteur, on retrouve les accumulations morainiques qui marquent l'extension PAG de ces glaciers (figure 7, b). Sur l'amont, ces dépôts sont généralement recouverts par des accumulations fluviales issues du ravinement des matériaux morainiques ou par des dépôts mixtes (fluviales et gravitaires). Enfin, un secteur d'éboulis se dessine sous les Vires Grises.

2. Secteur Grand Muveran – Paneirosse

Dans ce secteur, le pergélisol se trouve essentiellement dans les zones rocheuses, comme les faces nord du Grand Muveran, de la Tête aux Veillon (à l'ouest du Pacheu) et de la Tête à Pierre Grept (qui domine le glacier de Paneirosse) (figure 8). Les accumulations sédimentaires sont par contre situées pour la plupart d'entre elles en dessous de la limite d'occurrence du pergélisol, à l'exception de certains secteurs de la région du glacier de Paneirosse. De plus, les secteurs potentiellement favorables au pergélisol du point de vue topoclimatique sont occupés par les glaciers. D'une manière générale, l'essentiel des dépôts correspond à des accumulations morainiques mises à jour par le retrait des glaciers locaux (DORTHE-MONACHON & SCHOENEICH 1993). Ces dépôts sont particulièrement épais au Nord du Grand Muveran et les traces de ravinement y sont nombreuses. A l'aplomb du sommet, au lieu-dit «Les Outans», un glacier résiduel en grande partie couvert a construit un volumineux bastion morainique (figure 8, a). Les indices géomorphologiques témoignent de la présence de glace directement à l'amont des crêtes morainiques. Des dépressions thermokarstiques situées dans les dépôts morainiques du PAG à proximité de la cabane de Plan Névé constituent d'autres indicateurs de la présence locale de glace souterraine.

3. Vallon de Nant

Le haut Vallon de Nant se caractérise par de hautes parois de calcaire massif. En de nombreux endroits, celles-ci semblent connaître des conditions de gel permanent (secteurs des Dents de Morcles et de la Dent Favre notamment) (figure 9). Le glacier des Martinets, couvert dans sa partie frontale, marque également la géomorphologie du site par ses volumineuses constructions morainiques. Les dépôts situés à proximité du glacier, fortement ravinés dans le secteur frontal, datent du Petit Age Glaciaire (figure 9, a). La formation

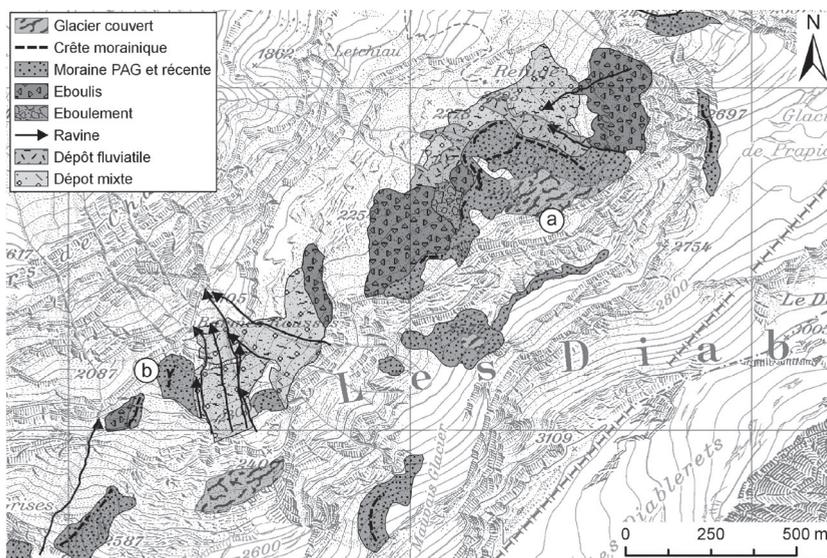


Figure 6.–Géomorphologie du secteur de Pierredar. Reproduit avec l’autorisation de swisstopo (BA100046).

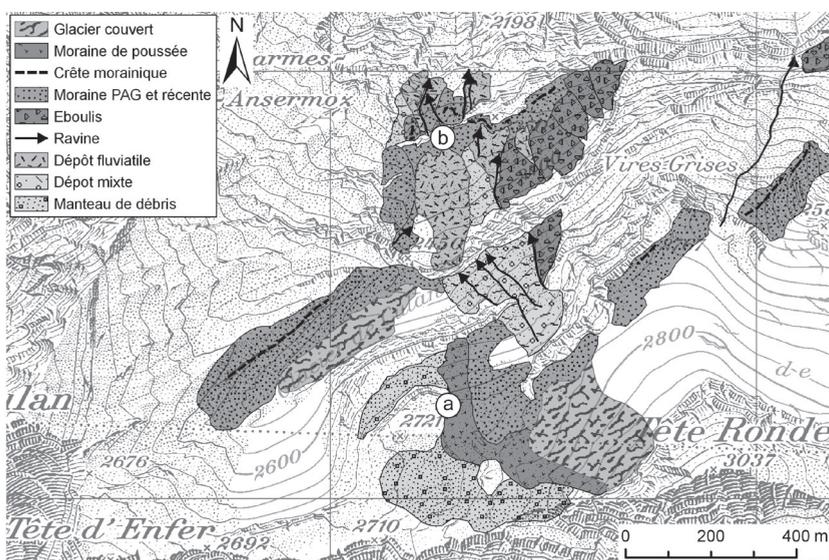


Figure 7.–Géomorphologie du secteur de Culan. Reproduit avec l’autorisation de swisstopo (BA100046).

du complexe morainique situé en rive gauche de ce système remonte à des périodes plus anciennes de l'Holocène, voire au Tardiglaciaire (b). A l'amont de ces moraines se trouve un imposant glacier rocheux (c). Son aspect bombé suggère la présence de glace en profondeur, bien qu'il soit situé en dessous de la limite inférieure du pergélisol. Les racines de ce glacier rocheux sont recouvertes par une autre formation périglaciaire d'une deuxième génération, située quant à elle à l'intérieur de la ceinture du pergélisol possible. Relevons également la présence d'un micro glacier rocheux (ou protalus rempart) qui s'est développé dans le flanc externe de la principale crête morainique PAG du glacier des Martinets. Enfin, des sédiments gelés pourraient également se trouver au nord de la Pointe des Martinets (Vallon de Javerne) et au nord-ouest du Petit Muveran.

DANGERS POTENTIELS INDUITS PAR LE DOMAINE PÉRIGLACIAIRE

Certains secteurs de la zone périglaciaire (> 2200 m) contenant des volumes sédimentaires importants dans des contextes de forte déclivité et/ou une activité torrentielle conséquente peuvent présenter un danger potentiel pour les infrastructures et les personnes. A cela s'ajoute le risque de déstabilisation de parois rocheuses en cas de dégradation du pergélisol, avec les conséquences suivantes, selon la situation topographique:

- Chutes de blocs ou éboulements pouvant atteindre directement les infrastructures;
- Augmentation du stock sédimentaire à l'aval des parois;
- Augmentation de la charge sédimentaire dans les couloirs, pouvant conduire à une modification des paramètres hydrologiques et à une augmentation de l'érosion dans les dépôts sédimentaires (éboulis) situés en contrebas.

1. Formations superficielles et dangers hydrologiques

1.1 Massif des Diablerets

Lors de l'été 2005, deux orages (25 juin et 29 juillet) de forte intensité ont touché la zone du Sex Rouge et ont provoqué une mobilisation importante des sédiments dans les bassins du Dar et de la Grande Eau. Dans le bassin du Dar, les écoulements ont raviné des dépôts mixtes d'origine glaciaire, fluviale et gravitaire qui tapissent le cirque du Dar Dessus (figure 4). La ravine située le plus au nord a charrié des volumes importants, qui se sont déposés à l'amont des barres rocheuses. En 2007, soit 2 ans après l'événement, plusieurs chenaux de cette ravine avaient déjà été comblés par les apports réguliers de matériaux (figure 5C). Les autres événements impliquant un transfert de sédiment (lave torrentielle, charriage, charriage hyperconcentré) ont tous transité vers l'aval.

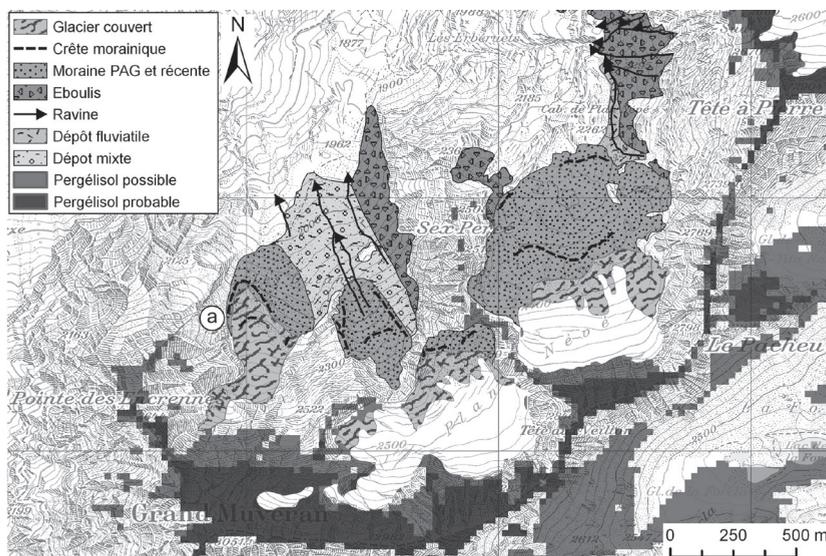


Figure 8.—Géomorphologie et extension du pergélisol dans le secteur du Grand Muveran. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA100046).

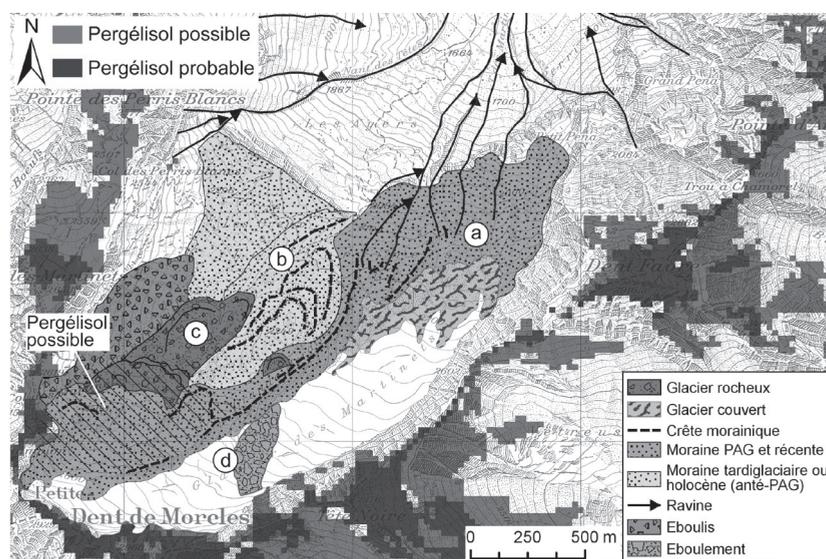


Figure 9.—Géomorphologie et extension du pergélisol dans le haut Vallon de Nant. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA100046).

Localement, l'érosion a été très importante, comme par exemple à la hauteur de la moraine frontale du glacier du Dar, à 2280 m. L'essentiel des matériaux qui se sont déposés dans le Creux du Pillon provient de ces laves torrentielles. D'autres laves, de plus petite dimension, se sont également déclenchées dans la partie nord-ouest du cirque (SCHOENEICH & CONSUEGRA 2008).

Une grande partie du cirque du Dar se situe en zone de pergélisol possible, voir probable pour la partie amont (cf. § 1.2 *formations superficielles, massif des Diablerets*). Les ravinements débutent à l'altitude d'environ 2450 m, soit au voisinage de la limite inférieure présumée du pergélisol dans ce secteur. On ne peut donc exclure un lien entre le pergélisol et la dynamique torrentielle. Le cas échéant, la partie du terrain gelée en permanence (sous quelques mètres de sédiments superficiels) jouerait le rôle d'aquiclude, concentrant ainsi les eaux à proximité de la surface, ce qui favoriserait le ravinement de la partie amont du versant. A l'avenir, on pourrait assister à une augmentation de l'épaisseur des sédiments mobilisables consécutivement au dégel des couches situées à proximité de la surface. Ce secteur verra sûrement sa dynamique évoluer.

Lors des intempéries de 2005, des laves torrentielles parties du versant ouest du Sex Rouge ont déposé d'énormes quantités de matériaux dans 2 secteurs du lieu-dit Creux de Champ, vers 1320 et 1420 m. En cas de nouvelles crues, ces matériaux pourraient être remobilisés et provoquer des aggradations locales du lit dans les tronçons plus plats, proche du village des Diablerets. De plus, dans les secteurs de Pierredar et de Culan, l'analyse géomorphologique a montré que des volumes sédimentaires relativement importants (dépôts morainiques, dépôts mixtes, glaciers couverts) se trouvent à l'amont des grandes barres dominant Creux de Champ. Une augmentation de l'activité érosive de ces formes n'est pas à exclure. Cependant, les écoulements de surface dans le secteur de Culan sont quasi absents (infiltrations karstiques?). Une remobilisation importante des matériaux non consolidés apparaît donc moins probable. Le risque d'une augmentation des volumes sédimentaires dans le cirque de Creux de Champ semble donc avant tout lié au ravinement des éboulis du versant ouest du Sex Rouge.

Signalons également que le retrait, voire la disparition future de certains glaciers de la région (Sex Rouge, Dar, Culan) pourrait libérer des volumes non négligeables de matériaux non consolidés. Ce phénomène pourrait donc constituer une autre source de danger potentiel.

1.2 Massif du Muveran et Vallon de Nant

Dans le flanc nord du Grand Muveran, les conditions topoclimatiques ne sont guère favorables à la présence de pergélisol dans les accumulations sédimentaires. Cependant, la présence de glace massive à l'amont du bastion morainique des Outans (aplomb du Grand Muveran) pourrait, lors d'orage violents, favoriser la concentration des eaux d'infiltration proche de la surface

et conduire ainsi à la saturation du terrain en eau. Cette formation sédimentaire présente donc les caractéristiques d'une zone potentielle de départ de lave torrentielle. Par ailleurs, on observe un fort ravinement des dépôts morainiques du glacier de Plan Névé (bassin ouest). Les laves torrentielles issues de ce secteur pourraient avoir comme conséquence des embâcles dans l'affluent de l'Avançon de Nant. Lors des intempéries de l'été 2005, plusieurs laves torrentielles ont atteint ce cours d'eau.

Le danger «périglaciaire» dans le Vallon de Nant se concentre au niveau des accumulations morainiques situées au front du glacier des Martinets, entaillées par plusieurs ravines. La profondeur des incisions est conséquente, ce qui témoigne d'une intense érosion. La présence de glace morte dans la moraine n'est pas exclue, même si le secteur se situe clairement en dessous de la limite inférieure du pergélisol.

Etant donné l'éloignement de Pont de Nant par rapport à ces secteurs sensibles, ainsi que la faible pente de l'Avançon de Nant, les risques pour les infrastructures demeurent pour l'instant modérés. Une dégradation du pergélisol et une augmentation du ravinement dans les années à venir pourrait toutefois augmenter le risque potentiel, notamment sous la forme d'embâcles de l'Avançon de Nant.

2. Parois rocheuses et dangers d'éboulement

D'une manière générale, on observe que le pergélisol occupe de nombreuses faces nord des Alpes vaudoises. C'est notamment le cas pour le massif des Diablerets, l'Oldenhorn, le Grand Muveran, la Dent de Morcles et la Dent Favre. Les dépôts d'un éboulement qui s'est déclenché entre 1998 et 2004 (dates des orthophotos) dans la paroi nord dominant le glacier des Martinets sont observables sur le glacier (figure 9, d). Dans ce cas, l'hypothèse de la dégradation du pergélisol comme facteur déclenchant ne peut être exclue. Une diminution de la stabilité des parois de la région, consécutivement à une hausse des températures atmosphériques, est à envisager (DAVIES *et al.* 2001). Les risques ne sont peut-être pas tant l'occurrence de grands écroulements rocheux, mais plutôt une augmentation des stocks sédimentaires en contrebas, consécutivement à une possible augmentation des chutes de blocs. On pourrait ainsi s'attendre à une augmentation future du volume sédimentaire sur le glacier des Outans, au pied de la face nord du Grand Muveran, haute de 600 m. Une possible augmentation de la charge sédimentaires dans les couloirs de la rive droite du Vallon de Nant est un autre exemple de scénario possible en cas de dégradation du pergélisol dans les parois nord de la Dent Favre et de la Point d'Aufalle.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude offre un aperçu global de l'extension du pergélisol dans les Alpes vaudoises. C'est essentiellement dans le massif des Diablerets, dans le secteur Muveran – Paneirosse et dans le Haut vallon de Nant que des conditions de pergélisol se rencontrent. Cependant, l'extension des glaciers, du fait de la relative humidité du climat de la région, réduit considérablement les surfaces potentiellement occupées par du pergélisol. A altitude égale, l'extension du pergélisol est beaucoup plus importante dans les Alpes valaisannes, où la relative sécheresse du climat réduit l'englacement. Une des particularités des Alpes vaudoises est ainsi de ne comporter que trois ou quatre glaciers rocheux actifs/inactifs, alors qu'on en trouve plusieurs centaines dans les Alpes valaisannes.

A travers l'analyse géomorphologique des différents sites, cette étude a montré que la principale source de danger périglaciaire dans les Alpes vaudoises est le ravinement des formations superficielles. Des stocks sédimentaires localement importants existent à proximité des torrents sur de fortes pentes. Dans certains cas, comme dans les dépôts du cirque du Dar ou le bastion morainique des Martinets, le ravinement est très actif. Les intempéries de l'été 2005 ont ainsi montré que le torrent du Dar pouvait charrier d'énormes quantités de matériaux rocheux. On trouve, par ailleurs, une forte concentration de barres rocheuses sub-verticales situées en zone de pergélisol possible. La dégradation du pergélisol, le retrait, voire la disparition des glaciers et l'élévation de la limite pluie-neige devraient, à l'avenir, conduire à une augmentation du ravinement.

Des études complémentaires (géophysique) visant à quantifier les volumes sédimentaires et à vérifier la présence de pergélisol dans le cirque du Dar devraient être envisagées. Localement, la détermination des changements de volume (par ex. par laser-scanning) serait également souhaitable. Enfin, des observations de terrain complémentaires devraient être effectuées dans certains sites comme le front du glacier des Martinets ou le glacier des Outans.

REMERCIEMENTS

Cette étude a bénéficié du soutien financier du Service des eaux, sols et assainissements (SESA) du canton de Vaud. Nous les en remercions sincèrement. Merci également à Marcia Phillips pour la relecture du manuscrit et ses conseils avisés.

BIBLIOGRAPHIE

DAVIES M., HAMZA O. & HARRIS C., 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, 137-144.

- DELALOYE R., 2004. Contribution à l'étude du pergélisol de montagne en zone marginale. Thèse. Fac. Sciences, Univ. Fribourg, Geofocus, Vol. 10.
- DELALOYE R. & MORAND S., 1998. Les glaciers rocheux de la région d'Entremont (Alpes valaisannes): inventaire et analyse spatiale à l'aide d'un SIG. Mitt. VAW / ETH Zürich 158: 75-86.
- DORTHE-MONACHON C. & SCHOENEICH P., 1993. Ligne d'équilibre des glaciers: le stade de référence de 1850 dans les Alpes calcaires occidentales. *Geographica Helvetica*, 3/1993, p. 125-134.
- GRUBER S. & HAEBERLI W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change, *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18.
- HAEBERLI W., HALLET B., ARENSON L., ELCONIN R., HUMLUM O., KÄÄB A., KAUFMANN V., LADANYI B., MATUSOKA N., SPRINGMAN S. & VONDER MUEHLL D., 2006. Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes* 17: 189-214
- HARRIS C., ARENSON L.U., CHRISTIANSEN H.H., ETZELMUELLER B., FRAUENFELDER R., GRUBER S., HAEBERLI W., HAUCK C., HOELZLE M., HUMLUM O., ISAKSEN K., KÄÄB A., LEHNING M., LUETSCHG M.A., MATSUOKA N., MURTON J.B., NOETZLI J., PHILLIPS M., ROSS N., SEPPÄLÄ M., SPRINGMAN S.M. & VONDER MUEHLL D., 2009. Permafrost and climate in Europe: geomorphological impacts, hazard assessment and geotechnical response, *Earth Science Reviews*.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Core Writing Team, R.K Pachauri and A. Reisinger, Eds., IPCC, Geneva, 102 pp.
- JOMELLI V., BRUNSTEIN D., DÉQUÉ M., VRAC M. & GRANCHER D., 2009. Impacts of future climatic change (2070-2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change* 97: 171-191.
- KÄÄB A., FRAUENFELDER R. & ROER, I., 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change* 56: 172-187
- LAMBIEL C., 2006. Le pergélisol dans les terrains sédimentaires à forte déclivité: distribution, régime thermique et instabilités. Thèse, Université de Lausanne, Institut de Géographie, coll. «Travaux et Recherches» n° 33, 260 p.
- LAMBIEL C. & REYNARD E., 2003. Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais). *Entwicklungstendenzen und Zukunftsperspektiven in der Geomorphologie, Physische Geographie, Zürich*, Vol. 41: 91-104.
- LAMBIEL C. & PIERACCI K., 2008. Permafrost distribution in talus slopes located within the alpine periglacial belt (Swiss Alps). *Permafrost and Periglacial Processes* 19: 293-304.
- MORARD S., DELALOYE R., DORTHE J., 2008. Seasonal thermal regime of a mid-latitude ventilated debris accumulation. Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, July 2008, Fairbanks, Alaska, 1233-1238.
- NOETZLI J., GRUBER S., KOHL T., SALZMANN N. & HAEBERLI W., 2007. Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research* 112 F02S13.
- PERMOS 2009. Permafrost in Switzerland 2004/2005 and 2005/2006, Glaciological Report (Permafrost) No. 6/7 of the Cryospheric Commission (CC) of the Swiss Academy of Sciences (SCNAT) and Department of Geography, University of Zurich (NOETZLI J., NAEGELI B. & VONDER MUEHLL D., eds.).
- PHILLIPS M., 1993. Géomorphologie du vallon de Nant. Mémoire de licence, Université de Lausanne, Institut de Géographie (non publié).
- PHILLIPS M. & REYNARD E., 1996. Influence régionale du climat et de la morphologie sur la distribution du permafrost: l'exemple des Hautes Alpes Calcaires. *Rapports de recherche UKPIK* 8, 197-206.

- PIERACCI K. (2006). Distribution et caractéristiques du pergélisol dans les éboulis calcaires de haute altitude. Région du Grand Chavalard, Valais, Suisse. Mémoire de licence, Université de Lausanne, Institut de Géographie (non publié).
- PIERACCI K., LAMBIEL C. & REYNARD E., 2008. Distribution et caractéristiques du pergélisol dans les éboulis calcaires de haute altitude (Hautes Alpes Calcaires, VS, Suisse). *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 2: 87-98.
- REYNARD E., DELALOYE R. & LAMBIEL C., 1999. Prospection géoélectrique du pergélisol alpin dans le massif des Diablerets (VD) et au Mont Gelé (Nendaz, VS). *Bulletin de la Murithienne* 117: 89-103.
- SCHOENEICH P., 1992. Glaciers rocheux fossiles des Préalpes vaudoises. Bull. Soc. vaud. Sc. nat., 82.1, p. 35-55 + Bulletin de géologie Lausanne n° 318.
- SCHOENEICH P. (1998). Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Étivaz (Préalpes vaudoises). Lausanne, Faculté des Lettres. Thèse, Université de Lausanne, Institut de Géographie, coll. «Travaux et Recherches» n° 14, 483 p.
- SCHOENEICH P. & CONSUEGRA D., 2008. A centennial rainstorm and flood event in Les Diablerets (Swiss Prealps). 11th Congress Interpraevent, 26-30 mai 2008, Dornbirn/Autriche. Extended abstracts, p. 370-371.
- WENKER Laurent (1997). Prévission de la répartition spatiale du permafrost dans les Alpes Suisses du Sud-Ouest. Comparaison entre les Diablerets (VD) et le Mont Gelé (VS). Mémoire de licence, Université de Lausanne, Institut de Géographie (non publié).

Manuscrit reçu le 26 octobre 2009