

**La détection du pergélisol alpin :
de l'analyse géomorphologique à
la compréhension des processus**

CHRISTOPHE LAMBIEL
KIM PIERACCI
EMMANUEL REYNARD

INSTITUT DE GEOGRAPHIE
UNIVERSITE DE LAUSANNE, SUISSE

In : Lawali Dambo, Emmanuel Reynard (Eds.). *Vivre dans les milieux fragiles : Alpes et Sahel*. Université Abdou Moumouni, Département de Géographie et Université de Lausanne, Institut de Géographie. Travaux et recherches n°31.



1. Introduction

La thèse de doctorat de Jorg Winistorfer (1977), rédigée sous la direction du Professeur Marcel Burri, a porté sur les reconstitutions des stades de retrait glaciaire dans les vallées latérales de la rive gauche du Rhône en Valais. Ses travaux s'inscrivaient dans une recherche à long terme visant à couvrir l'ensemble des vallées du bassin versant du Rhône suisse, travaux initiés par les études de Marcel Burri (1974) sur les vallées des Dranses et presque achevés plus de vingt ans plus tard par Claire Dorthe-Monachon (1993), dans les vallées de la rive droite du Rhône, et Philippe Schoeneich (1998) dans la vallée de la Grande Eau, deux recherches dirigées par le Prof. Winistorfer.

Dans sa thèse, J. Winistorfer étudie notamment le Val de Nendaz, où il répertorie quelques glaciers rocheux. Un peu plus tard, Müller et al. (1980, 1983) s'intéressent de près à cette vallée dans le but d'y effectuer des reconstitutions paléoclimatiques. Il y relèvent un nombre conséquent de glaciers rocheux. Au début des années '90, une équipe d'assistants de l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL) choisit de développer des travaux sur le pergélisol alpin. Ils jettent leur dévolu sur un vallon secondaire du Val de Nendaz, le vallon des Yettes Condjà, dominé par le Mont Gelé (3023 m.s.m.). Au début, dans les années 1992-1993, il s'agissait surtout, pour deux assistants, Marcia Phillips et Emmanuel Reynard, de pouvoir profiter de travaux de recherche pour pratiquer leur passion : la randonnée à skis. La méthode BTS (Haeberli, 1973), qui consiste à mesurer la température du sol sous le manteau neigeux, semblait être un moyen idéal de mêler l'utile (développer de nouvelles recherches à l'IGUL) à l'agréable (la randonnée à ski). Le Prof. Winistorfer ayant donné son accord pour l'achat d'une sonde, les premiers travaux pouvaient commencer, avec l'appui de collègues des universités de Zürich et de Fribourg, plus avancés que nous dans ce domaine.

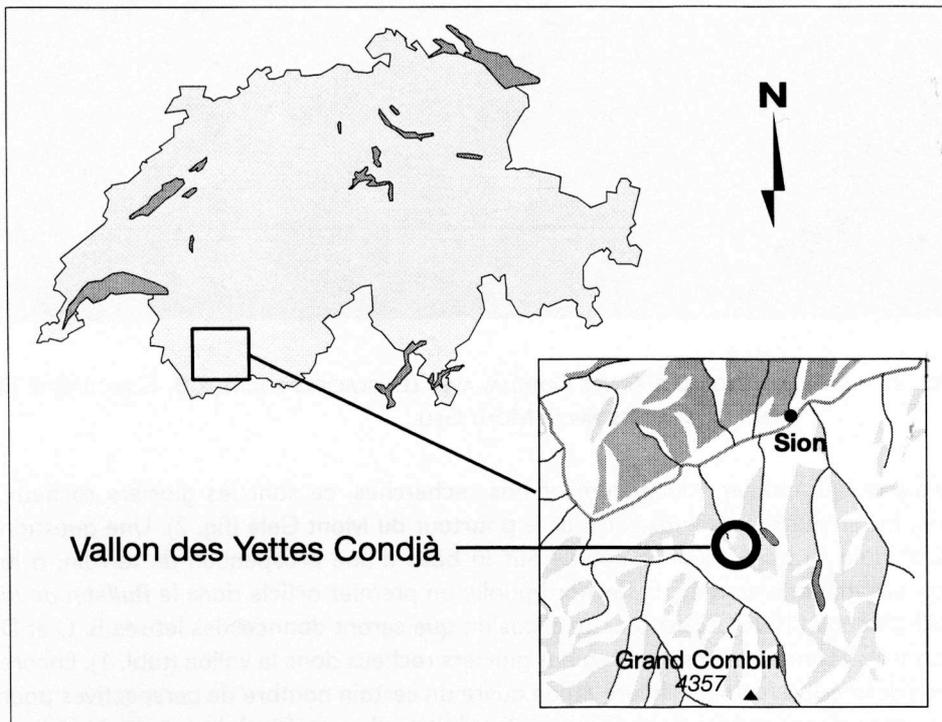
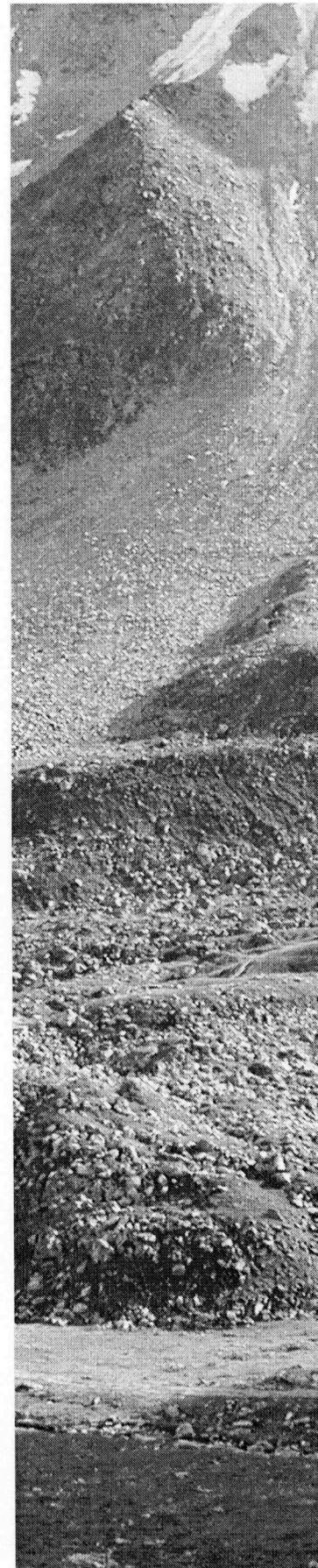


FIG. 1. LE VALLON DES YETTES CONDJA, SITUE DANS LA PARTIE HAUTE DU VAL DE NENDAZ





Cette petite note, centrée sur le vallon des Yettes Condja (fig. 1 et 2), a pour objectif de montrer comment en près de quinze ans, ce qui ne devait être qu'une agréable façon de pratiquer un hobby est devenu le domaine principal de recherche en géographie physique à l'IGUL et comment les recherches sur ce site ont évolué en fonction des intérêts et des besoins de la recherche suisse sur le pergélisol.

2. Les débuts (1992-1996) : les glaciers rocheux

Les premiers travaux remontent à 1992. En février de cette année, une première campagne de mesures BTS est réalisée avec des sondes prêtées par le Laboratoire de glaciologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (VAW-ETHZ). Cette première campagne permet de montrer, comme nous nous y attendions, que le flanc Est du Mont Gelé porte bien son nom et qu'il est en partie soumis au pergélisol (Bretz et Giroud, 1993). En 1993 débute également un mémoire de licence (Bretz-Guby, 1994), qui porte sur les relations entre pergélisol et végétation et qui prospecte notamment une partie du vallon.

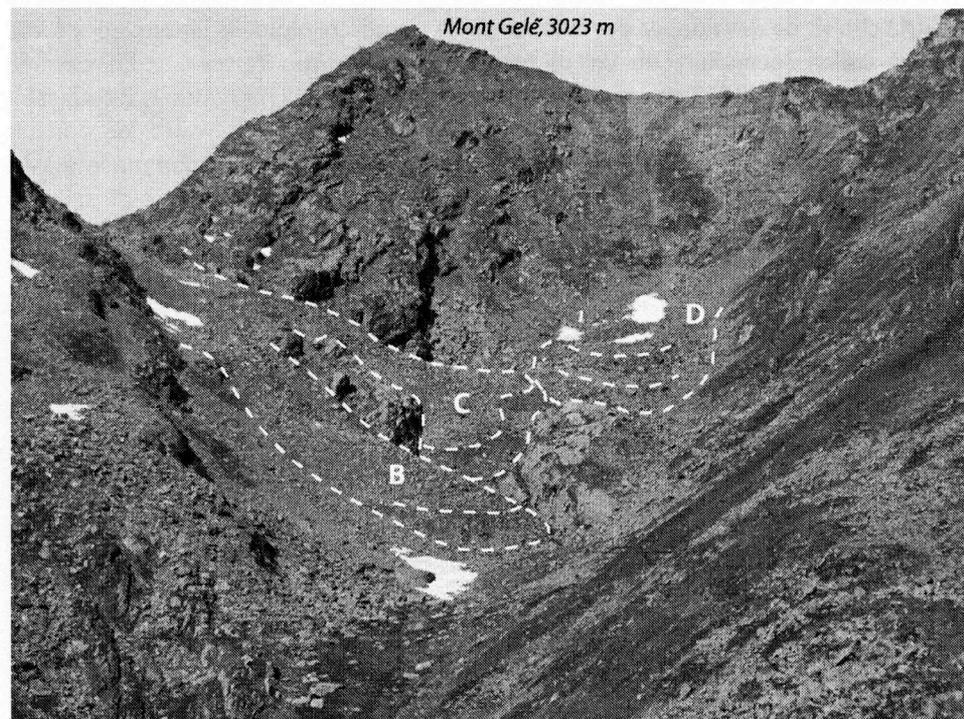


FIG. 2. LE VALLON DES YETTES CONDJA, AVEC LES GLACIERS ROCHEUX B, C (ACTIFS) ET D (INACTIF), DOMINES PAR LE MONT GELE

Mais ce qui motive principalement nos recherches, ce sont les glaciers rocheux, très fortement représentés sur tout le pourtour du Mont Gelé (fig. 2). Une question principale se pose : sont-ils actifs ? Sur la base d'une prospection de terrain, à la fois estivale et hivernale, E. Reynard publie un premier article dans le *Bulletin de la Murithienne* (1996). C'est à cette occasion que seront données les lettres B, C et D aux trois formations assimilées à des glaciers rocheux dans le vallon (tabl. 1). Encore très descriptive, cette première étude ouvre un certain nombre de perspectives pour une connaissance plus élaborée de la distribution du pergélisol dans toute la région. C'est l'objet de la deuxième phase de recherches.

Nom	Coord.	Alt. inf.	Alt. sup.	Orient	Pente front	Végét.	Lithol.	BTS	Activité
		[m]	[m]		[°]				
Mont Gelé B	588450/ 105100	2600	2800	NE	50	Non	Gneiss Prasinities	Prob.	Actif
Mont Gelé C	588300/ 105100	2620	2800	NE	45	Non	Gneiss Prasinities	Prob.	Actif
Mont Gelé D	588200/ 105200	2670	2770	E	-	Lichens	Gneiss Prasinities	Prob.	Inactif

TABL. 1. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES GLACIERS ROCHEUX DES YETTES CONDJA (REYNARD, 1996)

3. Régionalisation des études (1997-2000)

L'objectif suivant visé par l'IGUL consiste à dépasser le stade des études locales dans le but de régionaliser les mesures et observations effectuées. Le début des années 1990 avait vu le développement au niveau suisse de différents modèles de simulation du pergélisol (Hoelzle, 1992 ; Keller, 1992). Dans le cadre de son mémoire de licence, Wenker (1997) teste plusieurs de ces modèles dans le vallon des Yettes Condjà. Il compare ainsi les résultats des simulations avec les mesures BTS effectuées par Bretz et Giroud (1993) et Reynard (1996). Il en conclut que les modèles existants ne permettent pas une délimitation du pergélisol suffisamment précise et que dès lors une prise en compte de données régionales dans les modèles s'avère indispensable.

C'est dans cet esprit que Lambiel (1999) entreprend l'inventaire des glaciers rocheux d'une région ayant pour cœur le Val de Nendaz (et donc le vallon des Yettes Condjà). Durant l'été 1998, il couvre quelques 200 km² entre le Val de Bagnes et le Val d'Héremence, la limite sud ayant été fixée dans la région de la Rosablanche. Au final, 239 glaciers rocheux sont inventoriés, parmi lesquels 130 formations sont classées dans la catégorie actif/inactif, les autres étant considérés comme fossiles (fig. 3). L'omniprésence des glaciers rocheux dans la région est également illustrée par la surface qu'ils occupent: pas loin de 9 km²! La faible extension des glaciers, liée à des altitudes relativement basses et à un climat relativement sec, ainsi qu'une lithologie particulièrement favorable (les gneiss et autres roches vertes indifférenciées abondent) expliquent l'abondance de glaciers rocheux dans cette région.

De nombreux paramètres décrivant ces formations sédimentaires sont mesurés. L'analyse spatiale qui en découle permet la mise en évidence des particularités de la géomorphologie périglaciaire des vallées étudiées. Un des paramètres essentiels retenu est l'altitude des fronts. Les glaciers rocheux étant l'expression visible de la reptation du pergélisol (Haeberli, 1985), l'analyse de leur position à l'échelle régionale peut nous renseigner sur la distribution du pergélisol dans la région. Dès lors, la limite inférieure du pergélisol peut être estimée par l'altitude inférieure des glaciers rocheux actifs/inactifs (Barsch, 1996). Les valeurs obtenues pour la zone d'étude sont de 2400 m environ pour les expositions nord et de 2700 m environ pour les expositions sud. Ces altitudes sont ensuite utilisées pour produire une carte de la distribution potentielle du pergélisol dans la région (Lambiel, 1999).



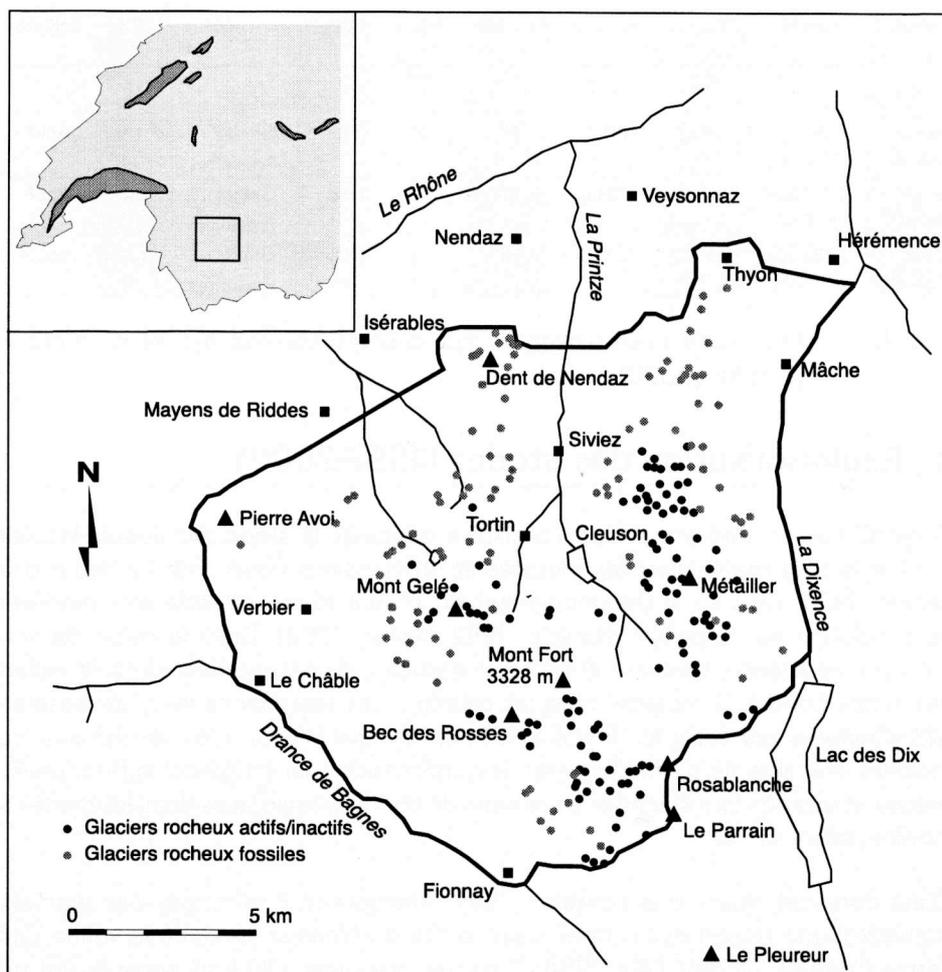


FIG. 3. LES 239 GLACIERS ROCHEUX INVENTORIES DANS LA REGION BAGNES-HEREMENCE (LAMBIEL, 1999)

Dans cette étude, un effort particulier est également mis sur l'analyse des glaciers rocheux fossiles. Dans un article écrit suite au colloque annuel de la Société suisse de géomorphologie de 2000, Lambiel et Reynard (2003) proposent une méthode originale de datation des glaciers rocheux fossiles basée sur la comparaison de leur position et de l'extension des glaciers aux différents stades tardiglaciaires identifiables dans la région. Plusieurs générations de glaciers rocheux fossiles sont ainsi identifiées: Dryas Récent (stade glaciaire de l'Egesen), Dryas Ancien Inférieur, début du Tardiglaciaire (Gschnitz-Clavadel ?). Utilisant le même modèle que celui utilisé pour la détermination de la limite inférieure actuelle du pergélisol, Lambiel et Reynard (2001, 2003) proposent une carte de la distribution possible du pergélisol au Dryas Récent. Ils en font de même pour un avenir proche, avec la prise en compte d'un réchauffement du climat de 1°C.

4. Vers une radiographie des glaciers rocheux (1998-2000)

Le pergélisol étant désormais un thème de recherche majeur à l'IGUL, la volonté d'aller plus avant dans l'utilisation des méthodes de prospection se fait ressentir. Des collaborations avec d'autres instituts s'avèrent dès lors indispensables. C'est à ce moment-là que prend naissance une collaboration étroite avec l'Institut de Géographie de l'Université de Fribourg (IGUF), avec notamment Reynald Delaloye,

collaboration extrêmement fructueuse qui se poursuit aujourd'hui encore. Par la suite, des projets seront également conduits avec l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, ainsi que l'Institut Universitaire Kurt Bösch à Sion (IUKB).

Un des fruits de ces nouvelles collaborations est la campagne de mesures géoélectriques menée dans le vallon des Yettes Condjà en 1998 avec l'IGUF. L'utilisation de cette méthode s'avère très concluante dans la prospection du pergélisol car la résistivité électrique du terrain augmente avec la croissance du contenu en glace et avec la baisse de la température du sous-sol. Les premières observations et mesures ayant laissé entrevoir la présence probable de glace au sein de certains glaciers rocheux du vallon, nous voulions en savoir plus sur les différents contenus en glace de ces glaciers rocheux. L'étude se focalise sur les formations B, C et D décrites par Reynard (1996). A cette occasion, huit sondages et trois traînées géoélectriques sont réalisés. Il en ressort une diversité que nous n'avions peut-être pas envisagée. En effet, s'il s'avère que les trois glaciers rocheux contiennent tous de la glace, on découvre que celle-ci est présente en des proportions extrêmement diverses d'une formation à l'autre (fig. 4 et 5).

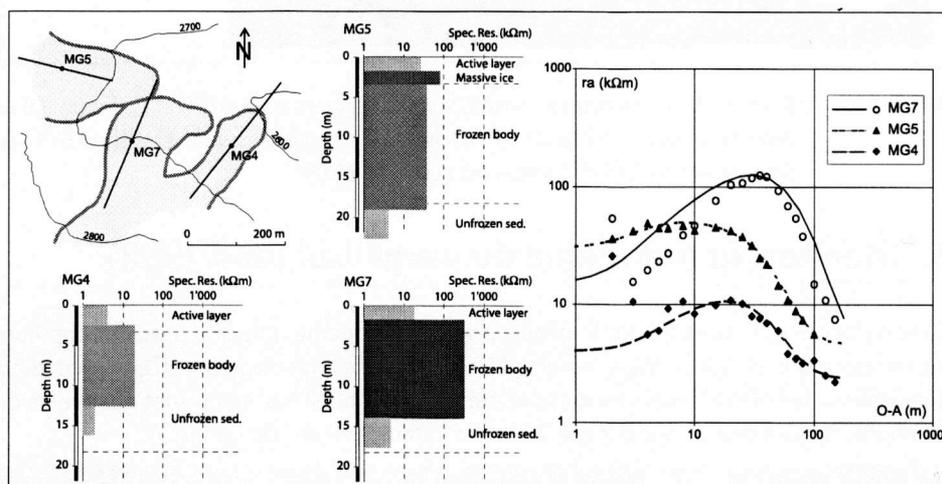


FIG. 4. RESULTATS DE TROIS SONDAGES GEOELECTRIQUES EFFECTUES SUR LES GLACIERS ROCHEUX B, C ET D

Les mesures montrent que les glaciers rocheux B et D contiennent de la glace de congélation. Ils sont donc considérés comme des glaciers rocheux périglaciaires typiques. Des résistivités relativement basses (50 kΩm) pourraient être le signe d'un pergélisol proche du point de fusion. Le glacier rocheux C est plus complexe. La présence d'une tache de glace à ses racines et les résistivités élevées mesurées (350 kΩm) témoignent de la présence de glace massive (et plus froide ?) en profondeur. De cette étude, on retiendra surtout que B et C, deux glaciers rocheux adjacents, en de nombreux points identiques (altitude, exposition, dimension, épaisseur, granulométrie, aspect du front, etc.), présentent des résistivités électriques, et par là-même un contenu en glace complètement différents (Reynard et al., 1999).



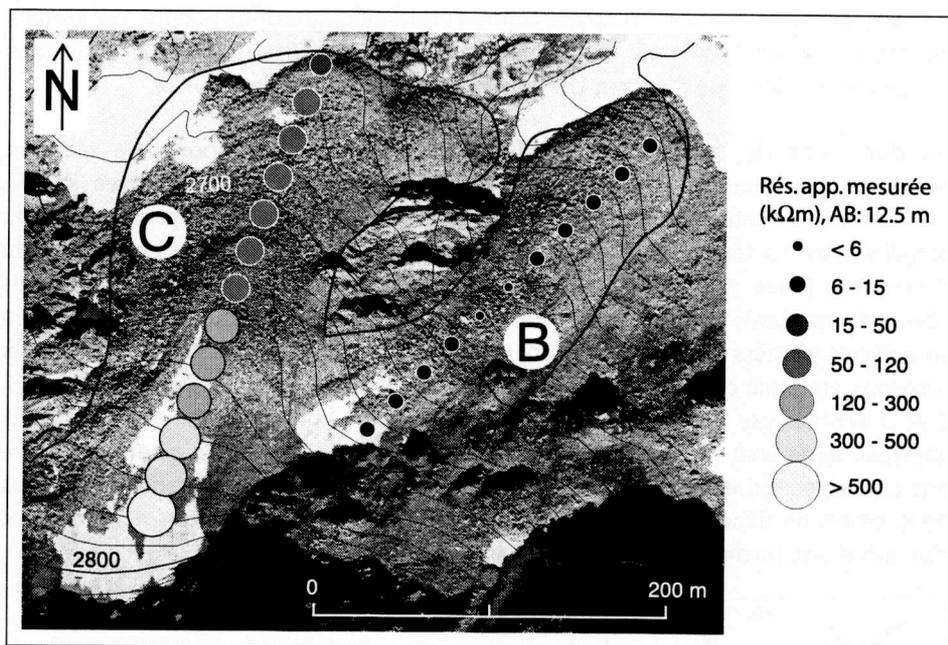
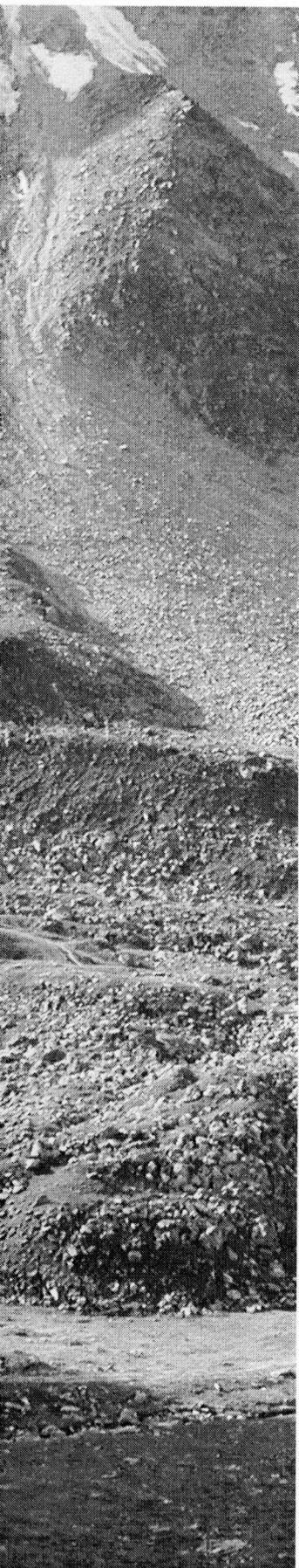


FIG. 5. RESISTIVITES APPARENTES MESUREES SUR LES GLACIERS ROCHEUX B ET C. ECARTEMENT INTER-ELECTRODE: 12.5 M. PROFONDEUR DE PROSPECTION ESTIMEE: 6-9 M. SWISSIMAGE © 2005 SWISSTOPO (DV023268)

5. Monitoring thermique du pergélisol (dès 1998)

Suite à l'analyse du sous-sol par la géoélectrique, l'équipement du site avec des capteurs de température s'impose logiquement. Neuf appareils (mini-loggers UTL-1) sont ainsi disposés sur les glaciers rocheux durant l'été 1998. Aujourd'hui, ce ne sont pas moins de 27 capteurs qui enregistrent chaque 2 heures la température du sol (fig. 6).

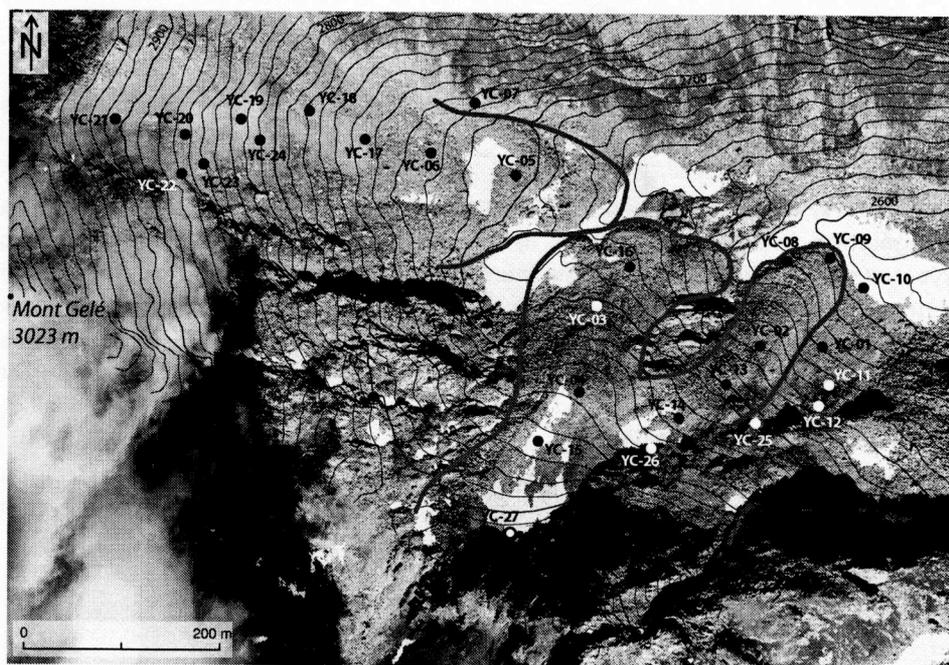


FIG. 6. LES 27 MINI-LOGGERS UTL-1 DISPOSES DANS LE VALLON DES YETTES CONDJA. SWISSIMAGE © 2005 SWISSTOPO (DV023268)

La fig. 7 illustre une courbe de températures obtenues entre 1998 et 2004 sur le glacier rocheux B. Les différences inter-annuelles très marquées, que ce soit en hiver ou en été, démontrent la nécessité d'effectuer un suivi des mesures sur plusieurs années si l'on veut saisir au mieux le régime thermique qui règne à la surface du terrain.

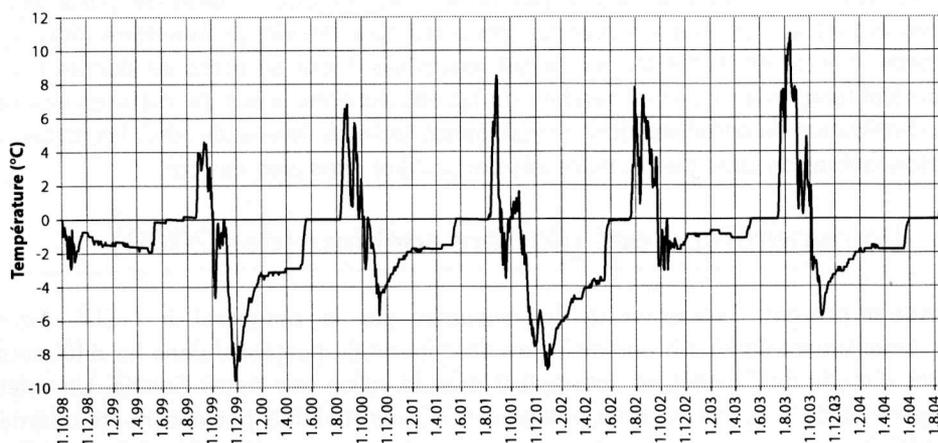


FIG. 7. TEMPERATURE DU SOL ENREGISTREE ENTRE 1998 ET 2004 PAR LE MINI-LOGGER YC-02, GLACIER ROCHEUX B

Ce monitoring thermique s'inscrit dans les objectifs du réseau PERMOS (PERmafrost MOnitoring in Switzerland), qui vise à suivre à long terme l'évolution du pergélisol dans les Alpes suisses. Ce réseau, coordonné par la Commission Glaciologique Suisse, regroupe les différents instituts universitaires et fédéraux suisses travaillant sur le pergélisol, dont l'IGUL. Une dizaine de sites d'étude sont répartis dans les cantons des Grisons, de Berne et du Valais, parmi lesquels figurent le site des Yettes Condjà, ainsi que celui des Lapires (Val de Nendaz également). Les mesures thermiques à la surface du terrain, via les mesures BTS et l'enregistrement en continu par mini-loggers UTL-1, constituent une des méthodes utilisées dans PERMOS.

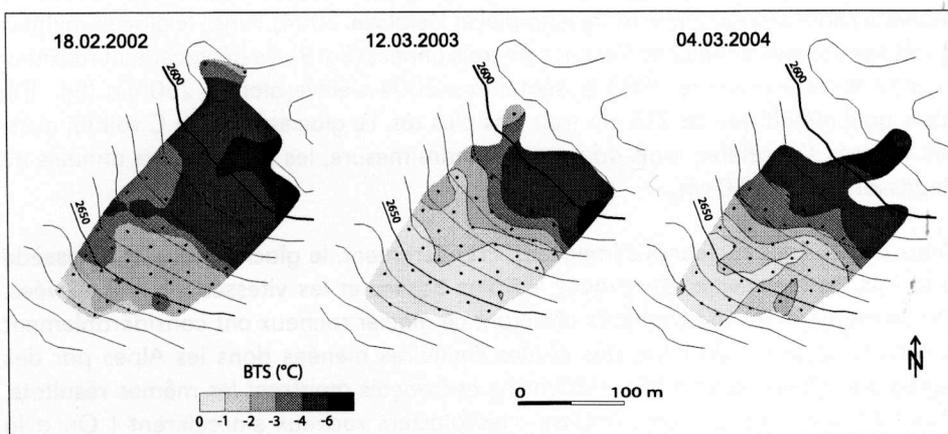
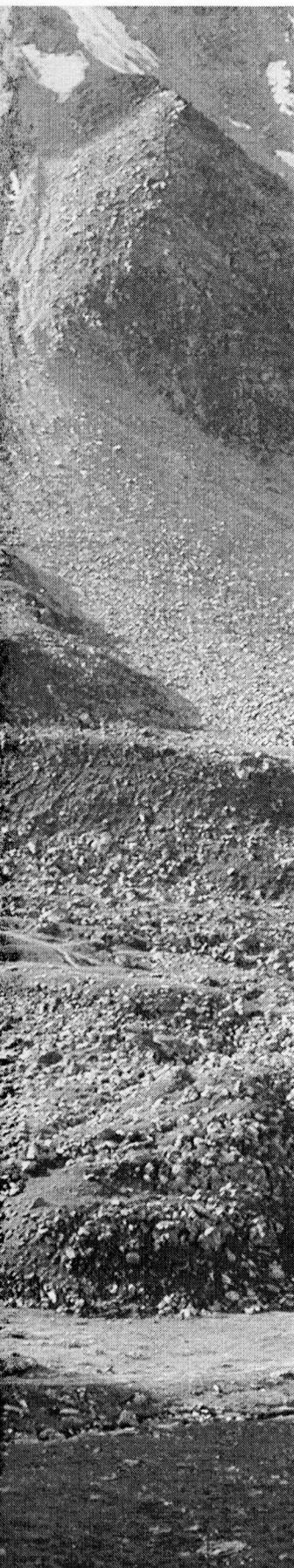


FIG. 8. LES TROIS CAMPAGNES DE MESURES BTS MENEES SUR L'ÉBOULIS JOUXTANT LE GLACIER ROCHEUX B

Ainsi, dix ans après les débuts, la méthode BTS est toujours en vigueur dans le vallon des Yettes Condjà ! A la différence près toutefois que les mesures sont aujourd'hui





systématisées : au lieu de mesurer aléatoirement çà et là, on adopte une stratégie visant à couvrir au mieux un terrain, et l'on répète chaque année les mesures. On obtient ainsi après quelques années une bonne image de l'état thermique du terrain en deuxième partie d'hiver (fig. 8).

L'exemple de la figure 8 illustre par ailleurs le fait que l'intérêt ne porte plus uniquement sur les glaciers rocheux, mais sur tout terrain sédimentaire (éboulis, moraines, etc.) et même sur les parois rocheuses. Dans sa thèse de doctorat, C. Lambiel focalise ainsi ses recherches sur les éboulis dans le but de mieux connaître la distribution du pergélisol dans ces terrains à forte déclivité et de saisir les facteurs responsables de cette distribution, très particulière dans bien des cas.

6. La dynamique des glaciers rocheux (dès 2000)

Jusqu'à présent, l'évolution de la recherche sur le pergélisol à l'IGUL avait essentiellement conduit à une meilleure description du pergélisol dans les différents sites d'étude de l'institut, et notamment dans le vallon des Yettes Condjà. Un volet important de la recherche dans ce domaine n'avait toutefois pas encore été abordé à l'IGUL : le fait que des terrains soumis au gel permanent bougent. Cela semblait manifeste dans le cas des glaciers rocheux B et C du vallon des Yettes Condjà, au vu de leur front extrêmement accidenté, et des signes d'instabilités observables çà et là. Il est donc entrepris, en septembre 2000, en collaboration avec l'Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne, de mesurer avec un GPS Différentiel (précision de l'ordre du centimètre) la position d'une centaine de blocs sur ces glaciers rocheux ainsi que sur le glacier rocheux D (d'apparence inactif) et sur l'éboulis jouxtant le glacier rocheux B. La mesure de la position des blocs une année plus tard permet la quantification des déplacements sur les différentes formations sédimentaires. Spectaculaires, les résultats montrent une différence notable de vitesse entre les glaciers rocheux B et C, le premier avançant de manière beaucoup plus significative que son voisin ! Présentés à la 8^e Conférence Internationale sur le Permafrost qui a eu lieu à Zurich en 2003 (Lambiel et al., 2003), ces résultats inattendus nous encouragent à poursuivre les mesures annuellement, dans le but de suivre l'évolution de ces mouvements. Les années suivantes vont elles aussi apporter leur lot de surprises : les vitesses augmentent de manière extrêmement importante (Lambiel et Delaloye, 2004). Ainsi, le glacier rocheux B voit ses vitesses doubler en l'espace de trois années (fig. 9). Le déplacement maximal mesuré entre septembre 2003 et septembre 2004 s'élève alors à 250 cm (fig. 10), alors qu'il n'était que de 135 cm trois ans plus tôt. Le glacier rocheux C voit lui aussi ses vitesses s'accroître, mais dans une moindre mesure, les mouvements annuels ne dépassant pas les 50 cm.

Deux conclusions majeures s'imposent. Premièrement, le glacier rocheux B possède à la fois les résistivités électriques les plus basses et les vitesses les plus élevées. Deuxièmement, les mouvements affectant ce glacier rocheux ont considérablement augmenté depuis 2000. Or, des études similaires menées dans les Alpes par des collègues suisses, allemands, autrichiens et français montrent les mêmes résultats. Dès lors une constatation s'impose : les glaciers rocheux s'accroissent ! On a là probablement une réponse du pergélisol à l'intensification du réchauffement climatique depuis les années 90 : le pergélisol se réchauffe, la glace devient plus ductile, la quantité d'eau sous forme liquide augmente, etc. En conséquence, les mouvements de terrain augmentent, et d'autant plus dans le cas de pergélisols tempérés (dont la température se situe proche du point de fusion). C'est probablement ce qui explique les différences notables relevées entre les glaciers rocheux B et C dans le vallon des Yettes Condjà. La poursuite des mesures sur ce site s'impose dès lors

en toute logique et des études similaires sont appelées à voir le jour sur d'autres terrains instables.

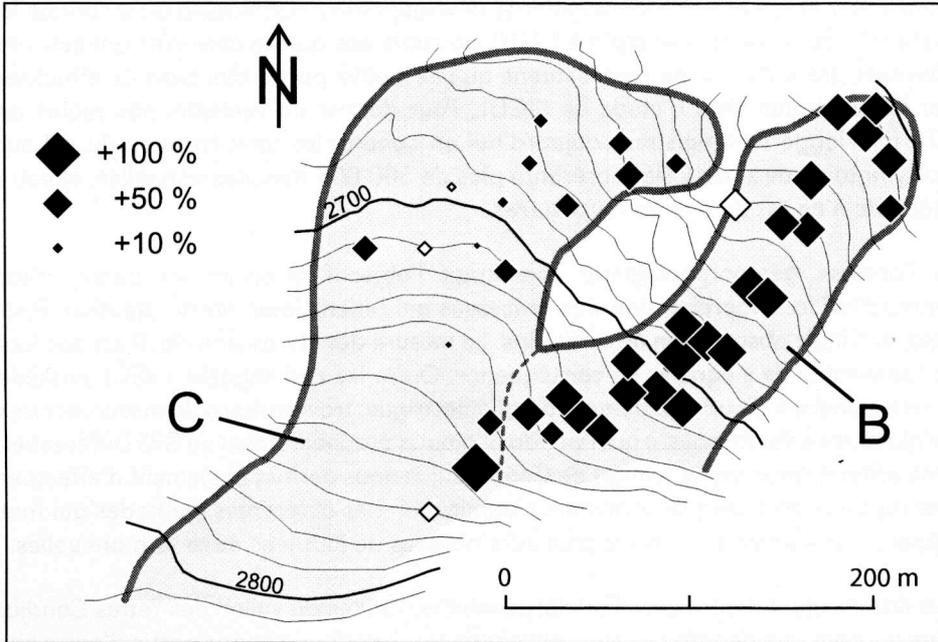


FIG. 9. AUGMENTATION EN % DES VITESSES HORIZONTALES DE SURFACE ENTRE LES PERIODES 2001-2003 ET 2003-2004 SUR LES GLACIERS ROCHEUX B ET C

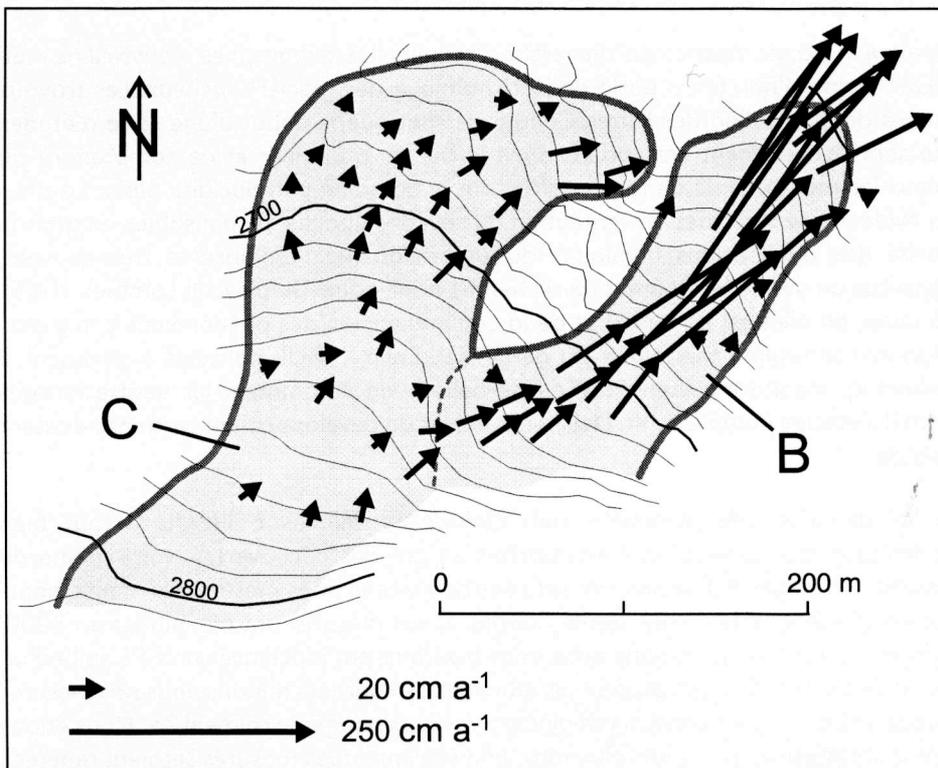


FIG. 10. VITESSES HORIZONTALES DE SURFACE ENTRE 2003 ET 2004 SUR LES GLACIERS ROCHEUX B ET C





7. Conclusions et perspectives

Partie de rien ou presque, la petite équipe pionnière du début des années 1990 aurait sans doute eu de la peine à imaginer le développement formidable qu'a connue la recherche sur le pergélisol alpin à l'IGUL au cours des quinze dernières années. Les résultats présentés ici ne représentent qu'une petite partie des travaux effectués sur les différents sites d'étude de l'IGUL. Pour donner un exemple, pas moins de 120 mini-loggers enregistrent aujourd'hui en continu les températures du sol sur une vingtaine de sites. Cela représente plus de 500'000 mesures annuelles, et cette méthode n'en est qu'une parmi d'autres.

Si l'analyse géomorphologique constituait l'objectif principal au début, c'est aujourd'hui la compréhension des processus qui retient toute notre attention. Pour cela, la simple observation ne suffit plus. La mesure devient essentielle. Il est dès lors indispensable de s'équiper en conséquence. Outre les mini-loggers, l'IGUL possède quatre sondes BTS, un équipement de géoélectrique, trois stations de mesures mises en place dans des forages, à quoi viendra s'ajouter prochainement un GPS Différentiel. Une collaboration avec l'Institut de Géophysique nous permet également d'effectuer des mesures de sismique réfraction. L'application des différentes méthodes qui font appel à ces appareils nécessite plusieurs dizaines de journées de terrain annuelles.

Les études dépassent aujourd'hui largement les limites du vallon des Yettes Condjà. Une quarantaine de sites ont été – et sont toujours pour une bonne partie d'entre eux – étudiés jusqu'à aujourd'hui, essentiellement dans les régions de Verbier-Nendaz (Reynard et al., 2003), d'Arolla (Lambiel et al., 2004), d'Ovronnaz (Pieracci, 2006) et des Préalpes chablaisiennes et vaudoises. Nos travaux nous ont même conduits dans les Pyrénées espagnoles (Delaloye et al., 2003 ; Lugon et al., 2004).

Quelques grands thèmes de recherche occupent les géographes « physiciens » de l'IGUL aujourd'hui. On a parlé de la dynamique des glaciers rocheux. Les travaux menés dans le vallon des Yettes Condjà ne sont que le début d'une série d'études qui sont actuellement entreprises dans le but de quantifier et de comprendre au mieux les mouvements de terrain affectant le domaine périglaciaire alpin. La mise en évidence de systèmes de ventilation au sein des éboulis, responsables en grande partie des distributions atypiques du pergélisol que l'on observe très souvent, constitue un des autres thèmes de recherche principaux (Delaloye et Lambiel, 2005). Là aussi, on n'en est qu'au début de la compréhension des phénomènes complexes régissant le régime thermique du pergélisol. Enfin, l'IGUL participe activement à l'effort de monitoring thermique du pergélisol, via notamment les quatre forages dont il s'occupe actuellement. Des perspectives de développement certaines existent là-aussi.

Si les directions de recherche sont clairement définies à l'IGUL, il faut bien reconnaître que celles-ci évoluent parfois au gré des découvertes, voire même du hasard. L'exemple le plus probant est sans doute celui de la mesure des mouvements sur les glaciers rocheux des Yettes Condjà. Si ces mesures ont été initiées en 2000, cela est surtout dû au fait que nous nous trouvions sur place avec un GPS suite à un camp de terrain. Nous nous sommes alors dits : « Pourquoi n'irions-nous pas mesurer quelques blocs pour vérifier si ces glaciers rocheux bougent vraiment ? ». Nous étions loin d'imaginer que cinq ans plus tard, non seulement les mesures seraient répétées annuellement, mais qu'en plus elles seraient effectuées à différentes périodes de l'année dans le but d'analyser l'évolution saisonnière des mouvements. Nous étions également loin d'imaginer que les résultats surprenants obtenus seraient publiés

un jour dans *Permafrost and Periglacial Processes* (Lambiel et Delaloye, 2004), la revue de référence pour la recherche sur le pergélisol, et que ces résultats nous conduiraient vers des collaborations à l'échelle européenne.

Une seconde série de perspectives concerne le géotourisme. Les régions de Verbier et Nendaz, de part et d'autre du Mont Gelé, constituent un ensemble touristique de grande envergure. Orientées principalement vers la pratique du ski, ces deux stations misent également sur le tourisme d'été pour rentabiliser leurs installations. Ces dernières sont par ailleurs, pour une partie d'entre elles, construites dans des terrains gelés (Delaloye et al., 2001 ; Lambiel et Reynard, 2002). Il y a là matière à développer des produits mettant en valeur le rôle de la glace dans les Alpes, les interactions avec les activités humaines et l'évolution à moyen terme du pergélisol et des glaciers dans un contexte de changements climatiques. Deux avant-projets ont été rédigés il y a quelques années (projet d'itinéraire de randonnée, par Christophe Lambiel et projet de valorisation sur la glace dans les Alpes, par Emmanuel Reynard, en lien avec le bureau technique Paul Glassey SA), sans toutefois être menés à terme. Il est certainement temps de les concrétiser maintenant.

Bibliographie

- Barsch D. (1996). *Rockglaciers. Indicators for the present and the former geocology in high mountain environments*, Berlin/Heidelberg, Springer Verlag.
- Bretz N., Giroud M. (1993). *Cartographie de la répartition théorique du permafrost dans la région du Mont-Gelé (VS)*, Institut de Géographie, Université de Lausanne (non publié).
- Bretz-Guby N. (1994). *Géomorphologie et végétation à l'étage alpin : l'exemple du Mont-Gelé (VS)*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence non publié.
- Burri M. (1974). Histoire et préhistoire glaciaires des vallées des Drances (Valais), *Eclogae geol. Helv.*, 67/1, pp. 135-154.
- Delaloye R., Lambiel C. (2005). Evidences of winter ascending air circulation in talus slopes situated near the lower limit of alpine discontinuous permafrost (Swiss Alps), *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 59, pp. 194-203.
- Delaloye R., Lambiel C., Reynard E., Lugon R. (2003). Réponse du pergélisol à l'avancée glaciaire du Petit Age Glaciaire: quelques exemples alpins et pyrénéens, *Bulletin de l'Association Française du Périglaciaire*, 10.
- Delaloye R., Reynard E., Lambiel C. (2001). Pergélisol et construction de remontées mécaniques: l'exemple des Lapires (Mont Gelé, Valais), in : *Le gel en géotechnique*, Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Thoune, 141, pp. 103-113.
- Dorthe-Monachon C. (1993). *Etude des stades tardiglaciaires des vallées de la rive droite du Rhône entre Loèche et Martigny*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et Recherches, 10, 113 p.
- Haeberli W. (1973). Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von permafrost in der Alpen, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9, pp. 221-227.
- Haeberli W. (1985). *Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers*, Zürich, Mitteilungen der VAW-ETH Zürich, 77.
- Hoelzle M. (1992). Permafrost occurrence from BTS measurement and climatic parameters in the eastern Swiss Alps, *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, pp. 143-147.
- Keller F. (1992). Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the Geographical Information System ARC/INFO, *Permafrost and Periglacial Processes*, 3, pp. 133-138.





- Lambiel C. (1999). *Inventaire des glaciers rocheux entre le Val de Bagnes et le Val d'Hérémence (Valais)*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence non publié, 167 p.
- Lambiel C., Delaloye R. (2004). Contribution of RTK GPS in the study of creeping mountain permafrost, cases studies in the Western Swiss Alps, *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, pp. 229-241.
- Lambiel C., Delaloye R., Baron L., Monnet R. (2003). Measuring rock glacier surface velocities with real time kinematics GPS (Mont Gelé area, western Swiss Alps), *8th International Permafrost Conference*, Zurich, Switzerland, pp. 89-90.
- Lambiel C., Reynard E. (2001). Regional modelling of present, past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes-Hérémence area (Western Swiss Alps), *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography*, 55, pp. 219-223.
- Lambiel C., Reynard E. (2002). Impacts du développement d'un domaine skiable sur la morphologie glaciaire et périglaciaire : le cas de Verbier (Valais, Suisse), in : Reynard E. et al. (éds.) *Géomorphologie et Tourisme*, Actes de la réunion annuelle de la Société Suisse de Géomorphologie (SSGM), Finhaut, 21-23 sept. 2001, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et Recherches, 24, pp. 19-33.
- Lambiel C., Reynard E. (2003). Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais), in : *Entwicklungstendenzen und Zukunftsperspektiven in der Geomorphologie*, Zürich, *Physische Geographie*, 41, pp. 91-104.
- Lambiel C., Reynard E., Cheseaux G., Lugon R. (2004). Distribution du pergélisol dans un versant instable, le cas de Tsarminne (Arolla, Evolène, VS), *Bulletin de la Murithienne*, 122, pp. 89-102.
- Lugon R., Delaloye R., Serrano E., Reynard E., Lambiel C., González-Trueba J.-J. (2004). Permafrost and Little Ice Age glaciers relationships in the Posets Massif, Central Pyrenees, Spain, *Permafrost and Periglacial Processes*, 15, pp. 207-220.
- Müller H.N., Kerschner H., Küttel M. (1980). Gletscher- und Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen im Val de Nendaz (Wallis). Ein Beitrag zur alpinen Spätglazialchronologie, *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 16, pp. 61-84.
- Müller H.N., Kerschner H., Küttel M. (1983). The Val de Nendaz (Valais, Switzerland). A type locality for the Egesen advance and the Daun advance in the Western Alps, in: *Late- and postglacial oscillations of glaciers: glacial and periglacial forms*, Rotterdam, Balkema, pp. 73-82.
- Pieracci K. (2006). *Distribution et caractéristiques du permafrost dans les éboulis calcaires de haute altitude. Région du Grand Chavalard, Valais, Suisse*, Institut de Géographie, Université de Lausanne, Mémoire de licence (à paraître).
- Reynard E. (1996). Glaciers rocheux et limite inférieure du pergélisol discontinu dans le Vallon de Tortin (Nendaz-Valais), *Bull. Murithienne*, 114, pp. 135-149.
- Reynard E., Delaloye R., Lambiel C. (1999). Prospection géoélectrique du pergélisol alpin dans le massif des Diablerets (VD) et au Mont Gelé (Nendaz, VS), *Bull. Murithienne*, 117, pp. 89-103.
- Reynard E., Lambiel C., Delaloye R., Devaud G., Baron L., Chapellier D., Marescot L., Monnet R. (2003). Glacier/permafrost relationships in forefields of small glaciers (Swiss Alps), *8th International Permafrost Conference*, Zurich, Switzerland, pp. 947-952.
- Schoeneich P. (1998). *Le retrait glaciaire dans les vallées des Ormonts, de l'Hongrin et de l'Étivaz (Préalpes vaudoises)*, Thèse de doctorat, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Travaux et recherches, 14, 483 p.
- Wenker L. (1997). *Prévision de la répartition spatiale du permafrost dans les Alpes suisses du sud-ouest, comparaison entre les Diablerets (VD) et le Mont Gelé (VS)*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Mémoire de licence non publié.
- Winistorfer J. (1977). *Paléogéographie des stades glaciaires des vallées de la rive gauche du Rhône entre Viège et Aproz*, Université de Lausanne, Institut de Géographie, Thèse de doctorat, Bull. Murithienne, 94, Sion, 72 p.