

# Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais)

Christophe Lambiel, Emmanuel Reynard

Institut de Géographie, Université de Lausanne  
BFSH2, CH-1015 Lausanne

Christophe.Lambiel@rect.unil.ch

## Abstract

IGUL (the Geography Institute of the University of Lausanne) has been active in geomorphological cartography for many years, notably in the region of Nendaz, Valais. The research carried out has shown how this region is rich in periglacial forms and has initiated numerous other studies, like for example a rock glacier survey. This inventory has allowed, on the one hand, a spatial analysis to be carried out on the rock glaciers in the region, and on the other hand, the lower limit of permafrost to be determined for the region. From this, a very simple model of permafrost distribution was created on the basis of the position of the rock glaciers. A part from being able to describe the current distribution of permafrost, this model has also allowed the past and future distribution of permafrost to be described. For this, the time of formation of the different rock glaciers in the directory had to be determined, which is what makes up the essential part of this article.

## Résumé

Depuis de nombreuses années, l'IGUL (Institut de Géographie de l'Université de Lausanne) est actif dans la cartographie géomorphologique, notamment dans la région de Nendaz, en Valais. Ces recherches ont montré la richesse en formes périglaciaires de cette région, initiant ainsi de nombreuses autres études, comme par exemple la réalisation d'un inventaire de glaciers rocheux. Cet inventaire a permis d'une part d'effectuer une analyse spatiale des glaciers rocheux de la région et d'autre part de déterminer la limite inférieure du pergélisol dans la région. A partir de cela, un modèle très simple de la distribution du pergélisol a été créé sur la base de la position des glaciers rocheux. Outre la répartition actuelle du pergélisol, ce modèle a permis de décrire sa distribution passée et future. Il a fallu pour cela déterminer les périodes de formation des différents glaciers rocheux répertoriés, ce qui constitue la partie essentielle de cet article.

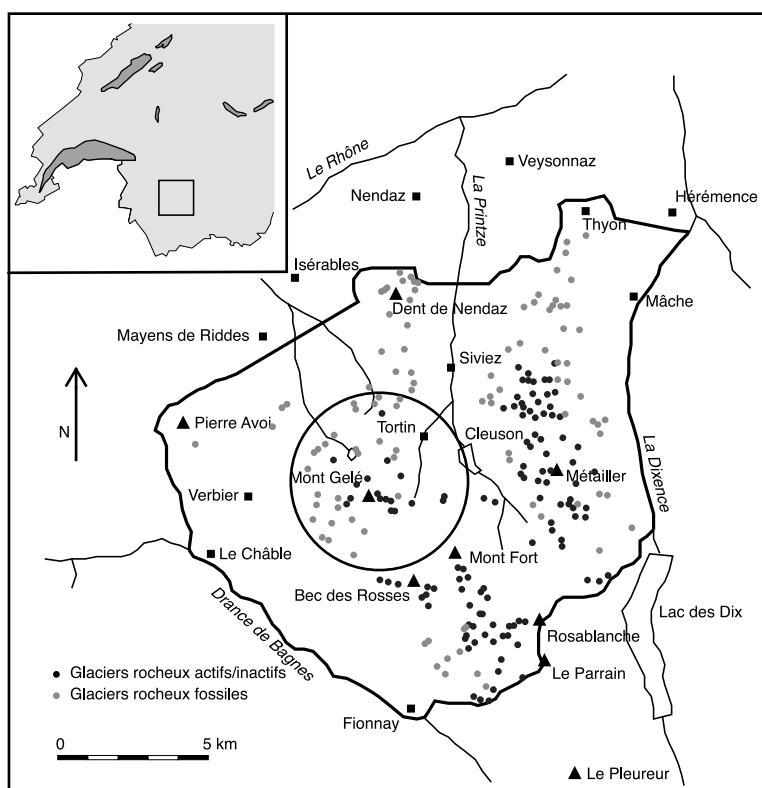
## 1 Introduction

Depuis le début des années 1990, l'Institut de Géographie de l'Université de Lausanne (IGUL) poursuit des investigations dans la région Tortin – Mont Gelé, sur le domaine skiable des stations de Verbier et Nendaz (Valais) (Fig. 1), avec l'objectif de mieux connaître la distribution et le

comportement du pergélisol alpin (Reynard 1996, Reynard et al. 1999, Delaloye et al. 2001, Lambiel & Reynard 2001). Quatre méthodes différentes ont été utilisées:

- Observation géomorphologique d'indicateurs de la présence de pergélisol (cartographie géomorphologique, inventaires de glaciers rocheux);
- Mesures thermiques (campagnes de mesures BTS, mesures en continu par mini-loggers, mesures thermiques dans des forages, mesures de températures de sources);
- Prospection géophysique (sondages et traînés géoélectriques, pseudo-section);
- Modélisation informatique de la distribution potentielle du pergélisol.

Cet article présente dans un premier temps les résultats obtenus par la cartographie géomorphologique et par un inventaire de glaciers rocheux effectué entre les vallées de Bagnes et d'Hérémence. L'objectif est ensuite de montrer tout l'apport que peut avoir ce type d'inventaire dans l'étude du pergélisol d'une région. C'est en effet grâce à la base de donnée constituée des paramètres mesurés sur les glaciers rocheux répertoriés que l'analyse spatiale des glaciers rocheux, la détermination de la limite inférieure du pergélisol, la modélisation de la distribution du pergélisol et enfin la datation des glaciers rocheux ont pu être effectués. Ces quatre points constituent les principaux éléments présentés dans cet article, l'accent étant tout particulièrement mis sur la datation des glaciers rocheux, un sujet encore relativement peu discuté aujourd'hui.



**Figure 1** La région du Mont Gelé, au cœur de la zone Bagnes-Hérémence, qui elle-même a fait l'objet d'un inventaire de glaciers rocheux.

## 2 Cartographie géomorphologique

A la fin des années 1980, l'IGUL a mis au point une légende géomorphologique (Schoeneich 1993). Cette légende, de type morphogénétique, permet de cartographier les formes du relief en fonction des processus qui leur ont donné naissance, en distinguant les formes d'érosion (dessinées sur un fond blanc) et les formes d'accumulation (dessinées sur un fond coloré dans la couleur du processus). En revanche, la légende ne permet généralement pas de distinguer les processus fossiles des processus actifs. Les travaux récents ont permis de développer une légende éditable par DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) (Schoeneich 1998a, Schoeneich et al. 1998) et une autre par SIG (Système d'Information Géographique) (Gentizon et al. 2001). Cette dernière offre l'avantage de pouvoir être combinée avec d'autres informations sur le pergélisol (ex. mesures thermiques ou géophysiques).

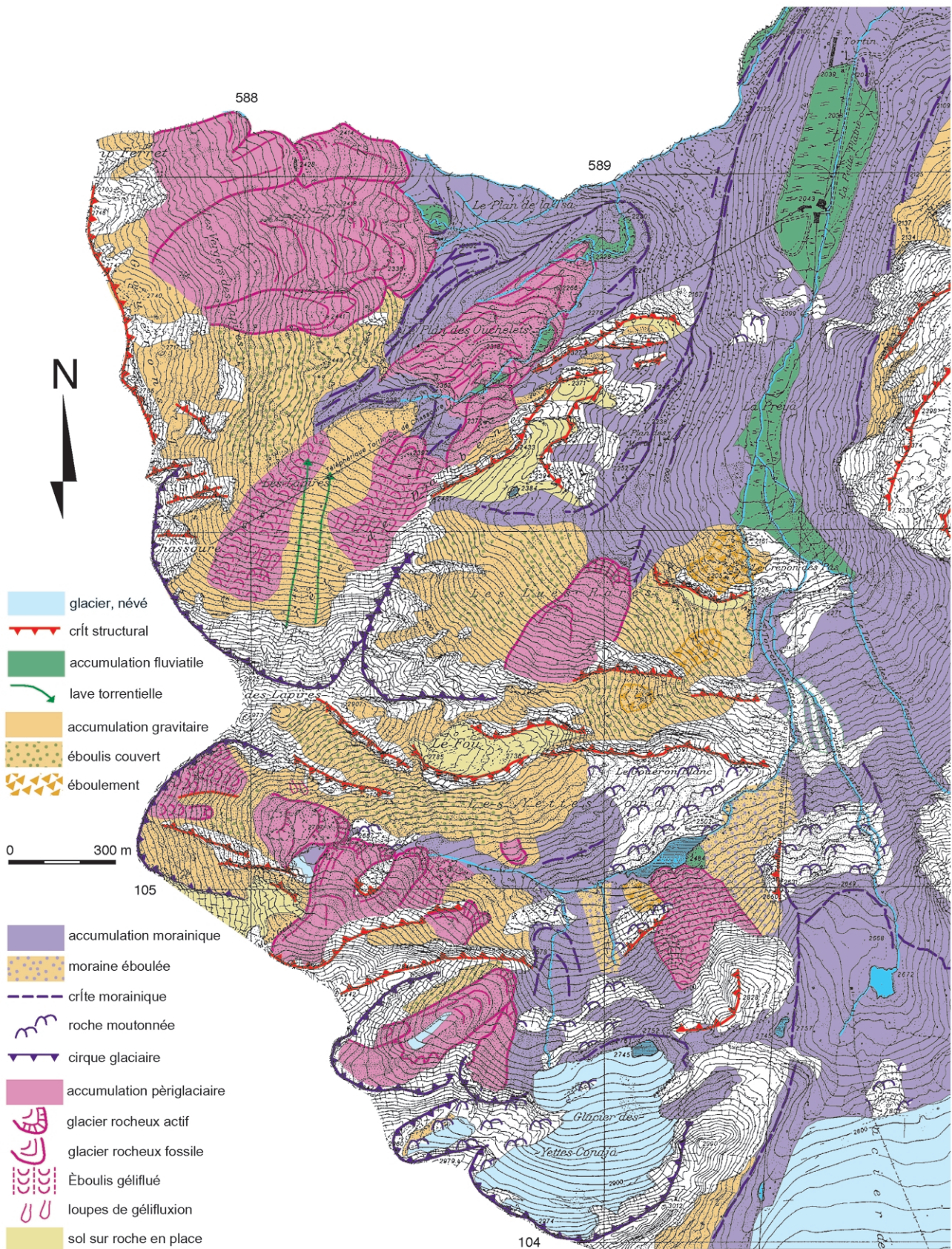
Plusieurs secteurs de la région étudiée ont fait l'objet d'une cartographie détaillée au 1/10'000. C'est le cas notamment du vallon de Tortin, à l'Est du Mont Gelé (Fig. 2). Cette carte permet de constater rapidement que la région est principalement affectée par des processus d'accumulation glaciaire, gravitaire et périglaciaire. Ces derniers ont permis le développement d'une série de glaciers rocheux et d'éboulis géliflués, représentés en rose. Afin d'augmenter le niveau de détail de la carte, une distinction entre formes actives et fossiles a été introduite quand cela était possible. C'est le cas des glaciers rocheux actifs et fossiles et des éboulis nus ou couverts.

Cette forte concentration de formes périglaciaires a initié de nombreuses recherches sur le pergélisol de la région, avec notamment un inventaire de glaciers rocheux dans une vaste zone qui englobe en son cœur le vallon de Tortin: la région Bagnes-Hérémence.

## 3 Les glaciers rocheux et le pergélisol dans la région Bagnes-Hérémence

### 3.1 Inventaire des glaciers rocheux: analyse spatiale et limite inférieure du pergélisol

L'inventaire de glaciers rocheux effectué entre les vallées de Bagnes et d'Hérémence au nord du massif de la Rosablanche (Fig. 1) a permis d'identifier 239 formations (Lambiel 1999). Sur la base d'indices morphologiques essentiellement (aspect général de la forme, présence de dépressions, présence de végétation, pente et aspect du front, etc.), les glaciers rocheux ont été classés dans deux catégories: les glaciers rocheux actifs/inactifs (130 formations) et les glaciers rocheux fossiles (109 formations). Cet inventaire visait plusieurs buts, dont la réalisation d'une **analyse spatiale** des glaciers rocheux répertoriés. Grâce à l'importance de l'échantillon, une étude statistique des paramètres mesurés (nombre, superficie, altitude, etc.) a pu être établie, ces paramètres ayant été étudiés en fonction de l'orientation. Parmi les enseignements retenus, on notera par exemple le fait que le nombre et la superficie des glaciers rocheux sont maximaux dans les orientations Nord (Ouest à Est) et minimaux dans les orientations Sud. Cependant, tant le nombre que la superficie des glaciers rocheux dépendent étroitement des conditions topographiques et du rayonnement solaire. Pour s'affranchir de ce problème, une carte des surfaces potentiellement favorables aux glaciers rocheux (altitude suffisante, pente inférieure à 40°, etc.) a été établie à l'aide d'un SIG. La superposition de ces surfaces par les surfaces effectivement occupées par des glaciers rocheux a ensuite permis de mettre en évidence d'éventuelles orientations préférentielles. Il en est ressorti que dans la région étudiée, les orientations Nord et Nord-Ouest sont légèrement plus favorables que les autres au développement des glaciers rocheux.



IGUL, E. Reynard, C. Lambiel, M. Baud, C. Gentizon, P. Schoeneich, 2000

Plan reproduit avec l'autorisation du Service cantonal des mensurations cadastrales du 13.04.2000

**Figure 2** Carte géomorphologique de la région de Tortin.

Un deuxième apport majeur de cet inventaire a été la détermination de la **limite inférieure du pergélisol** dans la région. En effet, les glaciers rocheux actifs/inactifs étant des indicateurs de la présence de pergélisol, l'altitude minimale atteinte par leur front peut-être utilisée pour déterminer la limite inférieure du pergélisol possible (Barsch 1996). Une classification des glaciers rocheux en fonction de leur orientation principale permet donc d'obtenir la limite inférieure du pergélisol possible pour chacune des huit orientations principales. Ainsi, *la limite inférieure du pergélisol possible dans la région Bagnes-Hérémence est donnée par l'altitude inférieure des glaciers rocheux actifs/inactifs de cette région*. On peut dès lors considérer que les terrains situés au-dessus de cette limite peuvent potentiellement contenir du pergélisol. Ce modèle est certes très simple car les glaciers rocheux, de par la protection thermique offerte par leur épaisse carapace de blocs, ont tendance à exporter du pergélisol en dessous de la ceinture du pergélisol discontinu. La distribution du pergélisol obtenue par ce modèle est donc surestimée, mais elle a le mérite d'être basée sur des paramètres locaux.

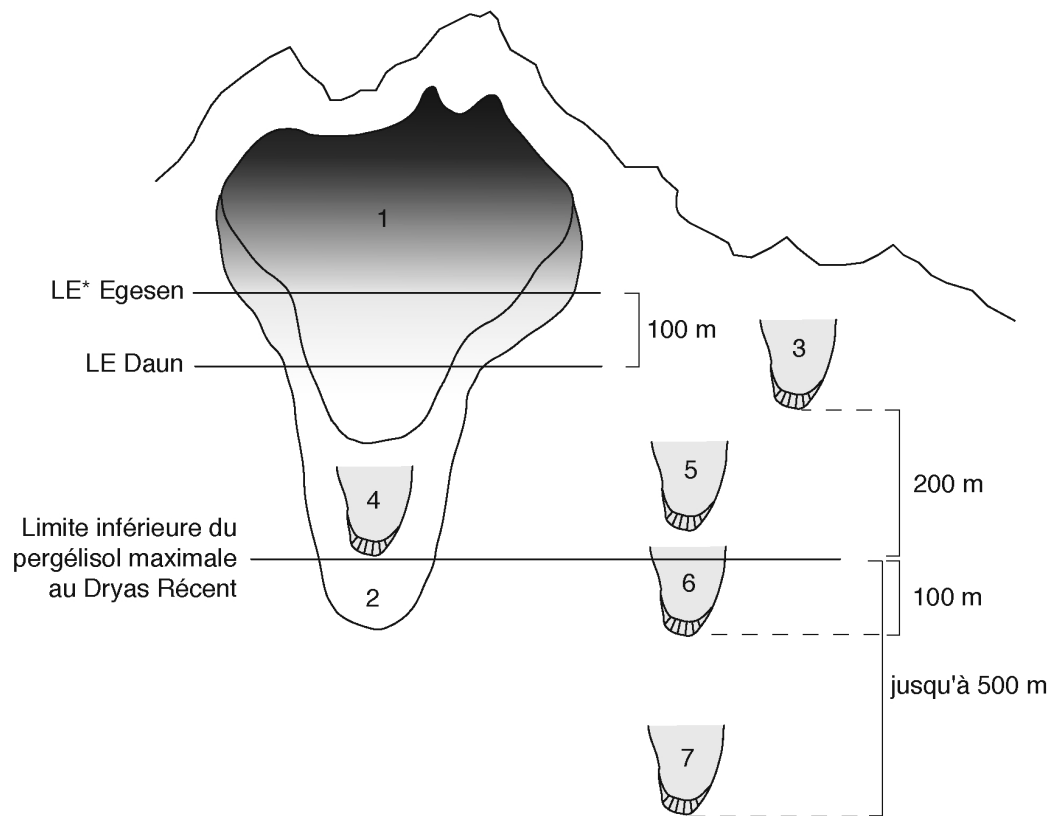
Les cartes de la figure 5 ont été établies selon ce modèle, à l'aide du SIG Idrisi et du modèle numérique d'altitude 25 m de l'Office Fédéral de Topographie. Elles donnent une représentation temporelle de l'évolution du pergélisol (et des glaciers) dans la région Tortin – Mont Gelé, située au cœur de la région Bagnes – Hérémence. Comme le modèle utilisé est basé sur la position des glaciers rocheux actifs/inactifs, pour décrire la distribution du pergélisol à une époque donnée il est nécessaire de connaître l'activité des glaciers rocheux à la même époque. Ceci constitue l'objectif des chapitres suivants.

### 3.2 Les glaciers rocheux fossiles

Sur le terrain étudié, pratiquement tous les glaciers rocheux fossiles sont situés plus bas que les formations actives ou inactives. Etant donné l'histoire climatique de l'Holocène (Schneebeli & Röthlisberger 1976, Röthlisberger et al. 1980, Gamper & Suter 1982), les glaciers rocheux fossiles n'ont pas pu se former durant les dix derniers milliers d'années, les températures ayant été trop élevées aux altitudes de leurs fronts. On en conclut que leur formation remonte au Tardiglaciaire. Contrairement à l'Holocène, le Tardiglaciaire a été marqué par des variations de températures très prononcées. On peut donc s'attendre à ce que les glaciers rocheux fossiles inventoriés n'ont pas tous pris naissance à la même période, ceux ayant les altitudes minimales s'étant probablement formés au début du Tardiglaciaire alors qu'à l'inverse, les glaciers rocheux fossiles situés aux altitudes les plus élevées n'ont pu se développer qu'à la fin de cette période (cf. Fig. 3 et 4). On peut dès lors s'intéresser à l'activité des glaciers rocheux - et par là même à la limite inférieure du pergélisol - lors de la période la mieux documentée du Tardiglaciaire: le Dryas Récent (12'700-11'550 cal BP) (Björck et al. 1996), dernier épisode froid du Tardiglaciaire, qui correspond au stade glaciaire de l'Egesen.

#### 3.2.1 L'âge des glaciers rocheux fossiles

Pour déterminer quels glaciers rocheux ont pris naissance au Dryas Récent, une méthode originale a été utilisée (Fig. 3). Elle consiste à comparer la position des glaciers rocheux actuellement fossiles avec celle occupée par les glaciers à la fin du Dryas Ancien Inférieur (stade du Daun, qui a précédé celui de l'Egesen). En effet, les glaciers rocheux situés dans des zones occupées par les glaciers à la fin du Dryas Ancien Inférieur n'ont pu se développer qu'après cette période, lors d'un épisode climatique moins froid, mais suffisamment froid pour que les conditions thermiques nécessaires au développement des glaciers rocheux soient atteintes. Cet épisode ne peut correspondre qu'au Dryas Récent.



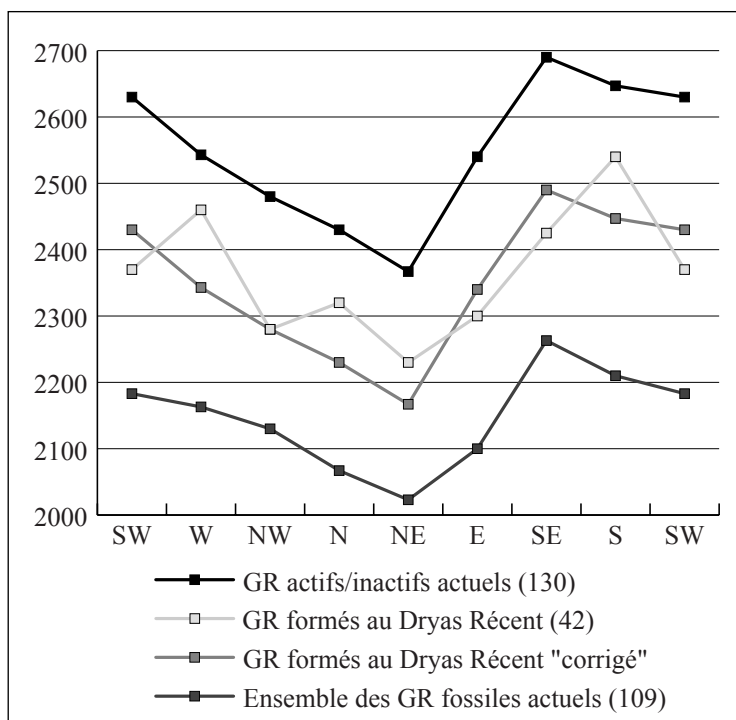
**Figure 3** Méthode de datation des glaciers rocheux fossiles, basée sur la comparaison de la position des glaciers et des glaciers rocheux, ainsi que sur des considérations climatiques et d'altitude.

1. Glaciers au Dryas Récent, stade de l'Egesen. 2. Glaciers à la fin du Dryas Ancien Inférieur, stade du Daun. 3. Glaciers rocheux actifs/inactifs. 4. Glaciers rocheux fossiles formés au Dryas Récent. 5. Glaciers rocheux fossiles formés avant le Dryas Récent, mais toujours actifs au Dryas Récent. 6. Glaciers rocheux fossiles formés avant le Dryas Récent, certainement toujours actifs ou inactifs au Dryas Récent. 7. Glaciers rocheux fossiles formés avant le Dryas Récent, certains étant déjà fossiles au Dryas Récent. \*LE = ligne d'équilibre.

L'usage de cette méthode a nécessité la reconstitution des glaciers pour les stades du Daun (2) et de l'Egesen (1). Pour ce faire, outre la prise en compte des moraines identifiées, un AAR 2:1 a été utilisé (Gross et al. 1977). En effet, une fois que la ligne d'équilibre d'un glacier est connue, on peut reconstituer sa zone d'accumulation et, grâce au rapport 2/3-1/3, sa zone d'ablation. Il a donc fallu déterminer l'altitude de la ligne d'équilibre des glaciers de la région Bagnes-Hérémece pour les stades de l'Egesen et du Daun. Pour l'Egesen, les altitudes retenues sont basées sur les travaux de Maisch (1995) et sur les valeurs proposées pour la région de Tortin par Müller et al. (1980, 1983), Bader (1990) et Lambiel & Stadelmann (1998). Pour le Daun, nous nous sommes basés sur les propos de Maisch (1995), selon lesquels l'altitude de la ligne d'équilibre des glaciers y était environ 100 m inférieure à celle de l'Egesen. Les zones d'accumulation des glaciers au Daun et à l'Egesen ont ensuite été dessinées au moyen d'un SIG, ce qui a permis d'estimer l'extension des glaciers pour les époques respectives.

L'utilisation de cette méthode amène deux informations majeures. Premièrement, la comparaison de la position des glaciers rocheux actuellement fossiles et des glaciers au Dryas Récent (Egesen) montre que quasiment tous ces glaciers rocheux étaient en-dehors des zones englacées au Dryas Récent.

Ces glaciers rocheux ont donc eu la possibilité de se former au Tardiglaciaire. Comme les températures y étaient plus froides qu'à l'Holocène, et donc favorables au développement des glaciers rocheux, nous avons la confirmation que les formations actuellement fossiles ont pris naissance au Tardiglaciaire. Deuxièmement, la méthode utilisée permet de constater que 42 glaciers rocheux actuellement fossiles (soit environ 40% des glaciers rocheux fossiles) se trouvaient dans des zones englacées à la fin du Dryas Ancien Inférieur (4). Ils n'ont donc pu se former qu'après cette période, vraisemblablement au Dryas Récent (Egesen). L'analyse de la position des fronts de ces glaciers rocheux montre que leur altitude minimale se trouve, en fonction de l'orientation, entre 80 et 280 m plus bas que celle des glaciers rocheux actifs/inactifs actuels (Fig. 4). Cependant, comme l'échantillon est faible (42 glaciers rocheux), ces valeurs ne peuvent être considérées comme significatives. Il a donc été nécessaire de les corriger en calculant leur moyenne, afin d'obtenir des valeurs les plus proches possibles de la réalité. La correction indique qu'au Dryas Récent la limite inférieure du pergélisol se trouvait au moins 200 m plus bas qu'aujourd'hui. On a donc là une limite inférieure du pergélisol **maximale**.



**Figure 4** Altitude minimale atteinte par les glaciers rocheux dans la région Bagnes – Hérémence pour chaque orientation.

L'analyse détaillée de la répartition des autres glaciers rocheux fossiles par rapport à la limite inférieure du pergélisol établie ci-dessus montre que l'on trouve une vingtaine de glaciers rocheux à l'intérieur de la ceinture du pergélisol discontinu au Dryas Récent et qui étaient situés hors des zones englacées à la fin du Dryas Ancien Inférieur (5). Comme les températures y étaient plus froides qu'au Dryas Récent, tout porte à croire que ces formations se sont développées à la fin du Dryas Ancien Inférieur, voir plus tôt, mais en tous les cas avant le Dryas Récent. Il est fort possible que ces glaciers rocheux aient connu une phase d'inactivité durant le Bölling – Alleröd et qu'ils se soient réactivés au Dryas Récent.

A l'inverse, on trouve une cinquantaine de glaciers rocheux fossiles situés en dessous de cette limite. Là aussi, il y a de fortes chances que ces formations aient pris naissance avant le Dryas Récent. Reste à savoir s'ils ont survécu au réchauffement du Bölling – Alleröd.



Parmi ces glaciers rocheux, treize sont situés moins de 100 m plus bas que la limite inférieure maximale du pergélisol discontinu au Dryas Récent (6), ce qui les place moins de 300 m plus bas que la limite inférieure du pergélisol actuel. Il est donc fort probable que ces formations aient été toujours actives, ou du moins inactives, au Dryas Récent, ce d'autant plus que le pergélisol réagit très lentement face aux modifications du climat (Haeberli et al. 1993). Pour preuve, une excavation réalisée dans un glacier rocheux fossile situé dans la région de Nendaz à une altitude de 2000 m a permis de mettre à jour de la glace à une profondeur d'environ 6 m. On peut en déduire que certains glaciers rocheux, même s'ils n'étaient plus en équilibre avec les conditions climatiques du Dryas Récent, ont pu survivre durant cette période.

Enfin, il reste les autres glaciers rocheux fossiles, ceux situés entre 100 et 500 m plus bas que la limite inférieure maximale du pergélisol au Dryas Récent (7). Les connaissances climatiques du début du Tardiglaciaire étant pour l'instant limitées, il serait vain de vouloir tenter de donner un âge de formation et de « fossilisation » à ces glaciers rocheux. On peut tout de même supposer que les glaciers rocheux situés dans les altitudes minimales se sont développés tout au début du Tardiglaciaire et qu'ils étaient déjà fossiles au Dryas Récent. On trouve ainsi sur les hauts de Verbier un glacier rocheux situé en orientation Sud-Est avec une altitude frontale de 1970 m, ce qui le place 520 m en dessous de la limite inférieure maximale du pergélisol au Dryas Récent. Une altitude aussi basse le place dans les mêmes valeurs que les glaciers rocheux fossiles des Préalpes (Schoeneich 1998b), glaciers rocheux qui furent probablement actifs uniquement durant la première partie du Tardiglaciaire.

### *3.2.2 Modélisation de la distribution du pergélisol au Dryas Récent*

La figure 5.1 représente la région Tortin - Mont Gelé au Dryas Récent. Comme la méthode utilisée ci-dessus n'a permis d'obtenir qu'une limite inférieure maximale du pergélisol, on estime que la dépression de la limite inférieure du pergélisol possible entre aujourd'hui et le Dryas Récent est non pas de 200 m mais plutôt de 250 à 300 m. On observera sur cette carte que tous les glaciers rocheux actuellement actifs ou inactifs se trouvent dans des zones englacées au Dryas Récent.

## **3.3 Les glaciers rocheux actifs/inactifs**

Le réchauffement climatique qui a marqué le passage du Tardiglaciaire à l'Holocène (11'550 cal BP) (Björck et al. 1996) a induit une élévation notable de la limite inférieure du pergélisol. Il est généralement accepté que les glaciers rocheux sont alors entrés dans une phase d'inactivité climatique et qu'ils sont devenus fossiles quelques centaines d'années après le début de l'Holocène (Barsch 1996, Frauenfelder et Käab 2000). Au même moment, les glaciers ont connu un rapide retrait. De nombreux cirques glaciaires ont été complètement déglacés, mettant ainsi de vastes surfaces à la disposition de la zone périglaciaire. Or, on sait que les glaciers rocheux actifs/inactifs inventoriés n'ont pu se former qu'à partir de ce moment (leur position se trouvant dans des zones englacées au Dryas Récent). Dès lors, ces glaciers rocheux se sont-ils formés dès le début de l'Holocène? Les conditions topographiques nécessaires à leur développement étant réunies, reste à savoir si les conditions climatiques l'étaient également.

### *3.3.1 L'âge des glaciers rocheux actifs/inactifs*

L'état des connaissances actuelles indique que l'Holocène a connu neuf phases froides entrecoupées de phases plus chaudes (Magny 1995). Les mouvements des glaciers au cours de l'Holocène auraient eu des amplitudes sensiblement égales à celles qu'ils ont atteintes durant le Petit Age Glaci-



aire et la période actuelle. L'amplitude des variations de la température serait ainsi de l'ordre de  $1,5^{\circ}\text{C}$  au cours de l'Holocène.

Cependant, les connaissances sur le climat de l'Holocène ne sont bien établies que pour les 6000 dernières années, période pour laquelle différents stades d'avancées glaciaires ont été attestés (Röthlisberger et al. 1980). Les preuves d'extensions glaciaires identiques à celle qu'a connu le Petit Age Glaciaire sont par contre extrêmement rares pour la première partie de l'Holocène (Schoeneich, comm. pers.). Il est donc difficile de savoir si cette période fut favorable ou non au développement des glaciers rocheux. Quoi qu'il en soit, les températures ne devaient pas y être beaucoup plus élevées qu'aujourd'hui (Magny 1995). On est donc en droit de penser que les glaciers rocheux situés dans les tranches d'altitude les plus élevées, à savoir les glaciers rocheux actuellement actifs, ont pu se développer dès le début de l'Holocène, ce qui confirme les recherches effectuées par d'autres auteurs, comme Haeblerli et al (1999), qui donnent un âge pluri-millénaire aux glaciers rocheux actifs. En revanche, les glaciers rocheux inactifs, situés en règle générale dans la frange inférieure de la ceinture du pergélisol discontinu, n'ont peut-être pu se former qu'une fois que les phases froides devinrent plus fréquentes. Ceci soulève un paradoxe: les glaciers rocheux actifs seraient plus âgés que les glaciers rocheux inactifs ! Ce qui est sûr, c'est que les périodes propices au développement des glaciers rocheux actifs ont été plus nombreuses que les périodes favorables à la formation des glaciers rocheux actuellement inactifs. On remarque d'ailleurs souvent que les glaciers rocheux actifs présentent une morphologie relativement uniforme. Frauenfelder et Käab (2000) parlent de glaciers rocheux "monomorphiques" pour décrire ces formations qui n'ont pas été perturbées par les variations climatiques et qui ont donc connu un développement continu tout au long de l'Holocène. A l'inverse, de nombreux glaciers rocheux, le plus souvent inactifs, présentent une superposition de lobes de générations différentes, certains étant inactifs et d'autres actifs. Les auteurs ci-dessus parlent de glaciers rocheux "polymorphiques". Ces formations ont probablement vu leur activité varier au gré des changements climatiques qui ont affecté l'Holocène.

### *3.3.2 Modélisation de la distribution du pergélisol aujourd'hui, au Petit Age Glaciaire et dans le futur*

Etant donné la grande inertie du pergélisol face aux modifications climatiques (Haeblerli et al. 1993), la distribution et les caractéristiques actuelles des glaciers rocheux actifs/inactifs doivent plutôt correspondre aux conditions climatiques du Petit Age Glaciaire qu'aux conditions actuelles. La limite inférieure du pergélisol au **Petit Age Glaciaire** (Fig. 5.2) est donc donnée par la limite inférieure des glaciers rocheux actifs/inactifs actuels. Cette limite n'a pas dû beaucoup changer **aujourd'hui** (Fig. 5.3). Cependant, comme l'élévation des températures depuis le Petit Age Glaciaire se situe aux environs de  $1^{\circ}\text{C}$  (Maisch et al. 1999), un fort déséquilibre doit exister vers la limite inférieure du pergélisol discontinu. En considérant un gradient de températures de  $0,56^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ , une tranche d'altitude de 170 m environ doit être concernée par des conditions de fonte. Dans cette zone, le pergélisol est globalement toujours présent, mais l'épaisseur de son niveau actif augmente et ses températures se rapprochent du point de fusion. Les premières mesures effectuées dans l'éboulis des Lapires (Tortin) montrent qu'entre 3,5 m et 20 m de profondeur, les températures sont stables et très proches du point de fusion ( $-0,2^{\circ}\text{C}$  à  $0,0^{\circ}\text{C}$ ) (Delaloye et al. 2001). C'est avant tout cette tranche d'altitude qui va être concernée par des instabilités de terrains liées à la dégradation du pergélisol.

L'horizon temporel qui correspond à un **réchauffement de  $1^{\circ}\text{C}$**  se situe selon les différents scénarios de l'IPCC (Maisch et al. 1999) aux environs de 2025 – 2055. Malgré ce réchauffement, la glace contenue dans les glaciers rocheux situés dans la frange inférieure du pergélisol discontinu n'aura très certainement pas fondu entièrement. La limite inférieure du pergélisol possible ne sera donc pas



beaucoup plus élevée qu'aujourd'hui. Cependant, le processus de dégradation du pergélisol sera renforcé et certains terrains peu épais auront même peut-être complètement dégelé. En considérant le même gradient de température qu'aujourd'hui, la ceinture de fonte du pergélisol pourra atteindre une dénivellation de 350 m (Fig. 5.4). Les zones d'instabilités potentielles deviendront donc très étendues, montrant par là qu'il est de la plus haute importance de surveiller l'évolution du pergélisol dans les vallées habitées.

## 4 Conclusions et perspectives

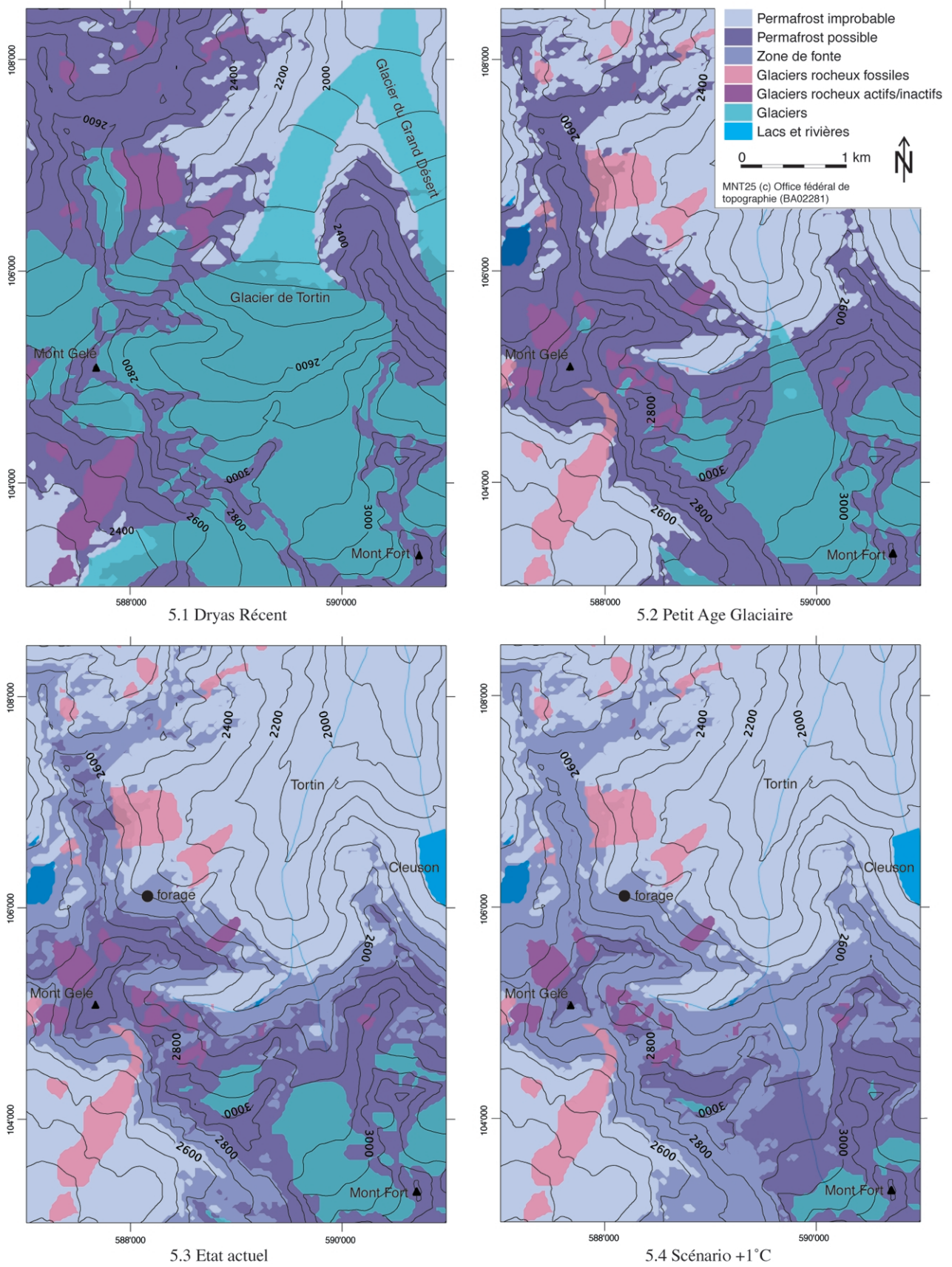
Cet article visait trois objectifs principaux: (1) la mise en évidence de la pertinence de l'utilisation de la cartographie géomorphologique dans la différenciation des processus géomorphologiques qui affectent les régions de montagne, (2) la modélisation de l'extension du pergélisol à diverses périodes et (3) la datation des différentes générations de glaciers rocheux. Les modélisations informatiques de la distribution du pergélisol et des glaciers ont permis de mettre en évidence le risque d'extension des zones potentiellement instables en milieu périglaciaire au cours des prochaines dizaines d'années. La tentative de datation des glaciers rocheux basée uniquement sur des considérations climatiques et sur les positions relatives des glaciers et des glaciers rocheux offre quant à elle quelques éléments de réponse à la question encore assez obscure de l'âge de ces masses de débris gelés (Haeberli 1985, Barsch 1996).

Il s'agit maintenant de poursuivre les investigations dans deux directions principales. L'étude des interactions entre processus glaciaires, gravitaires et périglaciaires, notamment en vue de l'évaluation des dangers naturels liés à la dégradation du pergélisol (cf. Haeberli et al. 1998), fait actuellement l'objet de campagnes de prospection géophysique et thermique dans divers secteurs de la région. Nous avons également lancé un programme de monitoring de l'évolution thermique du pergélisol dans le cadre du projet PERMOS (Vonder Mühll et al. 2000).

### Remerciements

Nous remercions Philippe Schoeneich pour ses nombreux conseils, suggestions et informations. Merci également à Marinette Baud et Caterina Gentizon pour leur aide dans la réalisation de la carte géomorphologique.






**Figure 5** Evolution temporelle de la distribution du pergélisol et des glaciers dans la région Torton - Mont Gelé (IGUL, C. Lambiel 2002).




## Bibliographie

- Bader S. (1990): Die Modellierung von Nettobilanzgradienten spätglazialer Gletscher zur Herleitung der damaligen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse – dargestellt an ausgewählten Beispielen aus den Schweizer Alpen. *Physische Geographie*, Vol. 31, Zürich.
- Barsch D. (1996): *Rockglaciers. Indicators for the present and the former geocology in high mountain environments.* Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Björck S., Kromer B., Johnsen S., Bennike O. (1996): Synchronized terrestrial atmospheric deglacial records around the North Atlantic. *Science*, 274, 1155-1160.
- Delaloye R., Reynard E., Lambiel C. (2001): Pergélisol et construction de remontées mécaniques : l'exemple des Lapires (Mont Gelé, Valais). Le gel en géotechnique, Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Thoune, 103-113.
- Frauenfelder R., Käab A. (2000): Towards a paleoclimatic model of rock-glacier formation in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 31, 281-286.
- Gamper M. & Suter J. (1982): Postglaziale Klimageschichte der Schweizer Alpen. *Geographica Helvetica*, Vol. 2, 105-114.
- Gentizon C., Baud M., Holzmann C., Lambiel C., Reynard E., Schoeneich P. (2001): GIS and geomorphological mapping as management tools in alpine periglacial areas. *High Mountain Cartography 2000*, Dresden University, 215-228.
- Gross G., Kerschner H., Patzelt G. (1977): Metodische Untersuchungen über die Schneegrenze in alpinen Gletschergebieten. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 12/2, 205-222.
- Haerberli W. (1985): Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der VAW-ETH Zürich*, Nr. 77.
- Haerberli W., Guodong C., Gorbunov A. P., Harris S. A. (1993): Mountain Permafrost and Climatic Change. *Permafrost and Periglacial Processes*, 4, 165-174.
- Haerberli W., Käab A., Hoelzle M., Bösch H., Funk M., Vonder Mühl D., Keller F. (1998): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. *Schlussbericht NFP 31*, Zürich, vdf Hochschulverlag.
- Haerberli W., Käab A., Wagner S., Vonder Mühl D., Geissler P., Haas J. N., Glatzel-Mattheier H., Wagenbach D. (1999): Pollen analysis and 14C age of moss remains in permafrost core recovered from the active rock glacier Murtèl-Corvatsch, Swiss Alps: geomorphological and glaciological implications. *Journal of Glaciology*, Vol. 45, No 149, 1-8.
- 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. & Stadelmann S. (1998): Essai de reconstitution paléoclimatique sur la base des observations faites dans le Vallon de Louvie (Valais). Institut de Géographie, Université de Lausanne, Rapport non publié.
- 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*, Vol. 55, 219-223.
- Magny M. (1995): *Une histoire du climat : Des derniers mammoths au siècle de l'automobile.* Paris, Editions Errance.
- Maisch M. (1995): Gletscherschwundphasen im Zeitraum des ausgehenden Spätglazials (Egesen-Stadium) und seit dem Hochstand von 1850 sowie Prognosen zum künftigen Eisrückgang in den Alpen. In: *Gletscher im ständigen Wandel*, Zürich, Publikationen der SANW Nr. 6, 81-100.
- Maisch M., Wipf, A., Denneler B., Battaglia J., Benz C. (1999): *Die Gletscher der Schweizer Alpen.* Schlussbericht NFP 31, Zürich, vdf Hochschulverlag.
- 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, 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, 73-82.
- Reynard (1996): Glaciers rocheux et limite inférieure du pergélisol discontinu dans le Vallon de Tortin (Nendaz-Valais). *Bull. Murithienne*, 114, 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, 89-103.
- Röthlisberger F., Haas P., Holzhauser H., Keller W., Bircher W., Renner F. (1980): Holocene climatic fluctuations - Radiocarbon dating of fossil soils (fah) and woods from moraines and glaciers in the Alps. Geographica Helvetica 35, 21-52.
- Schneebeli W. & Röthlisberger F. (1976): 8000 Jahre Walliser Gletschergeschichte, Ein Beitrag zur Erforschung des Klimaverlaufs in der Nacheiszeit. Bern, Verlag der Schweizer Alpen-Club.
- Schoeneich P. (1993): Comparaison des systèmes de légendes français, allemand et suisse - principes de la légende IGUL. In: Cartographie géomorphologique - Cartographie des risques, Institut de Géographie Lausanne, Série Travaux et recherches, 9, 15-24.
- Schoeneich P. (1998a): Cartes géomorphologiques des Préalpes et des Alpes vaudoises. Procédure d'édition par DAO, in: Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie. Mitteilungen der VAW-ETH Zürich, 158, 68-74.
- Schoeneich P. (1998b): Rock glaciers of the Prealps, Vaud, Switzerland. In: IPA Data and Information Working Group, comp. Circumpolar Active-layer Permafrost System (CAPS), version 1.0. Boulder, CO, National Snow and Ice Data Center (NSIDC). International Permafrost Association, CD-ROM.
- Schoeneich P., Reynard E., Pierrehumbert G. (1998): Geomorphological mapping in the Swiss Alps and Prealps. In: Kriz K. (Hrsg.) Hochgebirgskartographie Silvretta '98, Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie, 11, 145-153.
- Vonder Mühl D., Delaloye R., Haeberli W., Hoelzle M., Krummenacher B. (2000): Aufbau eines Permafrost-Beobachtungsnetzes in der Schweiz, Berne, Académie suisse des sciences naturelles, Rapport non publié.



SCHWEIZERISCHE  
GEOMORPHOLOGISCHE  
GESELLSCHAFT



SOCIÉTÉ SUISSE DE  
GEOMORPHOLOGIE


Die Schweizerische Geomorphologische  
Gesellschaft (SGmG/SSGm)  
verleiht an

**C. Lambiel & E. Reynard**


im Rahmen der Jahrestagung 2000  
«Entwicklungstendenzen und  
Zukunftsperspektiven in der Geomorphologie»  
einen Nachwuchs-Anerkennungspreis  
für die Gestaltung und Präsentation  
eines Posters zum Thema:

«Cartographie de la distribution  
du pergélisol dans la région du Mont Gelé  
(Alpes Valaisannes, Suisse)»

Winterthur, 13. Oktober 2000



180. Jahreskongress  
der SANW  
11. - 13. Oktober 2000  
in Winterthur



Naturwissenschaftliche  
Gesellschaft  
Winterthur



**Lambiel, C & Reynard, E., 2003: Cartographie de la distribution du pergélisol et datation des glaciers rocheux dans la région du Mont Gelé (Valais)**

In: Maisch, M., Vonder Mühl, D. und Monbaron, M. (Hrsg.): Entwicklungstendenzen und Zukunftsperspektiven in der Geomorphologie. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft (SGmG) anlässlich des 180. Jahreskongresses der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften (SANW) in Winterthur (vom 11.-13. Oktober 2000). *Physische Geographie Vol. 41*, Geographisches Institut der Universität Zürich, S. 91-104.