

## PERMOS (Permafrost Monitoring Switzerland)

### Le pergélisol dans les Alpes suisses de 2000 à 2002<sup>1</sup>

*Cela fait vingt ans que les milieux scientifiques se sont penchés sur l'étude du pergélisol (le sous-sol gelé en permanence; en anglais: permafrost) dans les Alpes suisses. Depuis l'année 2000, l'observation du pergélisol est coordonnée au plan national dans le cadre du programme PERMOS. La rédaction des «Alpes» a décidé de publier le résultat de ces investigations tous les deux ans, en alternance avec le traditionnel rapport sur les glaciers.*

Sur mandat de la Commission Glaciologique (CG) de l'Académie Suisse des Sciences Naturelles (ASSN), non seulement les glaciers sont observés, documentés et analysés de manière systématique dans les Alpes suisses, mais désormais également le pergélisol<sup>2</sup>. En janvier 2000, la CG a approuvé le concept d'un programme d'observation, appelé «PERMOS» (Permafrost Monitoring Switzerland)<sup>3</sup>. Le présent rapport initie ainsi la synthèse régulière des données les plus récentes sur le pergélisol en Suisse. Dans le cadre de PERMOS, les variations de la température interne du pergélisol sont mesurées dans différents forages. La température de la surface du sol est relevée pour sa part sur plusieurs sites-test. A cela s'ajoute la réalisation périodique de photographies aériennes, dont la

comparaison permet de fournir des informations détaillées sur l'évolution des terrains dans le temps.

#### Influence climatique

Le pergélisol est un phénomène thermique qui se déroule dans les régions où, pour simplifier, le sol qui gèle en hiver ne dégèle pas complètement au cours de l'été. Il subsiste ainsi en profondeur une couche présentant des températures négatives durant l'année entière. Les paramètres climatiques dictant l'évolution du pergélisol sont, les températures estivales et les conditions d'enneigement. Le manteau neigeux agissant comme une

1 Extrait des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> rapports du Groupe de coordination sur le pergélisol et de la Commission glaciologique de l'Académie suisse des sciences naturelles (CG/ASSN).

2 Les observations PERMOS reçoivent un soutien financier de la Commission Glaciologique de l'ASSN, de la Direction générale des forêts auprès de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). Les Universités de Bâle, Berne, Fribourg, Lausanne et Zurich ainsi que l'EPF de Zurich et l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches se chargent des travaux sur le terrain. Nous remercions Bernhard Krummenacher, Severin Schwab, Reynald Delaloye, Christophe Lambiel, Wilfried Haeberli, Martin Hoelzle, Stephan Gruber, Catherine Stocker-Mittaz, Lukas Arenson, Sarah Springman, Martina Lutschg, Marcia Phillips et Thomas Stucki de leur précieuse collaboration.

3 PERMOS est, au plan international, l'un des premiers éléments du Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), qui fait partie du Programme mondial d'observation du climat (GCOS/GTOS), élaboré par l'OMM. Avec le lancement de ce programme, la Suisse donne une impulsion majeure à la recherche internationale sur les montagnes et le climat. Cf. *Les Alpes* 10/2002.

4 Extrait des bulletins du Service d'avertissement des avalanches, ENA-Davos.



**Le glacier rocheux du Val Sassa a été étudié dans les années cinquante déjà. C'est le plus long glacier rocheux des Alpes suisses**

couche isolante, le moment des premières grosses chutes de neige et l'épaisseur totale de la couverture neigeuse sont particulièrement décisifs.

#### Conditions d'enneigement<sup>4</sup>

*Hiver 2000/2001: abondance de neige au sud, enneigement tardif au nord*

L'hiver 2000/2001 s'est distingué par de nombreuses situations de barrage du sud. En octobre, de généreuses quantités de neige sont tombées sur le versant méridional des Alpes et l'on mesurait, au

**La température s'élève avec la profondeur. L'épaisseur du pergélisol varie entre 20 et plus de 100 mètres (à gauche). Le dégel estival (couche active) atteint 3 à 5 mètres de profondeur (à droite)**

**Axe x: température [°C]  
Axe y: profondeur [m]**

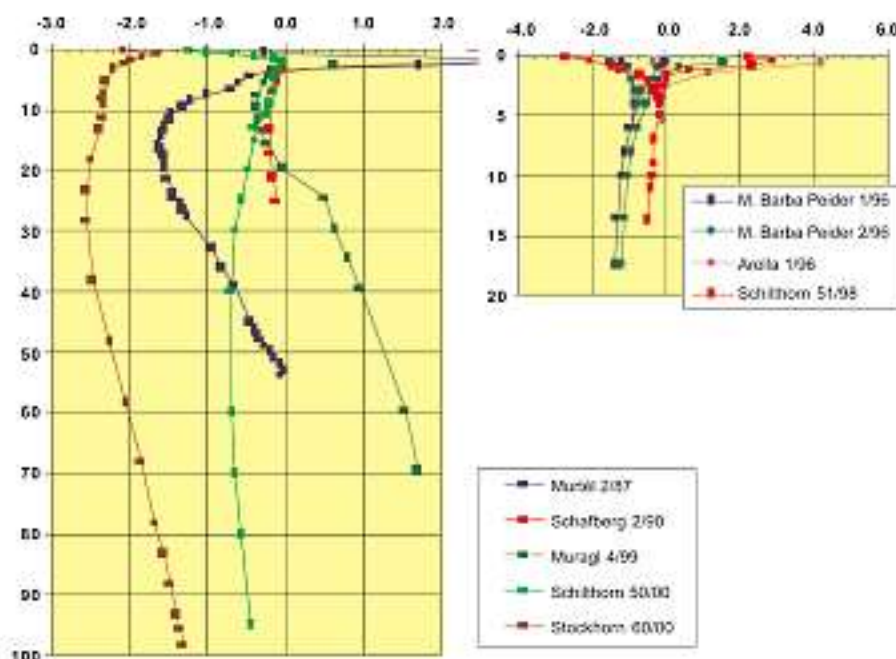




Photo: Christine Rothenbühler/vue aérienne prise d'un planeur

début décembre déjà, jusqu'à un mètre de neige des vallées de la Viège à la haute Engadine. La crête principale de la chaîne alpine et le centre des Grisons n'en annonçaient qu'un demi-mètre au même moment, et le versant nord, moins encore. Les épaisseurs maximales ont atteint deux à quatre fois la moyenne pluriannuelle au sud des Alpes, mais à peine la moitié de cette valeur au nord. Ce n'est qu'en avril que le versant nord des Alpes a reçu d'abondantes précipitations. Les épaisseurs de neige ont alors dépassé la norme.

#### Hiver 2001/2002: enneigement déficitaire

L'hiver 2001/2002 s'est caractérisé par des hauteurs de neige inférieures à la moyenne, particulièrement au-dessous de 2000 mètres d'altitude. Les premières chutes de neige se sont produites dans les régions élevées des Alpes en septembre et en octobre déjà, suivies d'un épisode neigeux jusqu'au-dessous de



## Titres des bulletins météorologiques mensuels de MétéoSuisse d'octobre 2000 à septembre 2002

| 2000      | Année exceptionnellement chaude. Automne extrêmement pluvieux au sud des Alpes et en Valais         |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Octobre   | Intempéries catastrophiques en Valais. Cote maximum du lac Majeur depuis 1868                       |
| Novembre  | Temps doux et changeant au nord, avec de fréquentes périodes de föehn. Très pluvieux au sud         |
| Décembre  | Extrêmement doux et sec au nord des Alpes et en Valais                                              |
| 2001      | Année chaude et bien ensoleillée en plaine, humide au nord des Alpes                                |
| Janvier   | Douceur et föehn. Peu de neige sur le versant nord des Alpes, peu de soleil au sud                  |
| Février   | Première quinzaine très douce. Peu de brouillard en plaine                                          |
| Mars      | Pluvieux et doux. Records de précipitations au nord des Alpes                                       |
| Avril     | Temps changeant au sud, humide et froid au nord. Retour tardif de l'hiver                           |
| Mai       | Ensoleillé, sec et extrêmement chaud                                                                |
| Juin      | Tout d'abord humide et frais, puis soleil et chaleur pendant la dernière décade                     |
| Juillet   | Fraîcheur et pluie au milieu du mois, plein été pendant les dix derniers jours                      |
| Août      | Très chaud et beaucoup de soleil. Déficit pluviométrique généralisé au nord des Alpes               |
| Septembre | Très frais. Temps exceptionnellement sombre au nord des Alpes                                       |
| Octobre   | Records de chaleur et très ensoleillé au nord, sécheresse en Valais                                 |
| Novembre  | Grande sécheresse au sud des Alpes, froid hivernal au nord                                          |
| Décembre  | Irruption massive de l'hiver, extrême sécheresse au sud des Alpes                                   |
| 2002      | Très chaud et humide, précipitations extrêmes au sud des Alpes et dans les Grisons                  |
| Janvier   | D'abord gel de lacs, ensuite très chaud, extrêmement sec au sud des Alpes                           |
| Février   | Très doux, changeant au nord et venteux, ensoleillé au sud                                          |
| Mars      | Très doux et très ensoleillé, sécheresse dans le sud                                                |
| Avril     | Doux, ensoleillé au nord, très sec à l'ouest et au sud                                              |
| Mai       | Changeant et humide, précipitations extrêmes au sud et dans la région d'Uri                         |
| Juin      | Ensoleillé, très chaud, records de chaleur                                                          |
| Juillet   | Très changeant, précipitations locales importantes vers la moitié du mois                           |
| Août      | Variable, précipitations importantes au-dessus de la moyenne, orages locaux très forts              |
| Septembre | Frais, peu de soleil, beaucoup de précipitations en Suisse allemande, irruption soudaine de l'hiver |

Source: MétéoSuisse

## Eléments de PRMOS dans la première phase pilote 2000–2003

| Forages<br>Localité, désignation du forage                           | Région                               | Profondeur max.<br>des mesures<br>thermiques [m] | Année |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|
| Murtèl-Corvatsch 2/87                                                | Oberengadin, GR                      | 58,0                                             | 1987  |
| Schafberg-Pontresina 2/90                                            | Oberengadin, GR                      | 33,2                                             | 1990  |
| Jungfraujoch N, S/95                                                 | Oberland, BE                         | 11,0                                             | 1995  |
| Emshorn                                                              | Oberems, VS                          | 6,4                                              | 1996  |
| Arolla, Mt Dolin                                                     | Val d'Hérens, VS                     | 5,5                                              | 1996  |
| Muot da Barba Peider 1, 2/96                                         | Pontresina, GR                       | 17,5                                             | 1996  |
| Randa Wisse-Schijen                                                  | Mattertal, VS                        | 9,9                                              | 1998  |
| Lapires                                                              | Val de Nendaz, VS                    | 19,6                                             | 1998  |
| Schilthorn 51/98                                                     | Mürren, BE                           | 13,7                                             | 1998  |
| Muragl 1, 2, 3, 4/99                                                 | Val Muragl, Oberengadin, GR          | 69,6                                             | 1999  |
| Schilthorn 50, 52/00                                                 | Mürren, BE                           | 95,0                                             | 2000  |
| Stockhorn 61/00                                                      | Zermatt, VS                          | 98,3                                             | 2000  |
| Sites faisant l'objet de mesures de température de la surface du sol |                                      |                                                  |       |
| Localité                                                             | Région                               |                                                  |       |
| Furggentälti                                                         | Gemmipass, BE                        |                                                  |       |
| Alpage de Mille                                                      | Bruson, Val de Bagnes, VS            |                                                  |       |
| Challand                                                             | Bourg-St-Pierre, Val d'Entremont, VS |                                                  |       |
| Lapires                                                              | Val de Nendaz, VS                    |                                                  |       |
| Muragl                                                               | Val Muragl, Oberengadin, GR          |                                                  |       |
| Murtèl-Corvatsch                                                     | Oberengadin, GR                      |                                                  |       |
| Tsavolires-Réchy                                                     | Val de Réchy, VS                     |                                                  |       |
| Schafberg-Pontresina                                                 | Oberengadin, GR                      |                                                  |       |
| Schilthorn                                                           | Berner Oberland, BE                  |                                                  |       |
| Yettes Condja                                                        | Val de Nendaz, VS                    |                                                  |       |

Le premier chiffre désigne le numéro du forage, le second l'année où le forage a été effectué

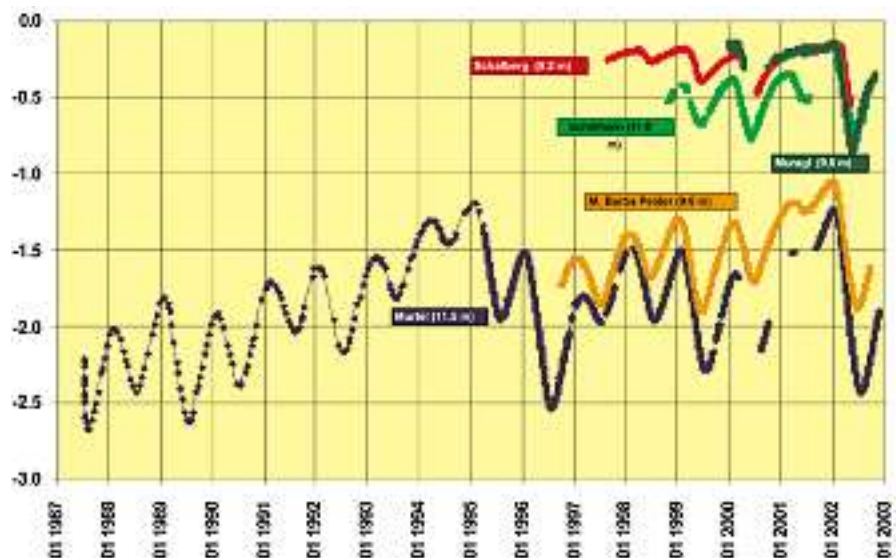
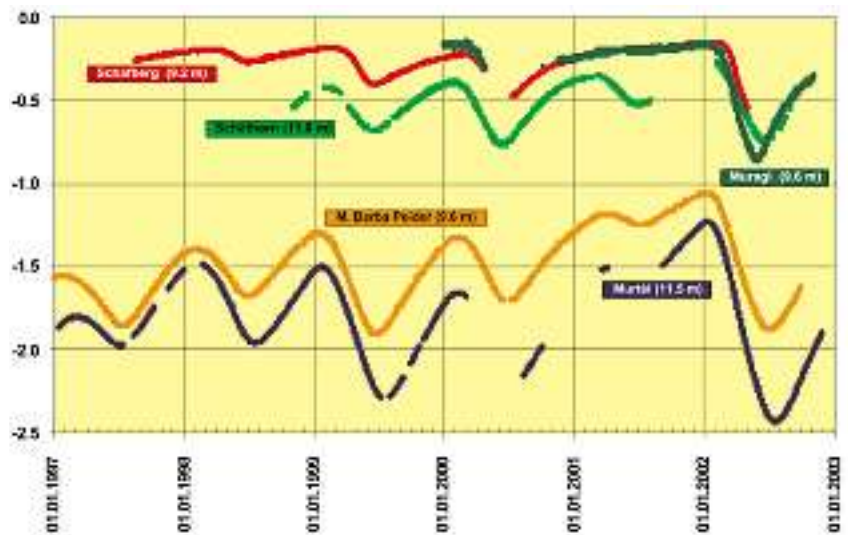
Durant sa phase-pilote, PERMOS se base uniquement sur des forages déjà existants (triangles) et, en ce qui concerne les températures de la surface

du sol, sur plusieurs sites-tests (trapèzes). Les forages ayant comme origine des projets de recherche menés par différentes institutions, la conséquence est

une concentration des éléments constitutifs de PERMOS en Haute-Engadine, en Valais et dans l'Oberland bernois

A 10 mètres de profondeur, on observe un retard des variations de température d'environ une demi-année. La tendance au réchauffement débutée en 1997 a été interrompue notamment dans le sud par l'hiver 2001/2002 très peu enneigé

Axe y: température [°C]



La plus longue série de températures (Murtel-Corvatsch) remonte à 15 ans. Entre 2000 et 2002, en dépit de l'hiver 2001/2002 qui fut froid, les températures sont demeurées

légèrement supérieures à la moyenne de toute la période d'observation

Axe y: température [°C]



En cas de forage dans un pergélisol contenant de la glace, on utilise de l'air froid et sec afin que celle-ci ne fonde pas

1000 mètres le 9 novembre, puis d'un autre à la fin du même mois. Par la suite, une hausse de la température a apporté des pluies jusqu'à haute altitude. Vers la fin de l'année, accompagnée de vents tempétueux, la neige est réapparue au-dessus de 2000 mètres sur une épaisseur d'un mètre environ. A fin janvier, l'enneigement était partout nettement inférieur à la norme. Février a enfin apporté les précipitations espérées; elles se sont prolongées en mars et en avril. D'importantes quantités de neige sont encore tombées au-dessus de 2000 mètres sur le versant sud des Alpes et en Engadine durant la première semaine de mai.

### Températures estivales

*Été 2001: plus chaud que la norme*

Un mois de mai extrêmement chaud, suivi de températures très fraîches au début juin et d'une période chaude durant le dernier tiers de ce même mois, ont marqué la première moitié de l'été 2001. Juillet a également enregistré des températures supérieures à la moyenne pluriannuelle, de même qu'août, avec une moyenne dépassant la norme de 2° C en toutes régions. Le passage en septembre s'est signalé par un net refroidissement et des températures inférieures à la moyenne durant presque tout le mois.

*Été 2002: vague de chaleur en juin*

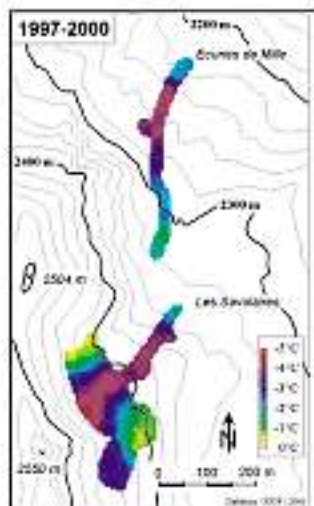
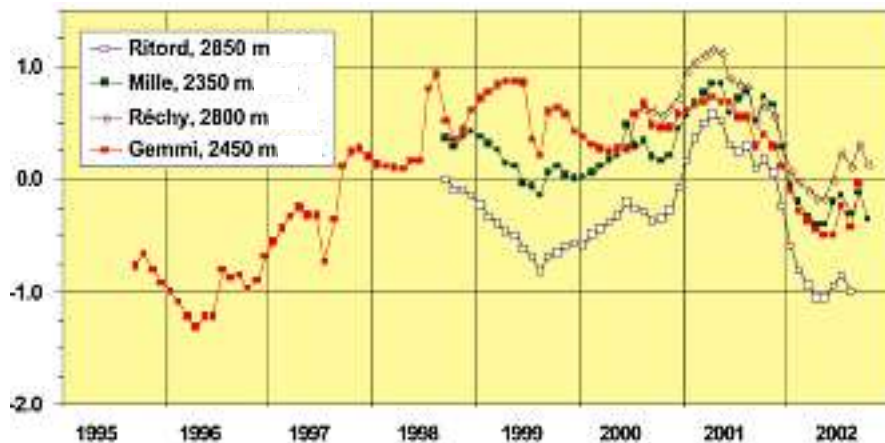
Après un mois de mai plus chaud que d'habitude dans toute la Suisse, à l'ex-

ception de l'ouest du pays, du Valais et des vallées du sud où les conditions étaient proches de la moyenne, une vague de chaleur a atteint l'ensemble du pays durant la seconde quinzaine de juin. Le temps changeant de juillet a apporté des températures presque normales; de même, la moyenne du mois d'août ne dépassa que de très peu celle de la période de référence 1961-1990. Quant à septembre, en raison d'une invasion massive d'air froid qui a temporairement apporté de la neige jusqu'à 600 mètres d'altitude, il s'est révélé un peu plus frais qu'à l'accoutumée dans la plupart des régions, mais surtout dans les Alpes.

Evolution de la température moyenne annuelle de la surface du sol (MAGST, Mean Annual Ground Surface Temperature) de 1995 à 2002. Les valeurs représentées sont la moyenne arithmétique des 12 mois précédents. A la station de mesure de la Gemmi, les températures étaient environ un demi-degré plus basses au milieu de la décennie 1990 que durant les der-

nières années. Les courbes de température obtenues dans le sud du Valais et au Furggentälti (Gemmi) montrent des comportements relativement similaires avec des parallèles intéressants qui doivent encore être analysés et interprétés dans le cadre de la phase-pilote de PERMOS.

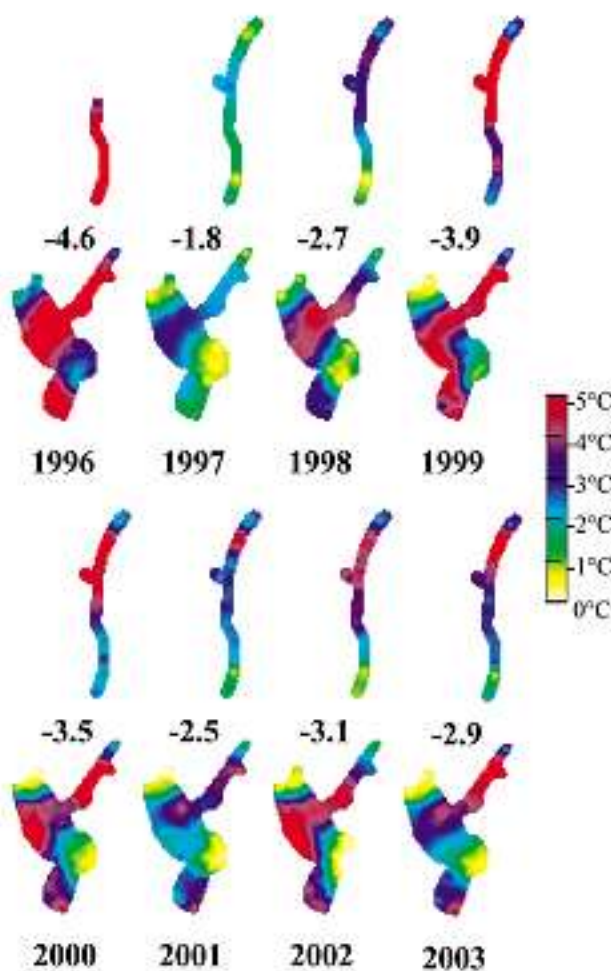
Axe y: MAGST [°C]



A l'Alpage de Mille, les mêmes mesures BTS ont été réalisées chaque année depuis 1996 aux environs du 10 mars (en haut à gauche). La valeur moyenne de toutes les mesures varie d'une

année à l'autre. Cependant, la structure relative de la répartition des températures est plus ou moins conservée (à droite). Les conditions d'enneigement, en particulier celles du début de

l'hiver, jouent un rôle important dans les variations observées (en bas à gauche : Station-ENA Boveire. (©) ENA Davos).



## Températures du pergélisol dans les forages

Dans les régions situées à une altitude proche de la limite inférieure du pergélisol, la température du sol gelé en permanence se révèle à peine inférieure à 0° C. Or, plus la température du pergélisol est

proche de 0° C, plus la proportion d'eau à l'état liquide – malgré la température négative – est importante. Les transferts d'énergie ne s'expriment dès lors pas uniquement par des variations thermiques, mais également par une transformation de la glace en eau ou vice versa. Ainsi, les changements de température sont fortement réduits au voisinage de 0° C. En règle générale, les variations

thermiques observées entre l'été et l'hiver sont beaucoup plus marquées lorsque le pergélisol est plus froid.

Six des forages PERMOS sont localisés dans un pergélisol froid. La température mesurée à dix mètres sous la surface du sol est prise en considération à des fins de comparaison. Cette profondeur convient particulièrement bien, car les

variations thermiques de courte durée, fréquentes à la surface, y sont largement filtrées. Il existe toutefois un décalage de six mois. En effet, la chaleur estivale met environ une demi-année pour atteindre – par conduction – ces dix mètres de profondeur. Les températures maximales y sont ainsi atteintes en hiver et les minimales en été.

Dans tous les forages, l'hiver 2000/2001 a provoqué une élévation de la température minimale, valeur mesurée à dix mètres de profondeur durant l'été 2001. Dans les forages de l'Engadine, ce minimum a même parfois été supérieur

au maximum qui a suivi l'été 1999. Plus tard et en Engadine toujours, les différences entre les valeurs extrêmes consécutives à l'été 2001 et à l'hiver 2001/2002 ont été particulièrement importantes en raison de l'enneigement déficient de la saison hivernale 2001/2002, saison qui s'est révélée très froide du point de vue du pergélisol. Ces conditions ont interrompu la tendance à l'augmentation des températures moyennes annuelles observée depuis 1997. Cependant, les températures relevées entre 2000 et 2002 dans le forage de Murtèl-Corvatsch sont demeurées dans la portion chaude des valeurs observées sur ce site depuis le début des mesures, il y a quinze ans.

### Variations thermiques de la surface du sol

La température de la base du manteau neigeux (BTS = Bottom temperature of

the winter snow cover) reste presque constante à la fin de l'hiver si la hauteur de neige dépasse 80 cm. Elle se situe, en règle générale, entre 0 et  $-2^{\circ}\text{C}$  hors des zones de pergélisol, en dessous de  $-3^{\circ}\text{C}$  en présence de pergélisol. Les mesures BTS sont effectuées en mars au moyen d'une perche munie d'une sonde thermique à son extrémité. Cette méthode ne permettant d'obtenir que des valeurs momentanées, des mini-capteurs autonomes de température, appelés Universal Temperature Logger 1 (UTL-1)<sup>5</sup>, sont utilisés depuis quelques années. Ces instruments programmables permettent de suivre de manière continue le comportement des valeurs BTS durant l'hiver et la température du sol durant l'année en-

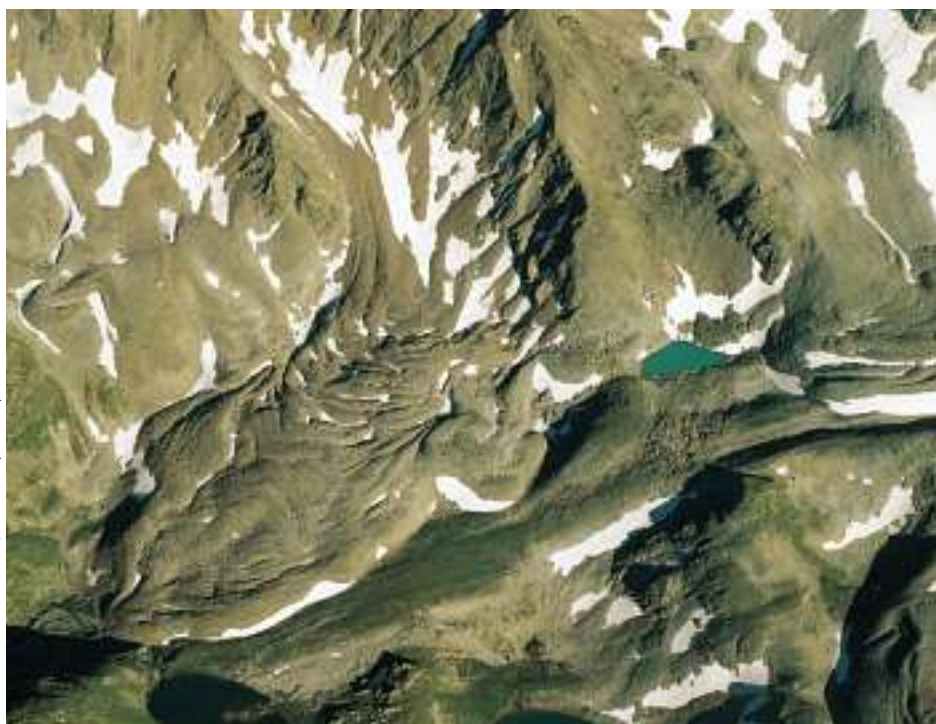
5 Cf. [www.utl.ch](http://www.utl.ch)

**La fonte de pergélisol riche en glace entraîne des dépressions appelées thermokarst. L'image montre un phénomène de thermokarst dans une moraine près du lac de Fully en Valais**





**Le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch est un des mieux étudiés au monde. Outre les mesures climatiques et géophysiques, cinq forages allant jusqu'à une profondeur de 65 m ont été effectués dans un but scientifique en 1971, 1987 et 2000**



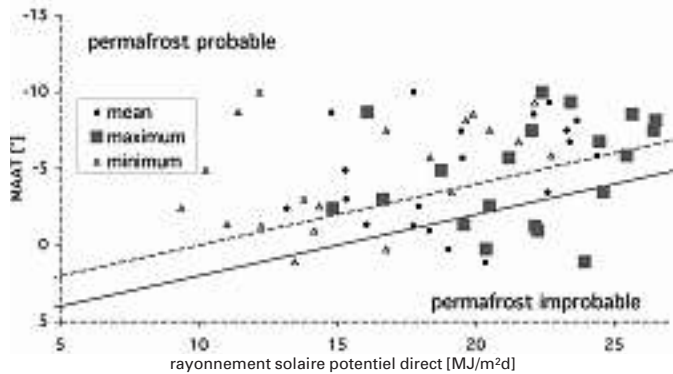
**Vue aérienne du haut-plateau des «Lajs da Macun» qui a été intégré au Parc national en l'an 2000. La morphologie d'écoulement (fluage) du glacier rocheux**

**est bien visible grâce au contraste provoqué par les plaques de neige encore présentes dans les dépressions du terrain au mois d'août**



Relation entre le rayonnement potentiel direct (axe x) et la température moyenne annuelle de l'air (MAAT; axe y). Une température moyenne annuelle de 0 °C accompagnée d'une énergie de rayonnement potentiel de

10 MJ/m<sup>2</sup> peut entraîner la formation de pergélisol. En cas de rayonnement solaire potentiel de 20 MJ/m<sup>2</sup>, la température annuelle doit être de -3 °C env. pour que le pergélisol puisse se former



Modèle: Département de géographie physique de l'Université de Zurich

tière. Ce second paramètre (GST = Ground Surface Temperature) est un élément important de l'observation à long terme des zones de pergélisol, car il permet d'appréhender l'évolution de la température durant la période d'absence du manteau neigeux. De telles mesures sont effectuées sur dix sites-témoins. A l'Alpage de Mille par exemple, les valeurs BTS sont relevées aux mêmes emplacements chaque année aux environs du 10 mars depuis 1996. Ces mesures démontrent que les températures BTS varient d'une année à l'autre. Cependant, la manière dont elles se répartissent sur le terrain ne se modifie guère.

### Phase-pilote du programme PERMOS

Les premières mesures de la phase-pilote de PERMOS soulignent l'importance d'un tel réseau d'observation. Chaque année supplémentaire permet d'apprécier et d'interpréter les données relevées dans un contexte plus large. Lors d'une seconde période d'essai prévue en 2004 et 2005, PERMOS affinera les méthodes de mesure des températures à la base du manteau neigeux (BTS) et à la surface du sol (GST). Des relevés thermiques complémentaires sont également envisagés sur des parois rocheuses libres de neige.

### Le pergélisol des versants rocheux

Des essais en laboratoire montrent que, lorsque la température des masses rocheuses se situe au-dessous du point de

congélation, leur stabilité diminue et provoque un danger accru de chutes de pierres. Durant ces cent dernières années, de nombreux éboulements se sont effectivement produits à partir de secteurs de «pergélisol chaud» dans les Alpes. Récemment, une telle zone d'instabilité a été détectée dans la paroi est du Mont-Rose.

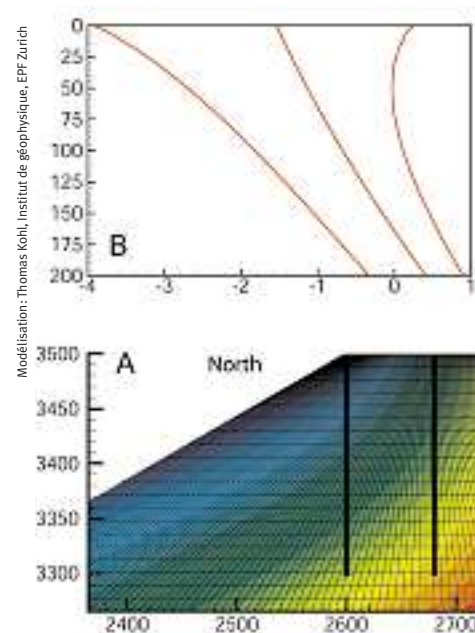
Des mesures effectuées dans des forages ont montré une augmentation de la température de la roche durant ces dernières décennies, augmentation comparable à celle de la température de l'air. Cette perturbation thermique s'est déjà répercutée jusqu'à cinquante mètres de profondeur. Toutefois, la forme complexe des cimes alpines et l'aspect souvent fort asymétrique de leur champ thermique rendent l'interprétation des mesures effectuées dans les forages beaucoup plus ardue qu'en terrain plat. La température de la surface de certaines parois rocheuses va être mesurée à l'aide de mini-capteurs UTL-1, notamment dans le but d'améliorer les modèles de calcul. ▀

Daniel Vonder Mühll, *délégué au pergélisol de la Commission glaciologique, Universités de Bâle et de Zurich (trad.)*

Même à une altitude de 3000 m, l'hélicoptère Kamax à double rotor supporte une charge allant jusqu'à deux tonnes. Pour les forages sur le Schilthorn, il transporte la foreuse et le compresseur. A l'arrière-plan, on distingue la Schwalmere. Photo prise en août 2000



Modèle: Département de géographie physique de l'Université de Zurich



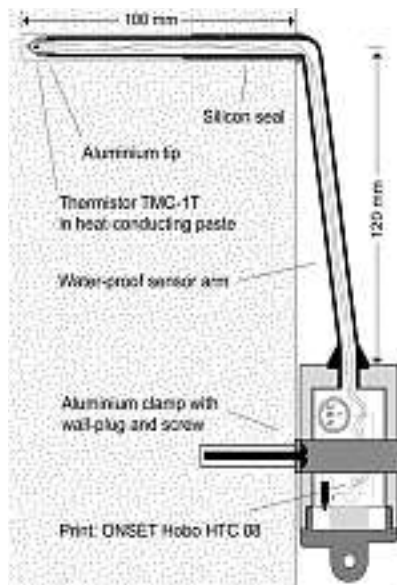
Les mesures sur le terrain sont complétées par des modélisations numériques. La répartition des températures à l'intérieur d'une montagne de même que le long d'un forage dépend notamment de la température mesurée à la surface du sol





< Vue sur le Dom, le Täschhorn, l'Alphubel et l'Allalinhorn (de g. à d.) créée à partir d'un modèle numérique d'élévation et d'une image satellite superposée. En bleu (probable) et en violet (possible), on voit la répartition du pergélisol calculée à l'aide du modèle ci-contre

> Les températures de la roche sont mesurées à 10 cm de profondeur à l'aide d'un senseur (en haut). Les données sont enregistrées à intervalles réguliers – p.ex. toutes les heures – par le mini-ordinateur fixé à la paroi au-dessous du senseur



Graphique: Stephan Gruber

Une méthode développée par Stephan Gruber dans le cadre de sa thèse de doctorat permet de mesurer la température de pa-

rois rocheuses libres de neige. La photo montre l'application de cette méthode dans la paroi nord de l'Eiger



Photo: Archives Stephan Gruber

de l'Université de Zurich

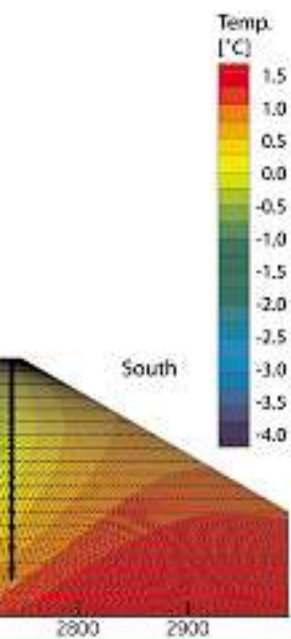


Photo: Daniel Vonder Mühll

> Pour être sûr que l'emplacement choisi près du sommet du Schilt-horn se situe dans le pergélisol, des tests de forages allant jusqu'à 14 mètres de profondeur ont été effectués en 1998. En outre, une station climatique a été aménagée (à dr.). En août 2000, deux forages ont été réalisés dans le versant Lauter-

brunnen, un forage vertical et un forage incliné (à g.), tous deux de 100 m de profondeur

Photo: Daniel Vonder Mühll



Photo: Daniel Vonder Mühll

Dans le pergélisol, la chaleur de frottement provoquée par les forages ne peut pas être évacuée par de l'eau. L'utilisation d'air

froid est à l'origine du gros nuage de poussière s'élevant au-dessus de la place de forage