



Le glacier du Gorner se termine dans une gorge étroite. En été, lors de journées de fonte intensive, le débit du cours d'eau issu du glacier est important et connaît de fortes variations journalières.

La cryosphère dans les Alpes Suisses

Neige, glaciers et permafrost en 2005/2006 et 2006/2007¹

Neige, glaciers et permafrost forment ensemble la cryosphère alpine. Pour la première fois, l'évolution de ces trois constituants est présentée conjointement. Leur comportement n'est pas identique et il existe des différences régionales. Cependant, on constate que l'accroissement des températures de l'air est responsable simultanément de la diminution du couvert neigeux, du retrait des glaciers et de l'élévation des températures du sol.

Les comptes rendus des variations des glaciers et du permafrost dans les Alpes suisses, publiés alternativement ces dernières années, sont présentés pour la première fois d'une manière commune et complétés par des données relatives au couvert neigeux. Les trois domaines neige, glaciers et permafrost font partie de ce que l'on appelle la cryosphère, ensemble regroupant toutes les formes d'eau gelée sur la surface terrestre. Le concept dérive du mot grec « kryos », qui

signifie froid. Les trois phénomènes, qui peuvent s'influencer mutuellement, réagissent de manière partiellement différente aux variations climatiques. Des mesures systématiques de la neige et des glaciers sont effectuées depuis le XIX^e siècle. Elles permettent d'établir et de documenter les changements qui se produisent à long terme. Depuis une bonne dizaine d'années, ceci est aussi le cas pour l'observation du permafrost.

Dans un souci de continuité des comptes rendus publiés à ce jour, le présent rapport décrit l'évolution de la neige et des glaciers durant les deux périodes

¹ Extrait des 127^e et 128^e rapports de l'observation des glaciers et du 8^e rapport d'observation du pergélisol de la Commission d'experts cryosphère de l'Académie suisse des sciences naturelles (EKK/SCNAT) et de leurs institutions partenaires

2005/2006 et 2006/2007. En ce qui concerne le permafrost, seul le cycle annuel 2006/2007 est considéré. Le rapport donne au préalable un bref aperçu des conditions météorologiques (températures, précipitations et chutes de neige) ayant joué un rôle particulier pour le comportement de la cryosphère dans les Alpes au cours des deux périodes d'observation.

Conditions météorologiques

En Suisse, comme à l'échelle planétaire, 2006 et 2007 ont à nouveau compté parmi les années les plus chaudes recensées depuis le début des mesures instrumentées en 1864. Alors que durant la première période d'observation 2005/2006, les précipitations ont été plutôt inférieures aux moyennes à long terme dans l'espace alpin suisse, les Alpes occidentales

Fig. 1a : Evolution des précipitations annuelles (somme de la période 1^{er} octobre-30 septembre) : écart à la norme (moyenne 1961-1990) en pour-cent.

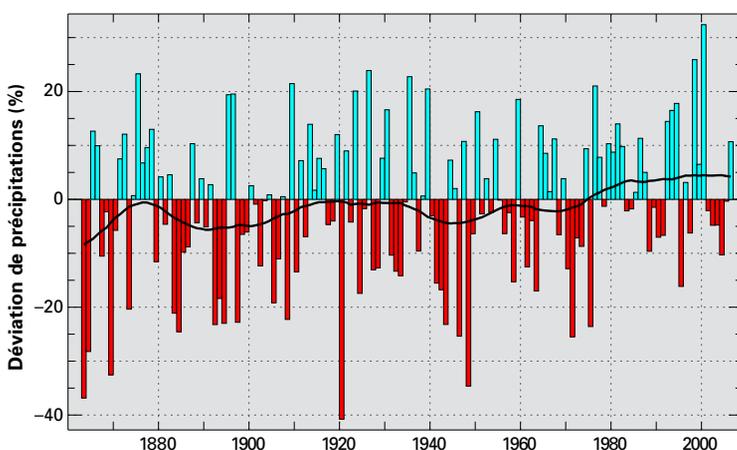
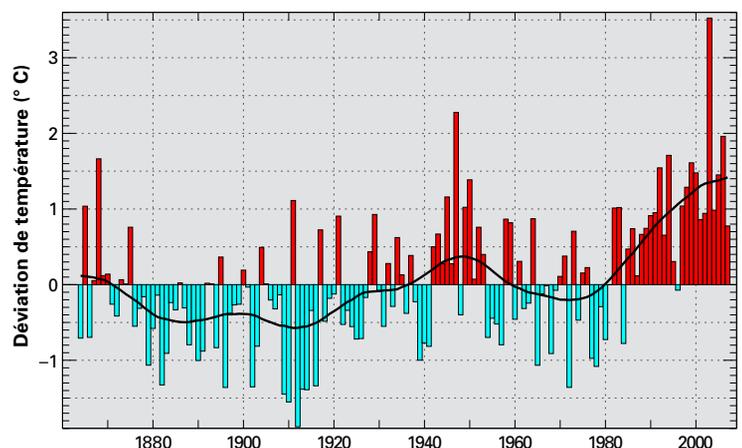


Fig. 1b : Evolution des températures estivales (moyenne de la période 1^{er} mai-30 septembre) : écart à la norme (moyenne 1961-1990) en degrés Celsius.



ont été très arrosées durant la seconde période 2006/2007. Lors des deux périodes, l'ensoleillement a atteint des valeurs normales à excédentaires.

2005/2006 : une longue phase hivernale peu enneigée

La première période d'observation a été caractérisée par un automne et un début d'hiver doux et peu enneigés. Fin novembre, les hauteurs de neige étaient largement déficitaires dans la plupart des stations (moins de 60% des moyennes à long terme), en particulier dans les régions internes des Alpes. Le vent, fréquent, a provoqué une répartition très irrégulière de la couche de neige. En décembre et janvier, des températures plus basses et de nouvelles chutes de neige ont lentement épaissi la couche de neige. D'importantes chutes de neige fin février, début mars et début avril, parfois jusqu'en plaine, ont finalement permis au manteau neigeux d'atteindre une épaisseur correspondant à des valeurs moyennes. Malgré une arrivée du printemps hésitante, un net excédent de chaleur a caractérisé la température alpine en avril et mai. A l'exception d'un mois d'août frais, la température a atteint des valeurs élevées à très élevées durant les mois d'été, faisant de la période estivale (mai-septembre) 2006 la troisième plus chaude en Suisse, dépassée seulement par les deux étés caniculaires de 2003 et 1947 (fig. 1b). Durant l'été, il n'est tombé que peu de neige en montagne, des chutes de neige significatives ne se produisant qu'au début juin et en août.

2006/2007 : le plus chaud semestre hivernal depuis le début des mesures

L'automne, très sec et le plus chaud depuis le début des mesures, et un hiver sec et très doux ont conduit à une pauvreté étendue et durable de l'enneigement. Les quelques grosses précipitations du cœur de l'hiver tombèrent parfois jusqu'à plus de 2000 mètres sous forme de pluie. La fonte fut ensuite précoce. Les hauteurs de neige maximales en haute montagne furent déjà mesurées mi-mars alors qu'en règle générale, elles ne sont atteintes qu'entre mi-avril et début mai, soit environ un bon mois plus tard. Dans quelques stations, la disparition de la neige fut la plus précoce depuis le début des mesures. Malgré quelques records de précipitations, l'été 2007 fut à nouveau légèrement plus chaud que la moyenne à long terme. A l'exception de juillet, les précipitations estivales n'apportèrent de la neige qu'au-dessus de 2600 mètres. Sur l'ensemble de la période d'observation 2006/2007, les quantités de précipi-

tations furent proches de la moyenne à long terme (1961-1990).

Neige

L'épaisseur du manteau neigeux et les quantités de neige fraîche sont relevées quotidiennement en Suisse dans environ 140 stations d'observation de l'Institut suisse pour l'étude de la neige et des avalanches (ENA) et de l'Office fédéral de météorologie et climatologie (Météo-Suisse). Ces mesures manuelles sont effectuées pour la plupart dans des lieux habités, au-dessous de 2000 mètres d'altitude. Les séries de mesures remontent à

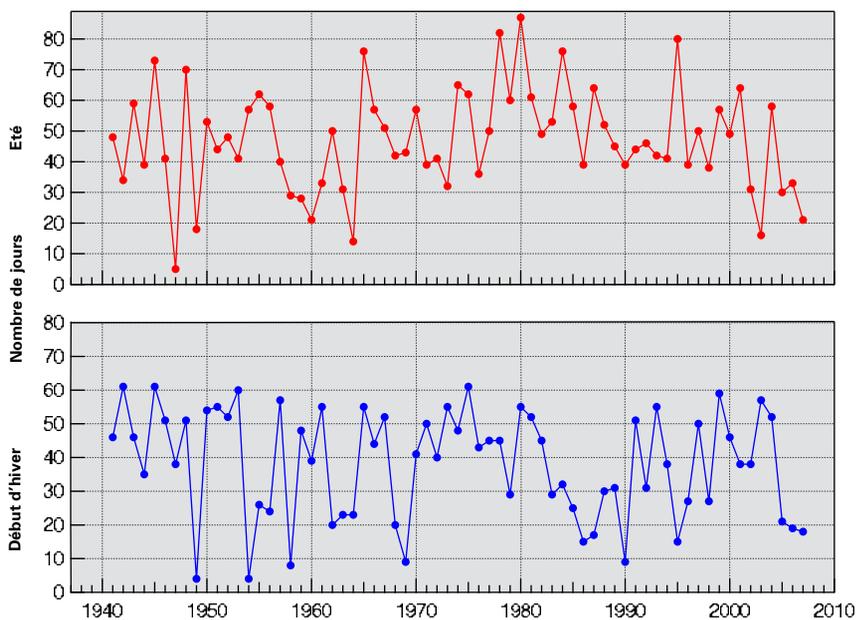


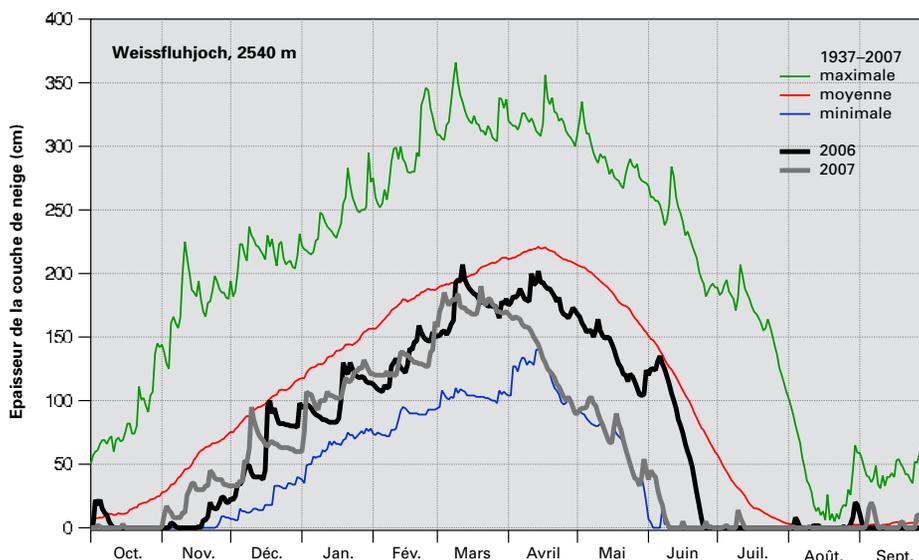
Fig. 2 : En bleu, nombre moyen de jours en début d'hiver (novembre et décembre) avec une couche de neige > 50 cm au Grimsel (1980 m), au Säntis (2490 m) et au Weissfluhjoch (2540 m) et, en rouge, nombre moyen de jours d'été (juin-septembre) avec une couche de neige > 10 cm au Säntis et au Weissfluhjoch.

Photo : A. Bauder

Trois personnes se déplacent avec un appareil radar sur le glacier du Gorner (à l'arrière-plan, le Lyskamm) afin d'en mesurer l'épaisseur. Un émetteur est installé sur la première luge et un récepteur sur la seconde.



Fig. 3 : Evolution journalière de l'enneigement au Weissfluhjoch (2540 m) lors des deux années hydrologiques 2005/2006 et 2006/2007 en comparaison avec les valeurs moyennes (rouge), maximales (vert) et minimales (bleu) de 1937 à 2007.



environ cinquante ans, pour certaines jusqu'à plus de cent ans. Au contraire, les stations automatiques de l'ENA, qui ne sont en fonction que depuis dix ans, sont presque toutes localisées au-dessus de 2000 mètres. En raison de leur altitude, ces stations sont particulièrement intéressantes pour l'étude des interactions entre neige et permafrost ou entre neige et glaciers. Pour les comparaisons à long terme en haute montagne, il faut cependant se contenter des rares stations ma-

nuelles qui y sont situées. Parmi celles-ci, la station du Weissfluhjoch (2540 m) fait exception et revêt un intérêt particulier : c'est le seul endroit des Alpes situé au-dessus de 2000 mètres où des mesures quotidiennes d'enneigement ont été réalisées durant plus de septante ans.

2005/2006 : un Weissfluhjoch longtemps sans neige

La première période d'observation fut marquée par un enneigement très tardif. Il n'y a eu par exemple au Weissfluhjoch

une couche de neige continue – mais encore fine – qu'à partir du 19 novembre. Il s'agit de la deuxième date la plus tardive des septante années d'observation. Mais au cours de l'hiver, le déficit initial fut plus que comblé en maints endroits, à l'exception des situations de haute altitude, au-dessus de 2000 mètres. Au-dessous de 1800 mètres, l'hiver fut l'un des trois plus enneigés des vingt dernières années au nord des Alpes. Ces dernières zones, importantes d'un point de vue touristique, ont dû cependant compter durant les deux dernières décennies avec nettement moins de neige que durant les quarante années précédentes (avant 1988). Sur le versant sud des Alpes, au-dessus de 1300 mètres, la série d'hivers pauvres en neige s'est poursuivie. Avant les chutes de neige de fin janvier, il n'y avait par exemple que tout juste 20 centimètres de neige à l'hospice du Simplon (2000 m), soit un nouveau record négatif pour cette période de l'année. Au contraire du versant nord des Alpes, le manque de neige durant les dernières années est avant tout dû à une diminution des précipitations hivernales au sud des Alpes. Lors d'un été chaud comme celui de 2006, les précipitations, déjà éparses, ne tombèrent de plus pas sous forme de neige jusqu'à haute altitude.

2006/2007 : typique des vingt dernières années

A nouveau, un enneigement très tardif, de faibles quantités de neige et une fonte très précoce ont marqué cette seconde période de mesure. Les hauteurs de neige n'ont que rarement atteint des valeurs moyennes, et ce pour de courtes périodes seulement. Par endroits, de nouveaux records négatifs ont été mesurés. Les tentatives laborieuses d'enneigement artificiel des pistes en dépit de températures

Photo : Emanuel Ammon



Sur un site de recherche de l'ENA au Weissfluhjoch.

Photo : F. Funk-Salamji



élevées en décembre, le transport de neige par hélicoptère en janvier (descente du Hahnenkamm à Kitzbühel) ou l'emploi de produits chimiques pour solidifier le peu de neige présent (descente du Lauberhorn à Wengen) ont fait les gros titres. Au-dessous de 2000 mètres, l'hiver 2006/2007 fut l'un des trois plus faiblement enneigés des soixante dernières années. Au-dessus de 2000 mètres, la quantité de neige au 1^{er} mai fut la plus faible depuis 1949. Le Weissfluhjoch était déjà déneigé le 12 juin (fig. 2). L'été 2007, trop humide mais normal pour ce qui fut des températures, n'a pas permis de compenser le déficit hivernal d'enneigement. Glaciers et zones de permafrost furent rapidement dépourvus de leur couverture de neige protectrice.

Glaciers

L'observation des glaciers suisses lors des deux périodes 2005/2006 et 2006/2007 ne reflète pas seulement les changements à long terme, mais montre aussi les grandes fluctuations d'une année à l'autre, souvent sous-estimées. La tendance globale au réchauffement se lit aussi à l'échelle régionale. Ainsi, le retrait des glaciers des Alpes suisses se poursuit sans

s'atténuer. Des fluctuations causées à court terme par la variabilité annuelle normale du climat ne suffisent pas à contrecarrer la tendance générale. Si les modifications de longueur et de superficie des glaciers révèlent plutôt des signaux climatiques à long terme, le bilan annuel d'alimentation en neige (précipitations) et d'ablation de glace (fonte) est pour sa part en relation directe avec les conditions météorologiques de la période de mesure.

Variations de longueur : un retrait persistant

Presque sans exception, tous les glaciers suisses se sont raccourcis durant les années d'observation 2005/2006 et 2006/2007. Parmi les quelque 110 glaciers observés annuellement, 98 langues glaciaires ont été visitées en automne 2006 et dans 92 cas, un relevé de variation de longueur a pu être effectué. Alors que 90 glaciers s'étaient retirés, seuls deux cas ont connu un allongement (voir tableau p. 52). Les valeurs extrêmes

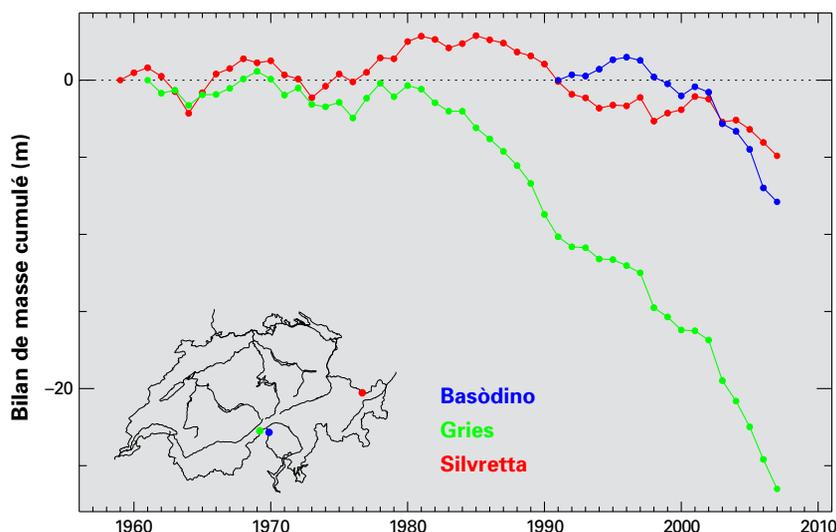


Fig. 4 : Bilan de masse annuel moyen cumulé (en m d'équivalent eau) des glaciers du Basòdino, de Gries et de la Silvretta.



Des lacs se forment aux marges de l'extrémité du glacier du Rhône. Sur la droite, la grotte glaciaire et le Belvédère sur la route du col de la Furka.



Photo : A. Bauder

Recouvrir un glacier (ici le Gurschenfirn) permet de ralentir la fonte de la glace. Au premier plan, un site test ; à l'arrière, la rampe d'accès sous la station supérieure du téléphérique du Gemsstock. Sous la toile protectrice, un bon mètre de glace a fondu.

tableau p. 52). Les valeurs extrêmes enregistrées furent un recul de 127 mètres du glacier de Roseg, de 100 mètres du glacier de Gauli et une petite avancée du glacier de Tseudet. Lors des deux périodes, la plupart des mesures se sont situées entre 0 et -30 mètres.

Le glacier de Suretta perd sa langue

Les valeurs de retrait extrêmes reflètent selon les cas des intervalles de plusieurs années, proviennent de grands glaciers ou sont consécutives à des effets locaux. Ainsi, le retrait exceptionnel du glacier de Suretta, dans le Rheinwald, n'était pas inattendu : la langue glaciaire, située dans une section raide, s'est fortement amincie durant les dernières années et plusieurs parties rocheuses ont continuellement été mises à jour. De plus, certaines parties terminales du glacier sont couvertes de sédiments, renforçant un effet de fonte différenciée persistant ; la couverture de matériaux protège la glace sous-jacente du rayonnement solaire et limite sa fonte. La fonte de la glace présentant une couverture de débris lacunaire s'intensifie, comme à proximité des rochers dégagés. Déconnectée des parties supérieures du glacier durant l'été 2006,

une grande partie de la langue s'est finalement retrouvée isolée. La limite effective du glacier s'est ainsi retrouvée environ 700 mètres plus en retrait et 300 mètres plus haut par rapport à la position retenue l'année précédente. Le vadret da Tiatscha montre un développement comparable, à savoir une séparation complète de la partie terminale de la langue. La formation de telles masses de glace morte isolées à l'aval du glacier et souvent couvertes de débris a fréquemment été observée durant les dernières années en raison de la fonte continue. Un autre type d'évolution particulière s'observe au vadret da Roseg, où la langue du glacier se termine dans un lac. L'apport de chaleur devenu plus important par le contact direct avec l'eau, ainsi que le vèlage (mise en flottaison et rupture de masses de glace marginales), accroissent le processus de retrait.

«Avancées» : des phénomènes locaux

Le fait que quelques glaciers avancent s'explique le plus souvent par des phénomènes locaux au niveau de la langue. Il ne s'agit pas d'une réelle avancée du glacier en réaction à un excédent de masse dans la zone d'accumulation qui découlerait de conditions météorologiques passées plus fraîches et plus riches en précipitations. La formation d'une couverture de débris sur la langue, diminuant la fonte de la glace sous-jacente, en est souvent responsable. De telles avancées, comme celles des glaciers de Cheillon ou de Tseudet, ne sont observées pour la plupart que durant une seule période de mesure, la tendance à la fonte des années précédentes se

mesurées furent les faibles avancées de 1 à 3 mètres des glaciers de l'Allalin et de Cheillon et le retrait d'environ 700 mètres du glacier de Suretta.

En automne 2007, 95 langues glaciaires ont été visitées et dans 91 cas, une mesure de longueur a pu être réalisée. A nouveau, une majorité de 88 glaciers s'était retirée, alors que deux langues glaciaires étaient demeurées stationnaires (± 1 m) et qu'une s'était allongée (voir

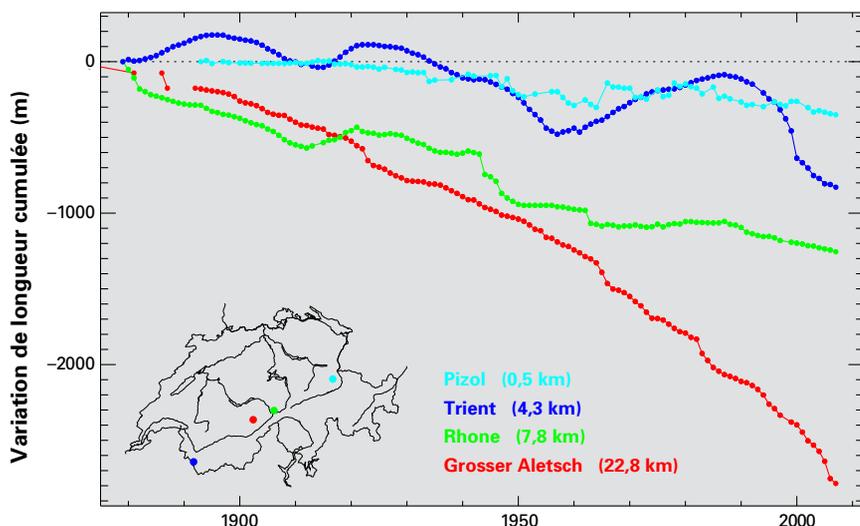


Fig. 5 : Variations de longueur annuelle cumulées (en m) de quatre glaciers réagissant au climat de manière différenciée.

Variation de la longueur des glaciers dans les Alpes suisses en 2005/06 et 2006/07

Glacier	Ct.	Variation de longueur (m)		Glacier	Ct.	Variation de longueur (m)	
		2005/06	2006/07			2005/06	2006/07
Bassin du Rhône				Bassin de la Reuss			
Allalin	VS	1,1	-14,3	Tschingel	BE	-6,8	-13,7
Arolla (Mont Collon)	VS	-35	-25	Unteraar	BE	x	x
Bella Tola	VS	n	n	Unterer Grindelwald	BE	x	x
Boveyre	VS	-23	-20	Bassin de la Reuss			
Breney	VS	-26,2	-36,2	Brunni	UR	n	n
Brunegg (Turtmann)	VS	n	n	Damma	UR	x	x
Cheillon	VS	2,4	-6,7	Firnalpeli (Ost)	OW	-32,8	-18,8
Corbassière	VS	-36,2	-17,7	Griess	UR	-10,7	-5,7
En Darrey	VS	-5,7	-1,3	Griessen	OW	-1,2	-8
Fee (Nord)	VS	-4,4	-5,1	Hüfi	UR	-6,4	-4
Ferpècle	VS	-33	-16	Kehlen	UR	-17,8	-26,6
Fiescher	VS	-14,3	-39,5	Rotfirn (Nord)	UR	-16,7	-14,3
Findelen	VS	-1,9	-12,1	Sankt Anna	UR	-26,7 ²	x
Giétro	VS	-31,3	-21,4	Tiefen	UR	-14,1	-19,3
Gorner	VS	n	-17,4	Wallenbur	UR	-1,8	-5,2
Grand Désert	VS	-6,2	-40,6	Bassin de la Linth/Limmat			
Grand Plan Névé	VD	-8,3	-3,1	Biferten	GL	-6	n
Gries	VS	-50,1	-39,3	Glärnisch	GL	-7,9	-13,7
Grosser Aletsch	VS	-114,6	-32,4	Limmern	GL	-2,1	-10,1
Kaltwasser	VS	-30,4	-22	Pizol	SG	-9,1	-6,5
Kessjen	VS	-16,5	-3	Plattalva	GL	-16,8	-13,9
Lang	VS	-16,5	-19	Sulz	GL	-2,1	-6,5
Moiry	VS	-9	-18	Bassin du Rhin			
Moming	VS	n	n	Lavaz	GR	x	n
Mont Durand	VS	-19,6	-17	Lenta	GR	-28,8	-36,1
Mont Fort (Tortin)	VS	-30,4	-3,2	Paradies	GR	-35,2	-5,7
Mont Miné	VS	-23	-10	Porchabella	GR	-17	-26,6
Mutt	VS	-30	-9,4	Punteglias	GR	-3	-7,3
Oberaletsch	VS	x	-5,7 ²	Sardona	SG	-22,4	-37
Otemma	VS	-99,8	-61	Scaletta	GR	-7,4	-19,6
Panevrosse	VD	-4,2 ²	-1,7	Silvretta	GR	-7,4	-10,4
Prapio	VD	x	-5 ²	Suretta	GR	-725	-20
Rhône	VS	-7,6	-11,6	Verstankla	GR	-20,7	-20,7
Ried	VS	-16,7	-9,1	Vorab	GR	-12,1	-24,4
Saleina	VS	-15	-24	Bassin de l'Inn			
Schwarzberg	VS	-11	-11	Calderas	GR	-12,2	-19,6
Sex Rouge	VD	-1,5	-0,6	Lischana	GR	-4,8	n
Trient	VS	-5	-18	Morteratsch	GR	-32,7	-19,3
Tsanfleuron	VS	n	n	Roseg	GR	-27,3	-127,3
Tseudet	VS	n	7 ²	Sesvenna	GR	-20,7 ²	-10,2
Tsidjiore Nouve	VS	-40	-18	Tiatscha	GR	-249,5 ⁶	-12,4
Turtmann	VS	n	n	Tschierva	GR	-54,8	-51,4
Valsorey	VS	n	-51 ²	Bassin de l'Adda			
Zinal	VS	-6,7	-15	Albigna	GR	n	n
Bassin de l'Aar				Cambrena	GR	-20	-33,3
Alpetli (Kanderfirn)	BE	-23	-25	Forno	GR	-23,7	-30,8
Ammerten	BE	-2,6	-0,8	Palù	GR	-37 ²	-27
Blüemlisalp	BE	-35	-31,3	Paradisino (Campo)	GR	-38	-2
Dungel	BE	-2	-5	Bassin du Tessin			
Eiger	BE	-20,5	n	Basòdino	TI	-10,9	-29,8
Gamchi	BE	-11,8	-18,3	Bresciana	TI	-13,8	-26,1
Gauli	BE	-78	-100	Cavagnoli	TI	-17,3	-16,5
Gelten	BE	-5,1 ³	-14	Corno	TI	-4,8	-8,4
Lämmern	VS	-9	-41,1	Crosolina	TI	-9,5	-3,2
Oberaar	BE	x	x	Rossboden	VS	n	x
Oberer Grindelwald	BE	x	n	Val Torta	TI	-13,8	-4,2
Rätzli	BE	n	n	Valleggia	TI	-5,1	-6
Schwarz	VS	-3,1	x				
Stein	BE	-45	-14				
Steinlimmi	BE	-27	-14				
Trift (Gadmen)	BE	-67,4	-71				

Abréviations
n = non observé
x = valeur non déterminée
st = stationnaire (+/-1 m)

Remarque:
 Lorsque la valeur indiquée s'applique à une durée de plusieurs années, l'exposant indique le nombre d'années.
 P. ex. Gelten -5,1³ = recul de 5,1 m en trois ans

poursuivant à nouveau lors des périodes suivantes. Suite à la rupture et à la perte d'une grande partie de la langue du glacier de l'Allalin en 2000, l'apport de glace provenant de la zone d'alimentation a pu compenser la fonte à l'extrémité de la langue durant les années qui ont suivi, et générer un comportement équilibré. Une légère tendance à la poussée a même été mesurée durant la période 2005/2006.

Bilans de masse: la perte d'épaisseur se poursuit

Des relevés détaillés du bilan de masse, à savoir du bilan entre l'apport de neige et l'ablation de glace, sont effectués sur les trois glaciers de Basòdino, Gries et Silvretta. En sus, des mesures portant sur les variations de masse sont réalisées ponctuellement sur le Jungfraufirn et le Claridenfirn, sur les glaciers de Giétroz et de Corbassière ainsi que sur des glaciers de la région de Mattmark. Au printemps, l'accumulation de neige hivernale est déterminée sur la base de profils d'enneigement et de sondages de la hauteur de neige. L'automne suivant, on estime la fonte estivale à l'aide de perches



Photo: Bruno Petroni

graduées ancrées au préalable dans la glace. Un déneigement tardif combiné à un été frais et humide est la situation la plus favorable pour obtenir un bilan de masse positif. A l'inverse, un hiver peu enneigé suivi d'un été ensoleillé et chaud conduit à une grande perte de masse.

Au vu des conditions météorologiques des deux années d'observation, il n'est pas surprenant de constater que les trois glaciers mesurés en détail ont perdu de leur masse. Les valeurs des bilans de masse spécifiques moyens (en m d'équivalent eau) sont de -2,5 mètres au Basòdino, -2,1 mètres à Gries et -0,8 mètre à la Silvretta en 2005/2006, et de -0,9 mètre, -1,9 mètre et -0,9 mètre en 2006/2007 (fig. 4).

En 2005/2006, alors que la fonte maximale de 2003 fut même dépassée au glacier du Basòdino dans le haut Val Maggia, la diminution de masse des glaciers de Gries dans la région du Nufenen et de la Silvretta dans l'arrière-Prättigau se situait, en regard des dix dernières années, à la troisième place après 2003 et

1998. Les pertes de masse enregistrées à Gries et à la Silvretta lors de la seconde période d'observation furent à peu près aussi importantes que celles de l'année précédente. Au glacier de Basòdino, la perte fut nettement plus faible. En comparaison pluriannuelle, les résultats s'insèrent en quatrième position derrière les grosses années de fonte 2002/2003, 2005/2006 et 1997/1998. Les résultats des deux périodes de mesure sont, à la différence de 2003, avant tout dus à des déficits d'enneigement hivernal. Si durant la première période, l'été chaud de 2006 fut également un facteur majeur, les conditions de fonte relativement modérées de l'été 2007 n'ont malgré tout pas empêché un bilan négatif.

Décompression glaciaire et éboulements

Durant l'été 2006, le bas-glacier de Grindelwald a attiré l'attention du public en raison de l'éboulement qui menaçait de se produire sur sa langue. Au pied du

contrefort est du massif de l'Eiger, la surface du glacier s'est abaissée d'environ 200 mètres depuis 1860. En raison de la diminution de la pression exercée par le glacier, une grosse masse de rochers de deux millions de mètres cubes est devenue instable. Des mouvements d'affaissement atteignant jusqu'à 75 centimètres par jour ont été mesurés. Des éboulements continus ont recouvert de débris l'extrémité de la langue glaciaire située dans un resserrement de la vallée. La couverture de blocs réduit fortement la fonte de la glace sous-jacente. Un peu à l'amont de cette zone, la surface s'abaisse de 6 à 10 mètres par année et un lac glaciaire s'est formé dans la dépression créée. Lorsque l'eau trouve un chemin à travers le glacier, le lac se vidange en peu de temps. Il faut s'attendre dans le futur à une croissance rapide des dimensions du lac et à des crues dans le Lütschental à l'aval.

Deux millions de mètres cubes de roche se sont effondrés du flanc est de l'Eiger sur le bas-glacier de Grindelwald durant l'été 2006. L'instabilité du versant est une conséquence du retrait du glacier.

La langue couverte du bas-glacier de Grindelwald avec des lacs d'eau de fonte et les dépôts issus de l'éboulement du pilier instable de l'Eiger à l'entrée amont de la gorge glaciaire. Vue en direction de Grindelwald. En haut à droite, la nouvelle cabane de Bäregg.



Photo: M. Funk



Photo: Jeannette Nötzli

Comme il n'y a plus de glacier pour faire appui, le pied du versant est de l'Eiger continue de s'effondrer.



Photo: S. Gruber

C'est en rappel, ordinateur portable compris, que l'on accède aux capteurs de température installés dans les parois rocheuses pour relever les données enregistrées (Fuorcla Surlej, Haute Engadine).

Permafrost

Le permafrost (pergélisol) est un matériau de sub-surface qui reste toute l'année à une température inférieure à 0° C. Dans les Alpes, il est fréquent au-dessus de la limite des forêts, concerne des éboulis, des parois rocheuses et plus généralement toutes les régions sommitales. Son observation est importante à plus d'un titre. Par exemple, la construction sur permafrost d'infrastructures telles que cabanes, stations de téléphérique ou paravalanches requiert des techniques particulières; des éboulements ou des laves torrentielles peuvent aussi être liés au permafrost. L'observation de l'état du permafrost et de ses changements est effectuée sur plusieurs sites des hautes Alpes (voir tableau) par le biais de mesures de températures de surface et de profondeur (forages). De plus, les mouvements que connaissent une dizaine de glaciers rocheux, une forme particulière du permafrost, sont suivis à l'aide d'analyses de photographies aériennes et de mesures in situ.

Après une phase pilote de six ans, le réseau suisse d'observation du permafrost (PERMOS) est passé en 2007 en mode de fonctionnement définitif. En

septembre dernier, les vingt ans du premier forage scientifique réalisé dans le permafrost alpin ont été fêtés. Il s'agit du forage situé sur le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch en Haute-Engadine, datant de 1987, et qui représente la plus longue série de données de température du permafrost en région de montagne.

Influence des conditions météorologiques sur le permafrost

La température du permafrost est influencée par les températures de surface, la topographie et les propriétés du sous-

sol. Pour l'essentiel, le permafrost réagit à des facteurs qui influencent la température de la surface. La date, l'épaisseur et la durée de l'enneigement sont des facteurs primordiaux. Si une couche de neige suffisamment épaisse pour isoler le sol se constitue rapidement, la chaleur de l'été reste stockée dans le sol. En revanche, lorsque, comme en 2006/2007, la neige n'apparaît que tardivement et, qui plus est, en quantité limitée, le refroidissement hivernal du sol est marqué. Pendant la période sans neige (environ de mai à septembre), comme dans les parties rocheuses raides, ce sont avant tout la température de l'air et le rayonnement solaire qui sont déterminants. Dans les zones planes ou couvertes d'éboulis ou de gros blocs, les températures de surface dépendent de l'influence combinée de la température de l'air, du rayonnement solaire, de la couverture neigeuse et d'une possible circulation d'air entre les blocs.

Températures de surface: déjà positives dans la face nord de l'Eiger en avril

Dans les Alpes, plus de cent capteurs mesurent environ toutes les deux heures les températures de surface. Ils complètent les mesures de température dans les forages et sont placés sur différents sites caractéristiques de la forte hétérogénéité des terrains de haute montagne: éboulis, glaciers rocheux et parties rocheuses horizontales, inclinées ou verticales. La longue période chaude de l'été 2006 au printemps 2007 (températures mensuelles constamment supérieures aux moyennes) est distinctement visible

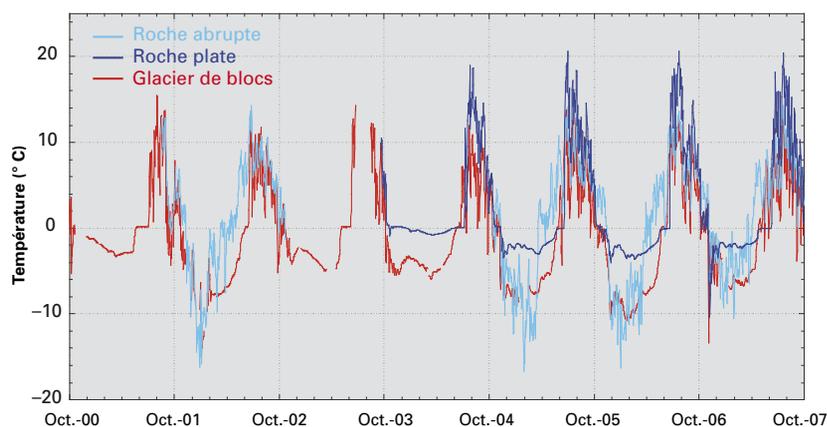
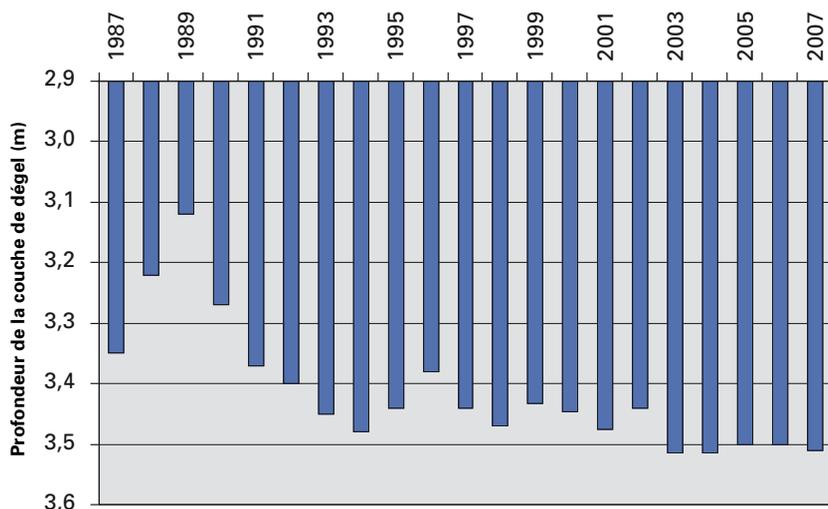


Fig. 6 : Comparaison des températures journalières moyennes mesurées à la surface d'un glacier rocheux et de zones rocheuses raides et planes. Les trois sites de mesure se trouvent à Murtèl-Corvatsch, en Haute Engadine.

dans les données mesurées sur rocher raide libre de neige (fig. 6). Dans la paroi nord de l'Eiger par exemple, à 2800 mètres, des températures positives ont déjà été relevées pendant plusieurs jours durant la seconde moitié d'avril. Des mesures sur rocher plat ou sur des glaciers rocheux montrent pour leur part l'influence de l'hiver peu enneigé de 2006/2007. En raison de l'enneigement tardif et faible, le sol fut mal isolé. Mais comme l'hiver fut très doux, le sol ne s'est pas autant refroidi que l'année précédente.

A fin 2003, suite en particulier à la canicule, les températures de surface s'étaient élevées de 2 à 3° C sur tous les sites de mesure dans les Alpes. Elles s'étaient déjà abaissées fin 2004 au niveau de la moyenne de la dernière décennie. Durant la période de mesure 2006/2007, les températures de surface se sont à nouveau légèrement réchauffées, mais sont demeurées environ 1° C plus froides que durant la période 2002/2003.

Fig. 7: Profondeur de la couche active (dégel superficiel annuel maximum) au forage du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch de 1987 à 2007.



Températures du sous-sol : évolution à long terme

La couche de surface où les températures sont positives en été s'appelle la couche active. Son épaisseur est avant tout influencée par les températures estivales et représente un signal climatique non décalé, comme le bilan de masse d'un glacier. La valeur de mesure absolue dépend cependant fortement des propriétés du sous-sol sur le lieu de mesure. De la glace peut ralentir la conduction de chaleur en provenance de la surface, car l'énergie est utilisée pour transformer la glace en eau. Au contraire, si de l'eau circule, la chaleur transportée peut renforcer les processus d'échanges thermiques dans des zones plus profondes. Alors que dans le permafrost riche en glace de Murtèl-Corvatsch, la marque de l'été 2003 (3,5 m) fut plus ou moins aussi de nouveau atteinte durant les étés suivants (2007 : 3,5 m) (fig. 7), les 9 mètres de l'été 2003 restent exceptionnels dans le permafrost pauvre en glace du Schilthorn. En 2006/2007 comme avant et après l'été extrême de 2003, des valeurs générale-

ment moyennes d'épaisseur de la couche active y ont été mesurées (2007 : 4,5 m).

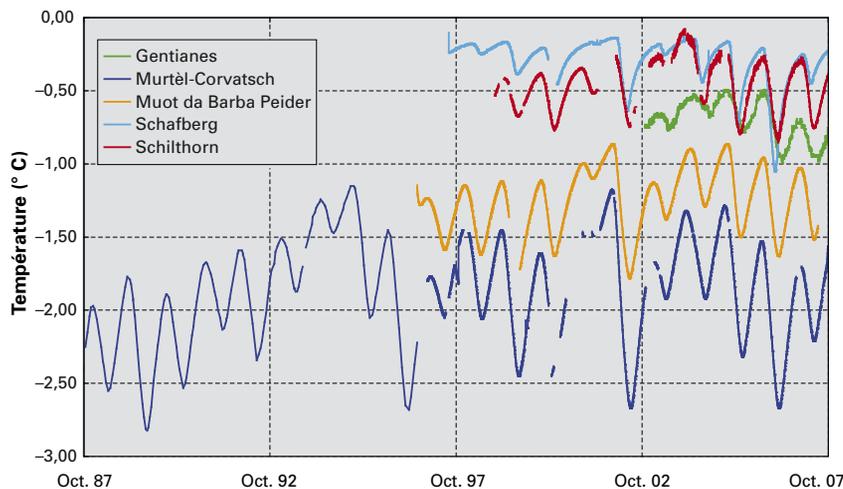
Le comportement saisonnier des températures du permafrost est observé à environ 10 mètres de profondeur et comparé entre différents lieux (fig. 8). Les variations de surface arrivent ici atténuées et décalées d'environ une demi-année. Les conditions météorologiques de 2006/2007 ont conduit, dans la plupart des forages, à des températures du permafrost semblables à celles des années précédentes en été, avec cependant des températures minimales nettement moins basses, en hiver, que lors de l'année précédente. L'influence de l'hiver pauvre en neige et doux de 2006/2007 se lit bien dans la série de mesures du glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch.

A plus grande profondeur encore, les températures se prêtent en premier lieu à l'observation des tendances à long terme. Des variations saisonnières sont seulement décelables au-dessus d'une profondeur de 15 à 20 mètres et sont complètement filtrées au-dessous. A ces profondeurs, la température ne réagit que lentement et de manière décalée aux changements en surface. Il faut ainsi plus de dix ans jusqu'à ce qu'un signal de surface ait atteint une profondeur de 100 mètres.

Mouvement des glaciers rocheux

Les glaciers rocheux se forment en zone de permafrost. Ils se composent d'une masse de débris colmatée de glace qui se déplace vers l'aval de quelques dizaines de centimètres par an. Depuis les années 1990, une accélération des vitesses de déformation de surface des glaciers rocheux a été constatée dans l'espace alpin par plusieurs études. Les premières

Fig. 8: Températures relevées à environ 10 mètres de profondeur dans six forages répartis dans les Alpes suisses.



Accès aux données

La plupart des résultats présentés ici ainsi que les séries de données à long terme sont préparés sous forme graphique et sont libres d'accès sur les pages de l'ENA (www.slf.ch), du réseau de mesure des glaciers suisses (www.gliaciology.ethz.ch/swiss-glaciers) et de PERMOS (www.permos.ch). En plus des rapports et communiqués de presse paraissant régulièrement, des informations et analyses complémentaires se trouvent également sur ces pages.²

estimations montrent aussi de tels changements pour la période examinée et pour le glacier rocheux de Murtèl-Corvatsch. Ceci signifie que les températures élevées des dernières décennies pourraient avoir atteint à environ 30 mètres de profondeur l'horizon de cisaillement où ont lieu les principales déformations du glacier rocheux.

Variations de la cryosphère

Les résultats de mesures issus des trois domaines de la cryosphère alpine dans les montagnes suisses aident à démontrer la complexité des processus et illustrent leur réaction en partie différente aux changements climatiques. La tempé-

Un lac où flottent quelques icebergs s'est formé ces dernières années à l'extrémité de la langue du glacier de Gauli.

rature de l'air hivernale est déterminante pour l'épaisseur et la durée de l'enneigement. Lorsqu'il n'y a que peu ou pas de neige, les températures de l'air influencent aussi les températures du sol proche de la surface. La fonte estivale des glaciers est avant tout conditionnée par l'ensoleillement et la température de l'air. Pour sa part, le développement temporel de la couverture neigeuse a des effets tout à fait différents sur les glaciers et le permafrost. Alors que pour les glaciers, c'est essentiellement la quantité de neige présente à la fin de l'hiver qui compte, les dates d'enneigement et de déneigement sont cruciales pour l'évolution du permafrost.

En résumé, on peut dresser le tableau suivant. Dans les zones situées au-dessus de 2000 mètres d'altitude, déterminantes pour les glaciers et le permafrost, les températures hivernales restent, en dépit du réchauffement, encore suffisamment froides pour qu'aucun changement net des conditions d'enneigement ne puisse être constaté. L'effet du réchauffement global se lit en revanche très bien dans la diminution des masses glaciaires observée depuis plus d'un siècle déjà. Les séries de mesures du permafrost sont encore trop courtes pour percevoir des résultats clairs d'un processus à long terme.

Le retrait marqué et continu des glaciers de ces dernières années rend la réalisation des mesures plus ardue. Quelques langues glaciaires se sont retirées

dans des terrains raides et inaccessibles. Dans d'autres cas, il devient très difficile de déceler l'extrémité du glacier sous une couverture de débris devenant de plus en plus épaisse. La couverture neigeuse et l'extension des glaciers n'ont pas seulement une importance pour l'exploitation touristique, mais aussi comme réserve d'eau. Le permafrost joue un rôle en particulier lors de constructions et pour la stabilité des zones rocheuses. Les trois éléments de la cryosphère alpine sont en lien avec les dangers naturels dans l'espace alpin suisse. ▀

Andreas Bauder (EPFZ), Christoph Marty (ENA) et Jeannette Nötzli (Uni de Zurich) (traduction et adaptation française : Reynald Delaloye, Uni de Fribourg)

² Les données d'enneigement sont relevées par l'ENA et MétéoSuisse dans le cadre de leurs tâches. L'observation des glaciers dans les Alpes suisses ne serait pas pensable sans le soutien actif et permanent de nombreux bénévoles. Un remerciement particulier est adressé à toutes les collaborations privées, aux employés des services forestiers dans les cantons de montagne, aux forces motrices de l'Ägina, de Mattmark et de Mauvoisin, ainsi qu'aux collaborateurs des offices fédéraux et de l'EPF de Zurich. Les mesures de l'observation du permafrost sont effectuées et mises à disposition par les Universités de Berne, Fribourg, Lausanne et Zurich, ainsi que par l'EPF de Zurich et l'ENA. Les réseaux d'observation de la cryosphère bénéficient du soutien financier de SCNAT, de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et de MétéoSuisse.



Photo: R. Straub