



Le 28 décembre 2015, le manteau neigeux était très mince, comme ici au Calanda (GR). Ce n'est qu'à partir de 2200 m qu'il était continu. Des domaines skiables connus tels que Grindelwald, Obergoms, Andermatt, Airolo et Sedrun n'étaient en grande partie pas enneigés. Photo: Matthias Huss

Neige, glaciers et pergélisol 2015/16

Rapport sur la cryosphère pour les Alpes suisses

Malgré la longue persistance du manteau neigeux en haute montagne, la chaleur de la fin de l'été a pesé lourd sur le bilan glaciaire: la perte de masse des glaciers correspond à la consommation annuelle d'eau potable en Suisse.

Texte: Matthias Huss, Andreas Bauder, Christoph Marty, Jeannette Nötzli

Figure 1
Ecart de la limite du zéro degré par rapport à la moyenne (2001-2016) entre octobre 2015 et septembre 2016. Les parties en rouge représentent des périodes plus chaudes que la moyenne, celles en bleu des périodes plus froides. La limite du zéro degré a été calculée sur la base des températures moyennes journalières de 11 stations automatiques de SLF et de MétéoSuisse (points rouges), en supposant une variation de la température de 0,6 °C par 100 m. Graphique: SLF

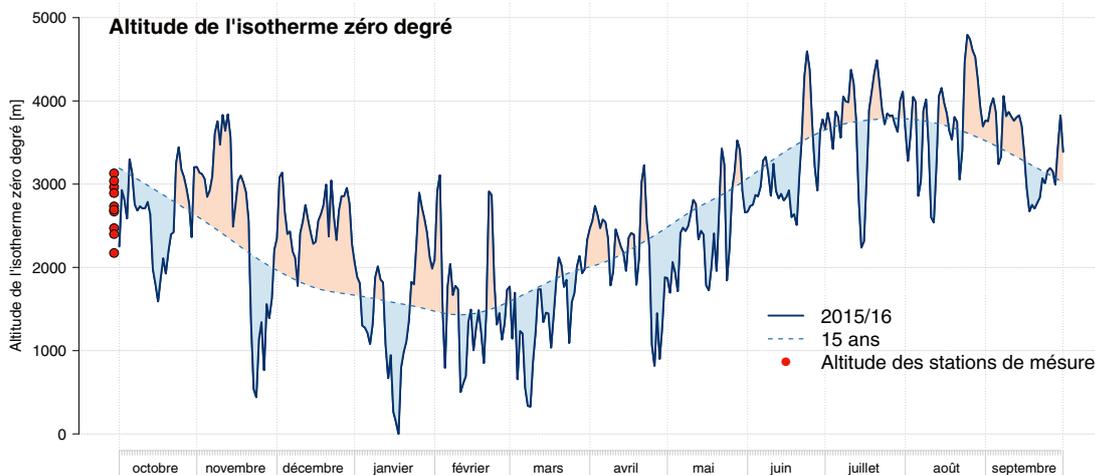
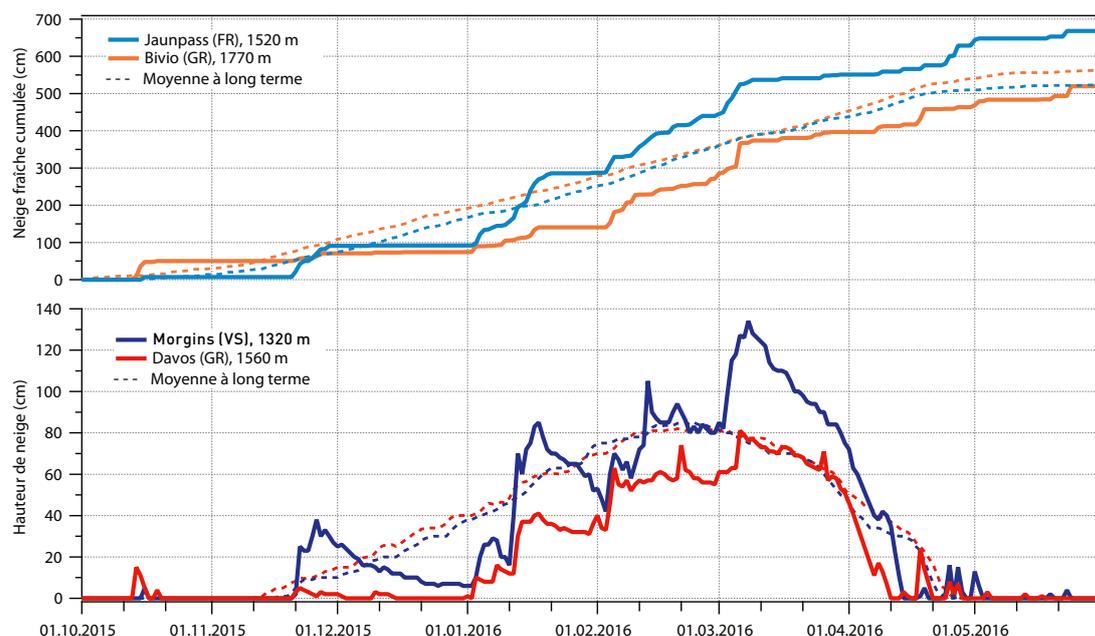


Figure 2
Evolution du cumul de neige fraîche (en haut) et de la hauteur de neige (en bas) en comparaison avec la moyenne pluriannuelle (lignes pointillées) dans deux stations en Suisse occidentale (bleu clair/bleu: Jaunpass et Morgins) et deux stations en Suisse orientale (orange/rouge: Bivio et Davos). Le graphique permet d'illustrer la différence d'évolution de la couverture neigeuse à l'est et à l'ouest au cours de l'hiver 2015/2016. Graphique: SLF



Météorologie et neige

Au début de la saison hivernale 2015/16, il n'y avait qu'une mince couche de neige sur les flancs orientés au nord. La quatrième semaine de novembre a été marquée par deux ébauches d'hiver au nord et à l'ouest du pays, mais le sud et l'est sont restés secs. Il en a résulté qu'au début décembre, le manteau neigeux avait une épaisseur à peu près conforme à la moyenne à l'ouest, mais le paysage était nu aux altitudes moyennes des Grisons et du sud des Alpes. Plus haut, il n'y avait que très peu de neige. Après l'absence quasi totale de précipitations et une chaleur record au mois de décembre (températures supérieures de 4 à 6 °C à la moyenne en montagne, fig. 1), la région sud-est des Alpes était dépourvue de neige jusqu'en haute altitude. Ce déficit d'enneigement au début de l'hiver a été encore plus marqué que lors de l'hiver précédent (2014/15). C'est en vain que l'on a espéré un Noël blanc pour l'hiver 2015/16. Certaines zones des montagnes grisonnes, par exemple Bivio, Davos ou St. Antonien, se présentaient même en habit de verdure à nouvel an, pour la première fois depuis

le début des observations. Cet état n'était pas dû qu'aux températures exceptionnellement élevées. La grande sécheresse y avait également contribué (fig. 2).

La neige n'est arrivée en montagne qu'au début de janvier. La Suisse romande a été clairement favorisée du point de vue du volume d'or blanc. Comme la couverture neigeuse avait été satisfaisante en novembre, la pénurie de décembre a eu moins d'importance. Dans les régions de l'ouest, le déficit a été comblé en janvier déjà par les généreuses chutes de neige. Dans le centre et l'est de la Suisse, le déficit ne s'est résorbé qu'en mars après de nombreux épisodes de pluie jusqu'aux plus hautes altitudes. Cette différence entre l'est et l'ouest s'est maintenue durant tout l'hiver (fig. 2). Au sud, il a fallu attendre mars pour que les flocons tombent en quantité. Au début mars, le flanc sud des Alpes a connu des chutes de neige record, atteignant 20 cm dans la plaine de Magadino et 60 cm au San Bernardino. Pourtant, le déficit neigeux n'a pas été comblé de tout l'hiver au Tessin. Sur le Plateau suisse, il n'y a eu qu'une courte période de températures de l'air inférieures au point de congélation avec un sol couvert de neige durant



Lac glaciaire d'un bleu profond sur le glacier de la Plaine Morte (BE) à la mi-août 2016. A cette période, le glacier était encore complètement recouvert de neige hivernale. Photo: Matthias Huss

plusieurs jours. Selon MétéoSuisse, il s'agit de la deuxième période la plus chaude de novembre à avril après celle de 2006/07, depuis le début des mesures en 1864.

Neige jusqu'en été en haute montagne

Le déroulement de l'hiver a été capricieux. Après une période de conditions printanières au début d'avril 2016, l'hiver est revenu au milieu du mois avec du froid et des flocons. En mai, les chutes de neige se sont poursuivies au nord et à l'est. L'épaisseur du manteau neigeux est ainsi restée stable au-dessus de 2500 m, ce qui est plutôt inhabituel pour ce mois. Aux altitudes inférieures, par contre, cette couche a nettement diminué. La couverture neigeuse hivernale a finalement disparu au début juillet en haute altitude. Le champ de mesures du Weissfluhjoch, à 2540 mètres au-dessus du niveau de la mer, était nu le 8 juillet. Cela correspond à peu près à l'époque habituelle de la fonte des neiges constatée ces 83 dernières années. Les régions d'altitudes moyennes et hautes n'ont été couvertes d'une mince couche de neige que durant quelques jours isolés. Par contre, les surfaces gla-

ciaires ont gardé pour la plupart une couverture neigeuse complète à la faveur de fréquentes précipitations.

Glaciers

Le bilan de masse de 20 glaciers et la modification de longueur de 94 langues glaciaires en Suisse ont fait l'objet de mesures de l'automne 2015 à celui de 2016. Le bilan de masse est évalué en mesurant, en différents points du glacier, les quantités de neige en avril ou mai, ainsi que la fonte durant l'été. La variation de longueur de la langue est quant à elle mesurée en fonction du changement de position du front glaciaire par rapport à l'année précédente. Les intempéries répétées avec chutes de neige au début de l'été ont maintenu un manteau neigeux suffisant à protéger les glaciers jusqu'au début de juillet, lorsqu'une première vague de chaleur est arrivée. Par la suite, le temps estival stable d'août à mi-septembre a favorisé une fonte massive et de nombreux glaciers



La langue du Länggletscher en 2009 (à gauche) et en 2016 (à droite). Dans la partie raide, le lien entre les deux parties du glacier a complètement disparu. Photos: AWN/GR, Bernhard Riedi

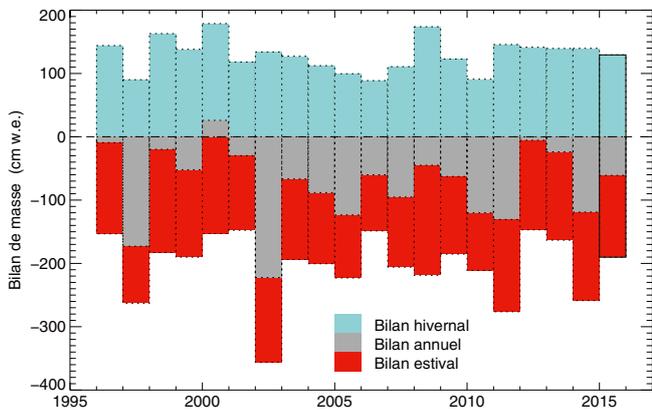


Figure 3
Evolution de l'enneigement (bilan hivernal), de la fonte pendant l'été (bilan estival) et du bilan annuel au cours des 20 dernières années. Les valeurs moyennes représentées sont celles des glaciers de l'Allalin (VS), de Basòdino (TI), de Findel (VS), de Giétroz (VS), de Gries (VS), du Rhône (VS) et de Silvretta (GR) avec de longues séries (équivalent en eau en centimètres).
Grafique: GLAMOS

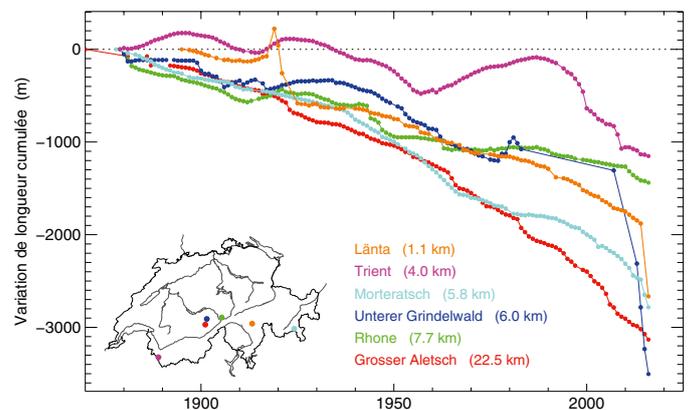


Figure 4
Variations annuelles cumulées (en mètres) de la longueur de certains glaciers du réseau de mesures présentant différents comportements d'adaptation au climat. Grafique: GLAMOS

ont été très largement découverts. Une fois de plus, il n'est resté que peu de neige hivernale.

Pertes de masse: grandes au sud, moindres à l'ouest

Durant la période de mesures sous revue, le bilan de gains par apport de neige et de pertes par fonte s'est avéré négatif pour tous les glaciers de Suisse examinés par le réseau suisse de mesure des glaciers GLAMOS. Les pertes les plus faibles ont été constatées dans les Alpes vaudoises et l'ouest des Alpes bernoises. Ainsi, le glacier de Tsanfleuron et celui de la Plaine Morte n'ont perdu que 30 cm d'épaisseur moyenne de glace. Les glaciers du sud ont été les plus touchés par la fonte. Le Griesgletscher voisin du col du Nufenen a perdu environ 1,5 mètre d'épaisseur de glace sur la moyenne de

toute sa surface. Les autres valeurs mesurées sur des glaciers de Suisse centrale et du Nord-Est ont révélé des pertes d'épaisseur variant de 50 centimètres à plus de 1 mètre (fig. 3). Ces différences s'expliquent principalement par la distribution variable des quantités de neige tombées en haute montagne durant l'hiver. En comparaison avec l'année précédente, les situations se sont inversées puisque les plus grandes pertes avaient été enregistrées à l'ouest alors que les glaciers situés au sud avaient été relativement épargnés.

La perte de masse des glaciers de Suisse se monte à 900 millions de mètres cubes, soit quelque 1,5% de leur masse totale. Cela correspond à la consommation annuelle d'eau potable en Suisse. En comparaison avec les pertes enregistrées au cours de la dernière décennie, celle de la période de mesures

Variation de la longueur (en m) des glaciers dans les Alpes suisses en 2015/16

Nom/Canton	Diff.	Nom/Canton	Diff.	Nom/Canton	Diff.	Nom/Canton	Diff.
Albigna/GR	x	Gauli/BE	n	Palü/GR	-16	Trift (Gadmen)/BE	-1
Allalin/VS	0	Gelten/BE	n	Paneyrosse/VD	-2	Tsanfleuron/VS	-14
Alpetli (Kanderfirn)/BE	n	Giétro/VS	-8	Paradies/GR	7	Tschierva/GR	-21
Ammerten/BE	-1	Glärnisch/GL	-11	Paradisino (Campo)/GR	x	Tschingel/BE	-2
Arolla (Mont Collon)/VS	-13	Gorner/VS	-61	Pizol/SG	0	Tseudet/VS	-2
Basòdino/TI	-10	Grand Désert/VS	-4	Plattalva/GL	-17	Tsidjiore Nouve/VS	-9
Biferten/GL	-9	Grand Plan Névé/VD	1	Porchabella/GR	-23	Turtmann/VS	-30
Blüemlisalp/BE	-18	Gries/VS	-23	Prapio/VD	-3	Unteraar/BE	n
Boveire/VS	-10	Griess/UR	-6	Punteglias/GR	-3	Unterer Grindelwald/BE	-270
Breney/VS	-27	Griessen/OW	-4	Rhone/VS	-18	Val Torta/TI	n
Bresciana/TI	-9 ²	Grosser Aletsch/VS	-59	Ried/VS	-40	Valleggia/TI	-9
Brunegg (Turtmann)/VS	-19	Hohlaub/VS	-13	Roseg/GR	-2	Valsorey/VS	-8
Brunni/UR	-1	Kaltwasser/VS	-26	Rossbode/VS	n	Verstankla/GR	-14
Calderas/GR	-7	Kehlen/UR	-10	Rotfirn (Nord)/UR	-20	Vorab/GR	-10
Cambrena/GR	-14	Lang/VS	17	Rätzli/BE	-6	Wallenbur/UR	-13
Cavagnoli/TI	-10	Lavaz/GR	0	Saleina/VS	-4	Zinal/VS	-8
Cheillon/VS	-7	Länta/GR	-787 ²	Sankt Anna/UR	-13		
Chessjen/VS	-3	Limmeren/GL	-3	Sardona/SG	-8		
Corbassière/VS	-37	Lischana/GR	1	Scaletta/GR	x		
Corno/TI	-4	Lämmeren/VS	-8	Schwarz/VS	n		
Crosolina/TI	-2	Mittelaletsch/VS	n	Schwarzberg/VS	-28		
Damma/UR	-37	Moiry/VS	-28	Seewjinen/VS	-7		
Dungel/BE	n	Moming/VS	-20	Sesvenna/GR	-14		
Eiger/BE	-1	Mont Durand/VS	-27	Sex Rouge/VD	3		
En Darrey/VS	x	Mont Fort (Tortin)/VS	-14	Silvretta/GR	-17		
Fee/VS	-20	Mont Miné/VS	-14	Stein/BE	-29		
Ferpècle/VS	-79	Morteratsch/GR	-135	Steinlimi/BE	-42		
Fiescher/VS	x	Mutt/VS	x	Sulz/GL	-6		
Findel/VS	-31	Oberaar/BE	n	Suretta/GR	0		
Firnalpeli (Ost)/OW	25 ²	Oberaletsch/VS	x	Tiatscha/GR	-22		
Forno/GR	28	Oberer Grindelwald/BE	-42	Tiefen/UR	-23		
Gamchi/BE	-6	Otemma/VS	-77	Trient/VS	-15		

Abréviations

n = non observé
s = langue glaciaire recouverte de neige
x = valeur non déterminée
y² = lorsque la valeur indiquée s'applique à une durée de plusieurs années, l'exposant indique le nombre d'années.
P. ex.: Länta -787² = recul de 787 m en deux ans.

2015/16 reste dans la moyenne, mais l'été 2016 s'est inscrit comme une nouvelle période calamiteuse pour les glaciers suisses. Ces derniers ont subi d'énormes pertes au cours des années extrêmes 2003, 2006, 2011 et 2015.

Certaines langues glaciaires se détachent

A la différence du bilan de masse, les mesures de changement de longueur de la langue glaciaire révèlent la réaction des glaciers à l'évolution à long terme des conditions climatiques. L'influence de celles-ci sur la langue se manifeste avec plus ou moins de retard selon la taille du glacier. Durant la période de mesures 2015/16, la longueur de 82 glaciers a diminué, alors que l'extrémité de la langue de 7 autres ne s'est pas déplacée et que 5 autres glaciers se sont allongés (fig. 4). Trois exceptions mises à part, les valeurs (voir le tableau) vont d'un retrait du front de la langue de 79 mètres au glacier de Ferpècle/VS à une progression de 28 mètres au Vadret del Forno/GR. Les exceptions concernent le Läntagletscher/GR, l'Unterer Grindelwaldgletscher/BE et le Vadret da Morteratsch/GR. Leurs retraits exceptionnellement grands sont la conséquence d'une longue évolution caractérisée par un recul important durant de nombreuses années. L'amincissement

Réseaux de mesure de la cryosphère en Suisse

L'observation de la cryosphère englobe la neige, les glaciers et le pergélisol (www.cryosphere.swiss). La Commission d'Experts pour la Cryosphère (EKK) coordonne les observations. Les mesures concernant la neige sont réalisées par l'Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse et par l'Institut suisse pour l'étude de la neige et des avalanches WSL. Elles englobent quelque 150 stations de mesure (www.slf.ch). Les mesures réalisées sur environ 120 glaciers dans le cadre du réseau suisse de mesure des glaciers (GLAMOS) sont relevées par diverses institutions (hautes écoles, offices forestiers cantonaux, sociétés productrices ou distributrices d'énergie et personnes individuelles, www.glamos.ch). Le réseau suisse du pergélisol PERMOS, géré par plusieurs hautes écoles et par le SLF, comprend 28 sites équipés de dispositifs de mesure de température et de géoélectricité et/ou de mouvements (www.permos.ch).



Éboulement (10 000–15 000 m³) du 8 septembre 2016 à la Fenêtre de Saleina (3350 m, Val Ferret/VS).
Photo: Reynald Delaloye/Raphaël Mayoraz

progressif du Länggletscher est dû à l'absence d'une alimentation en glace provenant du glacier principal. Au cours des dernières années, la fonte du glacier dans la forte pente dominant la langue n'en a laissé qu'une bande étroite. La liaison entre ce résidu et la langue s'est finalement rompue à la fin de l'été 2015, et l'extrémité active du glacier solidaire s'est soudain retirée à une grande distance vers l'arrière. L'évolution a été comparable pour les langues planes de l'Unterer Grindelwaldgletscher et du Vadret da Morteratsch.

L'absence d'alimentation en glace ainsi que l'amoncellement de débris rocheux couvrant la langue glaciaire ont entraîné une fonte irrégulière: la masse de glace s'est alors progressivement disloquée. Pour cette raison, de grandes portions de ces deux glaciers se sont séparées au cours des dernières années. Le calendrier des grands changements de position des langues glaciaires est plutôt aléatoire. Les rares valeurs positives ne sont pas le résultat de l'avance d'un glacier causée par davantage d'apport de glace par l'arrière. Elles s'expliquent par les événements et conditions de l'endroit dans l'année considérée, comme l'accumulation de neige ancienne ou l'augmentation de la couverture de débris rocheux.

Pergélisol

Après l'été torride de 2015, les températures à la surface du sol étaient plus hautes que lors des dix années précédentes dans la plupart des zones mesurées. Elles ont toutefois retrouvé des valeurs nettement plus basses à la fin de 2016. L'enneigement tardif du début de l'hiver 2015, si décevant pour les skieurs, a été favorable au pergélisol. Dépourvu d'un manteau neigeux isolant, le sol peut perdre plus facilement de la chaleur et se refroidir en surface. Le dénudement tardif attribuable au début d'été humide et froid a aussi été favorable au pergélisol, du fait que le sol était protégé des hautes températures de l'air par le manteau neigeux qui le couvrait. Dans l'ensemble, la température annuelle moyenne à la surface du sol a été comparable à la moyenne des 15 dernières années et inférieure d'environ 1 °C à celle de 2015. On constate ici aussi de notables différences régionales correspondant à la distribution de la neige: le refroidissement hivernal s'est montré particulièrement efficace et les températures à la surface du sol sont restées au-dessous de la moyenne dans les régions les plus sèches de l'En-

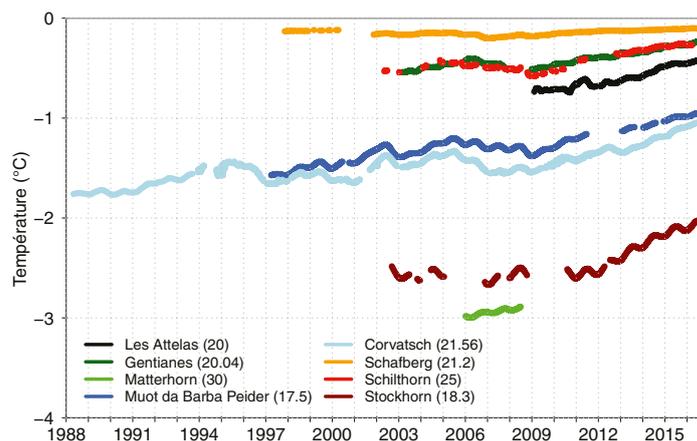
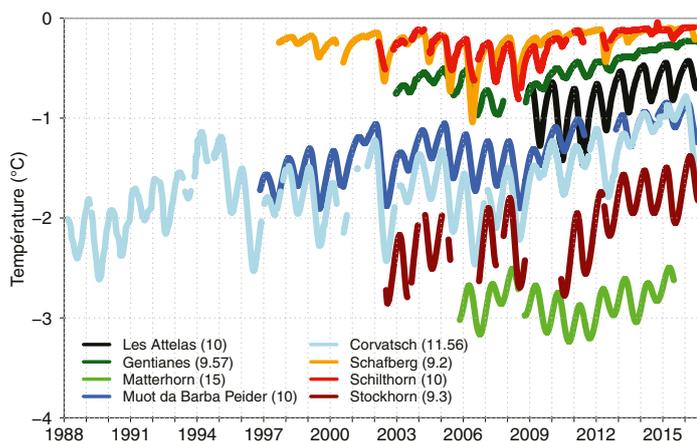


Figure 5

Evolution des températures dans différents forages effectués dans le permafrost dans les Alpes suisses, à une profondeur d'environ 10 mètres à gauche et 20 mètres à droite. La profondeur exacte à laquelle a eu lieu la mesure est chaque fois indiquée entre parenthèses, en fonction de l'installation. La tendance au réchauffement du permafrost est clairement visible ces dernières années. Graphique: PERMOS

gadine et au sud des Alpes. Par contre, les températures à la surface du sol sont restées trop élevées dans le sud-ouest du Valais où les chutes de neige ont été relativement précoces et moyennement abondantes. Les parois rocheuses escarpées, sur lesquelles la neige ne tient pas, sont restées nettement trop chaudes car leur température s'équilibre assez directement avec celle de l'air.

Nouveaux records de température dans le sous-sol

Comme ces dernières années, on a mesuré des températures en hausse dans les forages à des profondeurs de 10-20 mètres sur 16 sites des Alpes suisses. Des valeurs jamais atteintes par les mesures réalisées au cours de campagnes portant sur 10 à 25 ans ont été relevées (fig. 5). A ces profondeurs, les températures réagissent avec retard et reflètent avec un fort amortissement les variations des températures à la surface du sol. Ainsi, les changements observés dans les températures du pergélisol ne reflètent pas le résultat d'une seule campagne de mesure; ils sont influencés par l'évolution des années et décennies précédentes, comme les changements de longueur des langues glaciaires (alors que cette «fonction mémorielle» manque largement dans le cas de la neige).

Le réchauffement est particulièrement marqué dans ce que l'on nomme le «pergélisol froid». Par exemple au sommet du Stockhorn (3400 m) près de Zermatt/VS, où la température à 20 mètres de profondeur est passée de $-2,6^{\circ}\text{C}$ en octobre 2011 à $-2,0^{\circ}\text{C}$ en octobre 2016. Dans la même période, le sous-sol du flanc nord de la Pointe des Lapires (2500 m) près de Nendaz/VS ne s'est réchauffé que de $-0,15$ à $-0,08^{\circ}\text{C}$. Cela s'explique par le fait que la proportion d'eau dans le pergélisol augmente lorsque la température monte jusqu'à avoisiner 0°C (on parle alors de «pergélisol chaud»). L'énergie nécessaire au changement de phase de la glace en eau n'est alors pas disponible pour une augmentation de température.

Les glaciers rocheux s'écoulent plus rapidement

Les très grandes vitesses de déplacement des glaciers rocheux témoignent aussi de conditions très chaudes dans le sous-sol pour la période de mesures 2015/16. Les glaciers rocheux sont des éléments de paysage constitués de blocs de roche grossiers comprenant une proportion élevée de glace se déplaçant vers l'aval. La rapidité de ces déformations augmente avec la température de la glace. En 2016, les déplacements ont diminué de 10-20% par rapport à celles de l'année record 2015. Pourtant, la plupart des glaciers rocheux s'écoulent à un rythme plusieurs fois supérieur à celui qu'ils avaient il y a 20 ans, soit à des vitesses de plusieurs mètres par année.

Moins d'éboulements que durant l'été 2015

Durant l'été 2016, on a observé nettement moins d'effondrements rocheux que durant les étés caniculaires de 2003 et 2015. Quelques effondrements d'importance faible à moyenne se sont produits entre le 8 septembre et le début d'octobre à partir de couches superficielles, par exemple à la Fenêtre de Saleina/VS. Outre la chaleur inhabituelle de cet automne, le moment de l'année peut aussi jouer un rôle: c'est en septembre et octobre que la couche de dégel au-dessus du pergélisol atteint son épaisseur maximale. Réchauffées, les roches perdent alors leur «ciment» de glace.

Les extrêmes mesurés et les tendances au réchauffement du pergélisol dans les Alpes suisses sont le résultat de conditions durablement plus chaudes en surface durant les dernières années et décennies. En 2000, l'augmentation des températures mesurées depuis le début des observations dans le réseau PERMOS est nettement plus prononcée en profondeur qu'à la surface du sol. Ainsi, le pergélisol est encore trop froid en rapport avec les conditions climatiques actuelles.