

Les glaciers des Alpes suisses en 1996/1997

■ Science et montagne
 ■ Scienza e mondo alpino
 ■ Wissenschaft und Bergwelt

M. Hoelzle et D. Vonder Mühl¹, A. Bauder et G. H. Gudmundsson²

30

Extrait du 118^e rapport de la Commission glaciologique de l'Académie suisse des sciences naturelles (CG/ASSN) et des Laboratoires d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (VAW/EPFZ)

Introduction

But des observations actuelles sur les glaciers

Il y a plus d'un siècle, lorsque F.-A. Forel organisait l'observation des glaciers et la coordonnait tant sur le plan international que national, le principal but visé par ce savant suisse était l'explication des variations de leur longueur et de leur volume (Forel 1895). Grâce aux recherches poussées et aux observations glaciologiques détaillées réalisées jusqu'à présent, nos connaissances sur les glaciers se sont considérablement développées. Qu'en est-il aujourd'hui des buts poursuivis par leur étude? Il est nécessaire de se poser fréquemment cette question, surtout lors de séries d'observations de longue durée. On peut y répondre de la manière suivante:

- amélioration continue de la compréhension des processus glaciaires;
- validation de modèles mathématiques (de modèles climatologiques régionaux, par exemple);
- analyse de la fonction d'indicateur climatologique (estimation des vitesses d'évolution et des flux d'énergie incriminés, de la variabilité naturelle et des tendances éventuelles à l'accélération des évolutions);
- appréciation des conséquences directes et indirectes des variations glaciaires sur l'environnement (situations dangereuses créées par les glaciers, élévation du niveau des mers, par exemple).

Influence des variations des glaciers sur le niveau des mers

D'après les études les plus récentes, les glaciers des massifs montagneux ont contribué à l'élévation générale du niveau moyen des mers entre 1961 et 1990, par une lame d'eau annuelle estimée à 0,25 mm +/- 0,10 mm (Dyurgerov et Meier 1997). Quant aux estimations pour le Groenland et la période de 1865 à 1990, elles se montent à une contribution de 0,3 mm environ par an (Zuo et Oerlemans 1997). Cela signifie donc que ces glaciers de type alpin et le Groenland sont, ensemble, responsables pour un tiers environ de cette hausse pendant ces cent dernières années. Durant les périodes de fusion particulièrement active, la perte de masse

des glaciers de montagne, donnant une lame d'eau annuelle estimée à 0,9 mm environ, a contribué grosso modo pour moitié à l'élévation générale du niveau de la mer. Depuis le milieu des années quatre-vingt et, surtout, depuis la fin de cette même décennie, l'apport des glaciers à cette évolution a augmenté à nouveau. Toutefois, l'influence des gigantesques ensembles glaciaires de l'Alaska et de la Patagonie est de première importance sur les variations du niveau des océans. En revanche, celle des glaciers des Alpes est réduite à la portion convenue. En effet, si ceux-ci, dont le volume était estimé à 130 km³ dans les années septante, disparaissaient totalement par fusion, ils ne provoqueraient qu'une hausse de 0,35 mm du niveau de la mer (Haerberli et Hoelzle 1995). Néanmoins, si modestes soient-elles, les réserves de glace qu'abritent les massifs montagneux jouent un rôle non négligeable, car elles constituent de considérables accumulations d'eau douce influençant notablement le cycle de l'eau. Elles sont souvent les uniques sources de ce précieux liquide pour certaines contrées arides.

A l'opposé des glaciers de montagne, les puissantes carapaces de glace recouvrant le Groenland et l'Antarctique exercent à l'évidence une influence majeure sur le niveau des océans, car elles constituent la presque totalité des masses glaciaires de la planète. Grâce aux modèles climatologiques actuels, il est possible, par le calcul et selon divers scénarios, d'estimer les futures variations de masse de ces inlandsis. La conclusion d'une étude récente (Ohmura et al. 1996) montre que ces deux calottes glaciaires réagiraient très différemment à un doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère. Tandis qu'il faudrait compter avec une perte annuelle de masse de 390 km³ (équivalent en eau) de celle du Groenland, les glaces de l'Antarctique subiraient une augmentation de volume de 325 km³ par an. Cela signifie que les variations de masse prévues pour ces deux carapaces glaciaires se compenseraient à peu près, d'où l'on peut conclure qu'à l'avenir également, l'expansion thermique des océans et la perte de masse des glaciers de type alpin resteraient les principales causes de la hausse du niveau moyen des mers.

Les glaciers, indicateurs des variations du climat

Les glaciers se rangent parmi les indicateurs climatiques les plus fiables et les plus faciles à interpréter. En outre, on en trouve dans la plupart des régions montagneuses du globe, ce qui permet à la Commission internationale sur le changement climatique (Intergovernmental Panel on Climatic Change, IPCC) de les qualifier dans son rapport d'«indicateurs trois étoiles» (IPCC 1995), en raison de leur effet maximal de signalisation. Même dans

¹ M. Hoelzle, D. Vonder Mühl: Commission glaciologique de l'ASSN et des Laboratoires d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (VAW/EPFZ)

² A. Bauder, G. H. Gudmundsson: Laboratoires d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich

les massifs tropicaux d'Afrique (Kenya) et d'Amérique du Sud (Bolivie), on établit des bilans de masse dans le cadre du réseau mondial d'observation des glaciers. Ces données collectées dans le monde entier sont analysées par le «World Glacier Monitoring Service» (WGMS, siège à Zurich) dans le cadre d'un projet commun avec l'Université et l'EPF de Zurich. En y intégrant ses propres données, le réseau suisse de mesure apporte sa contribution à ce système international d'observation des glaciers de type alpin. A l'avenir, il sera toujours plus important d'étudier leurs variations non pas en vase clos mais au contraire en tant que partie inhérente de l'ensemble de la cryosphère; ces recherches inter- et transdisciplinaires concernant des ensembles isolés (la cryosphère, par exemple) gagneront constamment en valeur. En outre, il faut faire sauter le carcan des limites traditionnelles des diverses disciplines scientifiques, afin de s'attaquer aux questions essentielles du futur, comme la rapidité des modifications d'un système climatique ou les tendances éventuelles à l'accélération de son évolution. Les répercussions des mouvements des glaciers peuvent, entre autres choses, induire une variation marquée des dangers naturels potentiels qu'ils génèrent, dans le sens d'une augmentation ou d'une diminution, selon les circonstances locales.

Conditions météorologiques et climatiques

Résumé de l'année hydrologique 1996/97

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), l'année 1997 est, au plan mondial, la plus chaude jamais enregistrée dans les annales. Depuis 1979, on a mesuré des excédents thermiques pour chaque période annuelle. En Suisse, 1997 se range parmi les quatre années les plus chaudes de ce siècle.

L'année hydrologique (octobre 1996 à septembre 1997) a débuté par un temps humide et sombre. D'abondantes chutes de neige se sont produites en montagne durant la seconde moitié de novembre déjà, tandis que le thermomètre chutait jusqu'à des températures sibériennes pendant les fêtes de fin d'année. Par la suite, douceur et soleil ont persisté jusqu'en mai, à l'exception du mois de février. Temps changeant et frais en juin et juillet, à tel point que l'été ne s'est donné qu'en août et septembre. Toutefois cette période de beau temps a été interrompue par de violentes intempéries sur les régions du lac Noir et de Sachseln.



Photo: Andreas Wipf

L'évolution du glacier de Valsorey est observée depuis 1889. C'est l'un des glaciers du groupe observé

situé le plus au sud. Il a perdu près de 800 m sur sa longueur initiale (env. 4,5 km)

Série d'illustrations a-h
Etat du glacier de Hüfi
à différentes dates

a) 1961



c) 1968



d) 1973



e) 1983





b) 1964

h) 1997



g) 1988



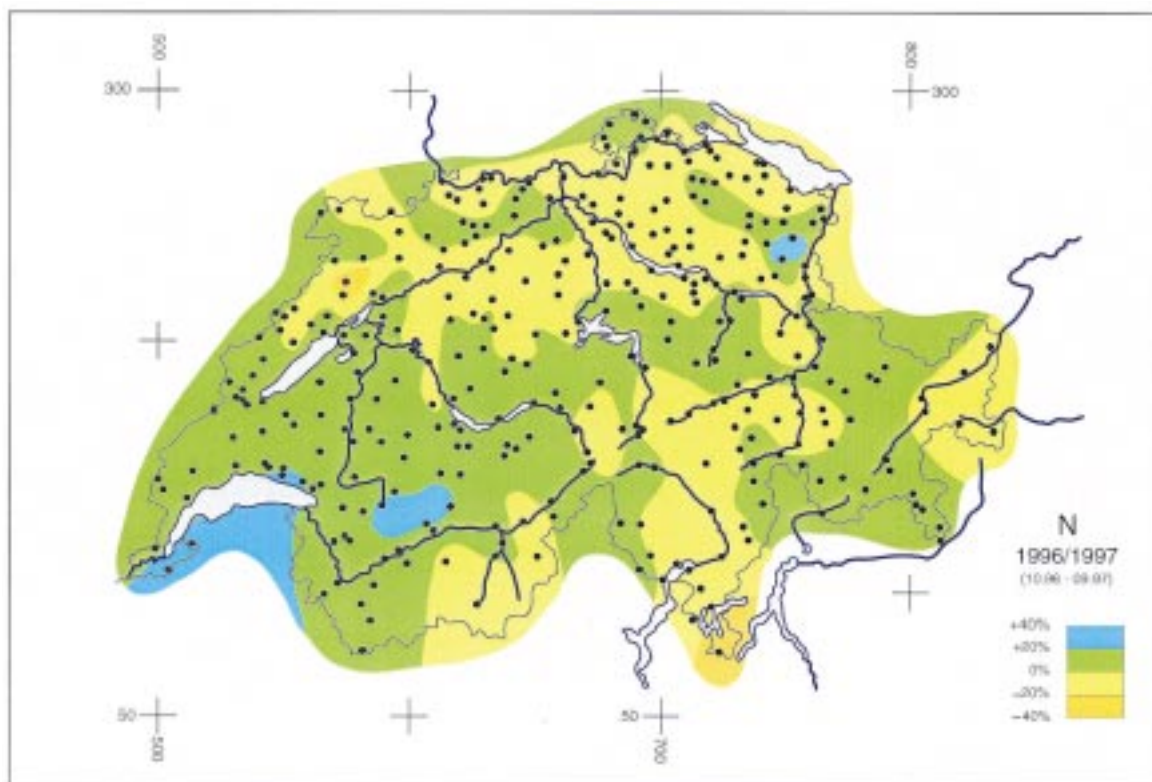
Photos: Ouvrages paravalanches et améliorations fondrières du canton d'Uri



f) 1984

Figure 1a et 1b
Précipitations annuelles 1996/97 et températures estivales 1997: écarts par rapport aux valeurs normales 1901-1960
 (Source: ISM, Zurich)

1a
Précipitations annuelles 1996/97 (sommées 1.10.96-30.9.97): écarts en pour cent



Titres des bulletins météorologiques de l'ISM d'octobre 1996 à septembre 1997

1996	
Octobre	Temps très perturbé, assez doux, mais surtout très nuageux et humide
Novembre	Sombre et très arrosé; grosses chutes de neige en montagne
Décembre	Hiver glacial entre Noël et Nouvel-An
Année	La plus froide depuis longtemps pour de nombreuses régions
1997	
Janvier	Presque cent fois plus de soleil au Corvatsch qu'à Neuchâtel
Février	Ensoleillé et très doux, nombreuses précipitations au nord des Alpes
Mars	La grande douceur continue. Sécheresse au nord
Avril	Très ensoleillé. Nombreux gels printaniers au nord et feux de forêt au sud
Mai	Les perturbations reviennent. Soleil et peu de pluie à la fin du mois
Juin	Augmentation de l'activité cyclonique. Temps frais en général, humide au sud
Juillet	Quelques brefs épisodes estivaux seulement
Août	Plein été. Intempéries au lac Noir et à Sachseln
Septembre	Temps excellent pour les excursions
Année	Inhabituellement chaude, très ensoleillée et assez sèche en général

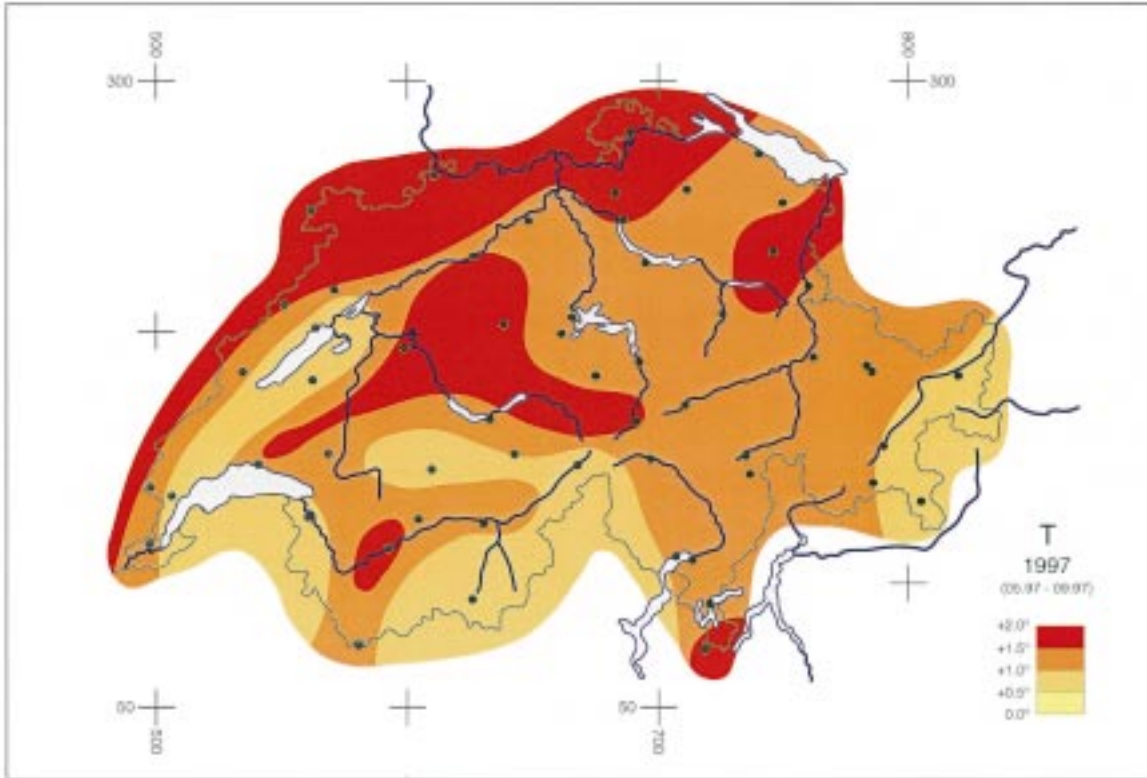
Source: ISM

Température

La plupart des moyennes mensuelles sont trop élevées, particulièrement celles de novembre, février, mars, août et septembre. Seuls janvier, avril et juillet s'avèrent un peu trop frais. Le printemps et l'automne ont ainsi le plus fortement contribué à l'excédent thermique annuel. Ainsi que le montre la figure 1b, l'été (mai à septembre) s'est révélé jusqu'à 2°C trop chaud sur toutes les régions de la Suisse. En montagne, cet excès s'est limité entre 0,5° et 1,0°C.

Précipitations

Comparé aux moyennes calculées sur de nombreuses années, 1997 affiche un déficit pluviométrique compris entre 10 et 20%. Il s'avère également que les épisodes isolés de fortes précipitations et les périodes prolongées de sécheresse n'influencent guère les lames d'eau annuelles, car ils se sont plus ou moins compensés. Cette constatation est surtout valable pour le Tessin: au cours de l'année hydrologique, les déficits des autres mois se sont presque annulés par les fortes pluies d'octobre et de novembre. Juin et juillet ont aussi été trop humides, ainsi que décembre et février dans certaines régions. Le manque de précipitations s'est particulièrement fait sentir partout en janvier et en août, ainsi qu'en février et en mars pour le sud des Alpes. Selon la figure 1a, l'année hydrologique 1996/97 s'approche de la moyenne pluriannuelle, les écarts ne dépassant 20% que par endroits.



1b
Températures estivales
1997 (température
moyenne de l'air
1.5-30.9.97): écarts en
degrés Celsius

Ensoleillement

A l'exception de deux mois successifs de mauvais temps, juin et juillet, la durée d'ensoleillement s'est toujours révélée supérieure à la norme, ce qui donne pour l'année entière un excédent allant jusqu'à 20%.

Bilan de masse

Dans le cadre des observations des glaciers, on a poursuivi les mesures annuelles du bilan de masse de trois d'entre eux, ceux de la Silvretta, de Gries et d'Aletsch. Ce paramètre constitue un précieux indicateur climatique car, au contraire de la variation de longueur, il réagit sans délai aux influences météorologiques annuelles (pluviosité et température surtout). L'interprétation des mesures de cet exercice effectuées sur les glaciers de la Silvretta, de Gries et d'Aletsch livre les résultats suivants (cf. fig. 2 également):

- au glacier de la Silvretta, on a mis en évidence jusqu'à mi-septembre un considérable gain de masse, probablement quelque peu amoindri par la fusion de la glace consécutive aux chaudes journées de septembre et d'octobre. Néanmoins, son bilan de masse est nettement positif avec + 540 mm;

- quant au faible accroissement de masse que présentait encore le glacier de Gries au début de septembre, il a disparu à la fin de l'année hydrologique (fin du même mois) et le bilan final s'avère négatif avec -270 mm;



Figure 2
Variations annuelles cumu-
lées (en m) des bilans de
masse des glaciers d'Aletsch,
de Gries et de la Silvretta

- le bilan de masse du bassin de réception des glaciers d'Aletsch (grand glacier, Aletsch supérieur et moyen) est déterminé par la méthode hydrologique. A l'opposé de 1995/96, il s'avère légèrement positif (+ 149 mm);

- les bilans positifs des glaciers de la Silvretta et d'Aletsch s'expliquent par le temps généralement assez frais et pluvieux de juin et de juillet 1997, mois habituellement importants du point de vue de la fonte, ceci en dépit des moyennes annuelles de température trop élevées et de pluviosité trop basses.

En résumé, on peut qualifier l'année 1996/97 d'exercice assez équilibré.

Variations de longueur

Persistance du retrait

Grâce aux conditions météorologiques favorables de l'automne 1997, on a déterminé la variation de longueur de 102 langues glaciaires, nombre rarement atteint au cours des exercices précédents. Les analyses mettent en évidence un retrait pour 86 glaciers et une progression pour 6 seulement. Les 10 autres glaciers sont restés stationnaires (fig. 3). Durant l'année dernière, on a relevé un recul maximum de 108 mètres au glacier de Tsidjiore Nouve, au-dessus d'Arolla (VS), tandis que celui de Bella Tola, tout proche (VS, à 30 km d'Arolla), subissait une avance de 26 mètres. La décrue persistante observée depuis le début des années quatre-vingt s'est donc également poursuivie pendant cet exercice. Etant donné que les langues glaciaires ne réagissent aux variations du climat qu'avec un certain retard, parfois prononcé, cette constatation ne surprendra donc pas. En effet, la réaction d'un glacier aux variables climatiques dépend fortement de sa forme géométrique, en particulier de sa longueur et de sa déclivité.

Figure 3
Variations de la longueur des glaciers des Alpes suisses en 1996/97



Meilleure comparaison grâce au classement selon la longueur

Un classement des glaciers selon leur longueur (figures 4a à 4d) permet de mieux expliquer et visualiser les relations évoquées tout à l'heure. En effet, il met en évidence que c'est la longueur de l'appareil glaciaire qui influence en premier lieu ses phases d'avance et de retrait. Les grands glaciers, tels que ceux d'Aletsch, d'Unteraar, du Gorner ou de Fiesch, ne subissent jamais de variations à court terme; au contraire, ils se retirent sans interruption depuis le milieu du siècle dernier. En revanche, les figures 4a à 4d permettent de déduire que les petits glaciers (fig. 4a) réagissent aux variations du climat en quelques années seulement, tandis que les temps de réaction de ceux de moyenne importance ou pentus (fig. 4b et 4c) sont de l'ordre de la décennie, et ceux des grands glaciers (fig. 4d) se montent à un

Photo: Martin Lüthi



Forage au moyen d'eau bouillante sur le glacier d'Unteraar

Photo: Hilmar Gudmundsson



siècle ou plus. C'est pourquoi il ne faut comparer de manière directe que des appareils glaciaires de forme semblable (longueur et pente); ainsi, les variations de longueur des glaciers d'Aletsch, du Pizol ou de Ferpècle reflètent non seulement des modifications du climat de fréquence et d'amplitude différentes, mais aussi des incidents climatiques plus ou moins anciens.

Relations entre variations de longueur et bilans de masse

Grâce à des paramétrisations adéquates et en considérant leurs conditions d'équilibre, il est aujourd'hui possible d'établir des relations entre les variations de longueur des glaciers et leurs bilans de masse (Johannesson 1989, pour des périodes de plusieurs décennies – ce délai ou son multiple étant nécessaire aux glaciers pour réagir). Dans cette optique, il convient donc de déterminer le temps d'adaptation de chaque glacier. C'est pourquoi l'on a estimé, pour 68 d'entre eux, leur perte annuelle moyenne de masse à partir des mesures de leur longueur, puis on les a répartis entre les quatre classes évoquées tout à l'heure. De ces estimations, on a conclu que, depuis le milieu du siècle dernier, les glaciers ont perdu en moyenne 0,12 à 0,24 mm d'équivalent en eau par année (cf. tab. 1), les grands ayant tendance à diminuer plus rapidement que les petits (Peschke 1998). Ces résultats sont, en outre, confirmés de manière tout à fait indépendante par les recherches de Maisch et al. (1998), effectuées dans le cadre du programme national de recherche No 31 (modifications climatiques et catastrophes naturelles). La comparaison avec les glaciers dont on détermine directement le bilan de masse au moyen de mesures est particulièrement intéressante, car elle révèle une excellente corres-

pondance (tab. 2). De même, celle faite avec quelques glaciers alpins dont on calcule, depuis la fin du siècle dernier, les variations de volume par des mesures photogrammétriques très précises corrobore ces conclusions (Haeberli 1998).

Remerciements

Pour l'exécution des relevés de sa 118^e campagne de mesures, la Commission glaciologique de l'ASSN a bénéficié d'un soutien actif qui lui est régulièrement apporté depuis fort longtemps. Elle en est extrêmement reconnaissante et ses remerciements s'adressent à tous les collaborateurs directs et indirects des services forestiers des cantons alpins, des sociétés de forces motrices d'Aegina, de Mattmark, de Mauvoisin et de l'Oberhasli, du bureau de géomètres Flotron, de l'Office fédéral de topographie, de la Direction générale des mensurations cadastrales, de l'Institut suisse de météorologie, du Service hydrologique et géologique national, de l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, des Instituts de géographie de l'EPFZ et de l'Université de Zurich, de la section de glaciologie et de la direction des VAW/EPFZ, et tout particulièrement à toutes les personnes effectuant à titre privé des relevés sur le terrain ou des travaux de traitement des données ou de rédaction.



Photo: Martin Lüthi

Station de référence GPS, à proximité de la cabane de Lauteraar



Le glacier d'Unteraar: prise de vue en direction du point de confluence des glaciers de Lauteraar et de Finsteraar

Tableau 1
Bilan de masse moyen sur la période de 1850 à 1996 pour 68 glaciers suisses, classés selon leur longueur

Classes de longueur (en km)	Bilan moyen de masse pour la période d'observation de 1850 à 1996 (en m d'équivalent en eau par année)
< 1	-0,11
1 - 4,9	-0,17
5 - 9,9	-0,20
> 10	-0,24
moyenne	-0,17

Complément: Recherches glaciologiques sur le glacier d'Unteraar

Centre d'intérêt au XIX^e siècle déjà

Le glacier d'Unteraar se range parmi les appareils glaciaires les mieux étudiés des Alpes, car il a éveillé l'intérêt des naturalistes au cours des siècles précédents déjà. Il est donc étroitement lié au développement historique d'importantes notions de glaciologie et à leurs auteurs. C'est ce que rappellent, par exemple, les noms de plusieurs sommets et lieux environnants: l'Agassizhorn, l'Escherhorn, le Grunerhorn, le Hugisattel, le Scheuchzerhorn et le Studerhorn.

Au XIX^e siècle, Franz Joseph Hugi (1793–1855) a passé plusieurs étés au glacier d'Unteraar et a publié ses premières observations sur ses variations (Hugi 1830, Hugi 1842). Mais c'est Louis Agassiz (1807–1873) qui a inauguré le début de l'activité scientifique expérimentale moderne sur ce glacier. Dans le cadre de ces travaux, J. Wild a dressé la première carte topographique d'un glacier selon des

Tableau 2
Comparaison entre les bilans moyens de masse mesurés directement et ceux calculés à partir des variations de longueur pour les glaciers suisses dont on détermine annuellement ce paramètre

Glacier	Période	Bilan moyen de masse ¹	Remarques
Gries	1962–1996	-0,27	Série de mesures (méthode glaciologique)
	1962–1996	-0,22	Calcul à partir des variations de longueur
Silvretta	1960–1996	-0,05	Série de mesures (méthode glaciologique)
	1960–1996	-0,02	Calcul à partir des variations de longueur
Grand glacier d'Aletsch	1920–1996	-0,22	Série de mesures (méthode hydrologique)
	1920–1996	-0,22	Calcul à partir des variations de longueur

¹ En m d'équivalent en eau par année

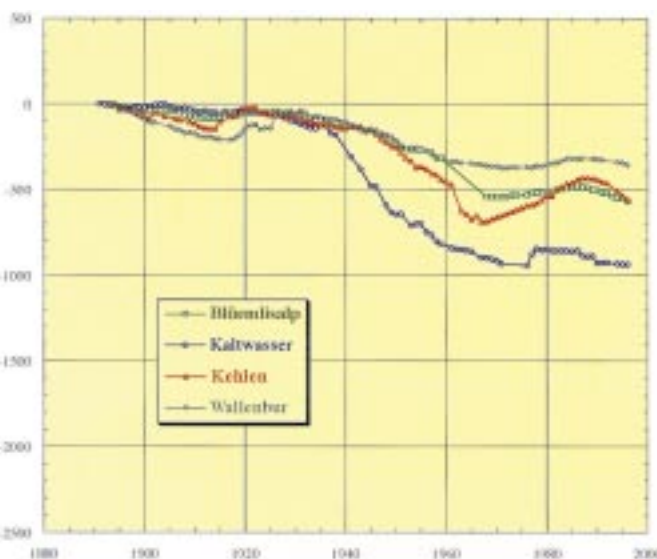
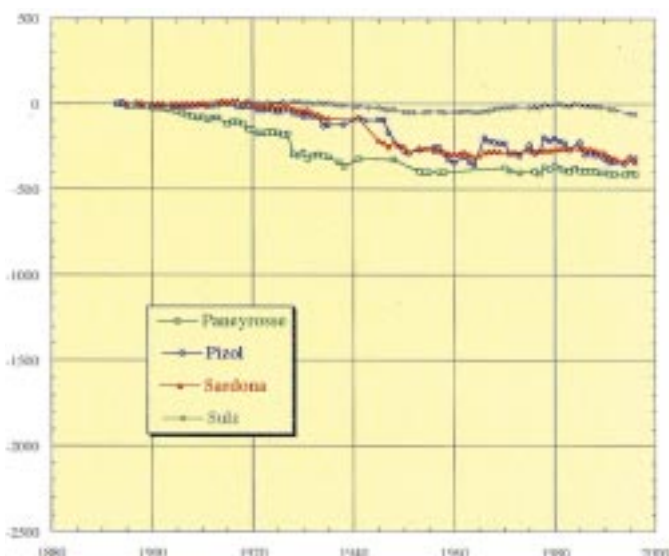
principes scientifiques. Pourtant cette représentation graphique exacte du glacier d'Unteraar au 1:10 000 ne comporte encore aucune courbe de niveau (Agassiz 1847). En plus de la mesure de variables météorologiques telles que température, humidité de l'air et pression atmosphérique, Agassiz et ses collaborateurs se sont attelés au relevé précis des mouvements de la surface du glacier. Ils ont mis au point des méthodes qui restent valables aujourd'hui, telles que la mesure au théodolite de la position de jalons fichés dans la glace.

Etudes détaillées du XX^e siècle

La recherche sur le glacier d'Unteraar s'est poursuivie activement durant ce siècle. A la suite d'un mandat des Forces motrices de l'Oberhasli (KWO), on a mesuré depuis 1924 la langue glaciaire, ainsi

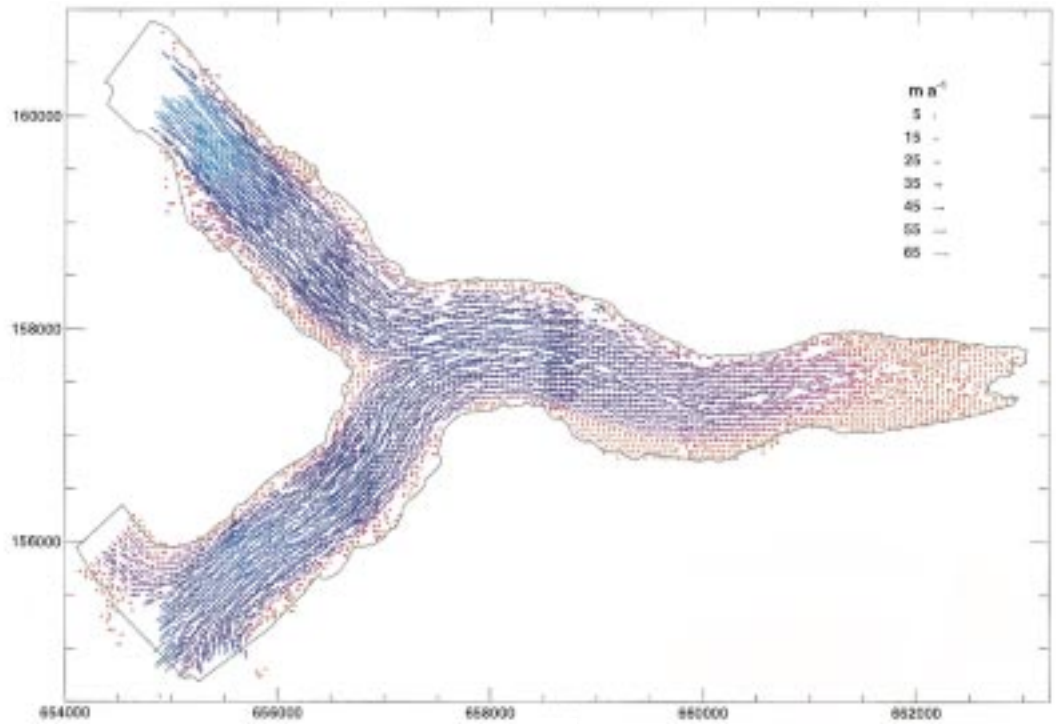
Figures 4a à 4d
Variations annuelles cumulées de la longueur (en m) des glaciers attribués à différentes classes de longueur:

4a) glaciers très petits, de moins d'un km



4b) petits glaciers de 1,0 à 4,9 km

Figure 5
Vitesses moyennes d'écoulement (en m/année) à la surface du glacier inférieur de l'Aar pour la période d'août 1990 à août 1991, déterminées à l'aide de prises de vues aériennes. (Système de coordonnées avec des unités de distance de 2000 m)



que les vitesses d'écoulement de la glace et les variations de son épaisseur le long de différents profils (Flotron, de 1924 à aujourd'hui). Dans le cadre de ces relevés, on a effectué chaque année depuis 1969 des prises de vue aériennes du glacier puis, à partir des années nonante, établi des modèles digitaux du relief, ce qui permet de calculer les variations temporelles et spatiales de la hauteur et du volume de la glace. En outre, on a eu recours à diverses méthodes géophysiques, telles que la sismique, l'auscultation au moyen de flux électrique continu et l'échosondage par radar, pour déterminer la topographie et les caractéristiques du lit du glacier (Knecht et Süssstrunk 1952, Röthlisberger 1967, Funk et al. 1994).

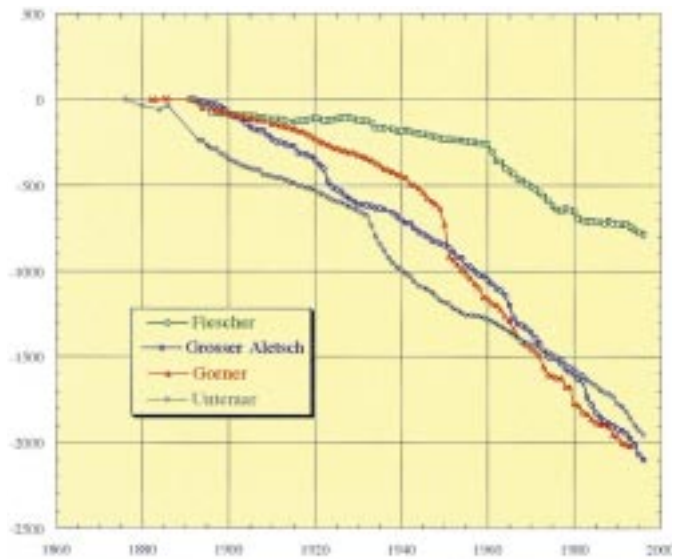
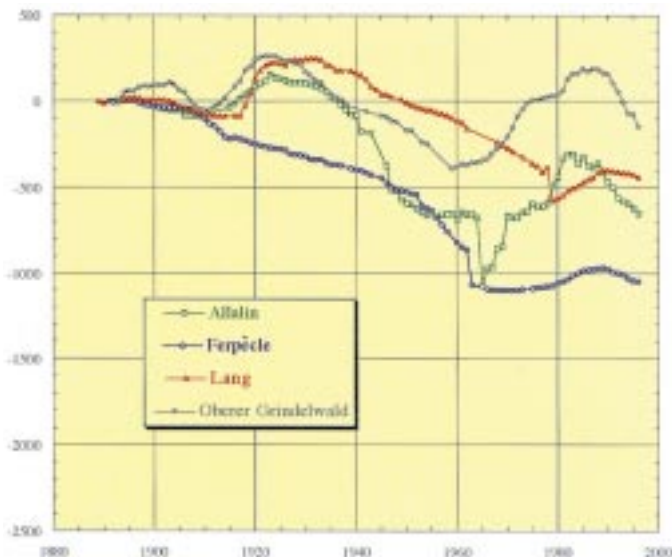
Ces dernières années ont été consacrées à l'étude approfondie de l'écoulement de la glace. On a pro-

cedé à des relevés détaillés du mouvement superficiel du glacier ainsi qu'à des forages atteignant le sous-sol rocheux (cf. figures 5 à 7). Ces diverses mesures, alliées à la connaissance de la topographie de la surface et du lit du glacier, constituent la base nécessaire à l'établissement de modèles numériques (Gudmundsson 1994).

Variations du bilan de masse et comportement du glacier

Le projet de recherche interdisciplinaire actuellement en cours réunit les méthodes les plus moder-

4c) grands glaciers alpins de 5,0 à 9,9 km



4d) grands glaciers de vallées de 10 km et plus

Tableau 3
Variations de longueur des glaciers des Alpes suisses en 1996/97

N°	Glacier	Variation [m]	N°	Glacier	Variation [m]	N°	Glacier	Variation [m]
Bassin du Rhône(II)			46	Martinets	n	79	Sulz	- 1,5
1	Rhône	- 18	47	Sex Rouge	?	80	Glärnisch	- 2
2	Mutt	n	48	Prapio	st	81	Pizol	- 17,1
3	Gries	- 10,4	49	Pierredar	n	114	Plattalva	- 1,6
4	Fiescher	- 13,2	106	Mittelaletsch	- 29 ⁵	Bassin du Rhin (Id)		
5	Grosser Aletsch	- 43	107	Bis	n	82	Lavaz	n
6	Oberaletsch	- 25 ⁷	108	Orny	n	83	Punteglias	- 2
7	Kaltwasser	+ 14,3	Bassin de l'Aar (Ia)			84	Lenta	- 21,7
8	Tälliboden	n	50	Oberaar	- 5,4	85	Vorab	- 9,8
9	Ofental	n	51	Unteraar	- 30,8	86	Paradies	- 11,2
10	Schwarzberg	- 12	52	Gauli	- 6	87	Suretta	- 13,9
11	Allalin	- 6	53	Stein	- 11	88	Porchabella	- 13,7 ³
12	Kessjen	n	54	Steinlimmi	- 9	89	Verstankla	- 1,8
13	Fee (Nord)	- 25,3	55	Trift (Gadmen)	n	90	Silvretta	- 10 ²
14	Gorner	- 30,5	56	Rosenloui	n	91	Sardona	- 5,5
15	Zmutt	0	57	Oberer Grindelwald	- 10 ca.	115	Scaletta	n
16	Findelen	n	58	Unterer Grindelwald	- x	Bassin de l'Inn(V)		
17	Ried	- 14,7	59	Eiger	- 13,4	92	Roseg	- 62,8
18	Lang	- 35	60	Tschingel	- 3	93	Tschierva	- 25,4
19	Turtmann	- 83,9	61	Gamchi	- 4,7	94	Mortersatsch	- 10,8
20	Brunegg (Turm. E)	- 5,5	62	Schwarz	- 1	95	Calderas	- 1,8
21	Bella Tola	+ 26	63	Lämmern	- 9	96	Tiatscha	+ 7,8
22	Zinal	- 14	64	Blümlisalp	- 11	97	Sesvenna	- 6,9
23	Moming	- 36	65	Rätzli	- 5 ² ca.	98	Lischana	- 1,5 ²
24	Moiry	- 5	109	Alpetli	- 6,5	Bassin de l'Adda (IV)		
25	Ferpècle	- 10	110	Lötschberg	n	99	Cambrena	- 5 ²
26	Mont Miné	- 7	111	Ammerten	- 1,8	100	Palü	- 7,1
27	Arolla (Mt. Collon)	- 7	112	Dungel	n	101	Paradisino (Campo)	- 4,5
28	Tsidjiore Nouve	- 108	113	Gelten	n	102	Forno	- 24
29	Cheillon	- 17	Bassin de la Reuss (Ib)			116	Albigna	n
30	En Darrey	+ 15	66	Tiefen	- 10,6	Bassin du Tessin (III)		
31	Grand Désert	- 0,6	67	Sankt Anna	- 2,8 ²	103	Bresciana	- 16,8
32	Mont Fort (Tortin)	- 20,5 ²	68	Kehlen	- 28,6	104	Basodino	- 6,7
33	Tsanfleuron	- 5	69	Rotfirm (Nord)	- 6,9	105	Rossboden	+ 4,6
34	Otemma	- 44,4	70	Damma	- 9,3	117	Valleggia	0
35	Mont Durand	- 3,2	71	Wallenbur	+ 0,4	118	Val Torta	+ 2,9
36	Breney	- 27,1	72	Brunni	- 8,7 ⁷	119	Cavagnoli	- 13,1
37	Giétro	- 7,5	73	Hüfi	- 24,3	120	Corno	- 1,2
38	Corbassière	- 12	74	Griess	- 5,5	121	Croslina	+ 0,82 ²
39	Valsorey	- 31 ²	75	Firnelpeli (Ost)	- 17 ²			
40	Tseudet	- 53 ²	76	Griessen	- 1 ²			
41	Boveyre	n	Bassin de la Linth (Ic)					
42	Saleina	- 79,1 ²	77	Biferten	- 7,6			
43	Trient	- 50	78	Limmern	- 0,4			
44	Paneyrosse	- 1,9						
45	Grand Plan Névé	- 6,2						

Abréviations:

+	en crue	x	valeur non déterminée
st	stationnaire	sn	sous la neige
-	en décrue	?	résultat incertain
ca.	valeur approximative	n	non observé

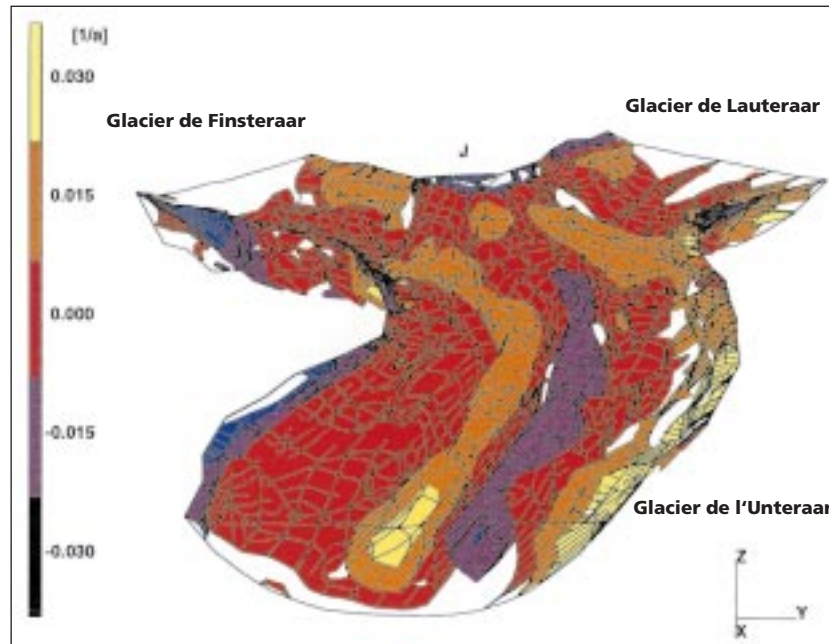
Remarques

Si la valeur indiquée est valable pour un intervalle de plusieurs années, on a noté le nombre d'années comme suit: -13,4² = recul de 13,4 m en deux ans.

nes de la glaciologie, de la géodésie et de la photogrammétrie, dans le but de déterminer le bilan de masse de manière plus aisée. En effet, la relation entre les variations de celui-ci et le comportement du glacier présente un intérêt fondamental pour la compréhension des variations climatiques. Par ce moyen, on peut décrire de manière plus complète

l'état d'un glacier que par la simple mesure des avances et des retraits de sa langue terminale. Le calcul du bilan de masse par la méthode glaciologique demande cependant des campagnes de mesure sur le terrain très astreignantes et coûteuses. Quant aux progrès de l'interprétation photogramétrique des prises de vues aériennes, elle permet non seulement la mise au point de modèles digitaux du relief, mais aussi une détermination rapide

Figure 7
Rapports d'extension verticale de la glace, calculés au moyen d'un modèle tridimensionnel d'écoulement et représentés par des surfaces d'égale valeur. Les valeurs négatives se rapportent au tassement, et les positives, au gonflement de la glace.



et fort précise du champ de vitesses à la surface du glacier. On a également appliqué pour la première fois un système d'auscultation des zones d'accumulation par rayon laser (laser-scanning). Cette innovation livre aussi des résultats dignes de confiance, là où les interprétations photogrammétriques classiques parviennent à leur limite de fiabilité. L'un des buts principaux de ce projet est l'estimation du bilan de masse en combinant des méthodes de télédétection avec un modèle numérique tridimensionnel d'écoulement. On a simultanément entrepris des recherches approfondies sur les processus fondamentaux encore insuffisamment connus, ainsi que sur les diverses variations saisonnières du ruissellement (Iken et al. 1983). A ce propos, l'intérêt général se dirige en premier lieu sur le développement du réseau hydrographique subglaciaire, car il exerce probablement une influence sur la structure du lit du glacier, ainsi que sur les mouvements d'écoulement en profondeur. En outre, on étudie les relations entre les variations de la pression hydrostatique, la résistance de la base et la vitesse à la surface.

Bibliographie

- Agassiz, L. (1847): *Première partie: Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels, leur structure, leur progression et leur action physique sur le sol*, V. Masson, Paris, 2 volumes
- Dyrgerov, M. B., et Meier, M. F. (1997): Year-to-year fluctuations of global mass balance of small glaciers and their contribution to sea-level changes. *Arctic and Alpine Research*, 29(4), 392–402
- Flotron, A. (1924 à aujourd'hui): *Jährliche Berichte über die Ergebnisse des Gletschermessungen im Auftrag der Kraftwerke Oberhasli*
- Forel, F. A. (1895): Les variations périodiques des glaciers. *Discours préliminaire, Archives des sciences physiques et naturelles*, Genève, 34, 209–229
- Funk, M., Gudmundsson, G. H. et Hermann, F. (1994): Geometry of the glacier bed of the Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 30, 1–8

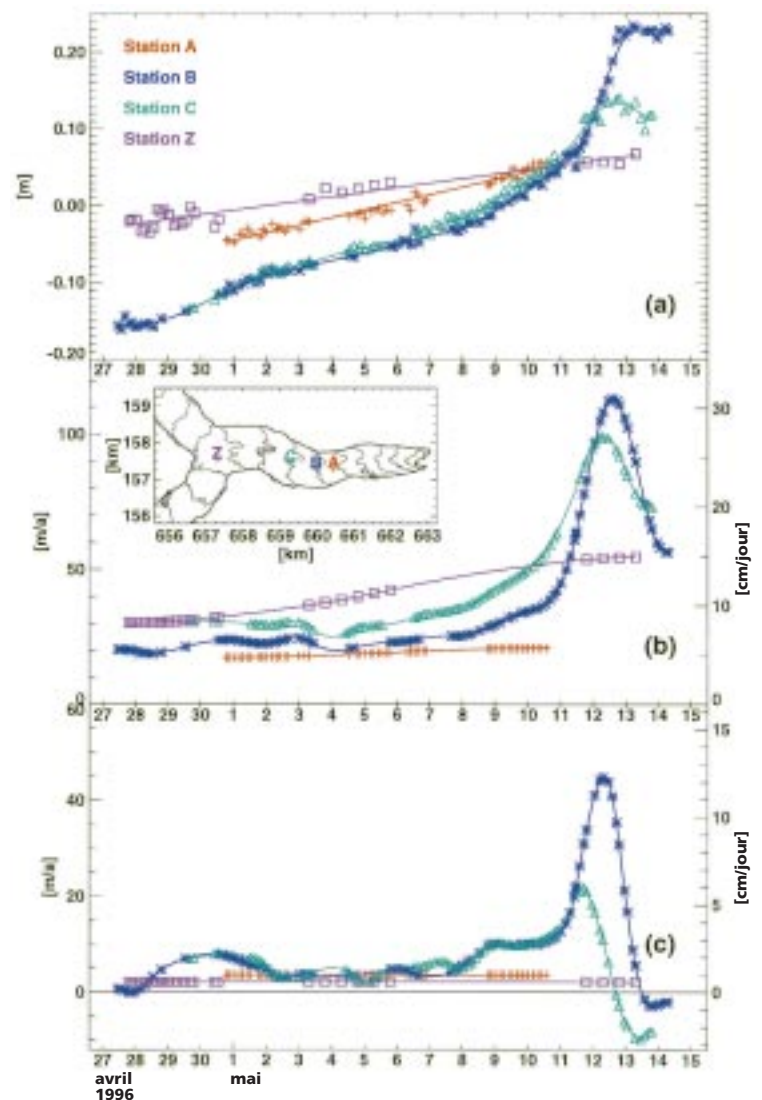


Figure 6a à 6c
Exemple du degré de résolution des mesures de mouvement, obtenu au moyen de l'observation satellitaire et du système GPS. Par cette méthode, on peut mettre en évidence de courtes variations temporelles, comme celles intervenant au début de la fon-

te printanière de la neige, lorsque le glacier se soulève par l'écoulement sous-jacent de l'eau. Pour les quatre stations GPS (A, B, C et Z), on a représenté sur cette figure le soulèvement (a) et les composantes horizontale (b) et verticale (c) de la vitesse.

Gudmundsson, G. H. (1997): Ice deformation at the confluence of two glaciers investigated with conceptual map-plane and flowline models. *Journal of Glaciology*, 43 (145), 537–547

Gudmundsson, G. H., Iken, A. et Funk, M. (1997). Measurements of ice deformation at the confluence area of Unteraargletscher, Bernese Alps, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 43 (145), 548–556

Haerberli, W. et Hoelzle, M. (1995): Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climatic change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps. *Annals of Glaciology*, 21, 206–212

Haerberli, W. (1998): Historical evolution and operational aspects of worldwide glacier monitoring. In: Into the second century of world wide glacier monitoring: prospects and strategies (W. Haerberli, M. Hoelzle et S. Suter): *Studies and Reports in Hydrology*, IAHS, 56, 35–51

Hugi, F. J. (1830): Naturhistorische Alpenreise. Amiet-Lutiger, Soleure

Hugi, F. J. (1842): Über das Wesen der Gletscher. Editions J. G. Cotta, Stuttgart et Tübingen

Iken, A., Röthlisberger, H., Flotron, A. et Haerberli, W. (1983): The uplift of the Unteraargletscher at the beginning of the melt season – a consequence of water storage at the bed? *Journal of Glaciology*, 29 (101), 28–47

Johannesson, T., Raymond, Ch. et Waddington, E. (1989): Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 35 (121), 355–369

Knecht, H. et Süsstrunk, A. (1952): Bericht über die seismischen Sondierungen des Schweizerischen Gletscherkommission auf dem Unteraargletscher, 1936–1950, rapport N° 512

Maisch, M., Wipf, A., Denneler, B., Battaglia, J. et Benz, C. (1998): Die Gletscher der Schweizer Alpen: Gletscherhochstand 1850 – Aktuelle Vergletscherung – Gletscherschwund-Szenarien. Schlussbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag AG, Zurich (sous presse)

Ohmura, A., Wild, M. et Bengtsson, L. (1996): Present and future mass balance of the ice sheets simulated with GCM. *Annals of Glaciology*, 23, 187–193

Peschke, W. (1998): Erste Ergebnisse einer Auswertung der Längenänderungsdaten des Schweizer Messnetzgletscher, Praktikumsbericht an der VAW/ETHZ

Röthlisberger, H. (1967): Recent DC resistivity soundings on Swiss glaciers. *Journal of Glaciology*, 6 (47), 607–621

Zuo, Z. et Oerlemans, J. (1997): Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation. *Climate Dynamics*, 13, 835–845 ■

Traduit de l'allemand par Cyril Aubert

En 1894, lorsque que l'on commença à mesurer les glaciers dans le Val Roseg, seul existait le glacier du Roseg qui s'est retiré depuis de plus de 2 km. L'espace mis à découvert est aujourd'hui occupé par un lac apparu en 1954. Le glacier du Tschierva s'est

séparé du glacier du Roseg en 1934. Un important pan de rochers de 300 000 m³ s'est détaché en 1988 du versant ouest du Piz Morteratsch à environ 3200 m d'altitude. Les éboulis se sont amoncelés sur le côté droit du glacier

