

Les glaciers des Alpes suisses en 1999/2000¹

Ce 121^e rapport de la Commission glaciologique de l'Académie suisse des sciences naturelles (CG/ASSN) est le dernier du siècle qui vient de s'écouler. Il se caractérise à nouveau par des extrêmes de température (vagues de chaleur et de froid) et de pluviosité (épisodes de sécheresse et d'abondantes précipitations). Les modifications climatiques d'échelle globale se traduisent, notamment, par la variation de longueur des glaciers: Septante-neuf des 108 glaciers régulièrement observés sont en décre.

Introduction

Le récent rapport de l'IPCC (International Panel on Climatic Change, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) confirme l'amorce du réchauffement général de la planète. Une majorité de scientifiques admet maintenant que l'accumulation des gaz à effet de serre produits par les activités humaines y contribue de façon notable. Les conséquences de cette hausse globale de la température se manifestent régionalement par un retrait persistant des glaciers. Aujourd'hui, comme hier, l'observation minutieuse de leur comportement constitue une des bases essentielles de la connaissance et de l'examen critique des modifications climatiques. Pourtant il ne faut pas lier tous les processus glaciologiques à l'évolution du climat. C'est pourquoi, outre la surveillance à long terme des variations glaciaires, certaines études scientifiques fondamentales sont nécessaires à la compréhension de la mécanique des glaciers et des phénomènes qui s'y déroulent. Les considérations présentées en annexe sur le vêlage glaciaire mon-

1 Extrait du 121^e rapport de la Commission de glaciologie de l'Académie suisse des sciences naturelles (CG/ASSN) et des Laboratoires d'hydrologie, d'hydrologie et de glaciologie (VAW/EPFZ).

Tableau 1: Titres des bulletins météorologiques mensuels de Météo Suisse d'octobre 1999 à septembre 2000

1999	Année humide et assez chaude. Avalanches, inondations, grêle, ouragan Lothar
Octobre	Doux. Foehn au nord des Alpes. Au sud, ciel très nuageux par phénomène de barrage
Novembre	Brusque offensive de l'hiver après le milieu du mois. Peu de soleil sur le Plateau
Décembre	Tempêtes et précipitations au nord, peu de soleil en montagne
2000	Année extraordinairement chaude. Automne extrêmement pluvieux au sud des Alpes et en Valais
Janvier	Ensoleillement supérieur à la norme et peu de précipitations. Sécheresse au sud
Février	Nettement trop doux; sec au sud, humide au nord des Alpes
Mars	Temps ensoleillé dans l'ouest et le sud, très nuageux et pluvieux dans l'est. Fin de la sécheresse au sud du Tessin
Avril	Humide et très nuageux au sud; au nord, doux grâce à de fréquentes périodes de foehn
Mai	Temps printanier exceptionnellement chaud, surtout durant la première quinzaine
Juin	Très chaud, trop peu de pluie; temps particulièrement ensoleillé hors du domaine alpin
Juillet	Mois frais, pluvieux et pauvre en soleil
Août	Après un début désagréable, grosses chaleurs estivales et beaucoup de soleil
Septembre	Un peu trop chaud; ensoleillé dans l'ouest et le nord-ouest. Quelques pluies isolées, mais abondantes

trent à l'évidence les possibilités d'acquisition de nouvelles connaissances sur ces processus de grande importance.

Conditions météorologiques et climatiques

Résumé de l'année hydrologique 1999/2000

La dernière année du deuxième millénaire se range à nouveau, au niveau planétaire, parmi les plus chaudes du XX^e siècle et se signale par les mêmes extrêmes climatiques (chaleur, froid, sécheresse, pluies abondantes). La moyenne de la température mesurée à proximité de la surface de la Terre se situe à 0,3 °C au-dessus de la norme de la période climatologique 1961-1990. Depuis 1860,

début des mesures instrumentales régulières, les huit années les plus chaudes se rangent toutes dans la dernière décennie du siècle qui vient de se terminer (OMM, 2000).

En Suisse, l'exercice 1999/2000 est une fois encore plus chaud que la moyenne et assez pluvieux dans l'est du pays et au sud des Alpes, en raison de

Glacier de Trift 1969



Photo: archives VAW/E. Pfister

Photo: A. Spielter



Front de vèlage du glacier de Gries, 1968, deux ans après l'engorgement du lac



Photo: archives VAW

Photo: M. Funk



Langue du glacier de Gries, 1998. Le glacier ne touche plus le lac

Cette photo, prise en automne 2000, montre que l'extrémité de la langue glaciaire ne recouvre plus le verrou rocheux et qu'une nappe d'eau s'est formée, avec un front de vèlage. Plusieurs signes indiquent encore que la langue se casse à différents endroits



Appel

En rapport avec les modifications connues en ce moment par le glacier de Trift, nous allons scientifiquement remettre à jour les informations et les données existantes. C'est pourquoi nous sommes à la recherche d'illustrations datées (photos,

peintures) qui documentent de précédents états du glacier. Contact: Réseau de mesure, Gloriastrasse 37/39, 8092 Zurich, tél. 01/632 41 12, courriel bauder@vaw.baug.ethz.ch

Photo: E. Streich



2001. Sur cette photo, on voit que la langue glaciaire a perdu un volume considérable et qu'elle a abandonné le verrou rocheux qu'elle recouvrait

quelques épisodes extrêmes. L'année hydrologique a débuté par un mois d'octobre doux, suivi de chutes de neige jusqu'en plaine dès début novembre et de basses températures durant la seconde quinzaine de ce mois. Après de nombreux redoux en décembre, la tendance au réchauffement s'est confirmée de février à juin avec des moyennes supérieures à la norme, le surplus thermique atteignant plus de 3,0 °C pendant les deux derniers mois de cette période. Juillet, en revanche, s'est signalé par une fraîcheur inhabituelle sur toute la Suisse, tandis qu'août reprenait la série des excédents de température.

Outre l'ouragan *Lothar* qui a provoqué de sérieux ravages après Noël 1999, l'extrême douceur de la première moitié de l'an 2000 restera dans les mémoires. En dépit de périodes prolongées de mauvais temps, l'été s'est révélé chaud et sec. Succédant au maigre ensoleillement de la période précédente, celui de 1999/2000 se montre très satisfaisant (cf. tab. 1).

Température

La tendance à des moyennes annuelles de température supérieures à la norme s'est poursuivie durant cet exercice. En particulier, octobre, décembre, février, avril, mai et juin se sont signalés par de nets excédents thermiques, moins

prononcés en montagne qu'en plaine. Seuls les mois de novembre et de juillet se sont révélés plus froids que d'habitude. L'intense rayonnement solaire des mois d'été est responsable de la fonte de la neige (mai et juin) et de sa disparition du sol (juillet à septembre). Durant cette période décisive, les moyennes thermiques se sont maintenues à 1,0 et 2,5 °C au-dessus de la norme (cf. fig. 1).

Précipitations

Après les fortes chutes de pluie et de neige, responsables de la pluviosité très excédentaire de l'exercice 1998/99, l'année hydrologique 1999/2000 s'est tenue à un niveau normal. Pourtant, les régions orientales de notre pays, ainsi que le versant sud des Alpes, se sont distinguées par des précipitations nettement supérieures à celles du reste de la Suisse. A l'opposé des mois d'octobre et novembre 1999, ainsi que de janvier, mai, juin et août 2000, trop secs sur l'ensemble du pays, seul juillet s'est caractérisé par un net surplus de précipitations en toutes régions. Les écarts de pluviosité se situent entre -10 et +30%, certains dépassant même 40%. On a relevé l'automne le plus humide du XX^e siècle dans le Haut-Valais, dans le nord du Tessin et dans les vallées méridionales des Grisons (cf. fig. 2).

Ensoleillement

Contrairement à l'exercice précédent, l'ensoleillement de 1999/2000 s'est rangé à nouveau au-dessus de la moyenne pluriannuelle. Cet excédent est un peu moins marqué sur le domaine alpin que sur les régions avoisinantes du nord des Alpes. Janvier, juin, août et septembre ont été particulièrement ensoleillés, tandis que seul le mois de décembre s'est révélé très avare en heures claires sur toutes les Alpes suisses.

Bilans de masse et mouvements des glaciers

De nos jours, on détermine les bilans de masse de trois glaciers suisses au moyen de la méthode glaciologique directe. En outre, on a procédé à quelques mesures ponctuelles de la variation de la masse glaciaire sur le névé de la Jungfrau (glacier d'Aletsch) et sur les glaciers des Clarides, de Giétro et de Corbassière, ainsi que dans la région de Mattmark.

On a renoncé, en revanche, à poursuivre la détermination du bilan de masse des glaciers d'Aletsch au moyen de la méthode hydrologique. Ce procédé est entaché de tant d'imprécisions et d'erreurs qu'on ne peut lui attribuer qu'une validité réduite. Quant aux mesures ponctuelles des variations de masse, on leur accorde la préférence car elles possèdent, au point de vue scientifique, une valeur nettement supérieure, surtout par rapport aux réponses à apporter aux problèmes climatiques essentiels.

Tandis que les glaciers de Gries, dans la région du Nufenen, et du Basodino, au Tessin, subissaient d'importantes

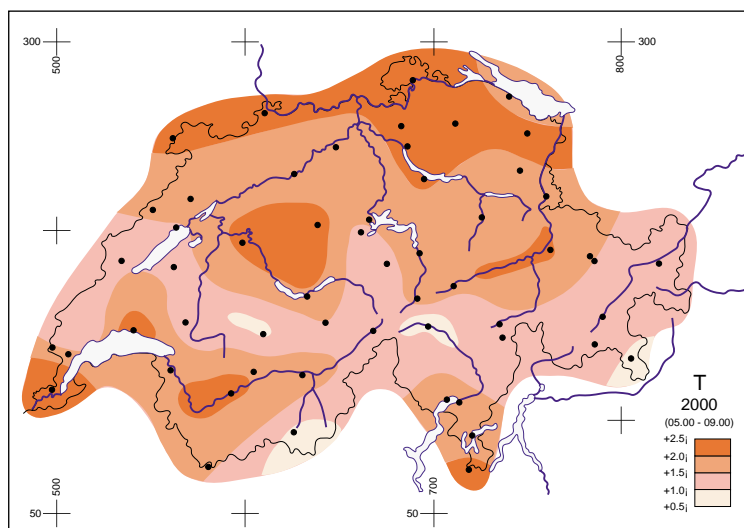


Figure 1
Températures estivales de 2001
(température moyenne de l'air
du 1.5 au 30.9.00): écarts par
rapport aux valeurs normales
1901-1960 en degrés Celsius

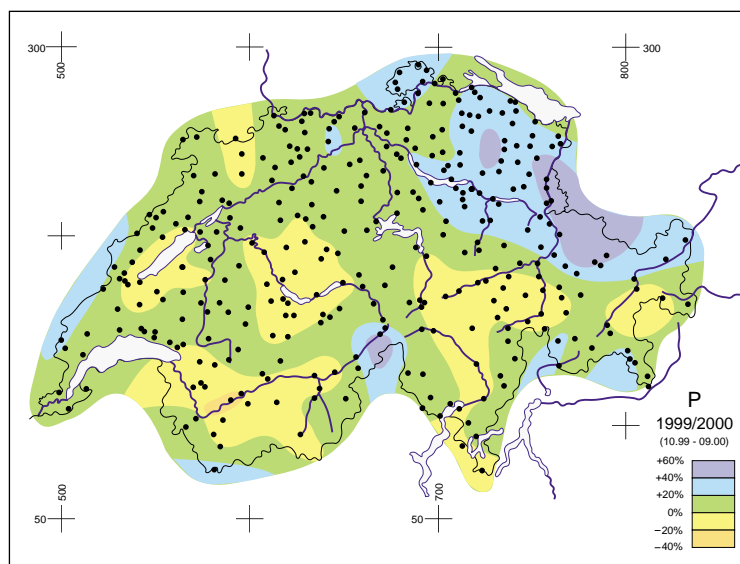


Figure 2
Précipitations annuelles 1999/2000
(sommées du 1.10.99 au 30.9.00):
écarts par rapport aux valeurs nor-
males 1901-1960 en pour cent

perdes de masse, le bilan de celui de la Silvretta, au fond du Prättigau, affichait une faible valeur positive. Exprimés en mètres d'équivalent en eau, les bilans spécifiques moyens donnent les valeurs suivantes: -0,91 m pour le glacier de Gries, -0,80 m pour celui du Basodino, et +0,15 m pour celui de la Silvretta. Comparées aux résultats des années précédentes, ces données se révèlent plus faibles que celles de la période 1998/99, dont l'hiver fut riche en neige, et plus élevées que celles de 1997/98, caractérisée par une ablation estivale prononcée (cf. fig. 3). L'exercice écoulé témoigne pourtant d'une répartition spatiale de ce paramètre analogue à celle du précédent. Tandis que les deux glaciers du Basodino et de Gries, soumis au régime météorologique du sud des Alpes, annonçaient des pertes, celui de la Silvretta, situé au nord de la crête alpine, affichait un bilan positif pour la seconde année consécutive. Les mesures ponctuelles des variations de masse reflètent également cette tendance. On note en effet un faible gradient négatif entre les valeurs moyennes normales du nord des Alpes et celles, un peu plus basses, du sud (Valais).

Les mesures des mouvements de la glace traduisent aussi le retrait général des glaciers alpins. Constamment répétées sur les mêmes sites, elles montrent en tous lieux une diminution des valeurs de la vitesse horizontale. Ce paramètre d'écoulement dépend en premier lieu de la pente de la surface de la glace et de son

épaisseur. Il se trouve donc en relation avec les modifications de la configuration du glacier.

Variations de longueur

Sur les 121 glaciers faisant partie du réseau d'observation de la Commission glaciologique, on n'en observe actuellement que 108 de manière régulière. Quant à la plupart des autres, ils ont subi un tel retrait que la détermination correcte de leur longueur au rythme d'une visite par année n'est actuellement plus possible, d'autant plus qu'ils sont souvent recouverts d'éboulis. Pour quelques autres, dont l'observation ne s'est effectuée qu'à intervalles très irréguliers, leurs données sont si imprécises et lacunaires que leur maintien dans les rapports et analyses glaciologiques ne se justifie plus guère.

Durant cet exercice, nos collaborateurs ont déterminé la variation de longueur de 88 glaciers sur les 95 qu'ils ont visités. Tandis que cinq langues glaciaires ont progressé et quatre autres sont restées stationnaires (plus ou moins 1 m), la grande majorité, soit 79, ont subi un retrait plus ou moins important (cf. fig. 4). Citons les variations extrêmes: 4,8 m de crue pour le glacier de Tourtemagne et 218 m de décrue pour celui de l'Allalin.

Cette dernière valeur, très élevée, s'explique par un phénomène particulier. Les 30 et 31 juillet 2000, un million de mètres cubes de glace environ, soit presque toute la langue surplombant la

vallée, s'est écroulée au bas d'une falaise escarpée. Un éboulement semblable, mais au volume trois fois plus grand, s'était déjà produit au même endroit en 1965, faisant 88 victimes sur le chantier du barrage de Mattmark, alors en construction. Grâce au vaste programme d'observation mis sur pied depuis cette catastrophe, on s'est rendu compte dès le milieu des années nonante, que le glacier de l'Allalin occupait à nouveau une position presque identique à celle de 1965. Il fallait donc s'attendre à un nouvel écroulement de glace. Les mesures de protection et les interdictions d'accès prises en conséquence se sont révélées parfaitement judicieuses, puisqu'elles ont permis d'éviter un nouveau drame².

Outre le glacier de l'Allalin, celui du Trient s'est aussi signalé par un très fort recul de 180 mètres. Après une période de crue constante et prolongée du début des années soixante à la fin de la décennie quatre-vingt, il se trouve en phase de retrait prononcé depuis le début des années nonante et cette dernière valeur se distingue des précédentes par son ampleur (cf. fig. 5). Quant aux autres importantes variations de longueur de cet exercice, elles se situent pour la plupart autour de -50 mètres. Même les glaciers de faibles dimensions, qui réagissent rapidement aux fluctuations du climat, présentent aussi une majorité de valeurs négatives; on peut en conclure que les exceptionnelles chutes de neige de l'hiver 1998/99 ne se sont pas manifestées de façon positive. Les résultats sont très di-

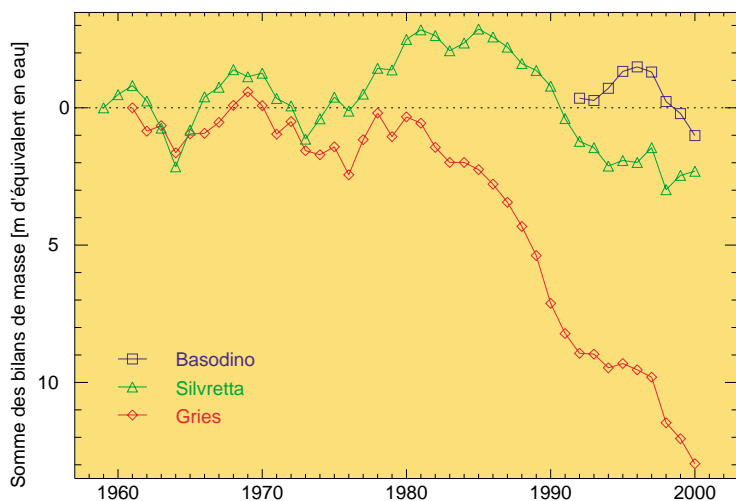


Figure 3
Somme des bilans de masse annuels moyens (exprimés en mètres d'équivalent en eau) des glaciers du Basodino, de la Silvretta et de Gries

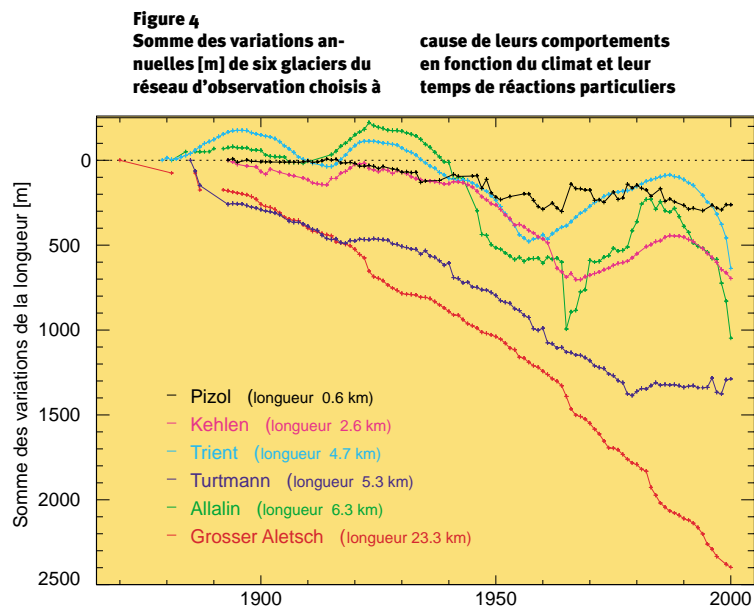
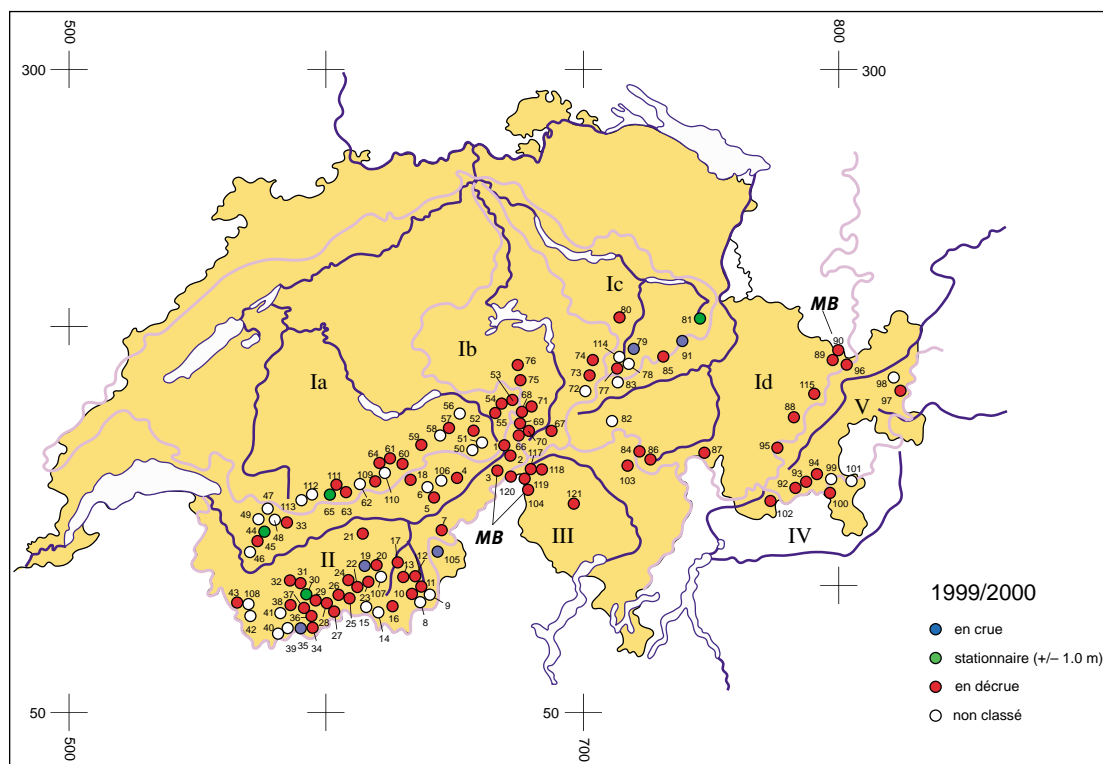


Figure 4
Somme des variations annuelles de la longueur [m] de six glaciers du réseau d'observation choisis à cause de leurs comportements en fonction du climat et leur temps de réactions particuliers

² Cf. *Les Alpes* 9/2001 «Un glacier à problèmes», p. 33-37.

Figure 5
Variations de la longueur
des glaciers des Alpes
suisses en 1999/2000



vergents et l'on ne peut guère admettre qu'une tendance puisse nettement se dessiner, étant donné qu'un signal éventuel est étouffé par le degré de résolution de la mesure.

Avec son altitude de 1650 mètres environ, la langue du glacier de Trift, dans la région du Susten-Grimsel (vallée de Gadmen) se range parmi les plus basses des Alpes suisses. Elle subit actuellement un retrait spectaculaire. Ces dernières années, elle a fondu massivement et perdu un volume considérable. Elle a aussi abandonné le verrou rocheux qu'elle recouvrait et une nappe d'eau s'est formée dans le surcreusement en amont. Il faut donc s'attendre à l'avenir à une fusion rapide de vastes portions de la langue glaciaire dans ce lac. Malheureusement, on ne dispose que de mesures lacunaires de la variation de longueur de ce glacier, en raison de son accès difficile et des modifications mineures intervenues le long de cette barre de rochers.

Remerciements

Pour l'exécution de ses relevés réguliers des glaciers des Alpes suisses, la Commission de glaciologie de l'ASSN a bénéficié du soutien actif et permanent d'un grand nombre de collaborateurs bénévoles. Elle remercie toutes les personnes effectuant à titre privé des mesures sur le terrain ou des travaux de traitement des

données, ainsi que les collaborateurs des services forestiers des cantons alpins, des Sociétés de forces motrices de l'Aegina, de Mattmark et de Mauvoisin, des offices fédéraux, des instituts de recherche, des hautes écoles et des universités. Sa reconnaissance s'adresse en particulier à la section de glaciologie et à la direction des VAW/EPFZ pour leur précieuse collaboration.

Complément

Le vèlage des glaciers

Les langues glaciaires aboutissant dans un lac ou dans la mer produisent des icebergs: c'est le phénomène du vèlage. Les variations temporelles de ces glaciers ne dépendent pas uniquement de leur bilan de masse influencé par le climat, mais aussi du détachement d'icebergs à leur extrémité. Le vèlage constitue un mécanisme très efficace de fusion qui permet une perte beaucoup plus rapide que la seule ablation superficielle.

Le vèlage est responsable des 70% de l'ablation totale de tous les glaciers et calottes de glace de la planète (Van der Veen, 1997). Il se déroule surtout sur les récifs englacés et les langues glaciaires flottantes de l'Antarctique et du Groenland. Cet article ne prend en compte que le vèlage des glaciers se trouvant sur terre ferme, c'est-à-dire dont la langue ne flotte pas. Cela ne concerne donc que les grands glaciers de Patagonie et de

l'Alaska, ainsi que les glaciers de moindres dimensions disséminés dans les Alpes comme, par exemple, celui du Rosegg, en Engadine, ou, depuis peu, celui de Trift, dans l'Oberland bernois.

Rapide retrait du glacier de Columbia

Parmi divers glaciers de Patagonie et de l'Alaska, on a récemment observé de rapides retraits, à la suite d'un net accroissement du taux de vèlage (différence entre la variation de longueur et la vitesse d'écoulement à la hauteur du front de vèlage; Meier et Post, 1987; Warren, 1993; Naruse et Skvarca, 2000). Après une longue phase de stabilité, le glacier de Columbia, en Alaska, s'est mis tout à coup à décroître rapidement au début des années quatre-vingt (cf. fig. 6, p. 30), au rythme moyen de 700 mètres par an. L'extrémité de sa langue se situe actuellement à douze kilomètres environ en amont de sa position de 1982. A la même époque, la multiplication des icebergs de ce glacier a constitué un réel danger pour les pétroliers se rendant et revenant du port où se termine l'oléoduc de l'Alaska. C'est pourquoi son comportement, ainsi que celui des autres glaciers de la région, font désormais l'objet d'une étude poussée en ce qui concerne le phénomène du vèlage. De nos jours, on s'intéresse particulièrement au mécanisme des glaciers de ce genre, en rapport avec les modifications du climat.

Tableau 2:
Variations de longueur des glaciers des Alpes suisses en 1999/2000

N°	Glacier	Cant.	Variation de longueur (m)	N°	Glacier	Cant.	Variation de longueur (m)	N°	Glacier	Cant.	Variation de longueur (m)
Bassin du Rhône (II)				Bassin de l'Aar (Ia)				Bassin du Rhin/Bodensee (Id)			
1	Rhône	VS	-5,9	47	Sex Rouge	VD	x	84	Lenta	GR	-17,3
2	Mutt	VS	-111,8 ⁶	48	Prapio	VD	x	85	Vorab	GR	-4,8 ²
3	Gries	VS	-13,1					86	Paradies	GR	-3,1
4	Fiescher	VS	-8,4	52	Gauli	BE	-11	87	Suretta	GR	-12
5	Grosser Aletsch	VS	-18,5	53	Stein	BE	-16	115	Scaletta	GR	-5
7	Kaltwasser	VS	-9,8	54	Steinlimmi	BE	-15	88	Porchabella	GR	-6,6
10	Schwarzberg	VS	-11	55	Trift (Gadmen)	BE	ca. -50	89	Verstankla	GR	-15
11	Allalin	VS	-218	57	Oberer Grindelwald	BE	ca. -50	90	Silvretta	GR	-2,0
12	Kessjen	VS	-13	58	Unterer Grindelwald	BE	x	91	Sardona	SG	+1,1
13	Fee (Nord)	VS	-36,8	59	Eiger	BE	-29,4	Bassin de l'Inn (V)			
16	Findelen	VS	-58,5	60	Tschingel	BE	-2,8	92	Roseg	GR	-54,1
17	Ried	VS	-26,3	61	Gamchi	BE	-7,6	93	Tschierva	GR	-53,1
18	Lang	VS	-31	109	Alpetli	BE	-10,3	94	Morteratsch	GR	-29,6
19	Turtmann	VS	+4,8	62	Schwarz	VS	x	95	Calderas	GR	-8,1
20	Brunegg (Turtmann Ost)	VS	-11,5	63	Lämmern	VS	-11,7	96	Tiatscha	GR	-18,9
21	Bella Tola	VS	-2,3	64	Blümlisalp	BE	-32	97	Sesvenna	GR	-1,7
22	Zinal	VS	-18	111	Ammerten	BE	-1,5	98	Lischana	GR	x (sn)
23	Moming	VS	-29	65	Rätzli	BE	st	Bassin de l'Adda (IV)			
24	Moiry	VS	-5	Bassin de la Reuss (Ib)				99	Cambrena	GR	x
25	Ferpècle	VS	-15	66	Tiefen	UR	-16,6	100	Palü	GR	-57
26	Mont Miné	VS	-20	67	Sankt Anna	UR	-11,1	101	Paradisino (Campo)	GR	x
27	Arolla (Mont Collon)	VS	-14	68	Kehlen	UR	-33,2	102	Forno	GR	-22,4
28	Tsidjiore Nouve	VS	-17	69	Rotfirn (Nord)	UR	-12,4	Bassin du Tessin (III)			
29	Cheillon	VS	-6,5	70	Damma	UR	-20,8	120	Corno	TI	-3,3
30	En Darrey	VS	st	71	Wallenbur	UR	-4,6	117	Valleggia	TI	-7,7
31	Grand Désert	VS	-13,4	73	Hüfi	UR	-8,9	118	Val Torta	TI	-19,1
32	Mont Fort (Tortin)	VS	-3,2	74	Griess	UR	-22,7	103	Bresciana	TI	-23,4
33	Tsanfleuron	VS	-5	75	Firnelpeli (Ost)	OW	-2,5	119	Cavagnoli	TI	-11,2
34	Otemma	VS	-24	76	Griess	OW	-8 ³	104	Basodino	TI	-19,6
35	Mont Durand	VS	+1,4	Bassin de la Linth/Limmat (Ic)				121	Crosolina	TI	-3,6
36	Breney	VS	-15,9	77	Biferten	GL	-9,8	105	Rossboden	VS	+3,3
37	Giétro	VS	-2,9	79	Sulz	GL	+4,4				
38	Corbassière	VS	-9,5	80	Glärnisch	GL	-8,6				
43	Trient	VS	-180	81	Pizol	SG	st				
44	Paneyrosse	VD	st								
45	Grand Plan Névé	VD	-2,6								

Abréviations
sn = sous la neige
x = valeur non déterminée
st = stationnaire

Remarque:
Si la valeur indiquée est valable pour un intervalle de plusieurs années, on a noté le nombre d'années comme suit: -118⁶ = recul de 118 m en six ans.

Vêlage et glissement de la base du glacier

En se basant sur l'observation de différents glaciers, on a constaté que leur taux de vêlage croît presque linéairement avec la profondeur de la nappe d'eau (Brown et al., 1982). Lorsqu'un glacier décroît par vêlage en eau profonde uniquement, on peut s'attendre à un retrait accéléré. Toutefois, la relation entre la production d'icebergs et la profondeur de l'eau est purement empirique et ne décrit pas ce processus physique.

L'examen des observations du glacier de Columbia a permis de proposer un concept différencié à propos du vêlage (Van der Veen, 1996). Toute partie d'une langue glaciaire en phase d'amin-

cissement, qui parvient presque en équilibre de flottement, se rompt en raison de la poussée d'Archimède qu'exerce l'eau sur la glace. Cela signifie que la langue glaciaire se brise en icebergs avant qu'elle ne surnage. Dans ce cas, on parle d'un «vêlage induit par la poussée verticale». Vu sous cet angle, le taux de vêlage est en premier lieu le résultat de la modification de l'épaisseur du glacier dans sa zone terminale et une conséquence de la dynamique du glacier dans son ensemble.

Quant à la production d'icebergs par des glaciers de moindres dimensions et s'écoulant plus lentement, comme on en rencontre quelques cas dans les Alpes, les processus de fonte se déroulant entre le front de vêlage et l'eau jouent un rôle

important sur ce phénomène. Prenons l'exemple du glacier de Hansbreen, au Spitzberg. L'érosion due à la fonte et aux vagues crée une entaille au niveau de la ligne de flottaison de la glace, ce qui provoque finalement l'écroulement de la falaise glaciaire en surplomb. Dans ce cas, c'est la vitesse de fusion au point de contact entre glace et eau qui détermine le taux de vêlage (Vieli, 2001).

Les vitesses élevées d'écoulement, que l'on observe habituellement dans la zone terminale des glaciers en phase de vêlage, s'expliquent par un glissement fortement accru au niveau du lit glaciaire, en relation avec l'importante pression hydrostatique qui s'exerce sur la base de ces langues. Ce mouvement vers l'aval de la partie inférieure de la masse glaciaire est également responsable de l'augmentation de la vitesse d'écoulement en direction du front de vêlage (fig. 7). Le glissement au niveau du lit glaciaire joue

donc un rôle important dans la dynamique du vêlage des glaciers.

Pour pouvoir comprendre le comportement des glaciers qui vèlent, il ne suffit pas d'étudier isolément les uns des autres les processus incriminés, tels la production d'icebergs, l'écoulement de la glace et son glissement sur le sol, car ils sont en rapport d'interactions mutuelles.

Modèles numériques expérimentaux

Il est possible, à l'aide d'un modèle numérique de glacier, de relier entre eux les processus les plus importants. Ce moyen mathématique (Vieli, 2001) permet de

mieux comprendre le comportement des glaciers générant des icebergs et, en particulier, leurs rapides retraits. Le modèle calcule l'évolution dans le temps de la géométrie du glacier, ainsi que les vitesses et les tensions tout au long d'une ligne d'écoulement. On introduit en outre une donnée représentant le «vêlage induit par la poussée verticale».

L'exemple de calcul d'une décrue traité dans cet article est typique des glaciers en phase de vêlage. Il s'agit d'un glacier dont la géométrie et la forme du lit sont influencées par la présence d'une auge sous-jacente (fig. 8).



Glacier de Hansbreen



Photos: A. Vieli



Le front de vêlage du glacier de Hansbreen (au Spitzberg), vu de face. La photo a été prise près de Ebbe, en juillet 1998. L'entaille qui s'étend sur toute

la longueur du front de vêlage, au niveau de la ligne de flottaison de la glace, était visible cet été là



Le glacier de Hansbreen (au Spitzberg), un glacier de taille relativement modeste qui engendre des icebergs. La langue glaciaire est large de 2 km, le front de vêlage se dresse entre 30 et 45 mètres au-dessus du niveau de l'eau, et la profondeur maximale à la hauteur du front atteint 70 m

L'équilibre climatique du glacier est rompu en l'handicapant artificiellement d'un bilan de masse légèrement négatif, ce qui signifie que l'accumulation diminue tandis que l'ablation augmente. Le glacier s'amincit donc et le front de vêlage se met à reculer (cf. fig. 9). Ce lent retrait s'effectue en eau de moins en moins profonde: production d'icebergs et vitesse

d'écoulement ralentissent. Lorsque le front glaciaire s'est retiré en amont du point le plus élevé du seuil sous-jacent (A), la décrue s'accélère en raison d'un

rapide accroissement du taux de vêlage. A la verticale du front glaciaire, la profondeur de l'eau s'accroît de plus en plus, ce qui augmente encore sensiblement le vêlage et le retrait. Mais dès que le point le plus bas de l'auge est atteint (B), la profondeur diminue à nouveau, entraînant ainsi un affaiblissement de la production d'icebergs et un ralentissement du recul, qui devient comparable à celui de la phase initiale du mécanisme. La vitesse d'écoulement à l'extrémité du glacier se comporte dans le temps de manière analogue au taux de vêlage; elle s'accroît avec le retrait en eau plus profonde et diminue lorsque la profondeur décroît. Mais ces variations ne sont pas strictement parallèles à celles de la production d'icebergs et il en résulte un retrait accéléré, induit par le surcreusement sous-jacent.

Dans ces calculs de modèles, le bilan de masse n'est modifié qu'une seule fois au début du processus et l'on présuppose que le climat reste constant. C'est pourquoi, la rapidité du recul n'est pas un signal climatique et ne se rapporte qu'à l'auge sous-jacente. Conséquence du bilan de masse négatif, l'amincissement du glacier joue un rôle décisif dans le déclenchement de ce retrait marqué. Ces calculs de modèles montrent que les variations de longueur des glaciers sont fortement influencées par la topographie de leur lit. Comme les surcreusements de lit dans la zone de la langue glaciaire sont typiques des glaciers qui vèlent, des retraits drastiques peuvent se produire même lorsque le réchauffement climatique est léger. A l'opposé de la décrue due au surcreusement du lit glaciaire, un bilan fortement positif durant une

Figure 7
Augmentation de la vitesse d'écoulement à la hauteur du front de vêlage du glacier de Hansbreen (Spitzbergen): (a) géométrie du lit et de la surface glaciaire le long d'un profil longitudinal, (b) vitesse d'écoulement en surface le long du même profil, mesurée sur différentes périodes de temps

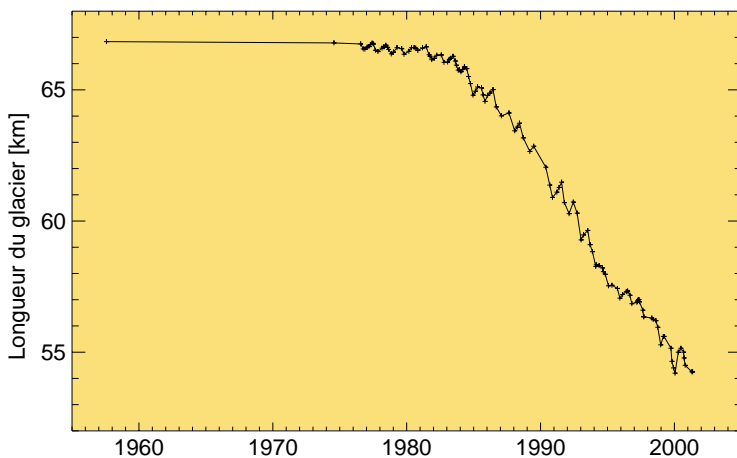
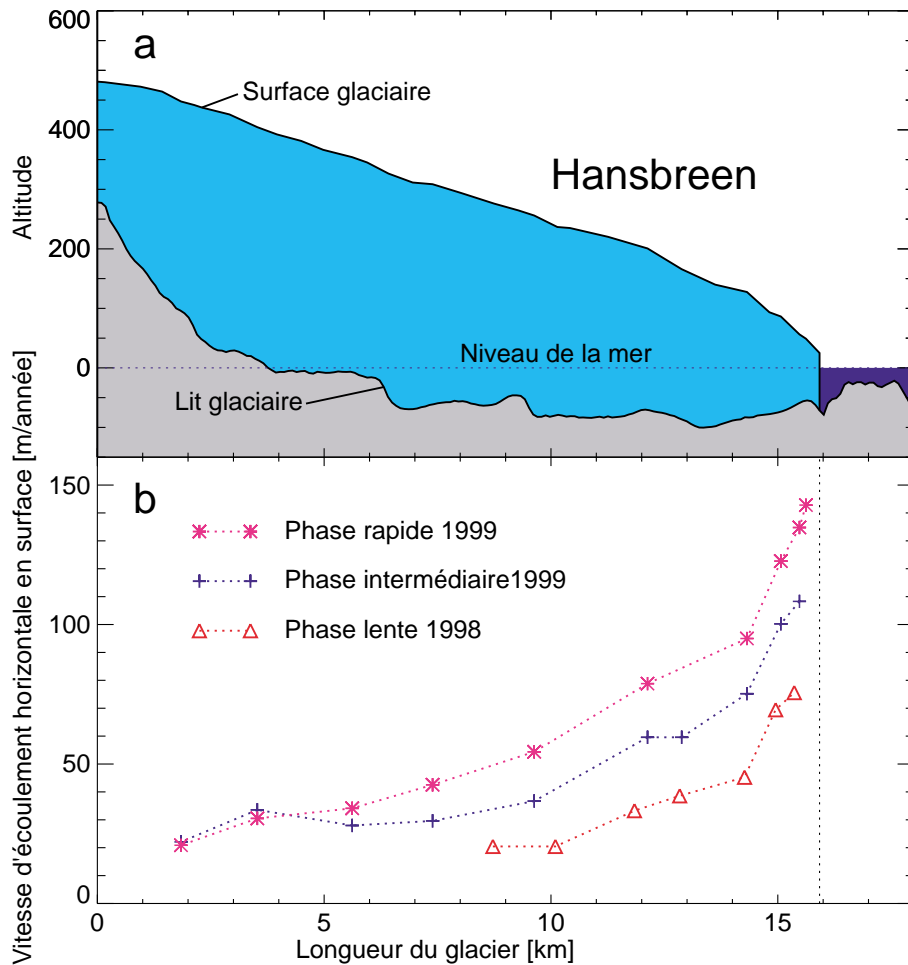
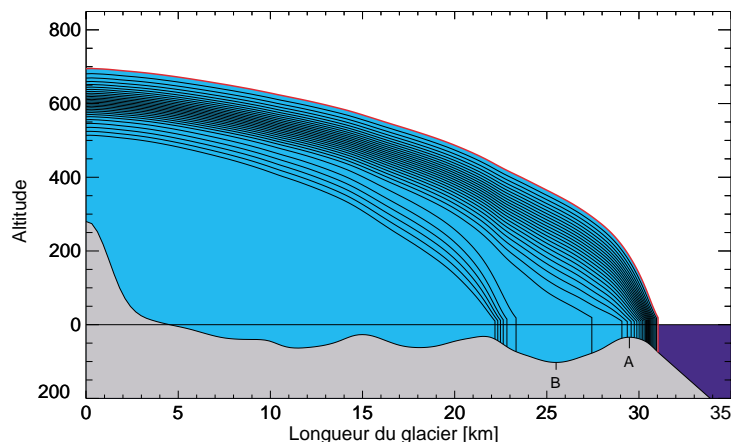


Figure 6
Variations de la longueur du glacier de Columbia (Alaska) depuis 1957 (données: R. Krimmel, US Geological Survey)

Figure 8
Modèle d'une décrue glaciaire induite par un surcreusement géométrique initial de la surface glaciaire; A désigne le point le plus élevé du lit glaciaire, et B, le point le plus bas, tous deux se situant dans la zone de la langue glaciaire. La ligne rouge indique la



longue période (plusieurs siècles) est nécessaire au déclenchement d'une phase de crue; on peut donc estimer que la rapidité actuelle du recul est un processus irréversible à moyen terme.

Vêlage des glaciers alpins

Ce phénomène est assez rare parmi les glaciers de nos Alpes. Leur taux de vêlage est, en comparaison des glaciers situés en Alaska ou en Patagonie, minime. L'ablation au niveau du front joue un rôle important sur la production d'icebergs. Lors de la formation d'un lac à l'extrémité du glacier du Rosegg (Engadine) en recul, celui-ci a commencé à vêler, mais ce phénomène n'a guère exercé d'influence sur la décrue générale du glacier, en raison de la faible profondeur de la nappe d'eau (cf. fig. 10). Durant ces deux dernières années, un lac et un front de vêlage sont également apparus lors du

retrait du glacier de Trift et l'on peut s'attendre à une accélération de la décrue pour ces prochaines années.

La construction de barrages hydro-électriques a créé des retenues dans les-

quelles plongent certaines langues glaciaires. Ces ouvrages ont artificiellement provoqué divers phénomènes de vêlage, notamment en 1933 au glacier inférieur de l'Aar, en 1953 au glacier supérieur du même bassin, et en 1966 au glacier de Gries. Le vêlage a nettement favorisé le retrait de ces glaciers à court terme (cf. fig. 10). Depuis lors, ils se sont tous retirés hors de ces nappes d'eau. ▀

Andreas Bauder, Andreas Vieli et Martin Hoelzle, VAW-EPFZ (trad.)

Figure 10
Somme annuelle des variations de la longueur (en m) des glaciers de l'Unteraar, de l'Oberaar, de Gries et de Rosegg, dont les langues ont un moment plongé dans une nappe d'eau. Les flèches marquent le début du contact avec l'eau

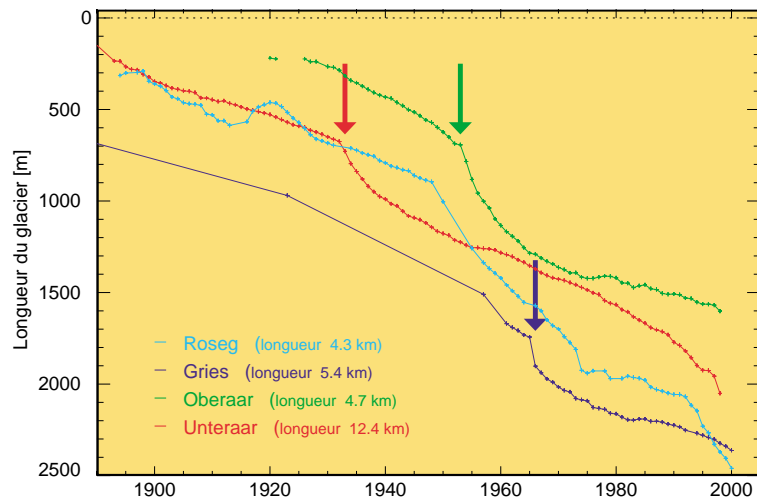
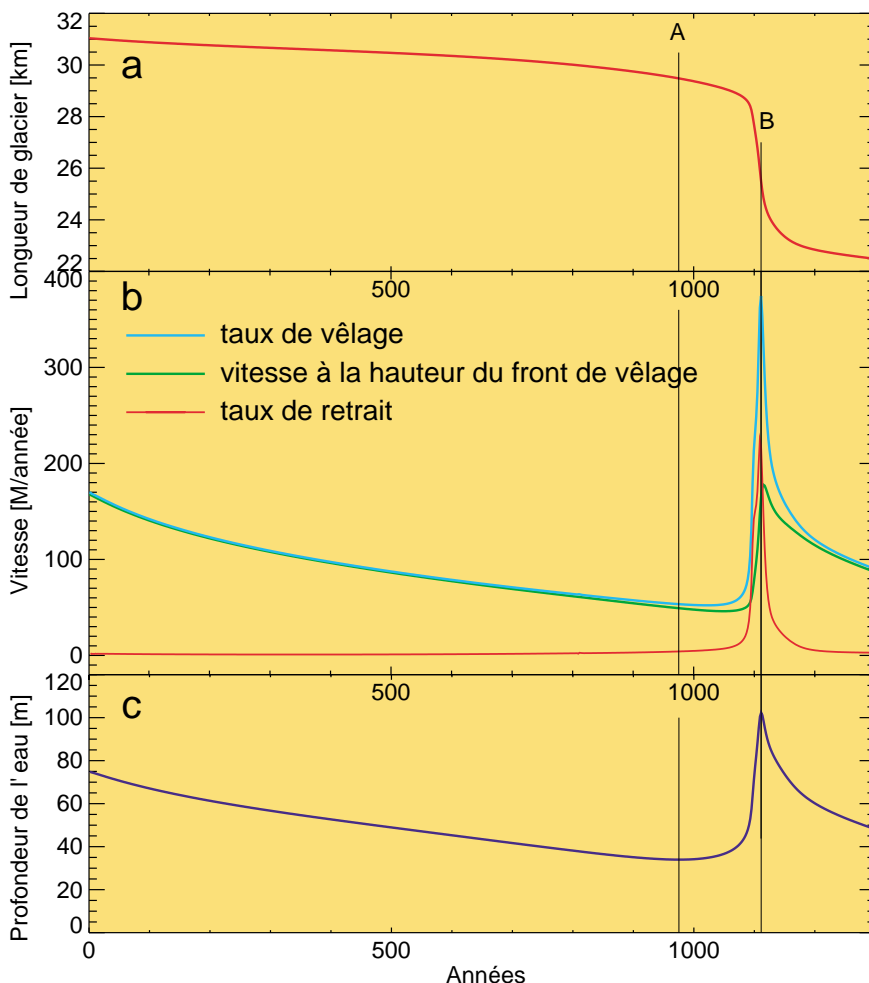


Figure 9
Modèle d'une décrue glaciaire induite par un surcreusement sous-jacent: (a) variations de la longueur du glacier; (b) taux de vêlage, vitesse à la hauteur du front glaciaire et taux de retrait; (c) profondeur de l'eau à la hauteur du front de vêlage



Bibliographie

Brown C. S., Meier M. F. et Post A. (1982): Calving speed of Alaska tidewater glaciers, with application to Columbia glacier. *Technical report*, US Geological survey professional paper 1258-C.

Meier M. F. et Post A. (1987): Fast tidewater glaciers. *Journal of Geophysical Research* 92 (B 9): 9051-9058.

Naruse R. et Skvarca P. (2000): Dynamic Features of Thinning and Retreating Glacier Upsala and Lacrustine Glacier in Southern Patagonia. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 32(4): 485-491.

Van der Veen C. J. (1996): Tidewater calving. *Journal of Glaciology*, 42(141): 375-385.

Van der Veen C. J., éditeur (1997): Calving Glaciers: Report of a Workshop. *BPRC Report No 15*, Byrd Polar Research Center, Ohio State University, Columbus, Ohio.

Vieli A. (2001): On the Dynamics of Tidewater Glaciers. *Thèse de doctorat, EPF-Zurich. No 14100*.

Warren C. R. (1993): Rapid recent fluctuations of the calving San Rafael Glacier, Chilean Patagonia: climatic or non-climatic? *Geografiska Annaler*, 75: 111-125.

OMM (2000): Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2000. Organisation météorologique mondiale, Service des publications (<http://www.wmo.ch>), n° 920.

Glacier de Columbia (Alaska), 1961. La langue glaciaire mesure 4 km de large et la profondeur de l'eau, à la verticale du front glaciaire, atteint environ 100 m

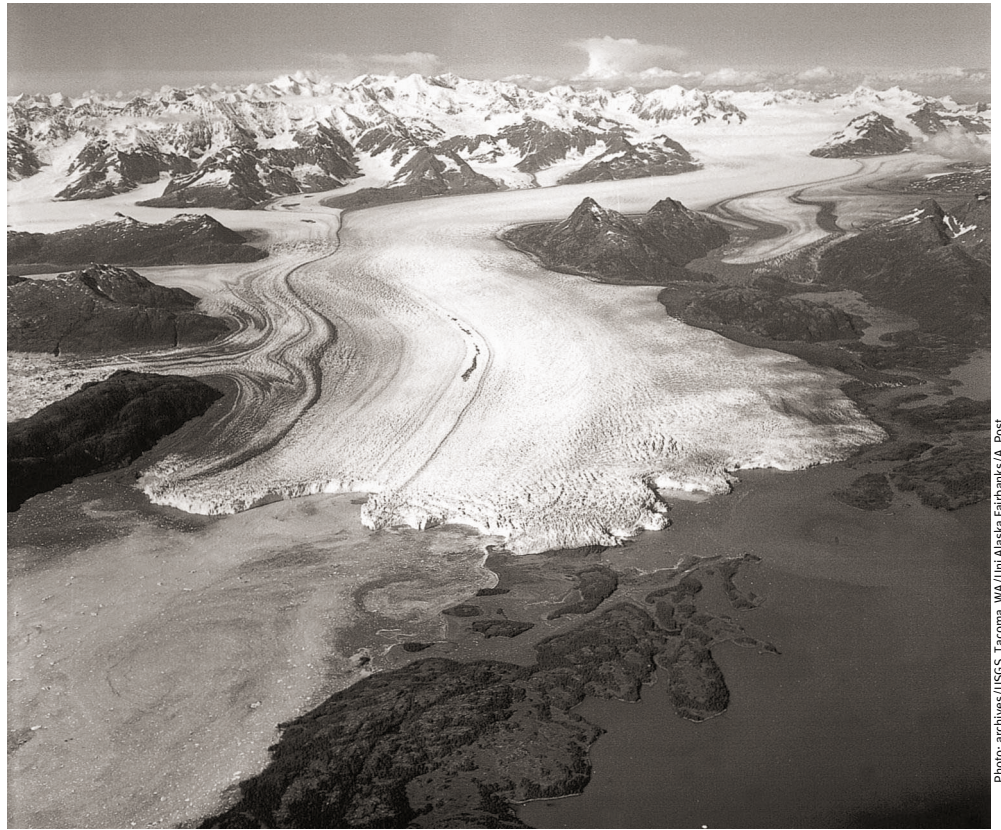


Photo: archives/USGS, Tacoma, WA/Uni Alaska Fairbanks/A. Post

Photo: archives/USGS, Tacoma, WA/Uni Alaska Fairbanks/R. Kimmel



Le glacier de Columbia, en 1994, en pleine phase de retrait. Le glacier a commencé à décroître rapidement au début des années quatre-vingt. Les nombreux icebergs recouvrant le fjord témoignent d'un taux de vêlage élevé. Depuis 1961 (cf. p. 26), le glacier s'est retiré de 10 km environ. Le fjord est profond de 350 m à la hauteur du front de vêlage