



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

**LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE
ET DE GEOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT
C.N.R.S.**

UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I

BP 96, 38402 ST MARTIN D'HÈRES CEDEX
TEL. 04.76 82.42.00
TÉLÉFAX : 04.76 82.42.01

**GLACIER DE GEBROULAZ
2004**
Rapport au Parc National de la Vanoise
Convention n°163/2004

C. Vincent et E. Le Meur



Glacier de Gébroulaz en août 2004. (C. Vincent)

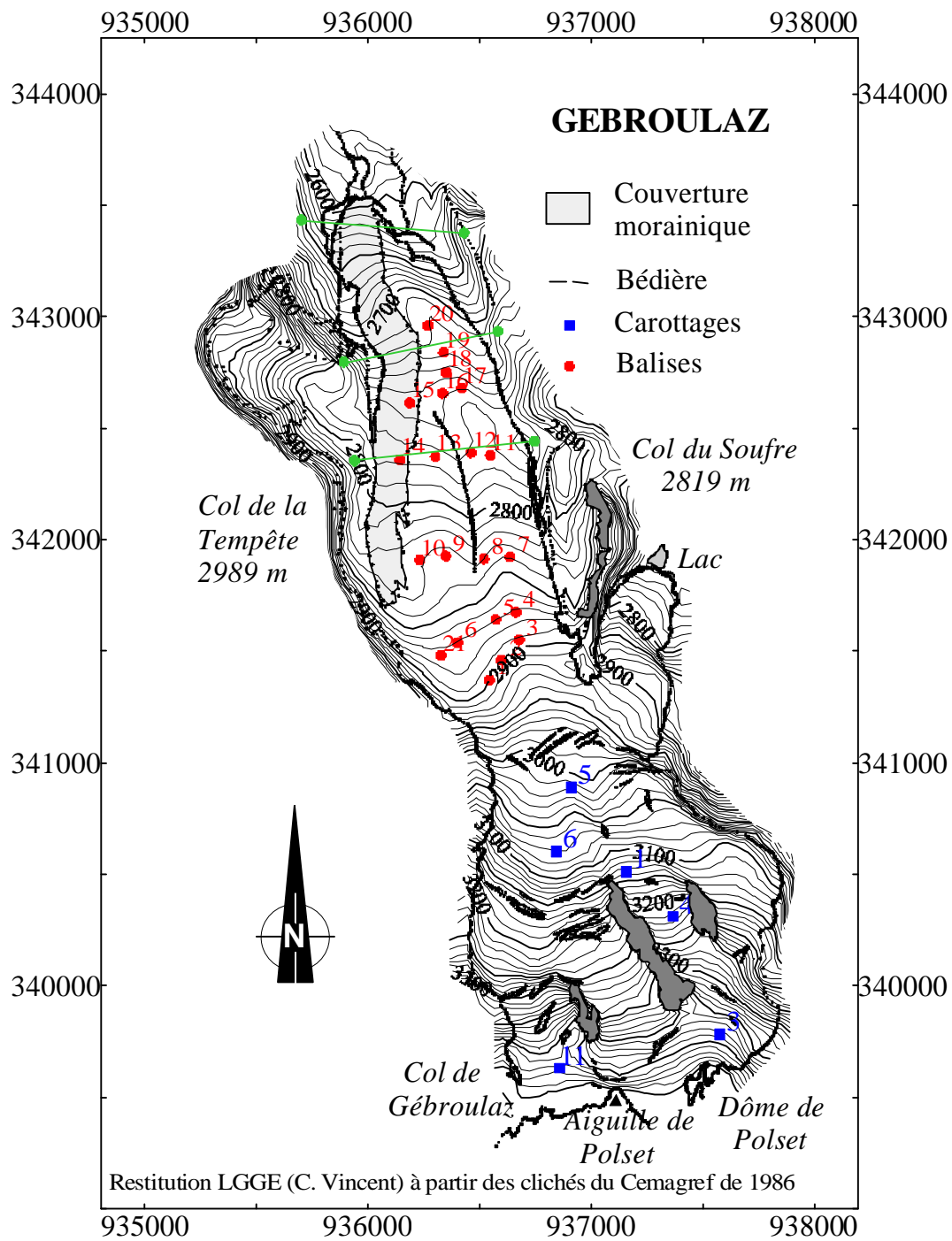


Figure n°1 : Plan de situation des profils transversaux, positions des balises d'ablation et des sites de carottage.

I. Travaux de terrain 2004, réimplantation du réseau de balises d'ablation.

Les campagnes de mesures de 2004 se sont déroulées:

- . le 26 avril 2004 pour les mesures de bilans hivernaux (carottages).
- . du 16 au 19 août 2004 pour l'implantation des balises d'ablation, les mesures topographiques et les mesures de bilans.
- . le 9 octobre 2004 pour une mesure de bilans en fin de saison d'ablation.

Ont participé à ces relevés :

- . Emmanuel Le Meur, Elodie Bruder, Michel Sacchetini et Christian Vincent le 26 avril 2004.
- . Baptiste Brun, Michel Sacchetini, Renaud Blanc et Christian Vincent du 16 au 19 août 2004.
- . Christian Vincent et M.T. Vincent le 9 octobre 2004, pour une mesure des émergences des balises à la fin de la saison hydrologique.

Cet été 2004, le réseau des balises de la zone d'ablation a été totalement renouvelé. En effet, l'ancien réseau datait de l'été 2001 et, à cause des chaleurs estivales des dernières années, les balises étaient en train de se déchausser (initialement, les balises sont implantées à 10 ou 12 mètres de profondeur et elles émergent au fil du temps avec la fonte glaciaire). Nous avons donc procédé à la réimplantation de l'ensemble des balises d'ablation (20 balises) entre 2900 m et 2680 m d'altitude. Avec le recul du glacier, les balises situées sur l'extrémité de la langue glaciaire terminale n'ont pas pu être replantées aux mêmes sites. Néanmoins, la grande majorité des balises a été réimplantée sur les mêmes positions que les années précédentes (dans un rayon d'une dizaine de mètres suivant la précision du GPS de navigation) ; le réseau n'a quasiment pas changé depuis 1994 (qui correspond au premier réseau dense sur la zone d'ablation). Pour l'étude des variations temporelles, il est primordial d'effectuer les observations de bilans toujours aux mêmes points car la variabilité spatiale des bilans est importante. Nous n'avons pas réimplanté les balises dans la zone couverte du glacier en rive gauche, car la plupart avait résisté à la fonte (moins importante). En outre, nous avons installé de nouvelles balises dans la partie haute de la zone d'ablation (balises 1, 2 et 3) qui n'était pas documentée jusqu'à présent. En 1994, le réseau initial comprenait des balises sur le plateau à 3000 mètres d'altitude, donc à proximité immédiate de la ligne d'équilibre. Mais le relevé de ces balises était problématique en été : d'une part, l'accès au cours de l'été n'est pas facile et pas rapide car une large zone de crevasses sépare ce plateau de la partie basse du glacier ; d'autre part, les balises sont sous la neige lorsque la ligne de névé est plus basse que 3000 m. Nous n'avons donc pas réimplanté de balises dans ce secteur.

L'implantation des balises au mois d'août 2004 a nécessité des transports hélicoptérés afin d'acheminer les bouteilles de gaz, les balises (100 éléments de 2 m de longueur en châtaigner), l'appareil de forage (sonde à vapeur) et les instruments topographiques (récepteurs GPS géodésiques). Une autorisation préalable avait bien sûr été accordée par la direction du Parc National de la Vanoise.

Le dépouillement des mesures a été fait par Christian Vincent.

Nous remercions les gardes du secteur du Parc de la Vanoise qui ont bien voulu nous prêter le chalet du Saut.

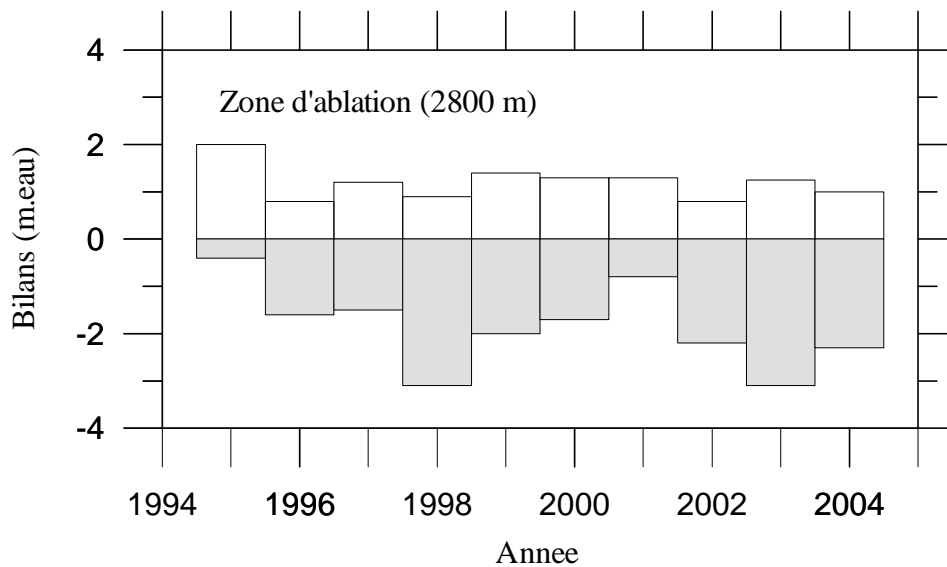
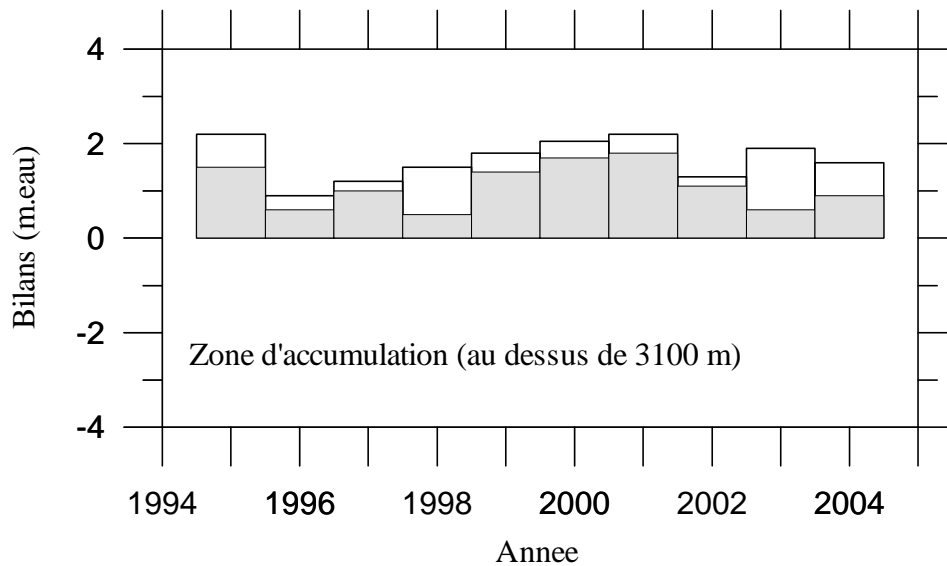


Figure n°2: Bilans hivernaux (en blanc) et annuels (en gris) observés sur le glacier de Gébroulaz depuis 1994/1995. En zone d'accumulation (graphe du haut), la référence de l'histogramme pour les bilans hivernaux est la même que celle des bilans annuels. La différence (partie blanche) représente ainsi la fusion estivale. Il en est de même pour la zone d'ablation (figure 2 en bas), mais cette fois, le bilan estival est la somme algébrique de la partie blanche (accumulation hivernale) et de la partie grisée (bilan annuel négatif). De cette façon, la partie grisée représente en zone d'accumulation la quantité de neige restante à la fin de la saison hydrologique et en zone d'ablation la quantité de glace disparue.

II. Bilans de masse, travaux de photogrammétrie:

II. a Bilans de masse de l'année 2004.

Comme pour les années précédentes, les bilans de masse hivernaux ont été déterminés à partir des carottages en zone d'accumulation et en zone d'ablation (figure 1). Les sites de carottages restent identiques d'année en année et correspondent aux sites des balises d'ablation en zone d'ablation ; bien que ces balises (implantées dans la glace) ne soient pas visibles à la surface au mois d'avril ou au mois de mai, car elles sont recouvertes de 2 à 3 mètres de neige, nous les localisons à l'aide d'un récepteur GPS de navigation. Ce positionnement est peu précis mais largement suffisant pour une localisation dans un périmètre de 10 à 20 m.

Au cours de l'été et jusqu'à la fin de l'été, nous procédons aux relevés des émergences de ces balises qui permettent de calculer les bilans de masse annuels et donc, par différence, les bilans de masse estivaux. Il est primordial de réaliser les mesures à la fin de la saison hydrologique, c'est à dire à la fin de la période de fonte estivale (avant les premières neiges hivernales qui stoppent l'ablation) afin de calculer le bilan de masse annuel de l'année en cours. Cette date peut beaucoup varier d'une année à l'autre ; en 2004, la fin de la saison d'ablation est relativement tardive (neiges hivernales persistantes en dessous de 2500 m vers le 10 octobre).

Les valeurs de bilans de masse au dessus de 3100 m et à l'altitude de 2800 m sont reportés sur la figure 2 à titre d'exemple et de comparaison avec les années précédentes. Ces valeurs sont issues, non pas d'une seule observation, mais de la moyenne d'un ensemble d'observations (3 à 5) ; elles sont par conséquent représentatives des bilans de masse des régions concernées. D'après cette figure 2, on peut conclure que les bilans hivernaux de l'hiver 2003/2004 sont assez moyens par rapport aux observations de la dernière décennie, que ce soit en zone d'accumulation ou en zone d'ablation. Il faut noter aussi que la variabilité temporelle des bilans de masse hivernaux est bien moindre que celles des bilans estivaux (et ceci est confirmé par les résultats issus de longues séries d'observation). Les bilans de masse estivaux en 2004 sont très négatifs puisqu'ils atteignent des valeurs de -3.3 m d'eau à 2800 m d'altitude. Ces valeurs restent malgré tout moins négatives que celles de 2003 (-4.35 m eau) et de 1998 (-4.0 m) à même altitude. L'été 2004 n'est pas un été particulièrement chaud ; en revanche, il se caractérise par la durée de la saison estivale qui s'étend jusqu'au mois d'octobre. La fonte était encore très active au mois de septembre (-1 m d'eau de fonte entre le 17 août et le 9 octobre 2004 à 2800 m d'altitude, ce qui représente environ un tiers de l'ablation estivale totale).

Le bilan total du glacier, calculé à partir de l'ensemble des observations, est de -0.79 m d'eau en 2003/2004.

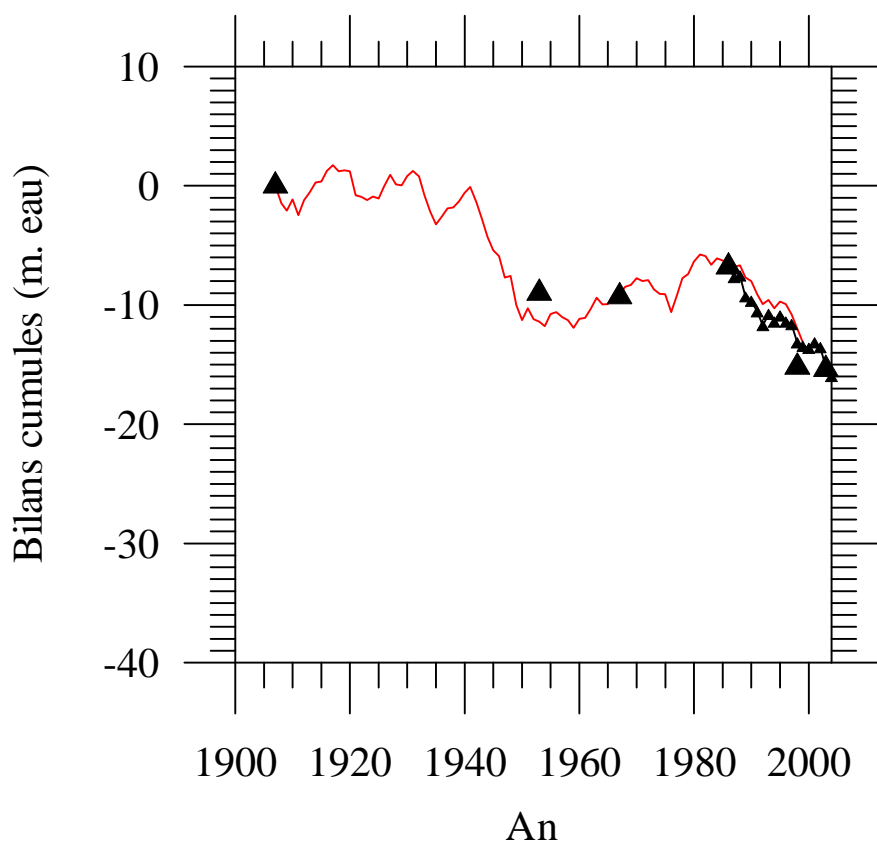


Figure n°3 : Bilans cumulés du glacier de Gébroulaz depuis le début du 20^{ème} siècle. Ils représentent la variation d'épaisseur moyenne sur l'ensemble de la surface du glacier, exprimée en mètres d'eau. Ainsi, le glacier de Gébroulaz a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 16.0 m depuis 1905. Les petits triangles représentent les résultats des mesures directes de terrain des bilans de masse ; les triangles plus larges représentent les résultats obtenus d'une part à partir des restitutions photogrammétriques réalisées par le LGGE grâce aux clichés photogrammétriques aériens, d'autre part de la carte topographique du service géographique de l'Armée établie en 1905/1906. La courbe continue résulte d'un modèle de calcul réalisé à partir des données météorologiques des stations de plaine ou de vallée (Précipitations de Besse en Oisans entre le 1^{er} octobre et le 31 mai, et températures de Lyon entre 1^{er} mai et le 31 septembre).

(Adapté de Vincent C., Journal of Geophysical Research, 4 octobre 2002 et de Vincent et Blanc, Article à paraître à la revue des Travaux Scientifiques du Parc de la Vanoise)

II.b Bilans de masse des 50 dernières années, obtenus par photogrammétrie:

Les fluctuations de volume du glaciers de Gébroulaz sont documentées depuis 1905. Les restitutions photogrammétriques permettent de calculer les variations de volume sur l'ensemble de la surface glaciaire au cours des 50 dernières années. Des restitutions dans le passé avaient déjà permis d'obtenir la variation globale du glacier au cours du 20^{ème} siècle. En 2004, un très important travail de restitution photogrammétrique a été fait au LGGE afin de déterminer la surface topographique du glacier en 1953 (les premiers clichés photogrammétriques de l'IGN utilisables dans le massif de la Vanoise), en 1998 et en 2003. Cette méthode permet d'atteindre une précision métrique ou décimétrique suivant les chambres de prises de vue utilisées, l'échelle des prises de vue et la qualité des points d'appui.

Bien que la chambre de prise de vue de 1953 soit de qualité médiocre (distorsions de 20 microns sur les bords de l'objectif), nous avons pu réaliser une restitution avec une précision d'environ 2 mètres en planimétrie et de 1.5 m en altimétrie. Les points d'appui de cette restitution sont des points naturels (rochers caractéristiques) et sont identiques à l'ensemble des restitutions. Ces points avaient été déterminés préalablement avec des techniques topographiques classiques. Seules les restitutions photogrammétriques récentes (1986, 1998, 2003) bénéficient de points d'appui spécialement installés dans ce but (bâches du Cemagref ou croix de peinture du LGGE). En 2003 et 2004, le réseau a été complété sur le terrain ; de nouveaux points, tels que le réservoir du système de déclenchement d'avalanches de Val Thorens, ont permis de compléter ce réseau de points d'appui. Pour ces restitutions récentes, la précision est meilleure que le mètre. Les restitutions photogrammétriques permettent d'obtenir la topographie de la surface du glacier le 30 août 1953, le 11 septembre 1986, le 31 août 1998 et le 20 septembre 2003 (Figure 3, larges triangles).

Les restitutions de 1953, 1998 et 2003 ont été faites sur une grille régulière (maille de 25 mètres sur le glacier et de 50 mètres à l'extérieur du glacier) afin d'améliorer la qualité de la comparaison des modèles numériques obtenus.

Les résultats issus de ces restitutions donnent les résultats reportés dans le tableau suivant :

	Bilans de masse (m. eau) cumulés calculés à partir de la comparaison globale des MNT (Modèle Numérique de Terrain)	Bilans de masse (m. eau) cumulés calculés à partir de la comparaison de 15 profils transversaux
1953-1986	+2.1	+1.9
1986-1998	-8.4	-8.1
1998-2003	0.0	-0.2

Les résultats des bilans de masse cumulés depuis 1905 sont reportés sur la figure 3. Le glacier a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 16.0 m depuis 1905. L'ensemble de ces résultats (bilans de masse cumulés) sont détaillés dans un article à paraître dans la revue des travaux scientifiques du Parc de la Vanoise.

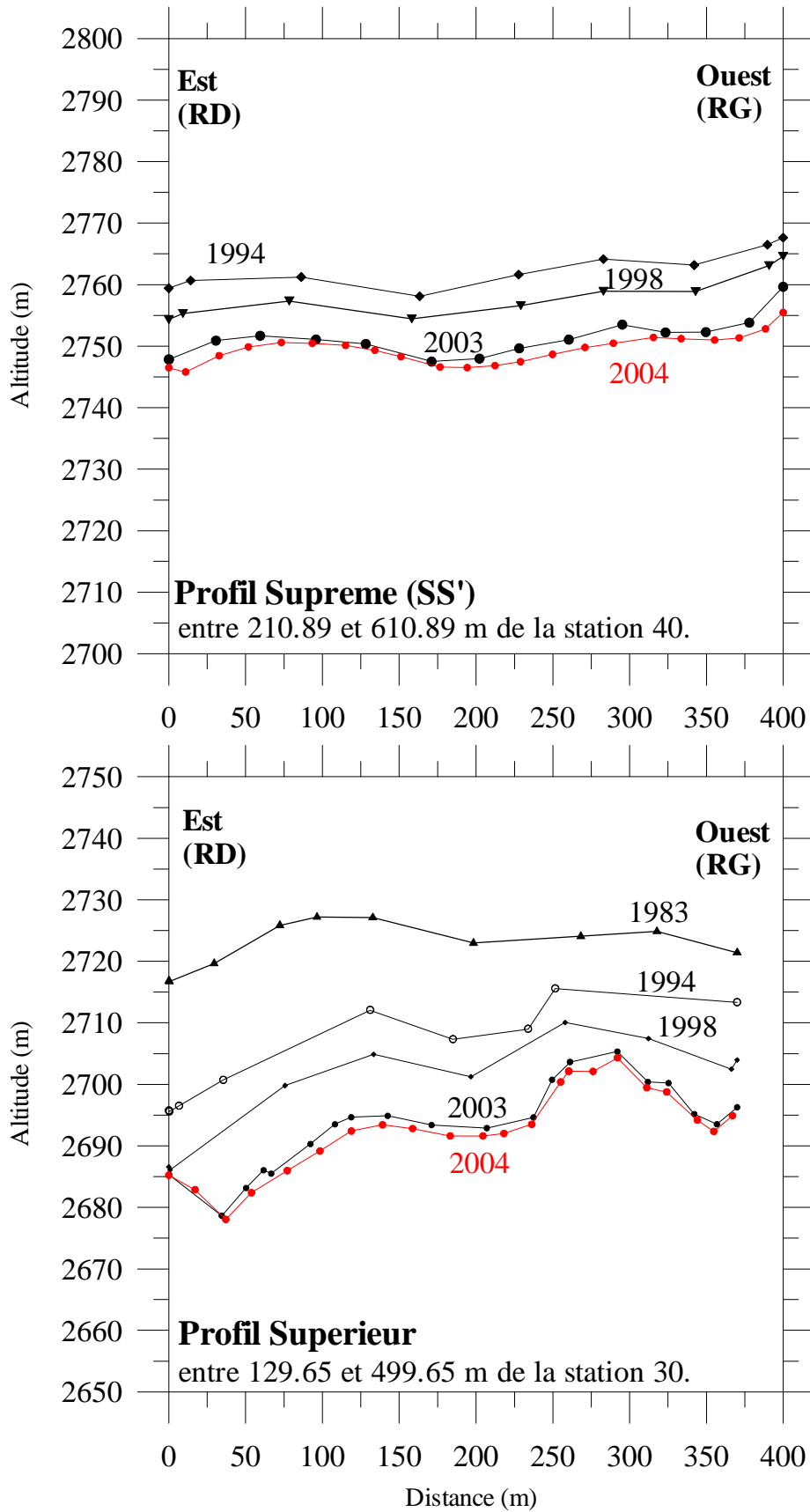


Figure n° 4 : Variations d'altitude aux profils supérieur et suprême (profils vus de l'aval).

III. Variations des épaisseurs aux profils transversaux (figure n°4):

Les observations topographiques des profils transversaux ont été effectuées le 17 août 2004. Ces observations sont réalisées à l'aide de récepteurs GPS géodésiques. Cette méthode permet d'atteindre une précision centimétrique mais nécessitent deux récepteurs ; l'un des récepteurs est mis en place sur un point fixe connu en coordonnées (Système Lambert dans notre cas) et l'autre récepteur est placé sur le point à déterminer. Le traitement des données utilise donc un calcul différentiel ; les données des signaux satellitaires acquis aux 2 récepteurs sont comparées et traitées afin de fournir les coordonnées des points inconnus par rapport à celles du point fixe. Si aucune liaison radio n'existe entre les 2 récepteurs (et c'est notre cas), le traitement est obligatoirement différé, à la suite de la campagne de mesures. Il est donc, par cette méthode de mesures, impossible de travailler en « temps réel », car les coordonnées des points inconnus sont obtenues après la campagne de mesures. Aussi, la méthode ne permet pas de se localiser sur le terrain précisément sur les profils transversaux . Pourtant, pour la mesure des altitudes du profil, il est essentiel de faire les observations sur la ligne de chacun des profils. Pour ce faire, nous utilisons donc une méthode qui double le nombre d'observations mais qui permet d'obtenir les altitudes rigoureusement sur les lignes transversales. Elle consiste à se positionner grossièrement à l'aide d'un instrument de navigation aux extrémités des lignes, de parcourir le profil transversal et d'effectuer systématiquement des observations GPS géodésiques 10 m à l'amont et 10 m à l'aval du profil. Les points du profils sont par la suite interpolés entre les points observés à l'amont et à l'aval du profil. Il semble que cette méthode donne des résultats tout à fait satisfaisants si l'on en juge par les résultats obtenus sur les 2 lignes transversales en 2003 et en 2004 (figure 4).

Les données globales des altitudes des profils transversaux sont reportées en figure 5.

Profil Suprême SS':

Depuis 1993, nous avons rétabli l'ancien profil SS' (vers 2760 m d'altitude) des Eaux et Forêts à proximité du Col du Soufre. Ce profil avait été implanté en 1953 (au moment où le profil inférieur disparaissait). Ce profil a été aussi rattaché au réseau NGF (Nivellement Général de la France). L'altitude de 1986 est issue de la restitution photogrammétrique des clichés du 11 septembre 1986.

Profil supérieur

Le profil supérieur (2700 m environ) est mesuré depuis 1907 avec une large interruption entre 1966 et 1983. Les variations d'épaisseurs aux profils transversaux pour l'année 2003/2004 sont les suivantes:

- 1.3 m au profil SS'
- 1.3 m au profil supérieur

Le profil inférieur est aujourd'hui déglacé.

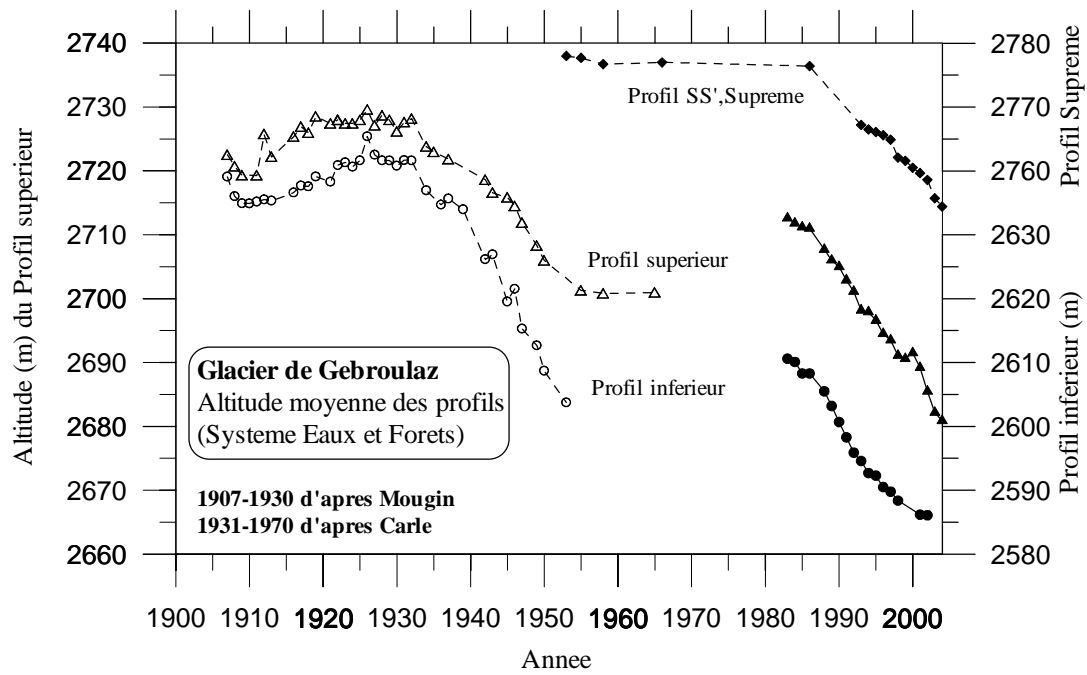


Figure n 5: Variations des epaisseurs aux trois profils transversaux (altitudes dans le syteme des Eaux et Forets)

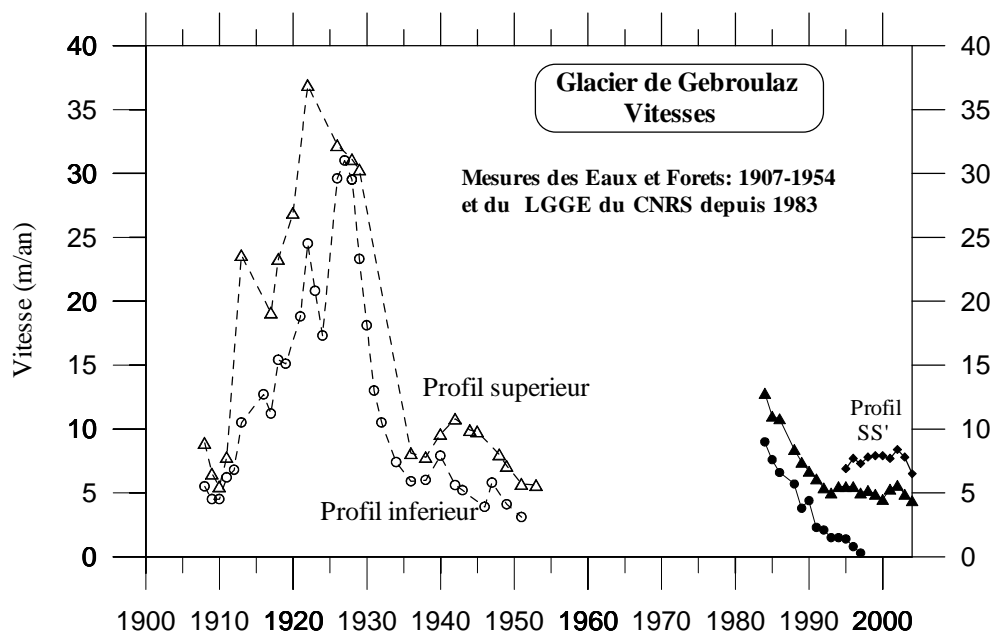


Figure n 6: Variations de vitesses sur les 3 profils transversaux (depuis 1983, les vitesses sont celles du centre du glacier)

IV. Variations du front.

Le front du glacier a été mesuré le 18 août 2004 (Figure n°7). Il n'a quasiment pas changé depuis le mois de septembre 2003.

VI. Conclusions:

Le glacier de Gébroulaz continue de décroître en 2004. Sur l'année hydrologique 2003/2004, il a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 0.79 m. Cette perte de masse est en grande partie due à la durée de la saison d'ablation qui s'est prolongée jusqu'au mois d'octobre. L'épaisseur de la langue terminale du glacier a diminué de 1.3 m. Les vitesses d'écoulement ont également diminué aux deux profils transversaux (6.5 m/an et 4.4 m /an).

Depuis 1986, le bilan de masse cumulé du glacier est de -9.2 m d'eau, ce qui signifie que le glacier a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 9.2 m en moyenne sur toute sa surface. Cette perte de masse est continue sauf pour les années 1988, 1993, 1995 et 2001.

Les variations de masse du glacier de Gébroulaz sont désormais bien documentées grâce aux travaux de restitutions photogrammétriques effectués au cours de l'année 2004 : les restitutions des clichés de 1953, 1998 et 2003 ont permis de compléter nos données. Ces résultats confirment que le glacier a gagné du volume entre 1953 et 1986.

Ces travaux photogrammétriques ont permis l'élaboration d'une carte topographique détaillée du glacier (restitution de l'année 2003).

Ces observations glaciologiques sont en cours de publication dans la revue des Travaux Scientifiques du Parc de la Vanoise.

*A Saint Martin d'Hères, le 10 décembre 2004
C. Vincent*

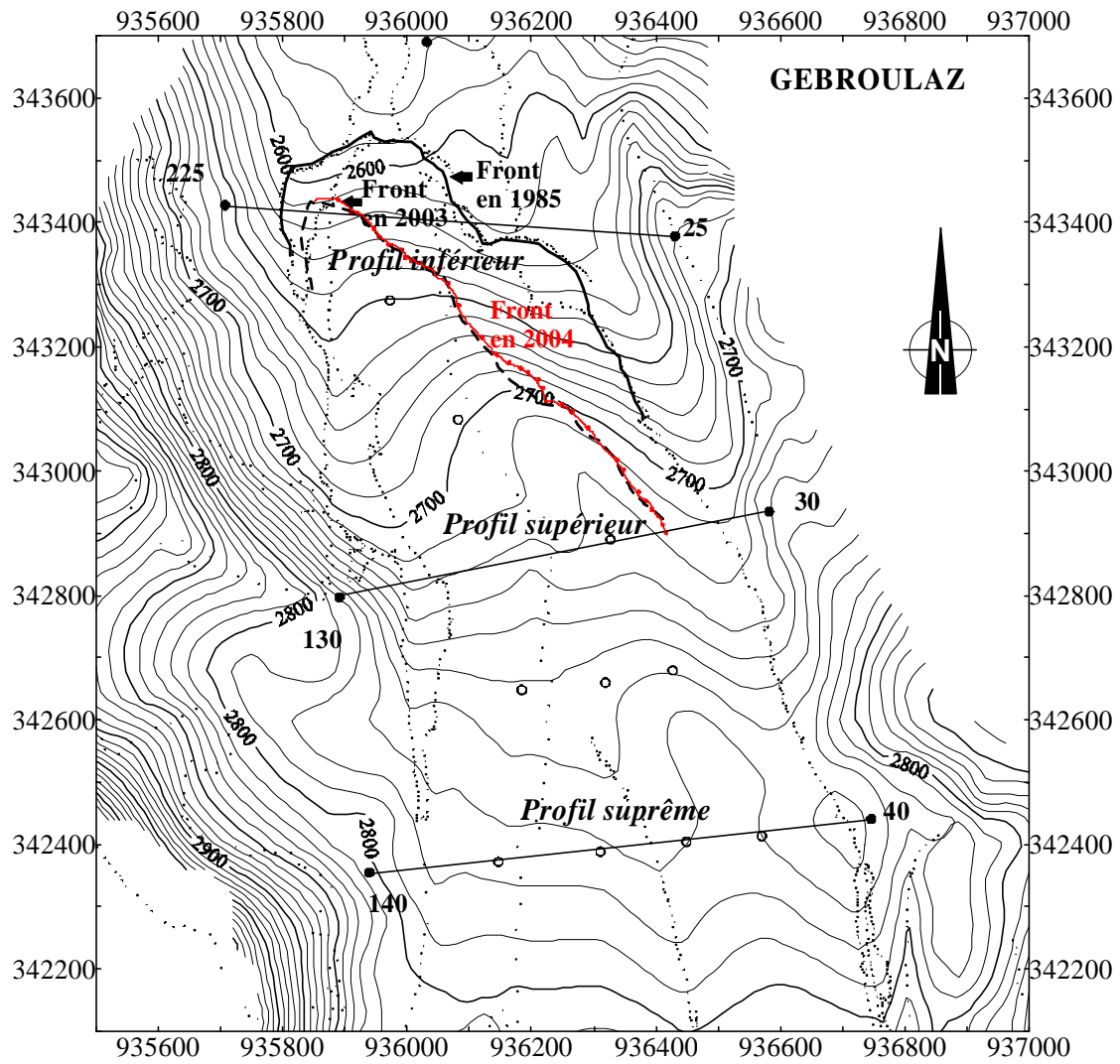


Figure n° 7 : Evolution du front du glacier depuis 1985.

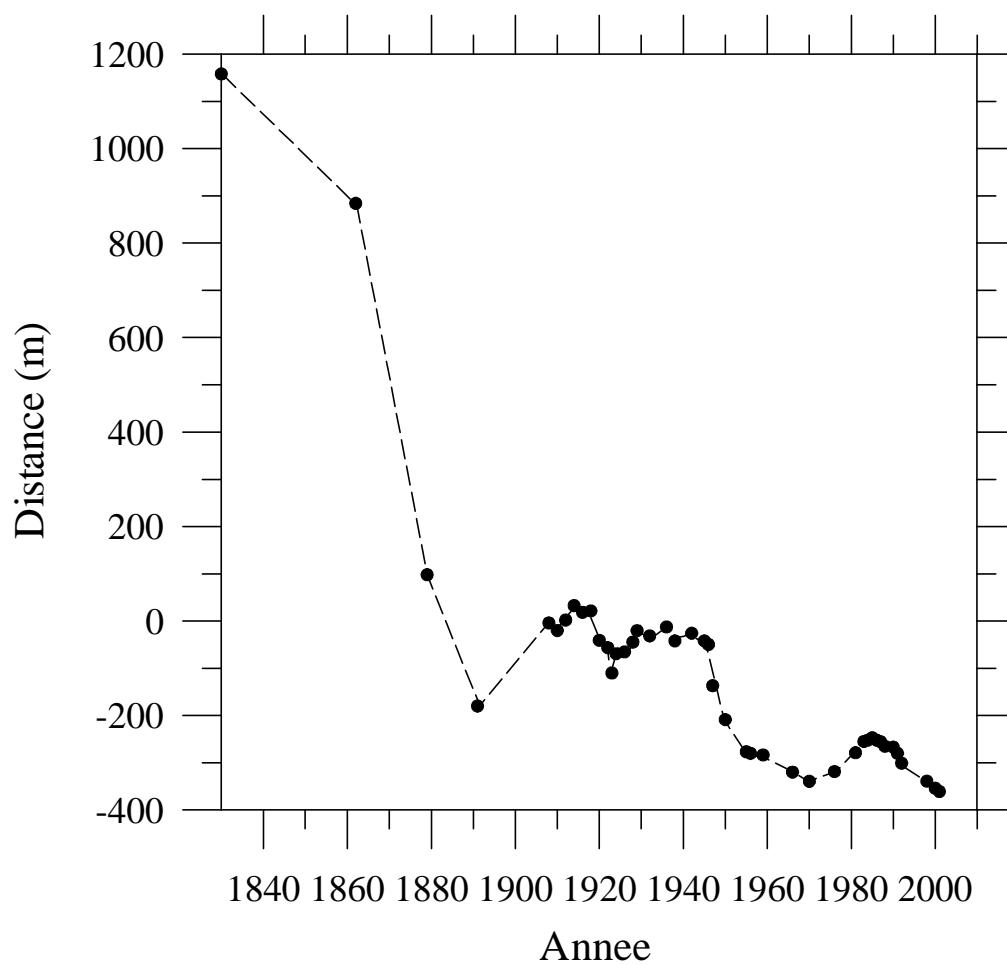


Figure n°8 : Fluctuations de longueur du glacier de Gébroulaz depuis 1870.

ANNEXE I

Vitesses mesurées sur les profils transversaux

Les vitesses sont calculées à partir des relevés topographiques de pierres placées chaque année sur les mêmes profils transversaux (la méthode de mesure est similaire à celle adoptée par les Eaux et Forêts). Dans le tableau ci-dessous, depuis 1983, nous avons reporté non pas les valeurs moyennes des vitesses en surface mais celles des vitesses au centre du glacier (donc les vitesses maximales mesurées).

Date	Vitesses au centre du glacier		
	Profil SS'	Profil sup.	Profil inf.
12.08.1983			
21.08.1984		12.8 m/an	9.0 m/an
25.10.1985		11.0 m/an	7.6 m/an
20.08.1986		10.8 m/an	6.6 m/an
24.08.1988		8.4 m/an (sur 2 ans)	5.7 m/an (sur 2 ans)
01.09.1989		7.4 m/an	3.8 m/an
01.09.1990		6.7 m/an	4.4 m/an
30.08.1991		6.1 m/an	2.3 m/an
20.08.1992		5.4 m/an	2.1 m/an
17.08.1993		5.0 m/an	1.5 m/an
11.08.1994		5.5 m/an	1.5 m/an
17.08.1995	6.9 m/an	5.5 m/an	1.4 m/an
05.09.1996	7.7 m/an	5.5 m/an	0.8 m/an
02.09.1997	7.3 m/an	5.0 m/an	0.3 m/an

Date	Vitesses au centre du glacier		
	Profil SS'	Profil sup.	Profil inf.
1.09.1998	7.8 m/an	5.2 m/an	1.1 m/an
31.08.1999	7.9 m/an	4.9 m /an	
24.08.2000	7.9 m/an	4.5 m/an	
28.08.2001	7.7 m/an	5.3 m/an	
21.08.2002	8.4 m/an	5.6 m /an	
27.08.2003	7.8 m/an	4.9 m/an	lit rocheux
17.08.2004	6.5 m/an	4.4 m/an	lit rocheux

ANNEXE II

Variations du front depuis 1983

Date	Surface du front /ligne 25-25b m2	Base	Distance du front à la ligne	Avance ou recul (m)
12.08.1983	19602	230	85	
21.08.1984	20189	230	88	+3
25.10.1985	21305	230	93	+5
20.08.1986	20272	230	88	-5
1987				
25.08.1988	17225	230	75	-13
10.09.1989				
10.09.1990	14446	230	62.8	-12.2
30.08.1991	11606	230	50.5	-12.3
20.08.1992	6825	230	29.7	-20.8
01.09.1998	-1860	230	-8	-37.7
24.08.2000				-15
28.08.2001	-6862	230	-30	-7

Date	Surface du front /ligne 130-30 (m2)	Base	Distance du front à la ligne	Avance ou recul (m)
25.10.1985	298000	480	621	
25.09.2003	187000	480	390	231

ANNEXE III: Variations des épaisseurs aux profils transversaux

Profil SS':

Date	Altitude Eaux et Forêts (m)	Altitude NGF (m)
1953	2778.0	2773.3
1955	2777.7	2773.0
1959	2776.7	2772.0
1966	2777.0	2772.3
1986 (photogrammétrie)	2776.4	2771.7
17.08.1993	2767.2	2762.4
11.08.1994	2766.5	2761.8
17.08.1995	2766.1	2761.4
05.09.1996	2765.6	2760.9
02.09.1997	2764.9	2760.2
01.09.1998	2762.1	2757.4
31.08.1999	2761.6	2756.9
24.08.2000	2760.5	2755.8
28.08.2001	2759.65	2754.95
21.08.2002	2758.6	2753.9
27.08.2003	2755.7	2751.0
16.08.2004	2754.4	2749.7

Profil supérieur

Le profil supérieur (2700 m environ) est mesuré depuis 1907 avec une large interruption entre 1966 et 1983.

Date	Altitude Eaux et Forêts	Altitude NGF
12.08.1983	2712.6	2723.9
21.08.1984	2711.8	2723.1
25.10.1985	2711.2	2722.5
20.08.1986	2711.0	2722.3
1987		
25.08.1988	2707.7	2719.0
01.09.1989	2706.0	2717.3
01.09.1990	2705.1	2716.4
30.08.1991	2702.9	2714.2
20.08.1992	2701.1	2712.4
17.08.1993	2698.2	2709.5
11.08.1994	2697.9	2709.2
17.08.1995	2696.6	2707.9
05.09.1996	2694.5	2705.8
02.09.1997	2693.5	2704.8
01.09.1998	2691.1	2702.4
31.08.1999	2690.6	2701.9
24.08.2000	2691.5	2702.8
28.08.2001	2689.2	2700.5
21.08.2002	2685.5	2696.8
27.08.2003	2682.2	2693.5

Profil inférieur:

Date	Altitude Eaux et Forêts	Altitude NGF
12.08.1983	2610.6	2622.2
21.08.1984	2610.1	2621.8
25.10.1985	2609.3	2620.9
20.08.1986	2608.3	2619.9
1987		
25.08.1988	2605.5	2617.2
01.09.1989	2603.2	2614.9
01.09.1990	2600.7	2612.3
30.08.1991	2598.3	2609.9
20.08.1992	2595.9	2607.5
17.08.1993	2594.6	2606.2
11.08.1994	2592.7	2604.3
17.08.1995	2592.3	2604.0
05.09.1996	2590.5	2601.6
02.09.1997	2589.8	2601.0
01.09.1998	2588.4	2600.1
28.08.2001	2586.2	2597.9
21.08.2002	2586.0	2597.7 déglacé

ANNEXE IV:

Coordonnées des stations topographiques (Lambert III)

Correction Lambert: +90 mm/km

Réduction au niveau de la mer et correction Lambert: -0.30 m/km (à 2500m)

Coordonnées recalculées en 2003

Point	Coordonnées	Gisements	Observations
IGN 20 Sommet Pecllet	936275.54 340030.87 3561.9		
106	936979.55 341405.76 2941.33		
140 (S') Profil SS' RG	935938.78 342354.55 2808.46 (sol) 2809.52 (embase)	Profil: 93.295 gr 50: 77.779 gr	Pilier LGGE dist. d'application du profil: entre 200 et 600 m de 140. A 210.89 m de 40.
40 (S) (août 1993)			marque peinture spit. bloc instable (1.2 m /an !)
240 (S) (septembre 2000)			marque peinture et spit. Même repère que 40.
130 (30 b) Profil supérieur RG (Distance d'application du profil: 204 à 574 m de 30b)	935890.86 342796.49 2785.66 (sol) 2786.66 (embase)	profil: 87.394 gr	Pilier LGGE dist. d'application du profil: entre 204 et 574 m de la station 130. A 129.65 m de 30.
230	935889.43 342795.68 2787.04		Plaquette LGGE
30 Profil supérieur			station disparue vers 1993 (bloc)
225(25b) Profil inférieur RG	935701.20 343433.44 2667.29 (embase)	Profil: 104.906 gr	station 125 disparue en 1999 dist d'application: entre 191.85 et 331.85 m de la station 225
25 Profil inférieur RD	936429.95 343377.16 2688.53		
2	936031.07 343689.61 2581.21		Bâche Cemagref
Station front n°85 (moraine de 1985)	935932.67 343518.90 2588.70		
Station crête 2003 N°82	935748.35 342126.59 3007.62		Plaquette
Station 50	936777.26 342659.72 2839.35		Repère métallique LGGE

ANNEXE V: Coordonnées des extrêmités des profils

Profil sup RD	45°18'25.761	6°37'41.536
Profil sup RG	45°18'24.012	6°37'24.723
Profil Suprême RD	45°18'09.709	6°37'44.118
Profil Suprême RG	45°18'09.021	6°37'25.776

ANNEXE VI: Coordonnées des Balises d'ablation

Balise 1	45°17'35.8	6°37'42.0
Balise 2	45°17'38.6	6°37'44.7
Balise 3	45°17'41.4	6°37'48.5
Balise 4	45°17'45.4	6°37'48.1
Balise 5	45°17'44.5	6°37'43.9
Balise 6	45°17'41.5	6°37'35.8
Balise 7	45°17'53.5	6°37'47.5
Balise 8	45°17'53.4	6°37'42.1
Balise 9	45°17'54.1	6°37'34.3
Balise 10	45°17'53.7	6°37'28.9
Balise 11	45°18'08.4	6°37'44.6
Balise 12	45°18'08.9	6°37'40.6
Balise 13	45°18'08.6	6°37'33.2
Balise 14	45°18'08.4	6°37'25.9
Balise 15	45°18'16.6	6°37'28.6
Balise 16	45°18'17.7	6°37'35.4
Balise 17	45°18'18.3	6°37'39.4
Balise 18	45°18'20.8	6°37'36.4
Balise 19	45°18'23.7	6°37'36.0
Balise 20	45°18'27.7	6°37'33.1
Balise 21	45°17'39.6	6°37'32.5

ANNEXE VII: Coordonnées des sites de mesures en zone d'accumulation

Site	11 vers col de Gébroulaz 3425 m	3 Sous le Dôme de Polset 3410 m	4 Combe de Polset 3220 m
Position Coord. Lambert	936860 339630	937580 339780	937370 340310
WGS 84	45°16'36.5" 6°37'51.0"	45°16'42.6" 6°38'25.6"	45°16'59.1" 6°38'19.2"

Site	5 Plateau 3020 m	1 Pied du Rognon 3100 m	6 Combe de Peclet 3070 m
Position Lambert	936900 340870		936846 340600
WGS 84	45°17'19.0" 6°37'57.1"	45°17'07.3" 6°38'11.7"	45°17'10.4 6°37'54.0

Annexe VIII : Points d'appui photogrammétriques

106	936979.6796	341405.7709	2941.2890 station
2	936031.0663	343689.6126	2581.2137 bache
225	935701.1221	343433.3981	2679.3117 plaquette
3	937106.7542	342417.5449	2847.1212 bache
5	935900.2621	342727.2263	2795.8325 bache
10	935792.2238	341665.7769	3071.9600 bache
2	936031.0663	343689.6126	2581.2137 bache (vers le front)
6	936983.9099	341390.0021	2941.3592 bache
68	935771.9501	341849.5118	3026.9468 croix peinture sur la crête
69	935963.6311	342445.1215	2797.8185 croix peinture vers station 140
85	935932.6765	343518.9011	2588.6967 croix peinture au front (moraine 1985)
7903	936222.7983	341739.2960	2819.6906 croix peinture sur un rocher, sur glacier
(attention au déplacement). (mesuré en aout 2003).			
80	936450.2032	343427.8829	2667.2070 croix peinture proche de la station 25
81	935841.8493	341605.2317	3058.5356 gazex (sommets, centre)
225	935701.2002	343433.4410	2667.2881 plaquette
130	935890.8613	342796.4897	2785.66 pilier, altitude/sol
140	935938.7759	342354.5503	2808.4643 pilier, altitude /sol
230	935889.4313	342795.6731	2787.0446 plaquette
25	936429.9527	343377.1631	2688.5311 station, marque peinture
82	935748.3295	342126.5050	3007.6174 station (plaquette) sur la crête
120	936275.54	340030.87	3561.90 Point géodésique IGN, sommet de Pécelet.
73	937326.836	341120.137	2906.10 station
30	936580.758	342934.912	2750.67 ancienne station (disparue)
51	936246.997	340008.000	3554.281 rocher proche de Pecelet
52	936236.401	339996.700	3550.694 rocher proche de Pecelet
53	936306.128	339964.583	3513.467 croix
54	936330.841	339960.418	3507.000 rocher proche de Pecelet
57	936406.913	339885.634	3499.825
58	936406.703	339881.207	3499.857
59	936349.555	339877.668	3454.281 croix
60	936430.468	339260.162	3376.072
62	936748.200	339343.902	3506.899 gendarme
63	936987.254	339455.153	3488.426
64	937018.671	339455.262	3499.108 gendarme
65	937096.106	339475.643	3531.039 Polset, sommet
8	937523.517	339568.998	3491.832 bache
7	937478.291	340302.934	3264.027 bache
74	937804.465	341713.753	2522.401 extrémité bloc
75	937893.628	341694.296	2481.619 extrémité bloc
76	937909.559	341629.292	2486.252 croix peinture
77	938380.166	341463.118	2438.119 croix peinture (lac)
78	938396.189	341471.310	2437.170 sommet bloc
70	936801.506	342204.877	2803.565 croix peinture
71	936803.516	342173.408	2808.284
72	936931.849	341958.429	2823.835
14	936236.829	343405.742	2617.139 cairn
13	936137.606	343637.970	2592.434 sommet bloc
12	935745.796	343465.613	2627.400 sommet bloc
11	935707.716	343426.915	2665.114 sommet bloc
20	935947.186	342398.753	2804.343 sommet rocher
21	935937.767	342354.956	2807.148 sommet rocher
41	935930.420	342340.408	2816.082 sommet rocher
86	935861.8815	341000.3309	3089.2627 coin SO embase pylone
87	935864.7875	340999.7402	3089.5120 coin NE embase pylone
88	935871.1369	340987.2525	3097.2470 plateforme bois, gare arrivée télésiège
89	935876.9785	340993.3687	3097.1206 idem
90	936868.5691	342339.1410	2767.0261 point altimétrique (rocher plat)
91	936724.6453	342752.8631	2787.5992 idem
92	936450.3192	343427.8410	2667.1647 croix peinture (2003)
93	935836.7875	343913.2331	2557.9170 croix peinture, aval du front, (2003)

ANNEXE IX. Considérations sur le réseau géodésique:

Les profils transversaux relevés par les Eaux et Forêts depuis 1907 et repris depuis 1983 par le LGGE sont indiqués sur la figure n°1:

- le profil SS' ou profil 40-40b
- le profil supérieur ou profil 30-30b
- le profil inférieur ou profil 25-25b

De 1983 à 1993, ces profils étaient relevés à partir de stations topographiques en rive droite. Depuis 1994, des piliers ont été installés en rive gauche du glacier pour des raisons de commodité et de stabilité (piliers 40b, 30b, et 25 b, sur la figure n°1).

En 2003, le réseau de triangulation a été totalement revu à l'aide de récepteurs géodésiques GPS, par la méthode différentielle. En premier lieu, les stations 106 (sommet de la moraine) et 225 (extrémité du profil inférieur) ont été rattachées au réseau REGAL (réseau permanent de stations GPS dans les Alpes, géré par l'Observatoire des Sciences de l'Univers). La station permanente la plus proche est localisée à Modane. Ainsi, nous avons déterminé avec une précision centimétrique les coordonnées de ces stations dans le système IGN national Lambert III. Ces coordonnées indiquent des écarts de 20 à 80 cm en planimétrie avec les coordonnées antérieures. Ces différences ont deux causes : d'abord la méthode de triangulation entreprise en 1989 par des moyens topographiques classiques ne permettaient pas d'espérer un positionnement absolu meilleur que 30 cm dans le système Lambert. En effet, la triangulation avait été effectuée du sommet de Pecllet (repère géodésique IGN) en visant d'autres repères géodésiques (Dent Parrachée, Chanrossa) non matérialisé préalablement. Les angles de référence (gisements) ont donc été déterminés avec une incertitude de quelques milligrades. La deuxième cause de l'imprécision de l'ancienne triangulation dans le système Lambert provient de l'instabilité des stations topographiques en rive droite. Nous avons notamment relevé des déplacements de plusieurs cm par an des stations 30 et 40. Etant donné que les opérations de triangulation se sont déroulées sur plusieurs années, ces déplacements ont directement altéré la précision du réseau de triangulation, et en particulier lors du transfert des stations topographiques en rive gauche.

Néanmoins, ces imprécisions sur les coordonnées antérieures n'ont pas entaché la précision des mesures relatives par rapport aux stations de référence. Le problème de stabilité des stations sur les moraines de la rive droite ont été résolus lorsque nous avons déplacé, en 1994, toutes les stations en rive gauche (piliers 40b, 30b, et 25b). Seules les coordonnées absolues (par rapport au système national) sont entachées d'incertitude. Le nouveau réseau géodésique de 2003 autour du glacier de Gébroulaz répond à deux critères :

- il est désormais rattaché avec une précision centimétrique au réseau IGN Lambert III. Cela présente l'avantage de travailler directement dans le système WGS84 (système international utilisé pour les récepteurs GPS) en appliquant seulement une transformation standard entre le système WGS84 et la projection Lambert.
- nous avons voulu conserver un système altimétrique le plus proche possible du réseau antérieur afin d'assurer la comparaison des travaux topographiques futurs avec les travaux antérieurs, et notamment les travaux photogrammétriques de 1986. Nous avons donc choisi un système qui minimise les écarts altimétriques obtenus.

Finalement, le réseau planimétrique est celui de la projection Lambert III, et le réseau altimétrique est local (avec un écart d'environ 50 cm au réseau de nivellement NGF). Toutes les coordonnées des balises implantées en 2001 ont été recalculées (2001 à 2003) dans le nouveau système. Les coordonnées des pierres mises en place en 2002 sur les profils transversaux (SS' et supérieur) ont également été recalculées. Les valeurs de vitesses ne sont donc pas affectées par ce changement de système de coordonnées. Seules les altitudes des profils transversaux sont affectées (<30 cm). Les incidences sur la comparaison avec les travaux photogrammétriques de 1986 sont quasiment négligeables étant donnée la précision de la restitution photogrammétrique (écart type de 50 cm). Enfin, pour la comparaison des altitudes obtenues sur les profils avec celles des Eaux et Forêts mesurées entre 1906 et 1965, nous rappelons qu'il est nécessaire de faire les translations altimétriques suivantes :

- nous devons retrancher 11.65 m pour obtenir l'altitude des Eaux et Forêts au profil inférieur.
- nous devons retrancher 11.30 m pour obtenir l'altitude des Eaux et Forêts au profil supérieur.
- nous devons ajouter 4.73 m pour obtenir l'altitude des Eaux et Forêts au profil SS'.

ANNEXE X: Bilans et vitesses mesurées à partir des balises et des pierres peintes.