



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

**LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE
ET GEOPHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT**

**C.N.R.S.
UNIVERSITE JOSEPH FOURIER - GRENOBLE I
OBSERVATOIRE DES SCIENCES DE L'UNIVERS - GRENOBLE**

BP 96, 38402 ST MARTIN D'HERES CEDEX
TEL. 04.76 82.42.00
FAX : 04.76 82.42.01

GLACIER DE GEBROULAZ

2006

Convention n° 170/2006

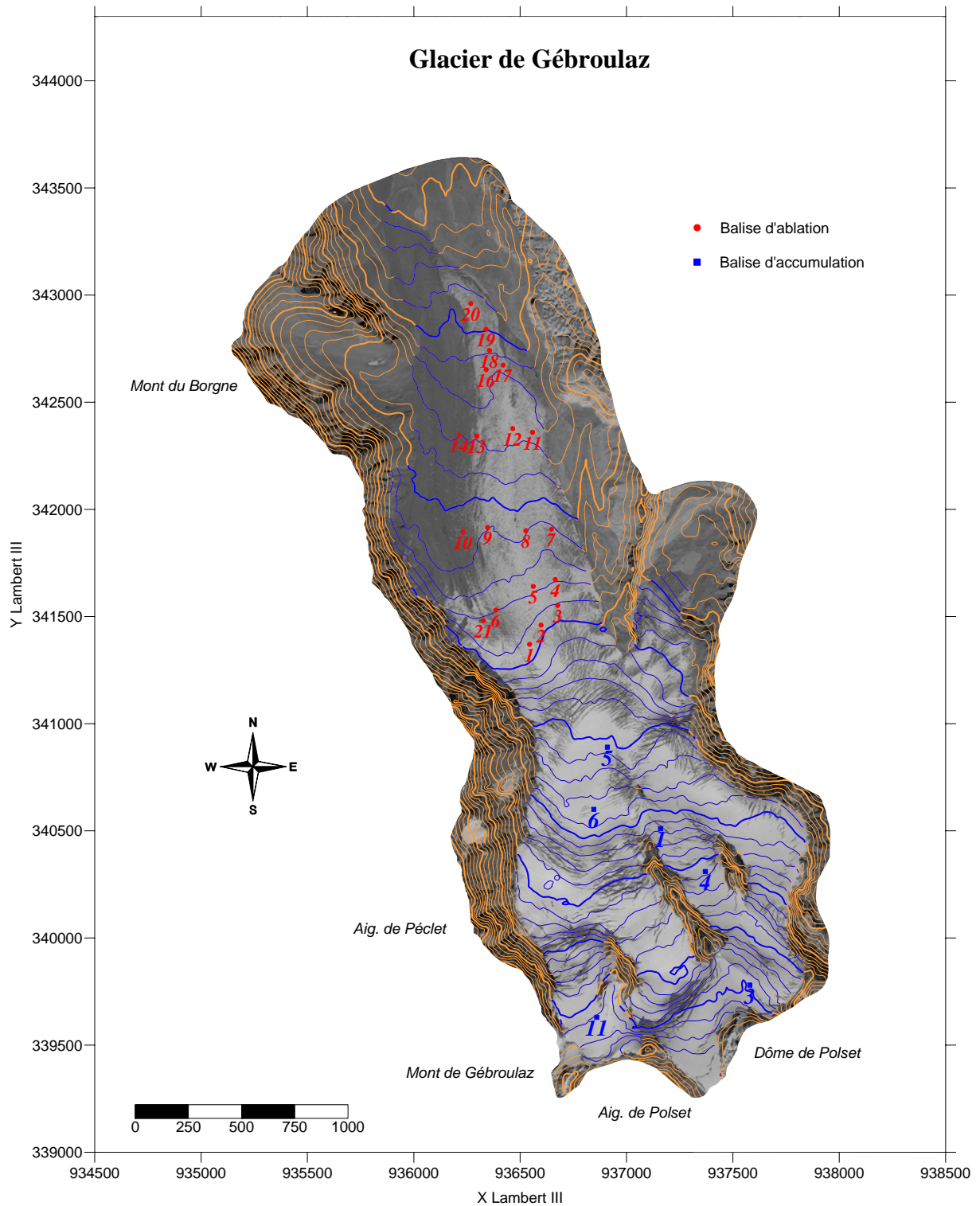
Rapport au Parc National de la Vanoise

C. Vincent, D. Six et E. Le Meur



Glacier de Gébroulaz, le 21 Septembre 2006 – Photo : B. Jourdain





Distances et coordonnées exprimées en mètres ; équidistance altimétrique de 20 m
 Modèle numérique de terrain obtenu par restitution photogrammétrique analytique (clichés du 20/09/2003)
 Levé suivant une maille de 25 m, lignes et points caractéristiques
 Planimétrie dans le système IGN Lambert III - Altimétrie dans le système NGF - IGN 1969
 Photographies aériennes (1/20000) argentiques numérisées et orthorectifiées

Figure n°1 : Plan de situation des positions des balises d'ablation implantées en 2004 et des sites de carottage. Les profils transversaux de la zone d'ablation sont représentés sur la figure 7

I. Travaux de terrain 2006

Les campagnes de mesures de 2006 se sont déroulées:

- . le 26 avril 2006 pour les mesures de bilans hivernaux (carottages) sur tout le glacier.
- . le 18 août 2006 pour les mesures topographiques (variations d'épaisseur, localisation des balises, position du front) et les mesures de bilans de masse.
- . le 21 septembre 2006 pour une mesure des bilans en fin de saison d'ablation (zone d'accumulation et zone d'ablation).

Ont participé à ces relevés :

- . Emmanuel Le Meur, Christian Vincent, Samuel Auclair, Laurent Arnaud, Marie Dumont, Hélène Castebrunet le 26 avril 2006.
- . Bruno Jourdain, Samuel Auclair, Delphine Six et Christian Vincent le 18 août 2006.
- . Bruno Jourdain et Delphine Six le 21 septembre 2006, pour une mesure des émergences des balises à la fin de la saison hydrologique.

Le dépouillement des mesures a été réalisé par Christian Vincent et Delphine Six à l'automne 2006.

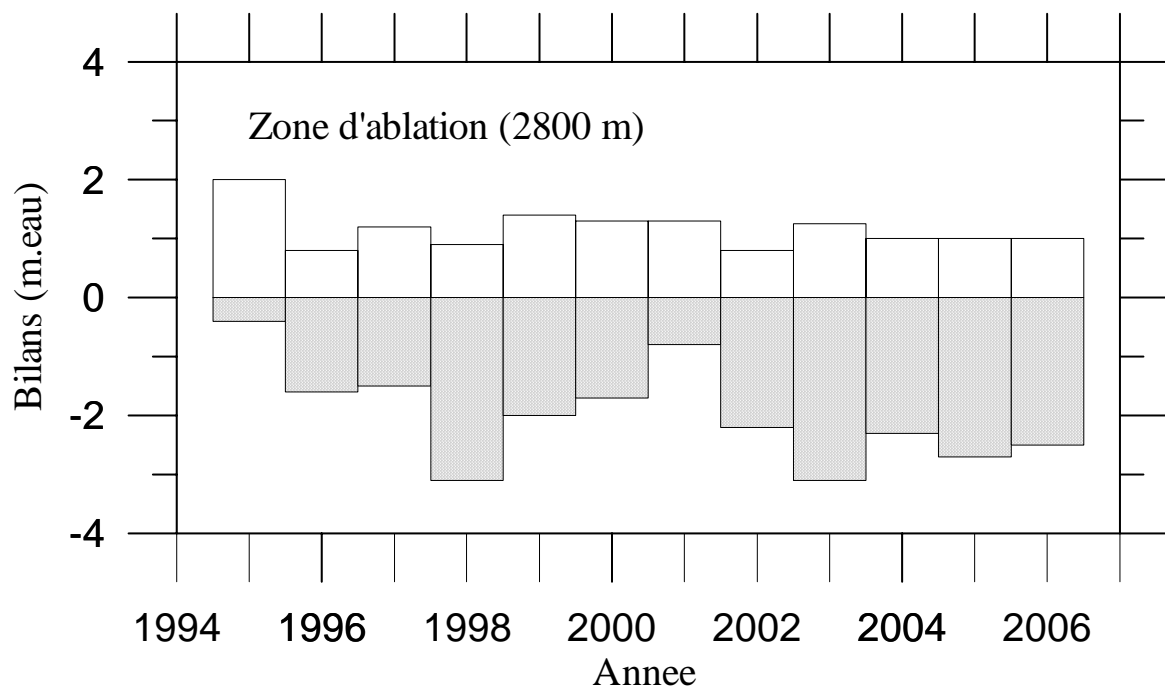
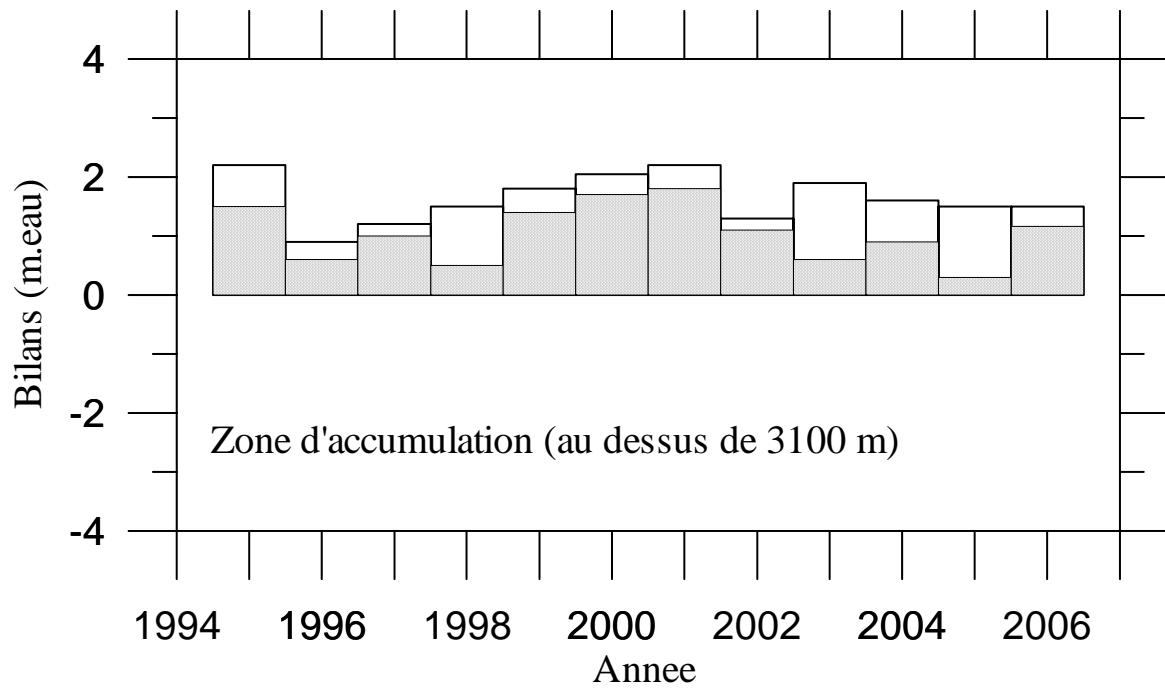


Figure n°2: Bilans annuels (en gris) observés sur le glacier de Gébroulaz depuis 1994/1995 en zone d'accumulation (graphe du haut) et en zone d'ablation (graphe du bas). En zone d'accumulation comme en zone d'ablation, les bilans hivernaux (en blanc) sont représentés à partir de l'ordonnée zéro. Pour la zone d'accumulation, le bilan estival est la différence entre la partie blanche et la partie grisée. Pour la zone d'ablation, le bilan estival est la somme algébrique de la partie blanche 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 de l'année 2006

a. Accumulation hivernale

En zone d'accumulation, les bilans de masse hivernaux de 2006 mesurés à partir des carottages (fin avril) indiquent des valeurs légèrement inférieures à la moyenne sur la période 1994-2006. Bien que ces valeurs d'accumulation hivernale soient très variables d'un site à l'autre (de 1,15 m d'eau au site 5 jusqu'à 1,66 m d'eau au site 3, soit un écartype des mesures de 20 cm d'eau), on peut dire que le bilan de masse hivernal de la zone d'accumulation atteint une valeur proche de 1.50 m équivalent eau (eqe) au dessus de 3100 m. En zone d'ablation, les valeurs d'accumulation mesurées à la surface du glacier sont également assez variables suivant le site (de 0,85 m d'eau à la balise 6 jusqu'à 1,45 m d'eau à la balise 1). On peut cependant noter une valeur moyenne de 1.00 m d'eau vers 2800 m d'altitude (figure 2).

b. Ablation estivale

Les valeurs d'ablation estivale sont inférieures à la moyenne de la période 1994-2005 en zone d'accumulation (0,34 m eqe à 3200, pour une moyenne de 0,58 m eqe). En revanche, elles sont extrêmement élevées en zone d'ablation : elles figurent parmi les valeurs les plus élevées de la période 1994-2005 3,5 m eqe d'ablation à 2800 m d'altitude pour une moyenne de 3,15 m eqe). Comme on peut le voir sur la figure 2, elles sont très proches des valeurs de 2004 ou 2005. Les fortes valeurs d'ablation peuvent s'expliquer par les chaleurs estivales de juillet dont la moyenne est la plus élevée jamais enregistrée sur le siècle. Les températures du mois d'août en revanche ont fortement ralenti l'ablation estivale.

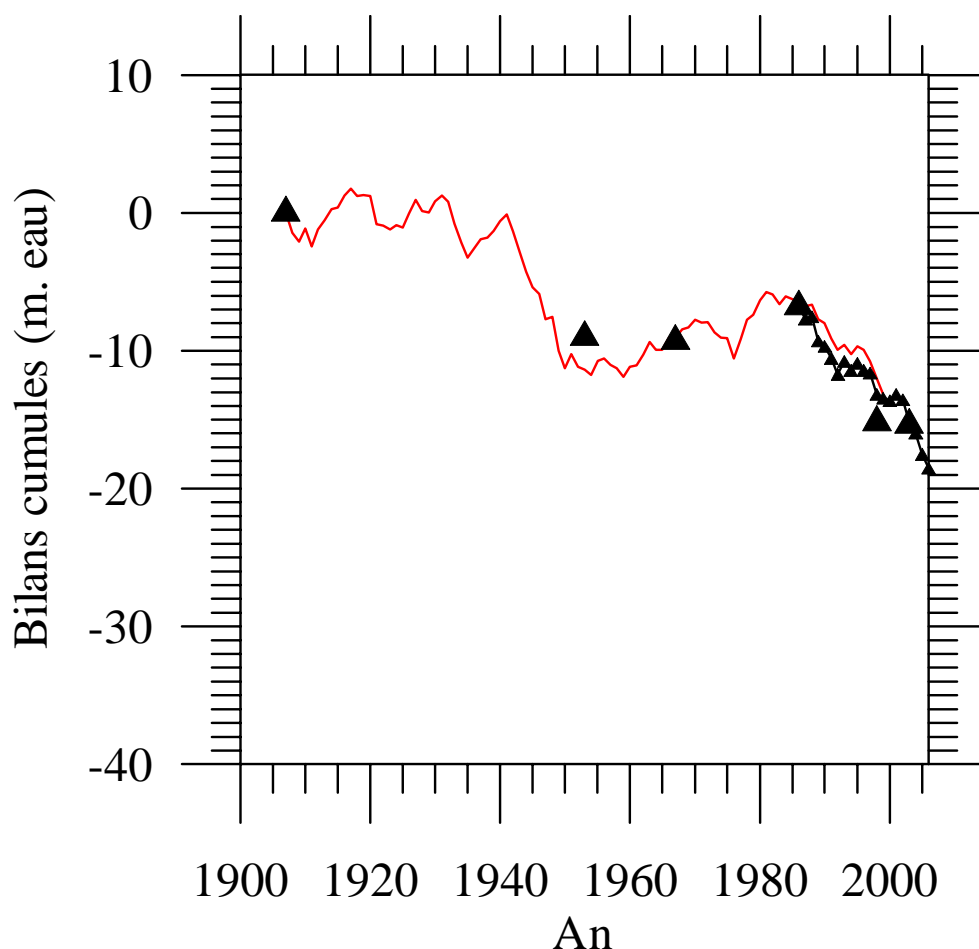


Figure n°3 : Bilans de masse cumulés du glacier de Gébroulaz depuis le début du 20^{ème} siècle. Ces bilans représentent la variation d'épaisseur moyenne sur l'ensemble de la surface du glacier, exprimée en mètres d'eau. Ainsi, le glacier de Gébroulaz a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 18.5 m depuis 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 sous presse dans la *Revue des Travaux Scientifiques du Parc de la Vanoise*, 2006).

c. Bilan de masse annuel

Le bilan de masse total spécifique du glacier en 2005/2006 est de -1.00 m d'eau : c'est donc l'équivalent d'une lame d'eau de 1.00 m qu'il a perdu sur toute sa surface en 2005/2006. Ce bilan de masse est calculé à partir du réseau de balises implantées sur le glacier : d'une part, les observations de chacune de ces balises permettent de calculer la variation temporelle du bilan sur la période 1994/2005 ; d'autre part, nous déterminons la tendance générale (variation de volume du glacier) à l'aide des mesures photogrammétriques. La combinaison de ces deux informations permet alors de calculer le bilan de masse chaque année depuis 1994. Les restitutions photogrammétriques permettent de surcroît de remonter dans le temps : grâce à elles, nous connaissons les variations de volume du glacier de Gébroulaz depuis plus de 50 ans (figure 3). La valeur du bilan de masse de 2005/2006 révèle donc un bilan relativement déficitaire comparé à la moyenne des 20 dernières années (-0,6 m eqe en moyenne).

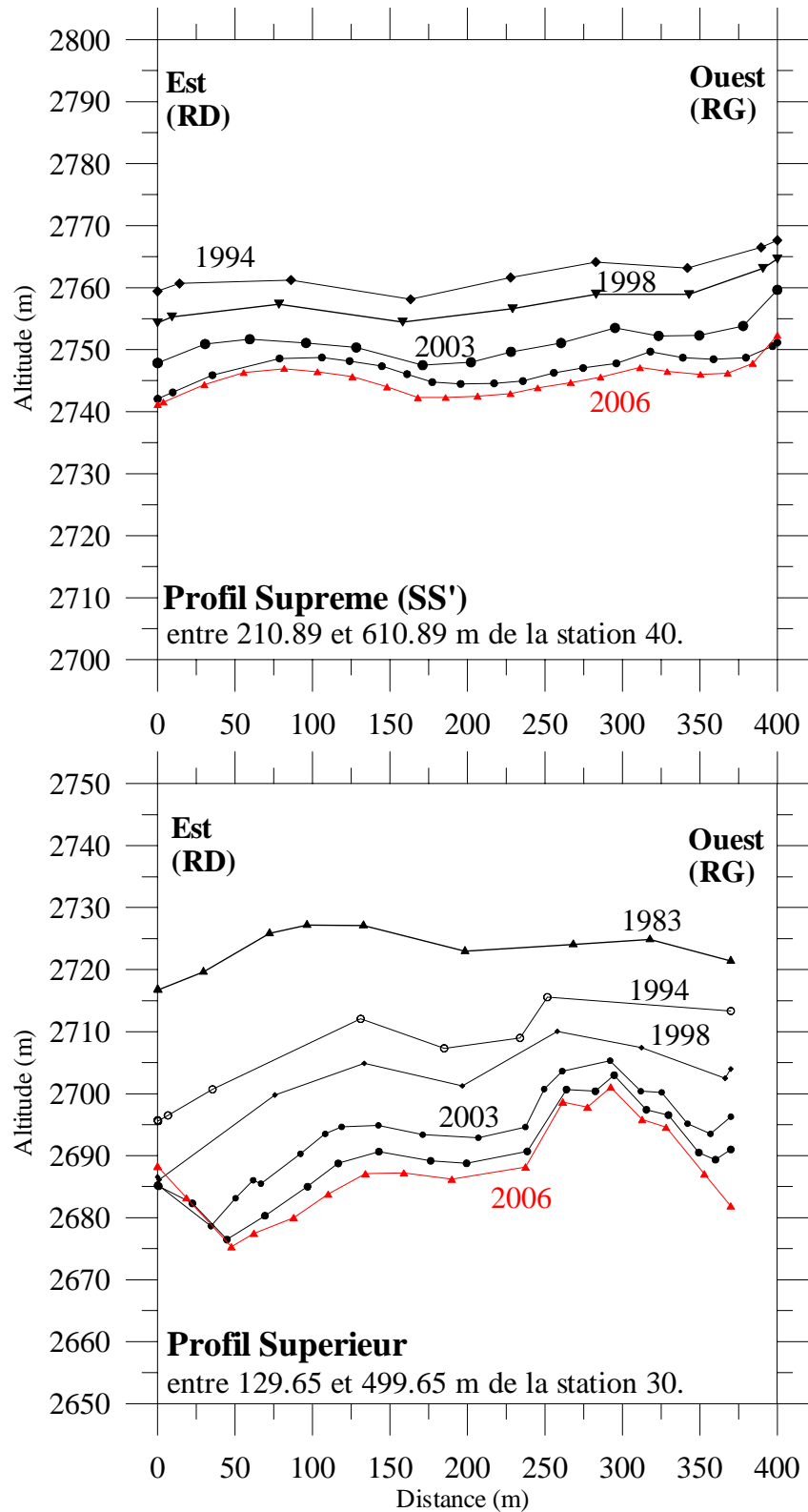


Figure n° 4 : Variations d'altitude aux profils suprême et supérieur (profils vus de l'aval).

III. Variations des épaisseurs et vitesses d'écoulement aux profils transversaux

Les variations d'épaisseurs du glacier sont mesurées sur la langue glaciaire sur des profils transversaux indiqués sur la figure 7. Ces variations d'épaisseurs et les vitesses d'écoulement à ces profils sont représentées sur la figure 4.

Le profil inférieur est totalement déglacé depuis 2002 suite au recul de la langue. Les observations sont donc faites suivant 2 profils, le profil dit « suprême » et le profil dit « supérieur ». Ces observations sont réalisées à l'aide d'instruments de topographie GPS (récepteurs GPS différentiel bi-fréquence).

L'altitude moyenne de chacun des profils est calculée à partir des points topographiques (GPS) relevés sur le terrain et la méthode dite « des aires » : entre les deux extrémités d'un profil transversal, fixées une fois pour toutes, l'altitude de chaque segment est pondérée par la distance de ces segments. On obtient donc une altitude moyenne (qui n'est pas une moyenne arithmétique) qui est indépendante de l'échantillonnage de points mesurés sur le terrain.

Depuis 1993, nous avons rétabli l'ancien profil Suprême 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.

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 2005/2006 sont les suivantes: -1,9 m au profil SS' et - 2.3 m au profil supérieur.

Au vu de la figure 4, on peut remarquer que les variations d'épaisseurs depuis 1994 sont très similaires d'une rive à l'autre du glacier au profil « suprême ») à 2750 m (près de 20 m de diminution de l'épaisseur à cette altitude depuis 1994). Ces variations sont beaucoup plus hétérogènes au profil supérieur à 2700 m : à cette altitude, le glacier est couvert de débris morainiques en rive gauche et cette couche morainique de surface affecte sensiblement l'ablation. On peut noter également qu'en rive droite, les variations d'épaisseurs du profil sont nulles sur une distance de 50 m entre 2003 et 2006. Elles s'expliquent par le retrait du glacier et son fort rétrécissement en rive droite : dans cette partie (jusqu'à 50 m de l'extrémité du profil), il n'y a pas de glace et le socle rocheux est apparent.

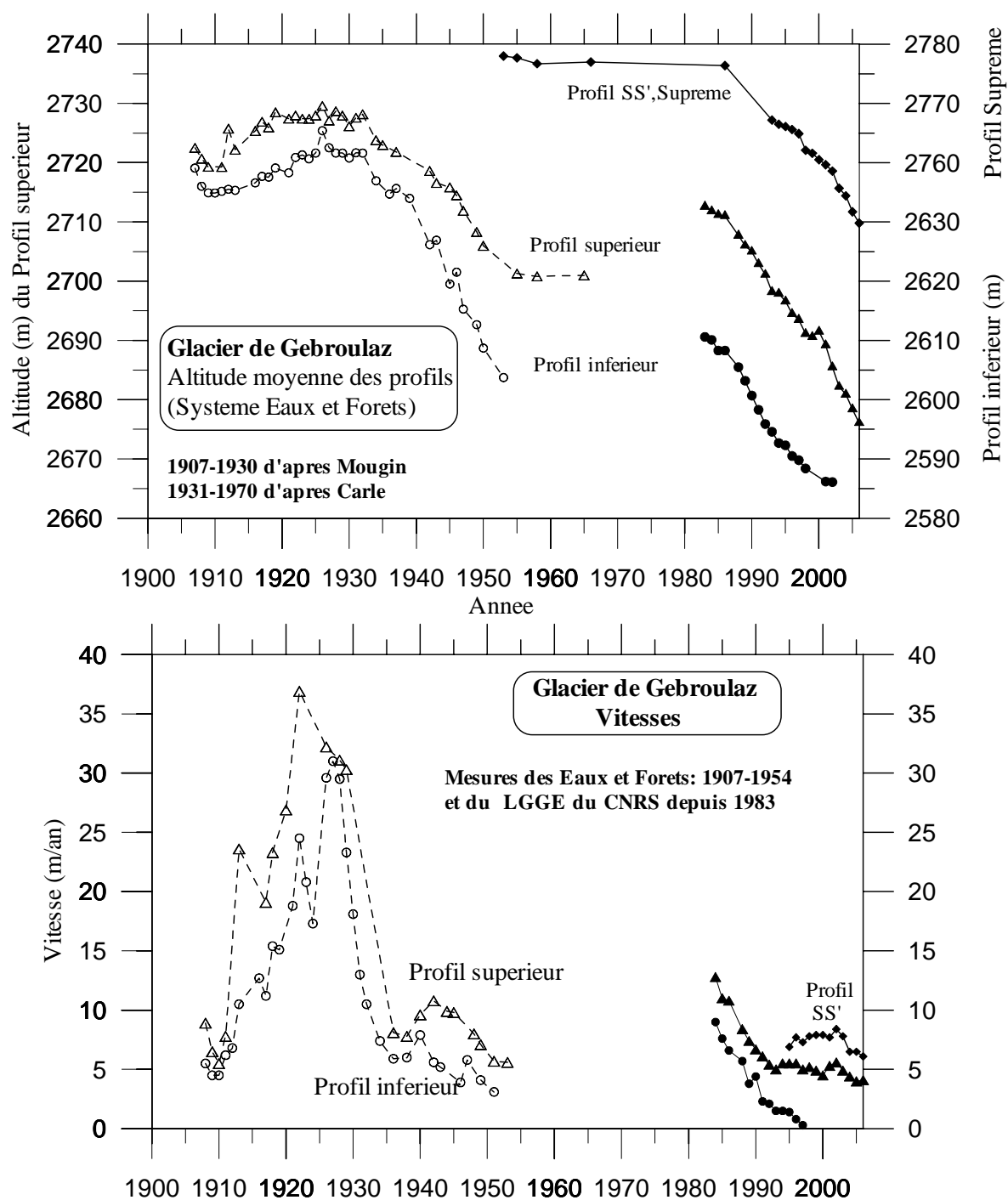


Figure 6 : Variations des épaisseurs aux trois profils transversaux (haut de la figure) ; Variations de vitesses sur ces trois profils (depuis 1983, les vitesses sont celles du centre du glacier) (bas de la figure).

Les vitesses d'écoulement en surface du glacier sont mesurées à partir du déplacement des balises, à l'aide des instruments de topographie GPS différentiel. Ces déplacements sont ramenés à l'année. Ils sont connus avec une précision de 5 cm environ ; en fait, la précision dépend de la matérialisation du point mesuré (la balise implantée dans le glacier), plutôt que la précision (millimétrique) de la mesure géodésique elle-même. Toutes ces observations de vitesses sont reportées en annexe X dans les tableaux des balises (avec les bilans). Les vitesses observées au centre du glacier suivant les profils suprême et supérieur sont de 6.1 m/an et 4.1 m/an respectivement (le glacier était 3 fois plus rapide en 1983/1984 dans cette région) (voir tableau annexe I).

La figure 6 permet d'avoir une vue d'ensemble du comportement du glacier (au moins de sa langue glaciaire) depuis le début du 20^{ème} siècle. Ce comportement dynamique a été analysé dans l'article (sous presse) publié dans la Revue des travaux Scientifiques du Parc de la Vanoise (Vincent et Blanc, à paraître), et dans le rapport précédent rendu en 2005 au Parc de la Vanoise. En 2006, nous pouvons noter des vitesses d'écoulement de la langue glaciaire stables, ou presque, alors que nous observons une forte décreue de l'épaisseur du glacier dans cette même région. Ce constat s'applique, en fait, à l'ensemble de la période 1994-2006 : nous n'observons aucune relation entre l'évolution des vitesses d'écoulement et les variations d'épaisseurs. Il est probable que la nature du lit du glacier joue ici un rôle primordial : la couche de sédiments sous glaciaires, gorgée d'eau, et sa déformation pourraient expliquer le maintien des vitesses d'écoulement du glacier au cours des 12 dernières années. Pour l'instant, nous n'avons aucun moyen de vérifier cette hypothèse. En tous les cas, cette dynamique de la langue glaciaire accentue encore la perte de masse globale du glacier puisque cet écoulement relativement élevé transfère de la glace des zones hautes du glacier plus rapidement vers la zone d'ablation, dans une région où la fonte est beaucoup plus intense.

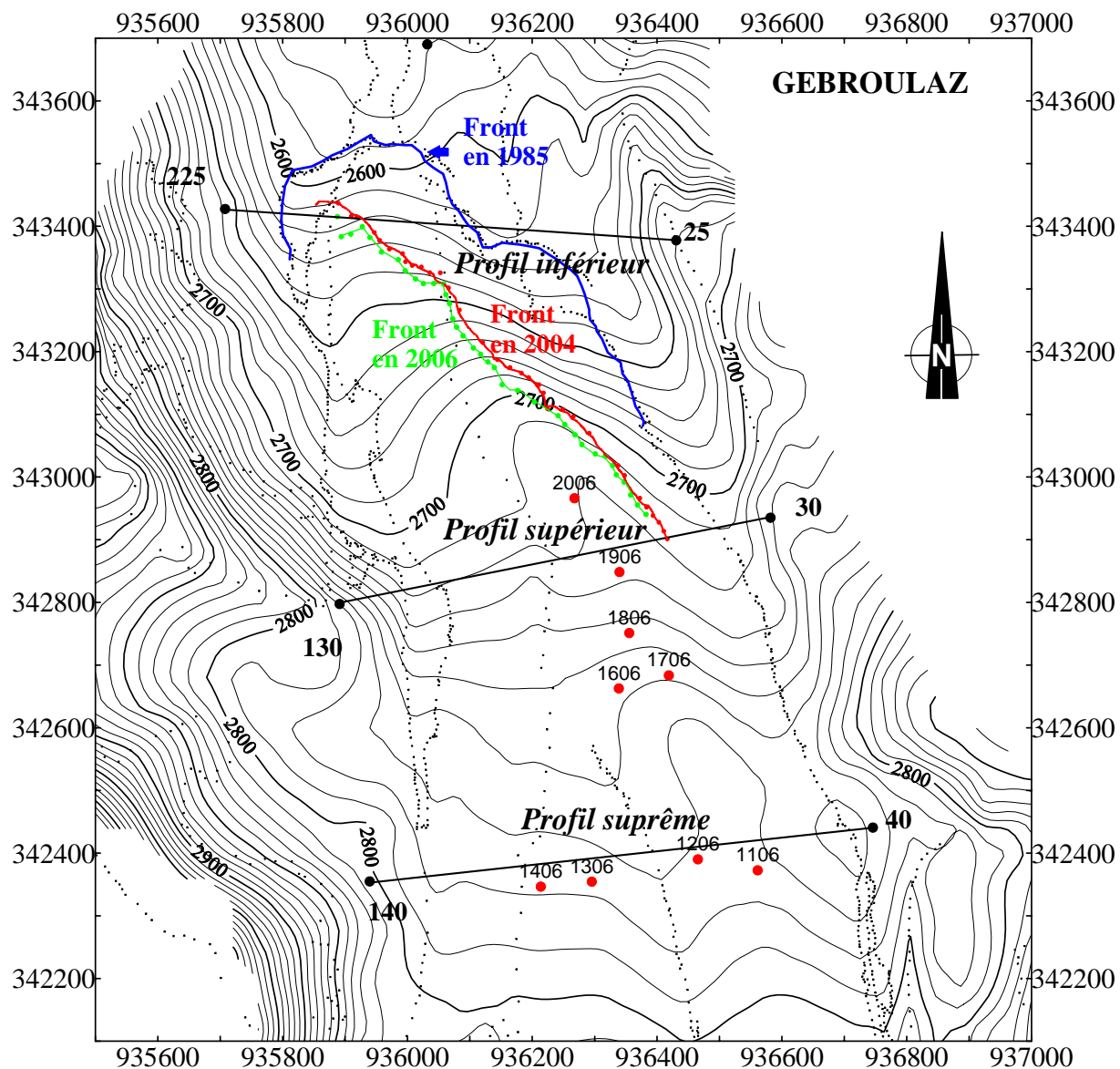


Figure n° 7 : Evolution du front du glacier depuis 1985. Localisation des balises d'ablation implantées en 2004 et relevées en 2006 dans cette zone basse du glacier. Les trois profils transversaux sont également représentés. Le front en 2006 est indiqué en vert.

V. Variations du front

Le front du glacier a été mesuré le 19 août 2006. Sa position a peu changé depuis 2005. Il est partiellement recouvert de débris morainiques et difficile à localiser en rive gauche. Comme on peut le voir sur la figure 7, la langue glaciaire en rive droite (découvert de débris morainiques) a beaucoup rétréci.

VI. Conclusions

Le bilan de masse du glacier de Gébroulaz en 2005/2006 est de -1.00 m d'eau (perte d'épaisseur moyenne sur l'ensemble de sa surface). Cette valeur est plus élevée que la moyenne des bilans mesurés sur les 20 dernières années ($-0,58$ m eqe). Le bilan de masse de l'année 2006 est donc relativement déficitaire.

Depuis 1906, le glacier a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 18,5 m.

Les balises d'ablation du glacier ont été implantées pour la dernière fois en 2004. Il sera nécessaire de ré-installer le réseau au cours de l'été 2007. Cette implantation nécessitant des charges lourdes (les balises elles mêmes, les sondes à vapeur, les bouteilles de gaz, etc....), seul un transport hélicoptéré est adapté. Une demande d'hélicoptage sera donc faite au Parc National de la Vanoise.

Le glacier de Gébroulaz fait partie du *Service d'Observation* des glaciers alpins, reconnu au niveau national par l'Institut National des Sciences de l'Univers (du CNRS) et le Ministère de la Recherche depuis 2003. A ce titre, l'ensemble des données du glacier de Gébroulaz (et des 3 autres glaciers suivis par le LGGE : Mer de Glace, Argentièrre et Saint-Sorlin) sont disponibles sur le site web :

<http://www-igge.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm> à la rubrique « Alpes ». Les données de bilans de masse, vitesses, variations d'épaisseurs, positions des fronts sont mises à jour annuellement sur le site. Des cartes et photos complètent cette base de données.

A Saint Martin d'Hères, le 11 Décembre 2006

Christian VINCENT, Delphine SIX et Emmanuel LE MEUR.

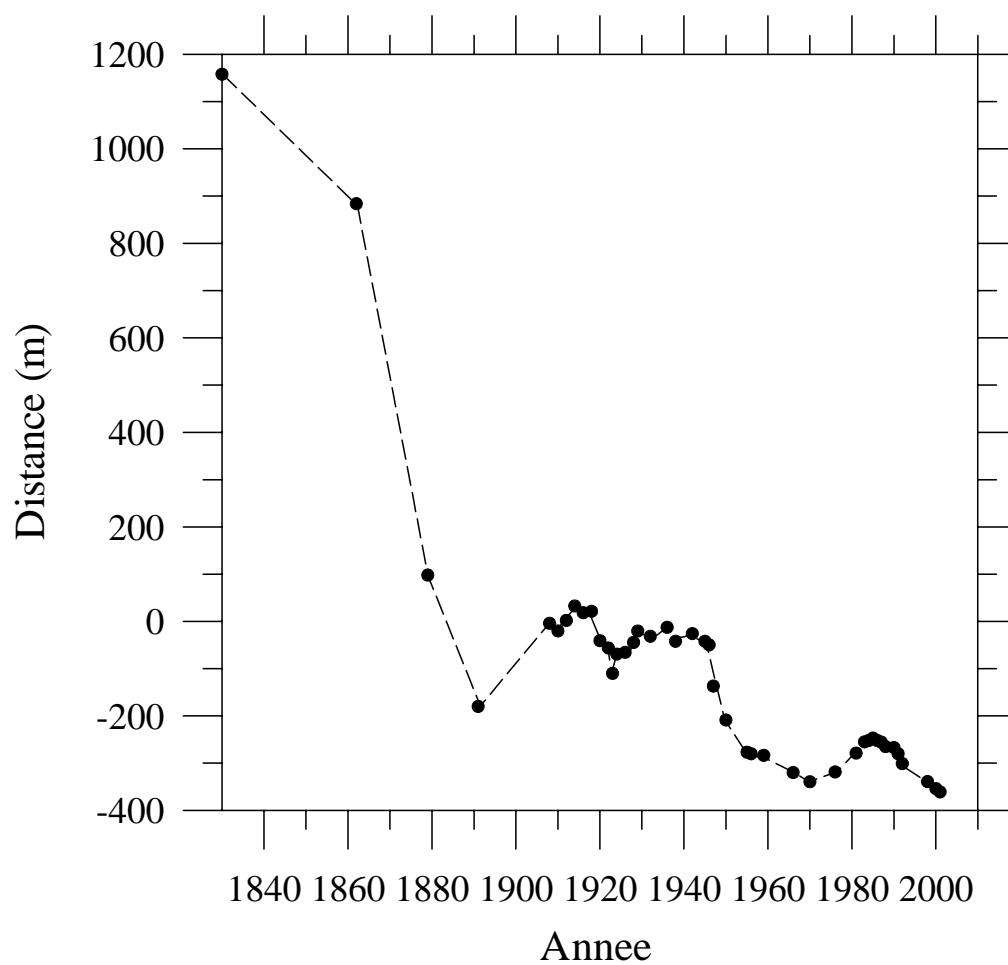


Figure n°8 : Fluctuations de longueur du glacier de Gébroulaz depuis 1870.

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
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
9.08.2005	6.5 m/an	4.0 m/an	rocher
19.08.2006	6.1 m/an	4.1 m/an	rocher

ANNEXE II

Variations du front depuis 1983

Date	Surface du front /ligne 25-25b m ²	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 (m ²)	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
9.08.2005	2751.7	2747.0
18.08.2006	2749.8	2745.1

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
16.08.2004	2680.9	2692.2
9.08.2005	2678.4	2689.7
18.08.2006	2676.1	2687.4

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 Peclet	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 (sommet, 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 Péclet.
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 Pecllet
52	936236.401	339996.700	3550.694 rocher proche de Pecllet
53	936306.128	339964.583	3513.467 croix
54	936330.841	339960.418	3507.000 rocher proche de Pecllet
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.

Enfin, 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 des 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

Balises d accumulation de 2006

point	date	x	y	z	haut. enf.	neige	dens neig	bilan equiv. eau	vites hor.	vites pente
		m	m	m	m	m			m/an	m/an
105	20. 9.	937160.00	340510.00	3130.00	0.01	0.00	0.00			
								1.51	0.0	0.0
106	26. 4.	0.00	0.00	0.00	4.00	4.00	0.38			
								-0.89	0.0	0.0
106	18. 8.	0.00	0.00	0.00	1.15	1.15	0.55			
								0.00	0.0	0.0
106	21. 9.	0.00	0.00	0.00	1.15	1.15	0.55			
305	20. 9.	937580.00	339780.00	3390.00	0.01	0.00	0.00			
								1.66	0.0	0.0
306	26. 4.	0.00	0.00	0.00	4.40	4.40	0.38			
								0.10	0.0	0.0
306	18. 8.	0.00	0.00	0.00	3.23	3.23	0.55			
								0.23	0.0	0.0
306	21. 9.	0.00	0.00	0.00	3.65	3.65	0.55			
405	20. 9.	937370.00	340310.00	3200.00	0.01	0.00	0.00			
								1.35	0.0	0.0
406	26. 4.	0.00	0.00	0.00	3.58	3.58	0.38			
								-0.51	0.0	0.0
406	18. 8.	0.00	0.00	0.00	1.54	1.54	0.55			
								0.05	0.0	0.0
406	21. 9.	0.00	0.00	0.00	1.63	1.63	0.55			
505	20. 9.	936910.00	340890.00	3005.00	0.01	0.00	0.00			
								1.15	0.0	0.0
506	26. 4.	0.00	0.00	0.00	3.05	3.05	0.38			
605	20. 9.	936846.00	340600.00	3070.00	0.01	0.00	0.00			
								1.46	0.0	0.0
606	26. 4.	0.00	0.00	0.00	3.86	3.86	0.38			
								-1.05	0.0	0.0
606	18. 8.	0.00	0.00	0.00	0.75	0.75	0.55			
								-0.19	0.0	0.0
606	21. 9.	0.00	0.00	0.00	0.41	0.41	0.55			
1105	20. 9.	936860.00	339630.00	3425.00	0.01	0.00	0.00			
								1.63	0.0	0.0
1106	26. 4.	0.00	0.00	0.00	4.32	4.32	0.38			

Nota: la hauteur enfouie est totale: glace+neige

Balises d'ablation de 2004

point	date	x	y	z	haut. enf.	neige m	dens neig	bilan equiv. eau	vites hor. m/an	vites pente m/an	
104	17. 8.	4	936544.26	341370.30	2887.56	9.80	0.00	0.00			
104	9.10. 4		0.00	0.00	0.00	8.90	0.00	0.00	-0.81	0.0	0.0
105	28. 4.	5	0.00	0.00	0.00	11.50	2.60	0.42	1.09	0.0	0.0
105	9. 8.	5	936530.22	341390.17	2882.18	7.75	0.00	0.00	-2.13	24.8	25.2
105	20. 9.	5	0.00	0.00	0.00	6.70	0.00	0.00	-0.94	0.0	0.0
106	26. 4.	6	0.00	0.00	0.00	10.23	3.53	0.41	1.45	0.0	0.0
106	18. 8.	6	936516.28	341409.11	2876.41	5.68	0.10	0.60	-2.40	22.9	23.4
106	21. 9.	6	0.00	0.00	0.00	5.05	0.00	0.00	-0.54	0.0	0.0
204	17. 8.	4	936598.45	341459.71	2889.05	9.95	0.00	0.00			
204	9.10. 4		0.00	0.00	0.00	9.20	0.00	0.00	-0.67	0.0	0.0
205	28. 4.	5	0.00	0.00	0.00	10.93	1.73	0.42	0.73	0.0	0.0
205	9. 8.	5	936584.49	341482.31	2881.65	6.95	0.00	0.00	-2.75	27.1	27.6
206	18. 8.	6	936571.54	341504.00	2875.10	4.96	0.00	0.00	-1.79	24.6	25.0
206	21. 9.	6	0.00	0.00	0.00	4.84	0.00	0.00	-0.11	0.0	0.0
304	17. 8.	4	936676.75	341551.55	2880.77	9.90	0.00	0.00			
304	9.10. 4		0.00	0.00	0.00	9.10	0.00	0.00	-0.72	0.0	0.0
305	28. 4.	5	0.00	0.00	0.00	10.90	1.80	0.42	0.76	0.0	0.0
305	9. 8.	5	936666.98	341573.21	2873.20	7.40	0.00	0.00	-2.29	24.2	25.0
305	20. 9.	5	0.00	0.00	0.00	6.60	0.00	0.00	-0.72	0.0	0.0
306	26. 4.	6	0.00	0.00	0.00	9.17	2.57	0.41	1.05	0.0	0.0
306	18. 8.	6	936658.36	341593.40	2866.71	5.50	0.00	0.00	-2.04	21.4	22.0
306	21. 9.	6	0.00	0.00	0.00	4.85	0.00	0.00	-0.58	0.0	0.0
404	17. 8.	4	936664.66	341673.21	2855.87	9.95	0.00	0.00			
404	9.10. 4		0.00	0.00	0.00	9.15	0.00	0.00	-0.72	0.0	0.0

!	706!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	8.07!	2.20!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	706!	18.	8.	6!	936646.10!	341927.23!	2812.81!	3.78!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	706!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	2.86!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	804!	17.	8.	4!	936526.80!	341900.23!	2815.92!	10.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	804!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	9.05!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	805!	28.	4.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	11.60!	2.55!	0.42!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	805!	9.	8.	5!	936524.59!	341913.08!	2812.19!	7.75!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	805!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	6.75!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	806!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	9.71!	2.96!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	806!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	5.15!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	904!	17.	8.	4!	936346.62!	341915.70!	2817.14!	10.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	904!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	8.60!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	905!	28.	4.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	11.05!	2.45!	0.42!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	905!	9.	8.	5!	936344.69!	341928.91!	2814.34!	7.20!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	905!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	6.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	906!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	8.98!	2.98!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	906!	18.	8.	6!	936343.18!	341941.34!	2811.49!	4.73!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	906!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	3.74!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1004!	17.	8.	4!	936231.54!	341894.65!	2811.78!	8.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1004!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	6.65!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1005!	28.	4.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	9.35!	2.70!	0.42!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1005!	9.	8.	5!	936229.71!	341902.58!	2809.62!	4.90!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1005!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	3.62!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1006!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	6.37!	2.75!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1006!	18.	8.	6!	936227.93!	341910.12!	2807.76!	2.10!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1006!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	1.10!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1104!	17.	8.	4!	936558.32!	342359.79!	2750.19!	11.90!	0.00!	0.00!	!	!	!

!	1406!	18.	8.	6!	936213.66!	342346.57!	2750.19!	5.04!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1406!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	3.87!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1604!	17.	8.	4!	936340.10!	342652.03!	2731.11!	11.90!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1604!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	10.70!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1605!	9.	8.	5!	936339.24!	342657.43!	2727.92!	8.80!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1605!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	7.50!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1606!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	10.46!	2.96!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1606!	18.	8.	6!	936338.68!	342662.69!	2724.77!	5.64!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1606!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	4.70!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1704!	17.	8.	4!	936420.02!	342673.17!	2729.30!	11.75!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1704!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	10.60!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1705!	9.	8.	5!	936419.20!	342678.37!	2725.57!	8.20!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1705!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	6.80!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1706!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	9.40!	2.60!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1706!	18.	8.	6!	936418.82!	342683.52!	2721.97!	4.75!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1706!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	3.72!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1804!	17.	8.	4!	936355.98!	342741.49!	2715.33!	7.55!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1804!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	6.55!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1805!	9.	8.	5!	936355.60!	342746.29!	2711.31!	4.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1805!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	2.70!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1806!	26.	4.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	5.95!	3.25!	0.41!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1806!	18.	8.	6!	936355.45!	342751.15!	2707.98!	1.33!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1806!	21.	9.	6!	0.00!	0.00!	0.00!	0.26!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!

!	1904!	17.	8.	4!	936339.54!	342840.23!	2698.09!	12.05!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1904!	9.10.	4!	!	0.00!	0.00!	0.00!	11.05!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1905!	9.	8.	5!	936339.32!	342844.16!	2695.13!	8.00!	0.00!	0.00!	!	!	!
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!
!	1905!	20.	9.	5!	0.00!	0.00!	0.00!	6.80!	0.00!	0.00!	!	!	!

