



INSTITUT DES GEOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

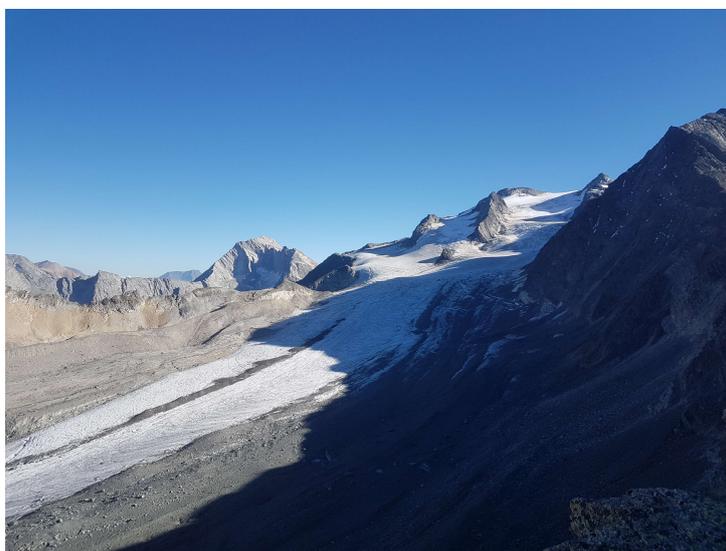
**CNRS - Université Grenoble Alpes
OBSERVATOIRE DES SCIENCES DE L'UNIVERS - GRENOBLE**

BP 96, 38402 SAINT MARTIN D'HERES CEDEX
TEL : 04.76 82.42.00

GLACIER DE GEBROULAZ 2023

Rapport annuel pour le Parc de la Vanoise

Delphine SIX, Olivier LAARMAN et Christian VINCENT



Glacier de Gébroulaz (Photo O. Laarman, 13 Octobre 2023)



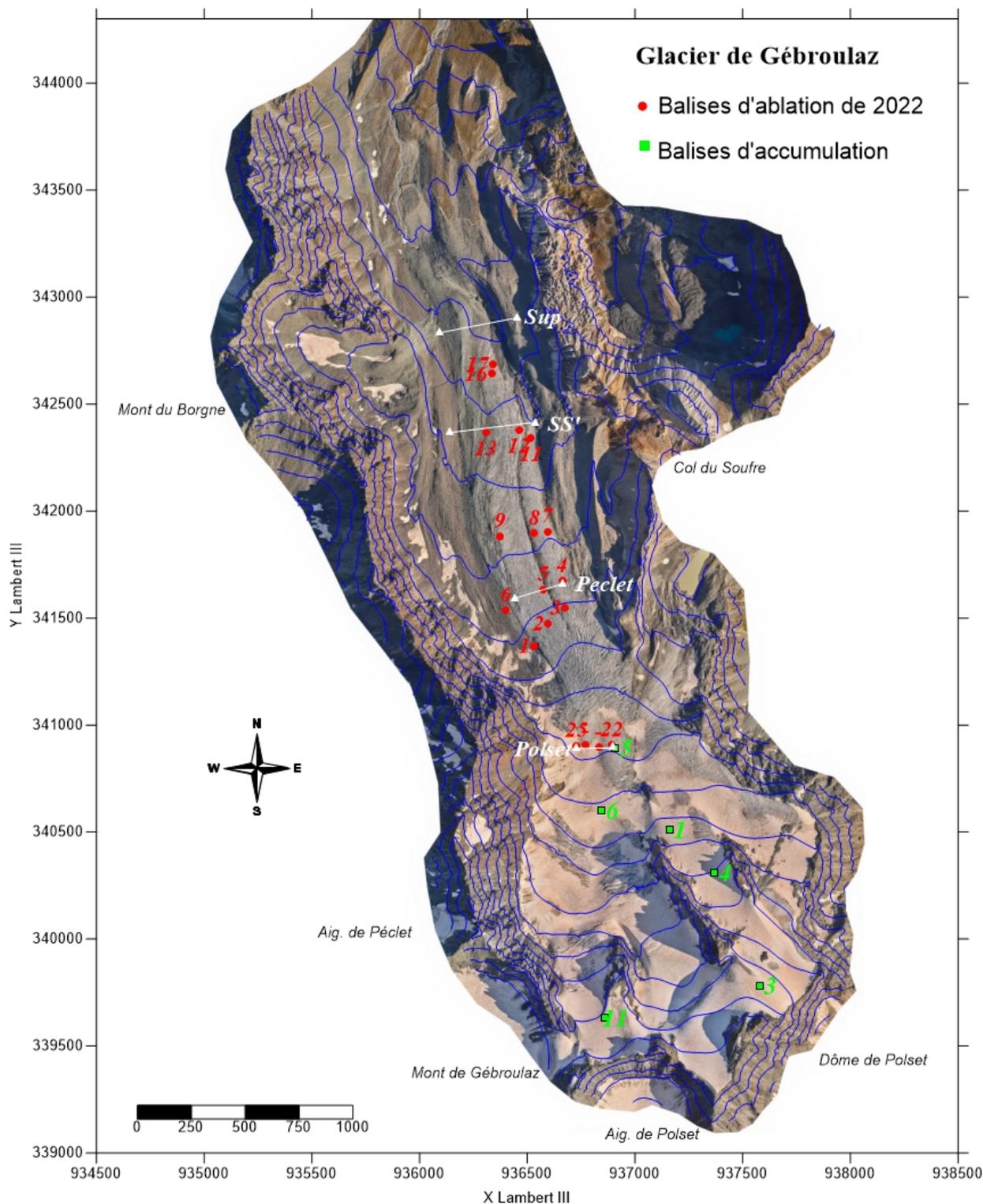


Figure 1: Carte du glacier de Gébroulaz obtenue à partir du levé LIDAR aérien et de l'orthophotographie de 2021 (IGN Lambert III). Sont reportées les balises d'ablation (en rouge) implantées en 2022 et les sites de carottage (en vert), mesurés en 2023. Les 4 profils transversaux de la zone d'ablation sont représentés sur cette figure du plus haut au plus bas: Polset, Péclet, Supreme (ou SS') et Supérieur.

I. Campagnes de mesures en 2023

L'IGE (*Institut des Géosciences de l'Environnement*, CNRS-UGA, Grenoble) réalise depuis de nombreuses années le suivi du glacier de GEBROULAZ pour le compte du Parc National de la Vanoise (PNV). La subvention annuelle en cours entre IGE et le PNV couvre une durée de 3 ans à compter de 2022 (rendus des rapports annuels aux 31 décembre 2022, 2023, et 2024). En 2023, ce rapport n'a pas pu être rendu au 31 décembre et a été rendu en février 2024, avec nos excuses.

Ce rapport 2023 reprend la trame classique de tous les rapports. Nous rassemblons l'ensemble des observations glaciologiques de l'année en cours, ainsi qu'un historique des observations présentant l'évolution de l'état du glacier au cours du temps.

Le suivi du Glacier de Gébroulaz par l'IGE a été mené en 2023 au cours de trois campagnes de terrain entre le 27 avril 2023 et le 13 octobre 2023. Une campagne de mesure a été réalisée en complément le 1 septembre 2023. Le réseau de balises a été remplacé en 2022.

Les participants à ces mesures sont des personnels de l'IGE, principalement O. Laarman et B. Jourdain. Le traitement des données et la rédaction du rapport ont été réalisés par D. Six et O. Laarman fin d'année 2023.

Les différentes campagnes se sont déroulées ainsi :

. Le 27 avril 2023, pour les mesures de bilans hivernaux sur tout le glacier. Cette mission a été opérée par 4 agents en 1 journée. En zone d'accumulation, 6 carottages ont été effectués (voir points verts de la carte de la *Figure 1*) pour obtenir les hauteurs de neige hivernale. Ces hauteurs de neige sont ensuite converties en hauteurs d'eau grâce aux profils de densité que nous réalisons sur place (mesures du volume et de la masse des carottes de neige). En zone d'ablation, nous avons estimé la hauteur de neige par sondage, que nous convertissons également en hauteur d'eau. Chaque sondage est réalisé aux emplacements des balises d'ablation enfouies sous la neige à cette époque de l'année. Vingt et un sondages ont ainsi été réalisés dans la zone basse du glacier. Un carottage a également été réalisé en zone d'ablation au niveau de la balise 2. Les résultats de ces mesures sont donnés en *Annexe XI*.



Mesure de densité sur le glacier de Gébroulaz (cliché de J. Witwicky, 27 avril 2023)

. Le 1 septembre 2023 (4 personnes), pour le relevé de l'émergence du réseau de balises des zones d'accumulation et d'ablation. Au cours de cette journée, nous avons également réalisé les mesures topographiques classiques : vitesses du glacier (grâce aux déplacements mesurés des balises, voir les résultats *section IV*, variations d'épaisseur pour les 4 profils en travers du glacier (voir les profils en blanc sur la carte de la *Figure 1* (nommés Polset, Péclet, suprême (SS') et

supérieur) et résultats *section III* et position du front (*section V*). Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un GPS différentiel bi-fréquence. Les résultats annuels sont comparés aux années précédentes dans des graphiques afin de suivre l'évolution du glacier. Des tableaux en annexes regroupent les résultats depuis le début des observations. Certaines anciennes balises de 2020 ont été retrouvées en complément de celles de 2022.

. Enfin, le 13 octobre 2023 pour une dernière mesure des émergences des balises à la fin de la saison hydrologique afin de déterminer les bilans de masse annuels en fin de saison d'ablation en chaque point du glacier. Cumulant les valeurs d'accumulation mesurées au printemps aux bilans annuels, nous pouvons en déduire, en tout point, la fonte estivale sur le glacier (voir *section II*). Ces émergences ont été relevées dans toute la zone d'ablation du glacier et également en zone d'accumulation. 2 personnes de l'IGE ont été mobilisées à la journée pour cette mission.

. Exceptionnellement, les 18 et 19 juin 2023, pour une campagne de mesure radar permettant de déterminer les épaisseurs de glace du Glacier de Gebroulaz dans le cadre d'une étude commanditée par EDF. Nous présenterons quelques résultats à la fin de ce rapport.



Mesures radar sur le glacier de Gebroulaz (cliché de B. Jourdain, 27 avril 2023)

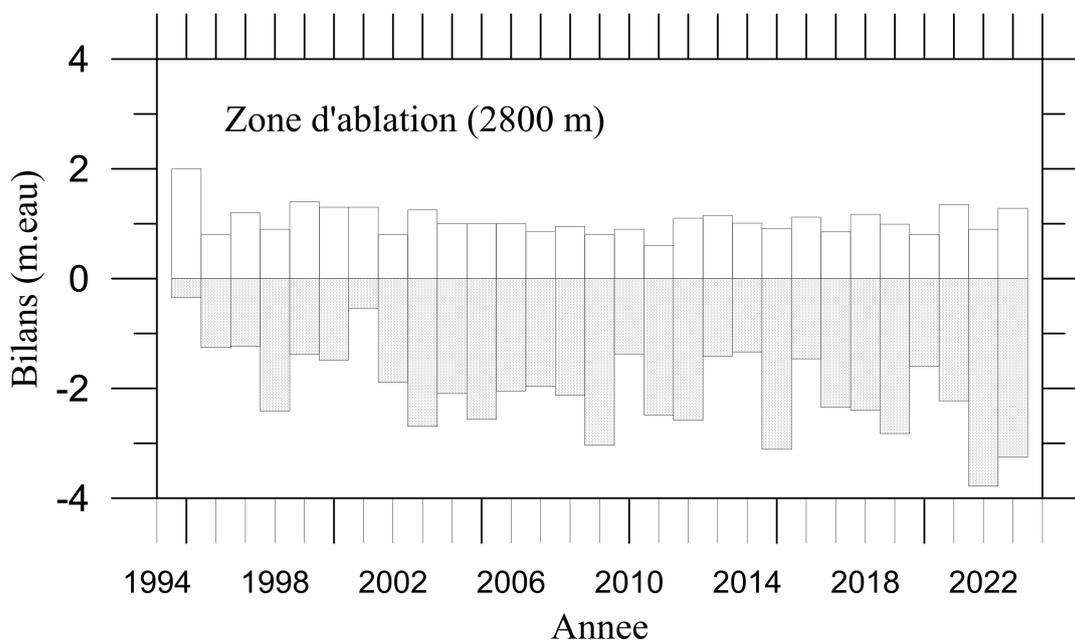
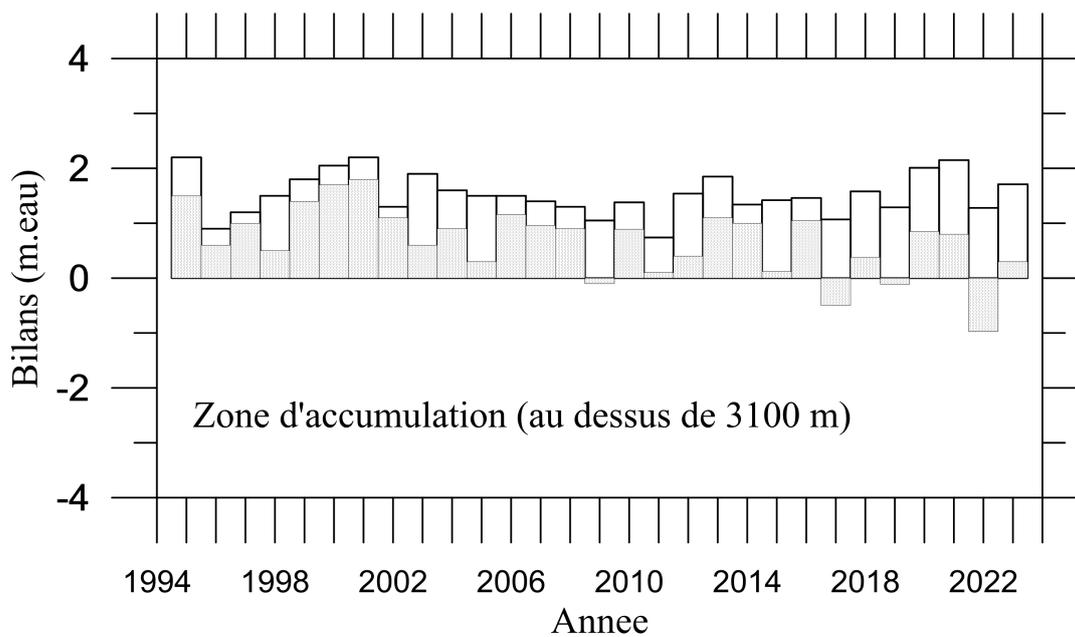


Figure 2: Bilans annuels (en gris) observés sur le glacier de Gébroulaz depuis 1994/1995 en zone d'accumulation (graphe du haut) et en zone d'ablation (graphe du bas). En zone d'accumulation comme en zone d'ablation, les bilans hivernaux (en blanc) sont représentés à partir de l'ordonnée zéro. Pour la 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 (pour les années 2008/2009, 2016/2017, 2018/2019 et 2021/2022, le bilan de masse est négatif dans la zone d'accumulation au-dessus de 3100 m) et en zone d'ablation la quantité de glace disparue.

II. Bilans de masse de l'année 2023

a. Bilan hivernal

Pour rappel, en ce qui concerne la mesure du bilan hivernal, nous procédons comme suit : en zone d'accumulation tout d'abord, nous réalisons chaque année 6 carottages à l'aide d'un carottier PICO (*Figure 1*, points verts et *Annexe XI* pour les mesures de hauteur de neige en chaque point). Les carottages permettent d'observer la stratigraphie du manteau neigeux et de reconnaître le névé (ou la glace) des années antérieures. Ils permettent également de mesurer la densité du manteau neigeux (et donc donnent accès à l'équivalent en eau) à partir de la mesure de la masse et du volume des carottes. En zone d'ablation, nous mesurons les accumulations de neige aux sites des balises d'ablation (points rouges de la *Figure 1*). Ces balises sont invisibles au mois de mai lors de la campagne de carottages (elles sont enfouies sous la neige) mais elles ont été localisées à l'aide d'un instrument GPS de navigation. Les bilans de masse hivernaux en zone d'ablation sont réalisés par sondages (avec une sonde à neige). Ces sondages sont utilisés uniquement en zone d'ablation dans la région du glacier où il n'y a pas de risque de confusion de la détection de la couche de l'année passée (puisque la surface de l'automne précédent est en glace). Certaines années, en zone d'ablation, ces observations sont complétées par un ou deux carottages qui permettent de mesurer la densité du manteau neigeux également dans cette région (un à la balise 2 en avril 2023).

Les bilans hivernaux sont reportés sur la *Figure 2*, en zone d'accumulation du glacier d'une part (au dessus de 3100 m : sites de forage 11, 3, 4, 1) et en zone d'ablation d'autre part (vers 2800 m : balises 4, 5 et 6) depuis 1994. En 2023, en zone d'accumulation, au-dessus de 3100 m, la valeur de l'accumulation hivernale est d'environ +1.7 m d'eau (partie blanche de la *Figure 2*, en haut), valeur supérieure à la moyenne des 28 dernières années, qui est de +1.52 m d'eau (l'incertitude sur la mesure des bilans hivernaux est supérieure à 20 cm d'eau. La variabilité temporelle de l'accumulation hivernale est de 0.38 m d'eau). En zone d'accumulation, l'année hydrologique 2022/2023 se caractérise ainsi par un stock de neige hivernal important. La figure 2 montre également la très forte variabilité interannuelle de l'accumulation annuelle.

En zone d'ablation vers 2800 m, l'accumulation hivernale est de +1.28 m d'eau, là encore une valeur supérieure à la moyenne qui est de + 1,05 m d'eau dans cette région. Le stock de neige a donc été important sur l'hiver 2022/2023.

b. Bilan estival

En zone d'accumulation, l'ablation estivale est mesurée grâce aux balises implantées au printemps dans les trous de carottages. En zone d'ablation, l'ablation est obtenue par la lecture de l'émergence de balises dans la glace dont le renouvellement du réseau s'effectue tous les 2 ou 3 ans sur Gébroulaz. Il avait été renouvelé en juillet 2020 puis août 2022.

En zone d'accumulation, le bilan estival de 2023 est égal à -1.4 m d'eau, comparé à la moyenne de la période 1995-2022 qui est de -0.82 m d'eau. La fonte estivale, y compris dans ces régions de très haute montagne a donc été extrêmement importante (troisième valeur la plus forte observée depuis le début des mesures dans cette zone d'accumulation en 1994. En 2022, cette fonte avait atteint la valeur record de -2.25 m d'eau). Associé à un bilan hivernal excédentaire, le bilan annuel 2023 dans cette zone du glacier, est certes positif (+0.3 m d'eau), mais inférieur à la

moyenne des bilans depuis 1994 dans cette région qui est de +0.75 m d'eau (la valeur est positive car on est en zone d'accumulation).

Dans la zone d'ablation vers 2800 m, le bilan estival est égal à -4.53 m d'eau, valeur, là encore, extrêmement négative, quasiment autant que le bilan estival de 2022 qui s'établissait au record de -4.68 m d'eau. La moyenne des bilans estivaux depuis 1994 est de -2.9 m d'eau. Associé à une accumulation excédentaire, le bilan annuel dans cette région du glacier est de -3.25 m d'eau, deuxième valeur la plus négative après 2022.

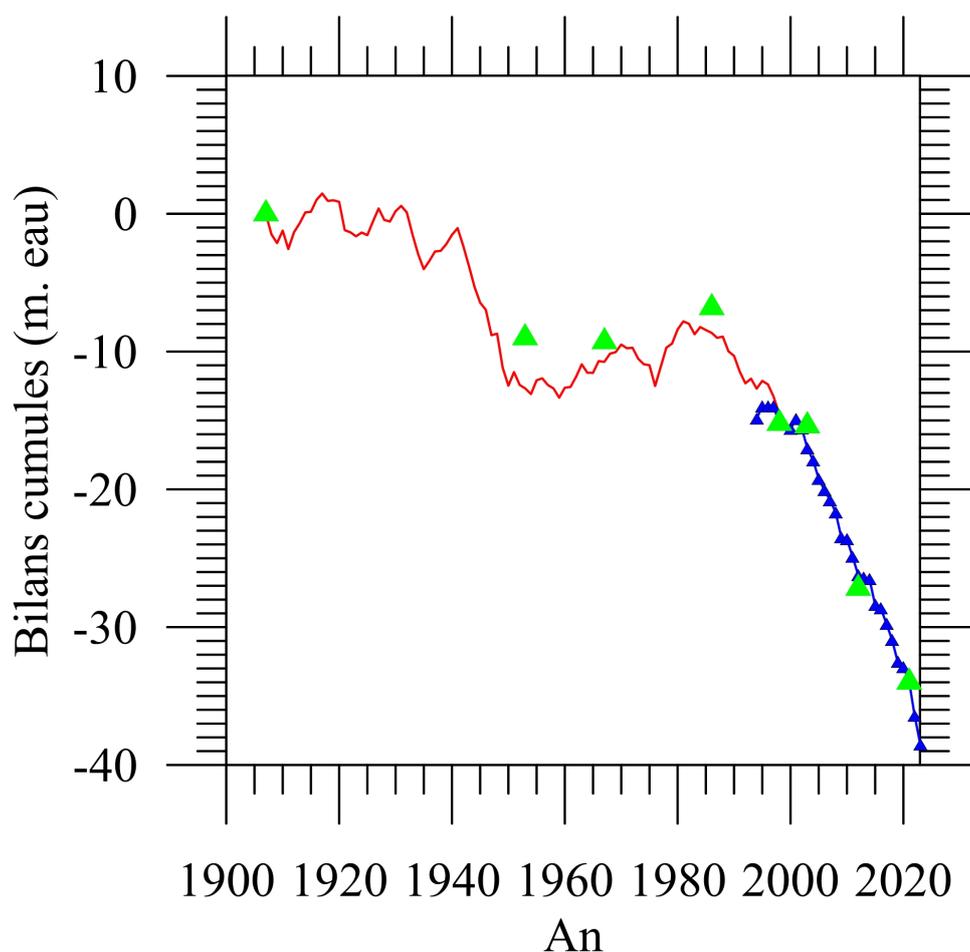


Figure 3 : Bilans de masse cumulés du glacier de Gébroulaz depuis le début du 20^{ème} siècle. Ces bilans représentent la variation d'épaisseur moyenne sur l'ensemble de la surface du glacier, exprimée en mètres d'eau. Ainsi, le glacier de Gébroulaz a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 36.6 m d'eau depuis 1907. 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 (IGE) grâce aux clichés photogrammétriques aériens, d'autre part de la carte topographique du service géographique de l'Armée établie en 1905/1907. La courbe continue rouge 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).

c. Bilan de masse annuel global du glacier

Le bilan de masse annuel du glacier est calculé à partir des observations de bilans mesurés dans la zone d'altitude 2700-2850 m et d'une analyse des variations de ces bilans dans cette zone. Pour faire ce calcul, nous utilisons un modèle de variations linéaires du bilan de masse : pour appliquer cette méthode, nous supposons que les variations temporelles du bilan de masse annuel sont similaires sur l'ensemble du glacier. Cette hypothèse a été validée sur plusieurs glaciers alpins. Ce modèle a le gros avantage de calculer des variations temporelles de bilans qui ne sont pas affectées par des observations ponctuelles manquantes. Ce type d'analyse permet d'obtenir ainsi une série temporelle de bilans de masse sur l'ensemble de la période de mesure. Le bilan de masse correspond à l'équivalent de la lame d'eau perdue (ou gagnée) sur l'ensemble de la surface.

Le bilan de masse de l'année 2022/2023 est extrêmement négatif, de -2.06 m d'eau, lié à des bilans estivaux très déficitaires. Le bilan annuel total du glacier est donc beaucoup plus négatif que le bilan annuel moyen sur la période 1994-2023, qui est de -0.81 m d'eau. Jamais le bilan n'avait dépassé les -2 m d'eau avant 2022. Bilan 2022 : -2.55 m d'eau). Le bilan 2023 est quasiment 3 fois plus déficitaire que la moyenne des 28 dernières années. Le glacier a donc connu 2 années consécutives de bilan très négatif.

d. Bilans de masse cumulés, par photogrammétrie et mesures lidar.

Grâce aux mesures lidar aéroportées de 2021, qui ont une précision décimétrique, nous avons pu recalculer les bilans géodésiques sur différentes périodes. Ainsi, pour obtenir le bilan de masse cumulé de l'ensemble du glacier sur la période, nous utilisons les observations photogrammétriques de 1998 et 2003 et les observations lidar héliportées de 2012 et 2021, totalement indépendantes des mesures de terrain. Ces campagnes aériennes permettent d'obtenir des modèles numériques de terrain du glacier et les pertes d'épaisseur sur ces différentes périodes. Les bilans de masse cumulés depuis 1907 sont reportés sur la *Figure 3*. Ils indiquent une forte décrue depuis le milieu des années 80 avec une accélération de cette décrue depuis 2003. De 1995 à 2023, la moyenne des bilans est de -0.81 m d'eau/an ; depuis 2003, la perte moyenne s'accélère et s'élève à -1.09 m d'eau/an (+35%).

Depuis 1907, le glacier a perdu une lame d'eau de 38.5 m, soit 42.8 m de glace en moyenne sur toute sa surface (*Figure 3*). Bien sûr, les parties hautes du glacier perdent moins que les parties basses. Notons que sur les 36 dernières années (depuis le milieu des années 80), les dix années les plus déficitaires se situent après 2003. La couverture morainique de la langue atténuée sans doute le déficit de masse du glacier mais il n'est probablement pas fondamental au vu de la comparaison entre les bilans obtenus à partir des balises (implantées dans les parties dépourvues de couverture morainique) et les bilans géodésiques qui prennent en compte la totalité de la surface du glacier.

III. Variations des épaisseurs aux profils transversaux

a. Historique des mesures de ces profils.

Les mesures de variations d'épaisseurs du glacier sont réalisées sur la langue glaciaire sur 4 profils transversaux indiqués sur les *Figures 1* et *6* (zoom sur le front et les profils les plus bas), 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. Les altitudes sont reportées dans les tableaux de l'*Annexe III*.

Les variations d'altitude sont mesurées depuis le début des observations par les Eaux et Forêts en 1904 sur les profils inférieur et supérieur. On peut voir une large interruption entre 1954 et 1983, qui correspond par ailleurs à une période de crue du glacier. Le profil inférieur est totalement déglacé depuis 2002 suite au recul de la langue (illustré *Figure 5, en haut*). Le profil dit « suprême » et le profil dit « supérieur » sont mesurés depuis 1986. L'appellation du profil « supérieur » a été donnée par les Eaux et Forêts au début du 20^{ème} siècle. Il se situe pourtant aujourd'hui dans la zone inférieure du glacier.

Les mesures sur les deux profils dit « Pecllet » (à 2850 m) et « Polset » (à 3000 m) ont débuté en août 2007 pour compléter le suivi des variations d'épaisseurs du glacier dans des zones plus élevées de la zone d'ablation et pour rendre compte de la perte d'épaisseur en fonction de l'altitude.

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. Dans ce rapport, les altitudes sont calculées selon le système NGF (*annexe III*).

b. Variations d'épaisseur en 2023

Nous avons réalisé les mesures topographiques (épaisseurs, vitesses, position du front) le 1^{er} septembre 2023. Les *Figures 4a, 4b* montrent la perte d'altitude de la surface glaciaire pour quelques années depuis le début des mesures, et pour 2023 (en rouge) le long des profils. Nous n'avons pu réaliser en entier le profil supérieur car il désormais coupé, lié au recul du front. Nous ne calculons donc pas la variation d'épaisseur sur l'ensemble du profil comme nous le faisons les années d'avant. Les variations d'altitude sont relativement homogènes d'une rive à l'autre du glacier. Les variations d'épaisseur dépendent à la fois des bilans de masse de surface et de la dynamique du glacier. Les valeurs de l'altitude moyenne de chaque profil sont ensuite calculées et reportées *Figure 5* (en haut). On note une homogénéité spatiale de la perte d'épaisseur depuis le milieu des années 90 pour les profils SS' et Supérieur.

Dans le tableau suivant, et pour chacun des profils, nous reportons les variations d'altitude depuis 2019. Nous observons des pertes d'épaisseurs en relation avec l'altitude :

	Polset	Pecllet	SS'	Supérieur
2019	-0.9 m	-1.9 m	-2.3 m	-2.7 m
2020	-0.7 m	-1.3 m	-1.6 m	-2.0 m
2021	-0,1 m	-1,6 m	-2,5 m	-2,7 m
2022	-1.9 m	-3 m	-3.2 m	/
2023	-1.5 m	-2.9 m	-3.9 m	/

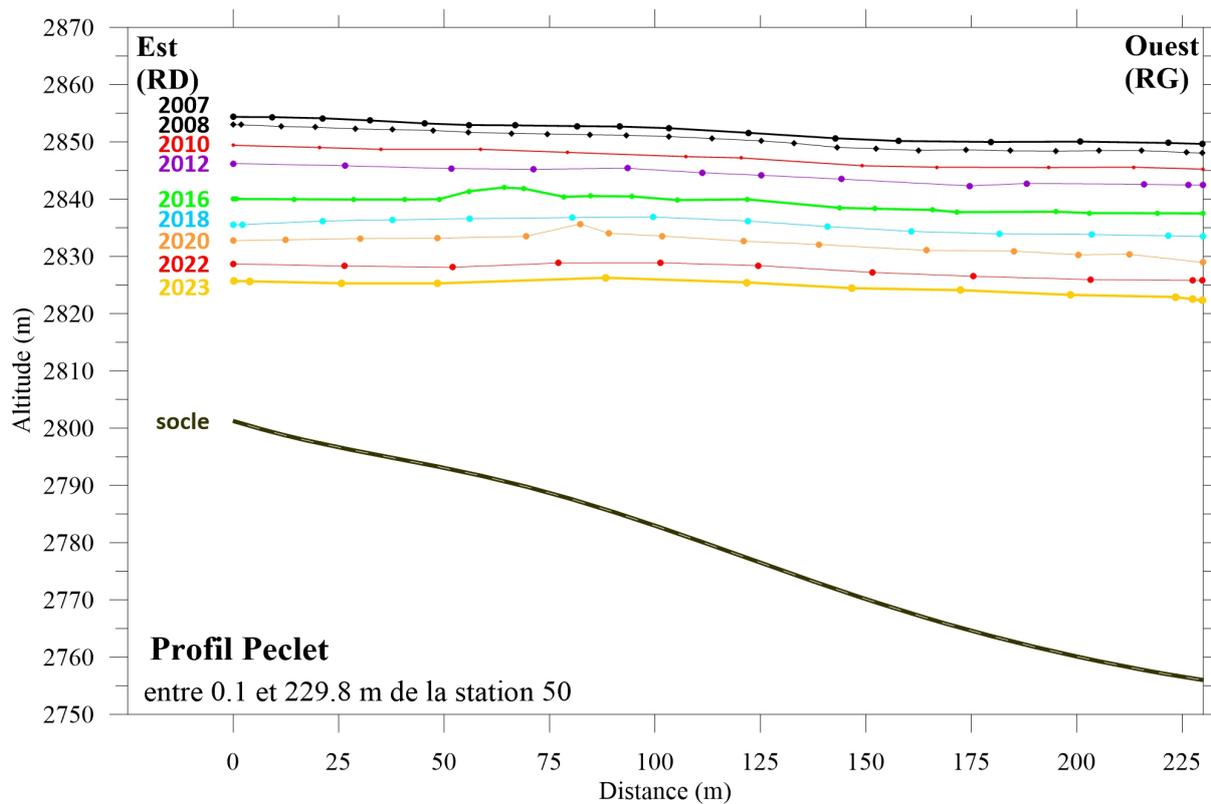
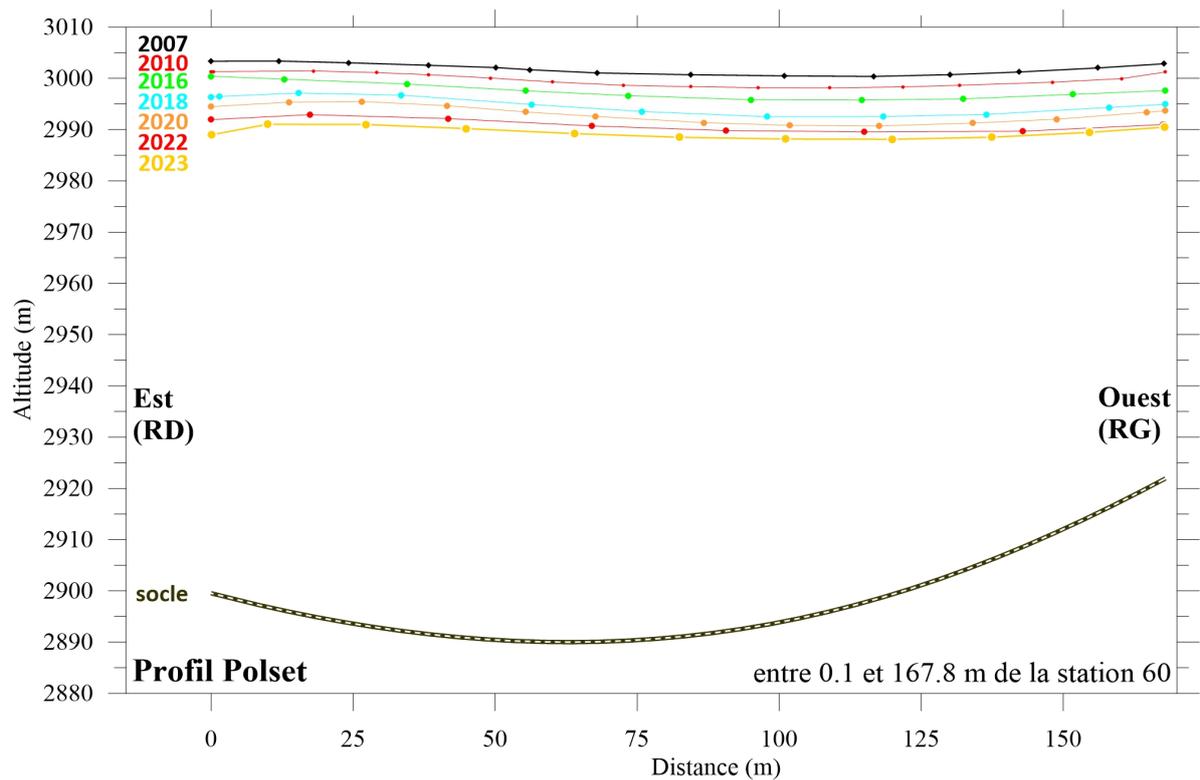


Figure 4a : Variations d'altitude aux profils Polset (3000 m d'altitude) et Peclet (2850 m d'altitude). La situation de ces profils est reportée sur la Figure 1. RD et RG signifient Rive Droite et Rive Gauche.

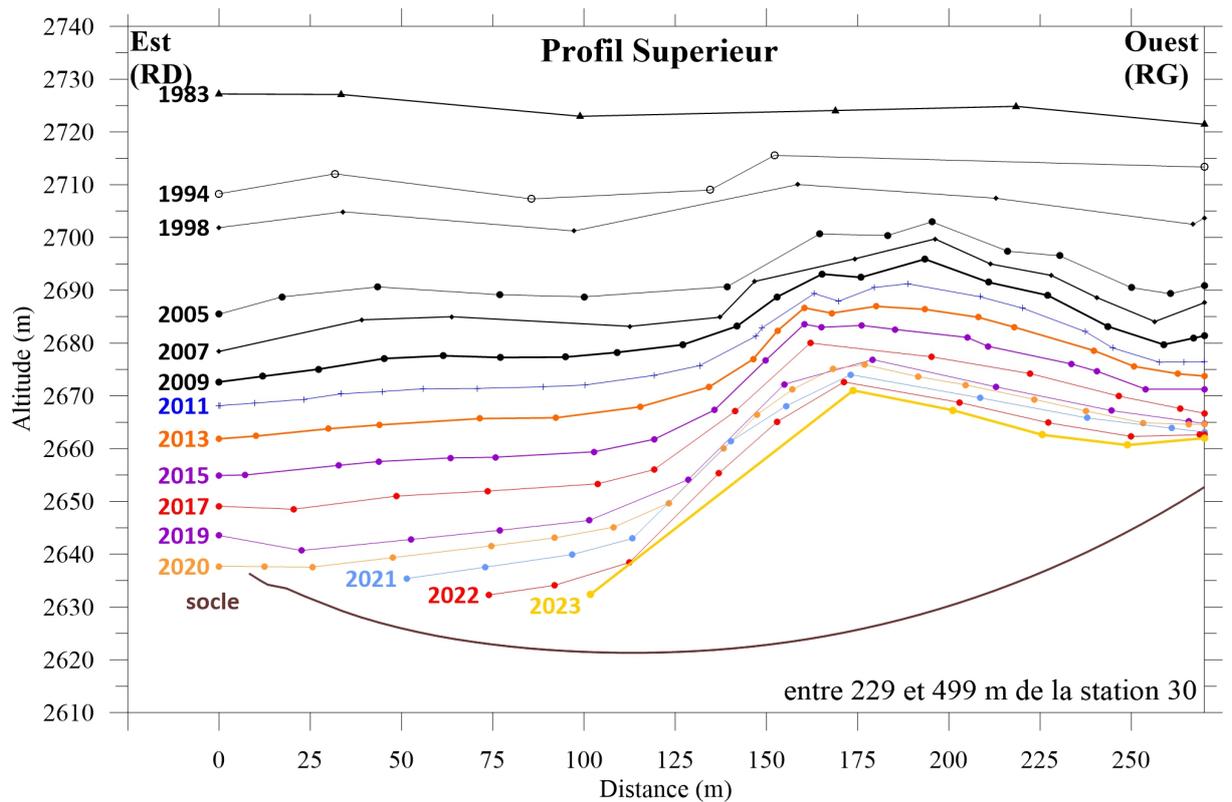
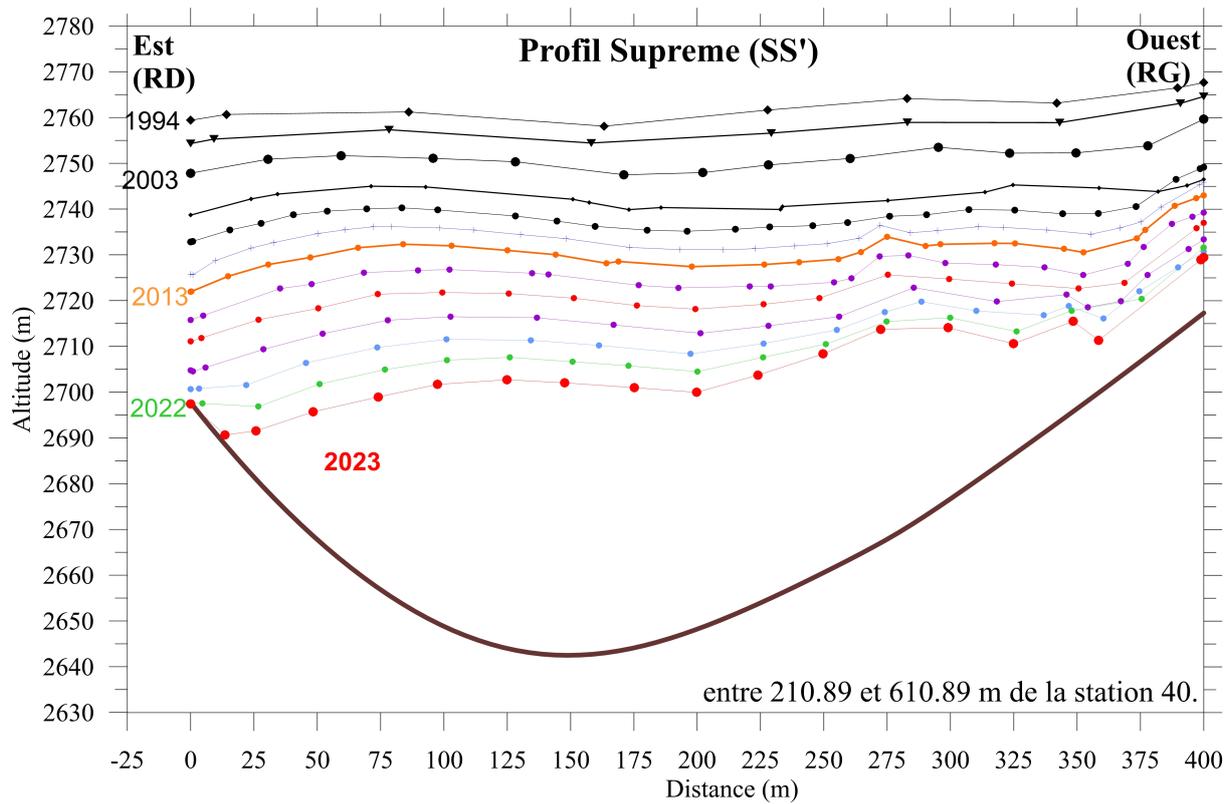


Figure 4b : Variations d'altitude aux profils Suprême et Supérieur (profils vus de l'aval). La situation de ces profils est reportée sur les Figures 1 et 6. RD et RG signifient Rive Droite et Rive Gauche.

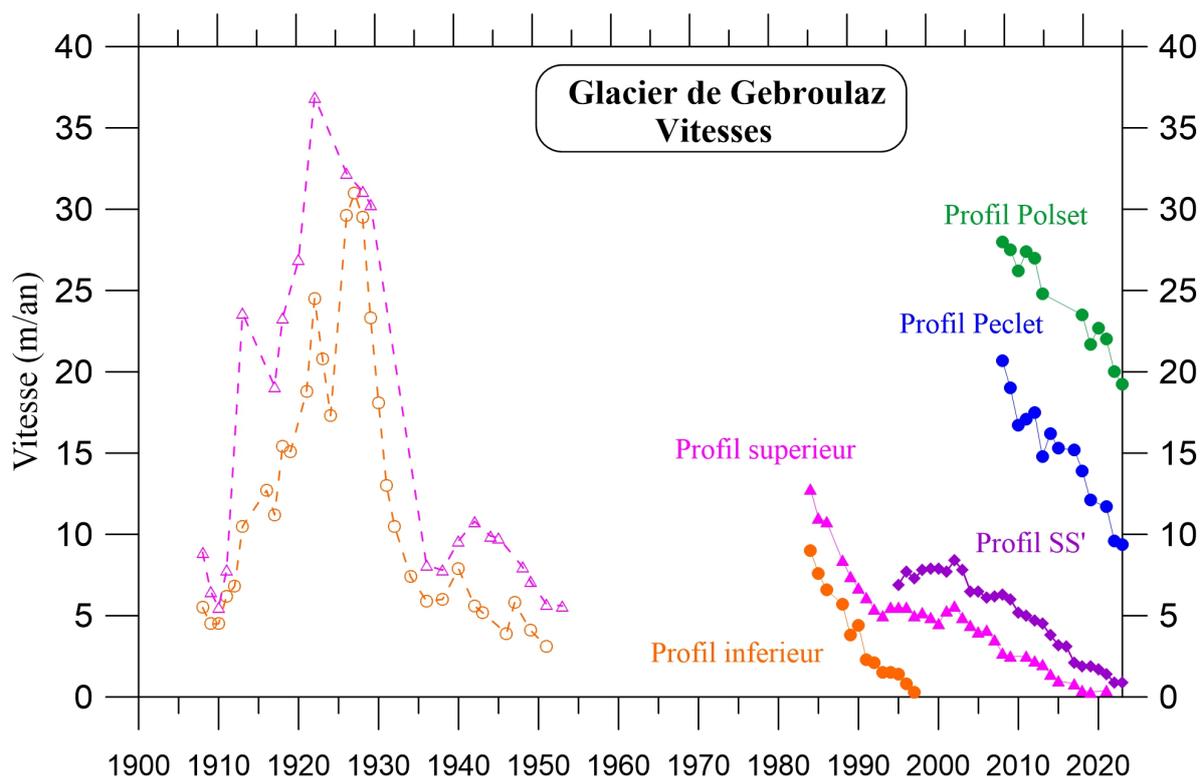
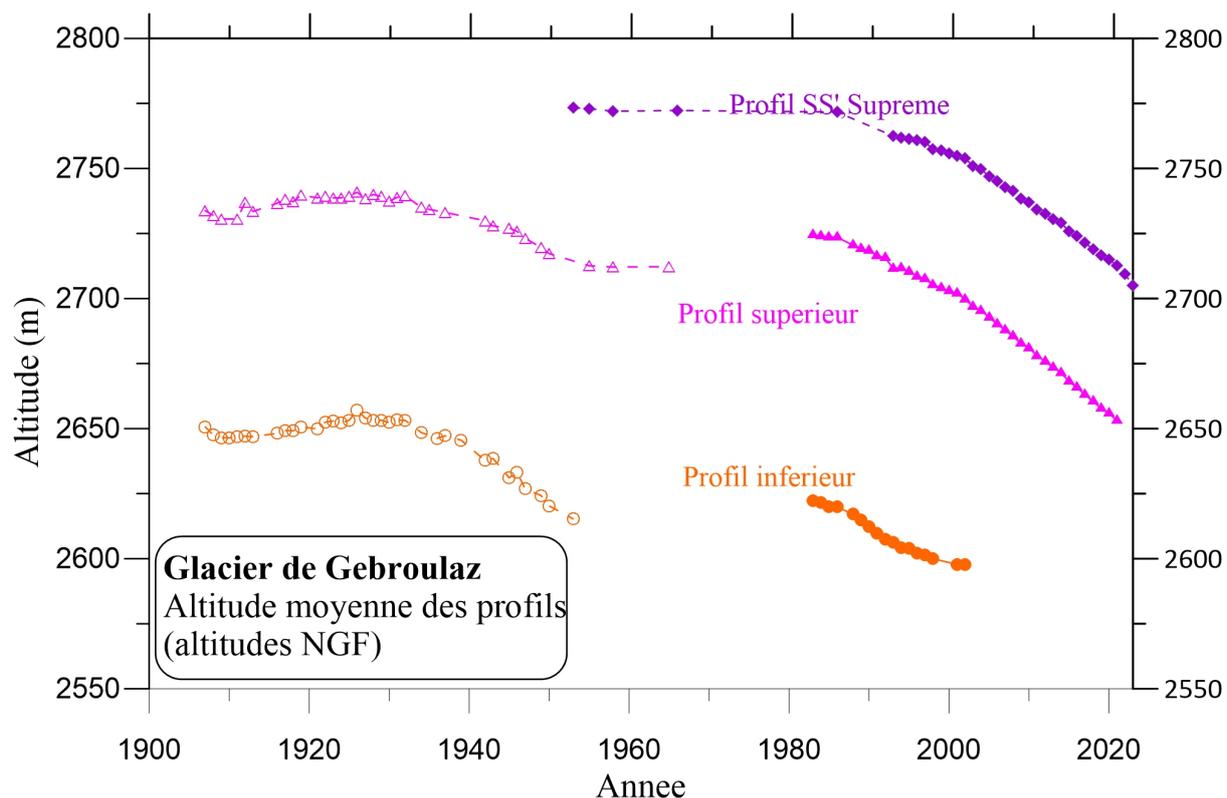


Figure 5 : Variations des épaisseurs aux trois profils transversaux Suprême, Supérieur et Inférieur (haut de la figure) et variations de vitesses sur ces trois profils (depuis 1983, les vitesses sont celles du centre du glacier) (bas de la figure). Les vitesses et altitudes moyennes des profils Peclet et Polset ne sont pas représentées sur cette figure. Les mesures entre 1907 et 1954 ont été réalisées par les Eaux et Forêt ; à partir de 1983, les observations ont été faites par le Laboratoire de Glaciologie de Grenoble (IGE). Il n'y a pas eu de mesures de vitesses sur le glacier entre 1954 et 1983. Les altitudes des profils inférieur et supérieur sont exprimées dans le système altimétrique des Eaux et Forêts, qui diffère de plusieurs mètres du système NGF (Cf. Tableaux de l'Annexe III).

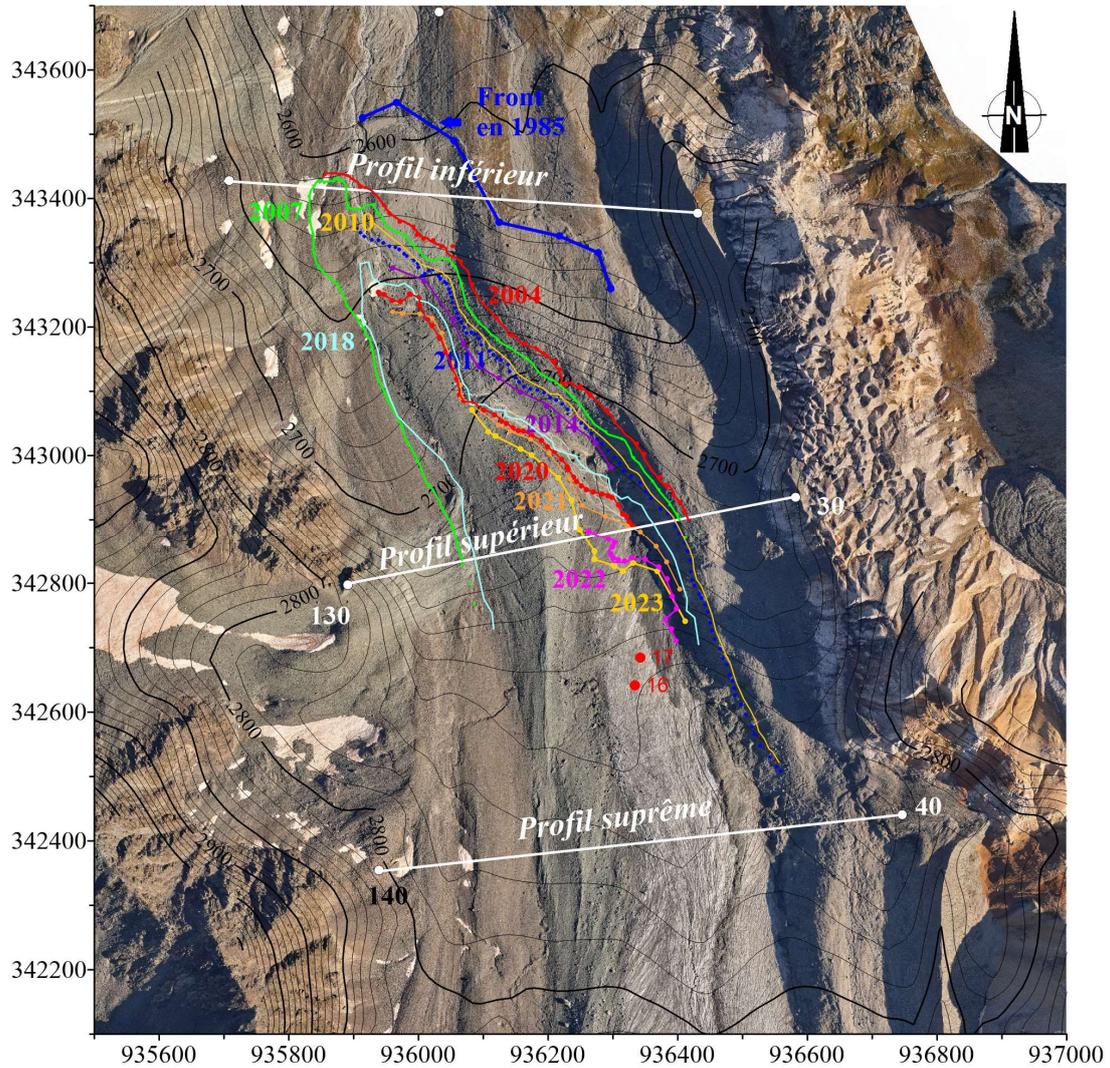


Figure 6 : Evolution du front du glacier depuis 1985. Localisation des balises d'ablation implantées en bas du glacier en 2022 en rouge. Les trois profils transversaux du bas sont également représentés. En 2023, le front n'a pas été topographié. En rive gauche, les éboulements de la moraine n'ont pas permis de se rapprocher du front. Dans cette zone du glacier, il est complexe de déterminer la glace active des moraines. La position du front est généralement donnée avec plusieurs mètres d'incertitude.

Depuis 2022, il est compliqué de calculer l'altitude ainsi que la perte d'épaisseur sur la totalité du profil *Supérieur* car une partie du profil (en rive droite) n'existe plus (voir photo ci-dessous de la mesure sur le profil, à proximité du front du glacier, photo réalisée en 2022). Si l'on se retirent à la rive gauche du glacier, là où la moraine protège le glacier (bosse sur la *Figure 4b* en bas. La distance d'application est alors calculée sur 170 m en rive gauche du glacier et non 270 m), alors la perte d'épaisseur est de -2.4 m.



Mesures topographiques du front du Glacier de Gébroulaz, Août 2022 (crédit D. Six)

IV. Variations des vitesses d'écoulement du glacier

a. Méthode de mesures

Les vitesses d'écoulement en surface du glacier (*Figure 5*, bas de la figure) sont mesurées à partir du déplacement des balises au centre du glacier, à l'aide des instruments de topographie GPS différentiel. Ces déplacements sont calculés sur une année entière en m/an. 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 *annexes I et XI*.

b. Résultats

En 2023, nous avons pu calculer les vitesses de l'ensemble des balises implantées en 2022 ainsi que de certaines de 2020 qui sont encore en place. La vitesse au profil Polset est calculée à partir des vitesses des balises 23 et 24, celle du profil Peplet, correspond à la vitesse de la balise 5 et la vitesse au profil SS' est calculée avec les balises 12 et 13. Il n'est plus possible de calculer de vitesse sur le profil Supérieur, le front se situant désormais au niveau de ce profil. D'une façon générale, le glacier ralentit, en lien avec les pertes d'épaisseur du glacier.

L'aspect chaotique des courbes de vitesses mesurées aux profils Polset et Peplet (*Figure 5*) sont à mettre en relation avec la localisation des balises utilisées pour estimer ces vitesses. En effet, la variabilité spatiale de la vitesse est importante dans ces deux régions et les estimations de vitesses

ne sont pas déterminées exactement aux mêmes sites puisque les balises avancent avec l'écoulement du glacier et ne sont pas renouvelées chaque année.

V. Variations de la position du front

Cette année encore, la détection de la présence de glace en rive gauche est très délicate puisque sur cette rive, le glacier est couvert d'une épaisse couverture morainique. Aussi, il est très difficile de délimiter sur le terrain le bord du glacier en rive gauche. L'estimation de la rive gauche reste donc subjective et on peut supposer que son évolution est lente, sous cet amas de débris.

En rive droite, la délimitation ne pose aucun problème puisque le glacier est dépourvu de débris morainiques. De ce fait, il est encore extrêmement compliqué de mesurer le recul du front et une mesure annuelle n'aurait pas de sens au vu de l'imprécision de la détermination de la forme du glacier en rive gauche.

Nous n'avons donc pas mesuré le front (ni son recul) en 2023.

En 2018, nous avons recalculé les fluctuations du front depuis 1983 à partir d'une méthode de perte de surface sur une distance donnée en rive droite. Cette perte n'est pas forcément représentative de la perte en rive gauche. Avec cette méthodologie, nous avons estimé que le glacier avait reculé de 10 m entre 2018 et 2020.

Depuis 1983 (maximum de la dernière avancée), le front a reculé de 240 m. Entre 1990 et 2020, le recul était égal à 180 m. C'est un recul modéré par rapport à d'autres glaciers (*Figure 7*), à nouveau en raison de la forte couverture morainique de la rive gauche.



Front du Glacier de Gébroulaz le 29 juin 2023 (crédit B. Jourdain)

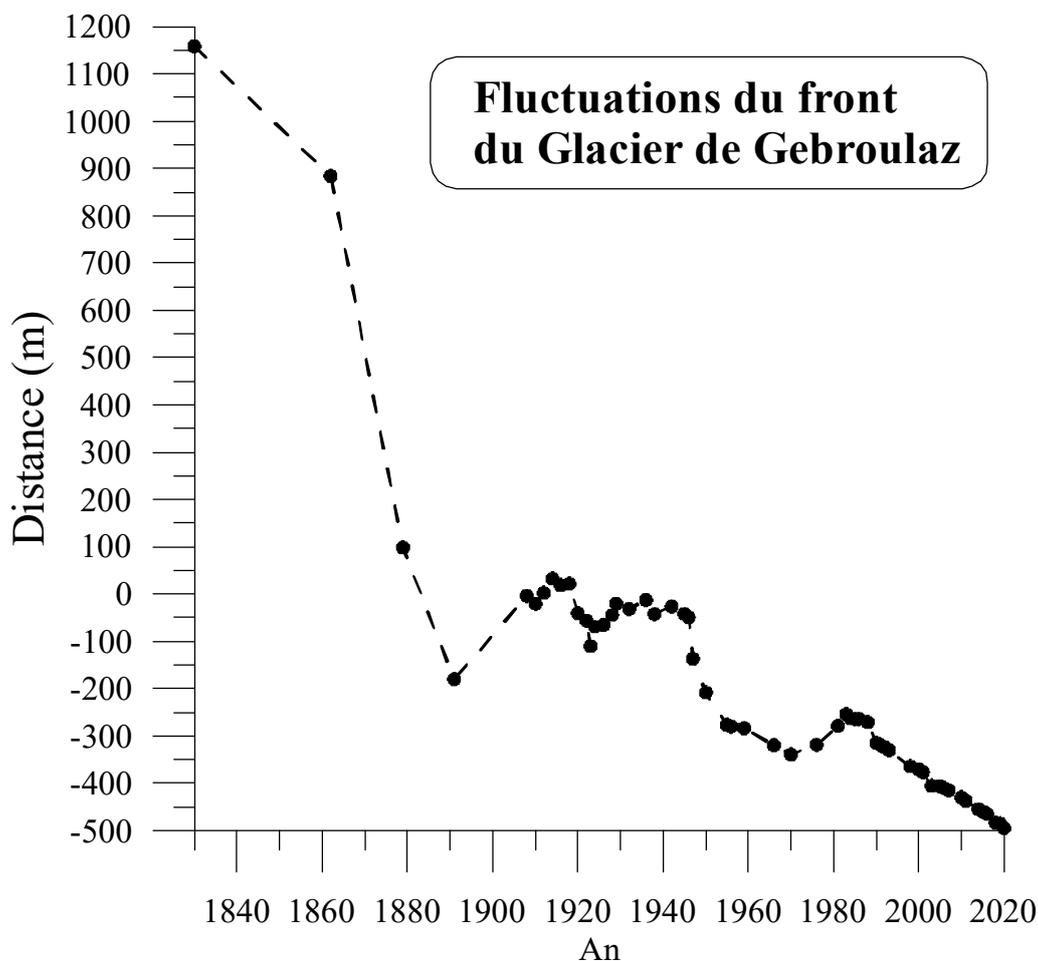


Figure 7 : Fluctuations de longueur du glacier de Gébroulaz depuis 1830.

VI. Epaisseurs de glace

Grâce à une collaboration avec EDF sur le secteur de Gébroulaz, une campagne de mesure de la forme du lit rocheux et des épaisseurs de glace a pu être menée sur le glacier. Cette campagne a été réalisée à l'aide d'un instrument RADAR opéré par l'IGE les 28 et 29 juin 2023.

Vingt-deux profils ont été réalisés afin de couvrir une large superficie du glacier.

Après un traitement des observations réalisé également par l'IGE, nous pouvons interpoler les mesures des épaisseurs de glace et déterminer la forme du lit rocheux sur l'ensemble du glacier.

Sur la *Figure 8*, nous faisons ainsi apparaître (avec l'autorisation d'EDF) la forme du lit rocheux et sur la *Figure 9*, les épaisseurs de glace restantes sur le glacier en septembre 2021.

Ainsi, nous avons pu mesurer qu'au maximum, il reste 55 m de glace vers les balises 1, 2 et 3 c'est-à-dire vers 2860 m d'altitude. Un peu plus bas sur le glacier, vers les balises 12 et 13, il reste au maximum 70 de glace. Nos mesures montrent qu'il reste au maximum 110 m de glace aux alentours de 3000-3100 m, approximativement vers les balises d'ablation 23-24 et vers la balise d'accumulation 6.

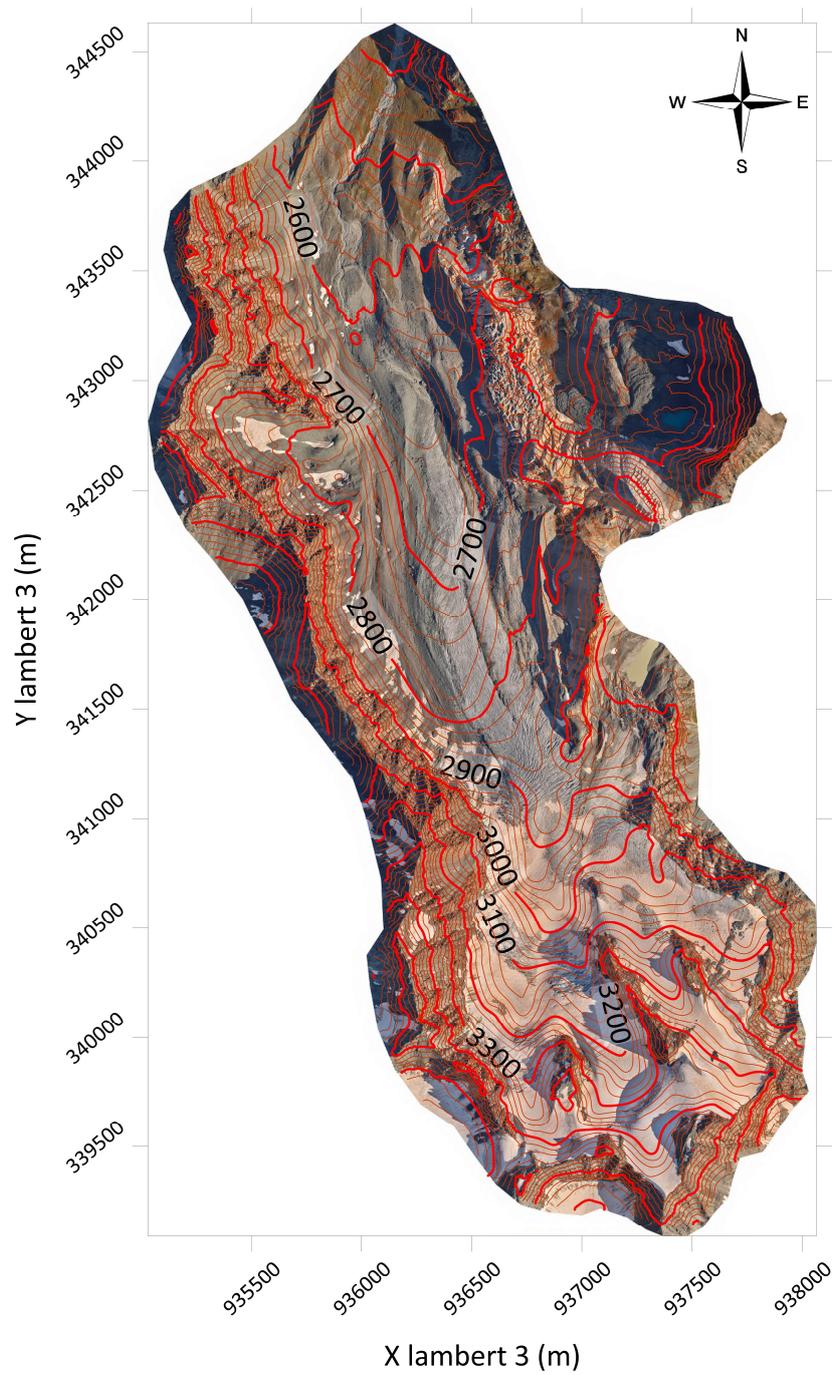


Figure 8 : Topographie (Modèle Numérique de Terrain) du lit rocheux sous le glacier de Gébroulaz

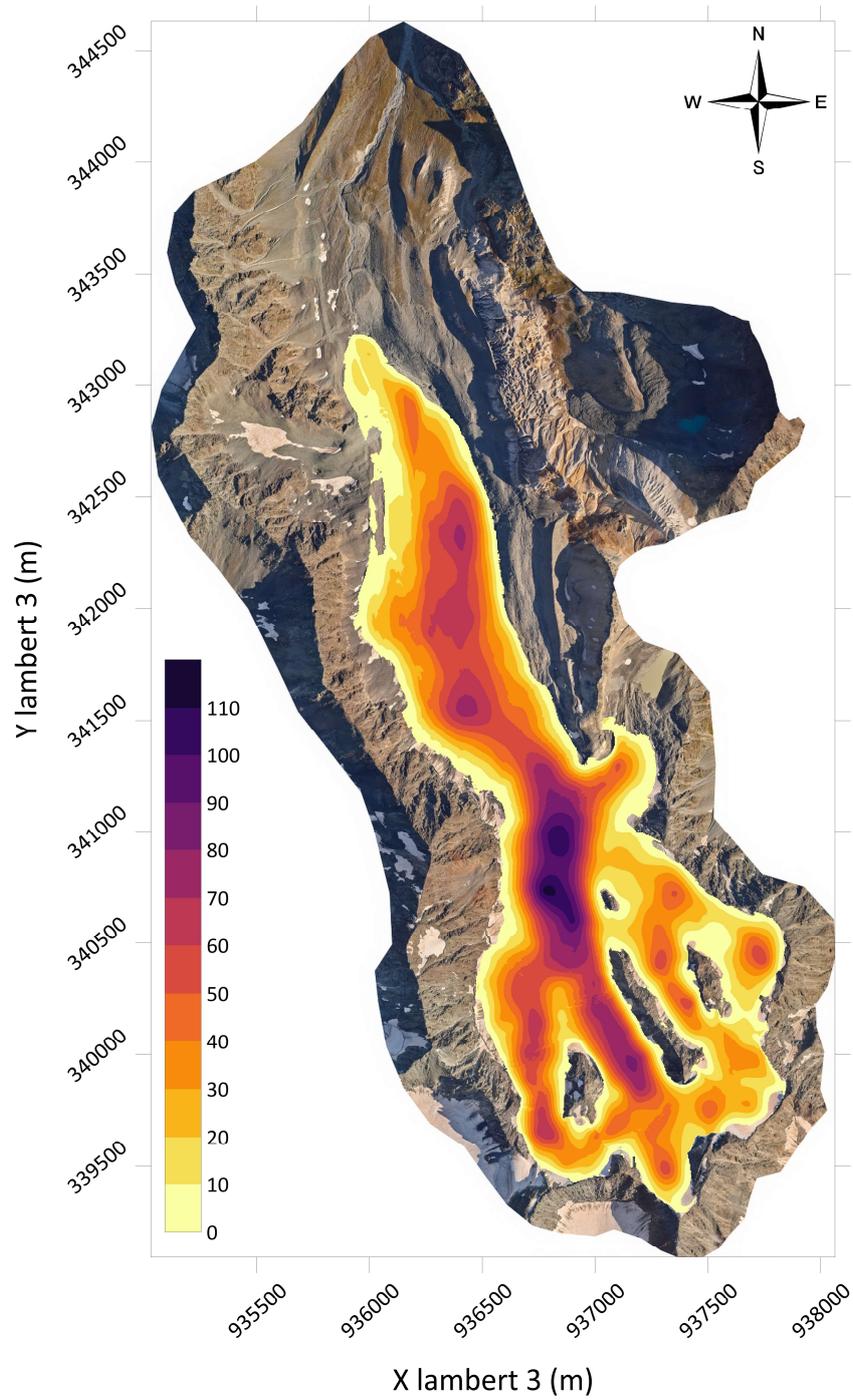


Figure 9 : Epaisseurs de glace du glacier de Gébroulaz, d'après la campagne RADAR de Juin 2023

VI. Conclusions

L'année 2023 se caractérise par un bilan de masse annuel sur l'ensemble du glacier très négatif, le deuxième plus négatif après 2022.

Ce bilan annuel extrêmement négatif, de -2.06 m d'eau, est lié à des bilans estivaux très déficitaires. Le bilan annuel total du glacier est donc beaucoup plus négatif que le bilan annuel moyen sur la période 1994-2023, qui est de -0.81 m d'eau. Jamais le bilan n'avait dépassé les -2 m d'eau avant 2022. Le bilan de 2022 était de -2.55 m d'eau. Le bilan 2023 est quasiment 3 fois plus déficitaire que la moyenne des 28 dernières années. Le glacier a donc connu 2 années consécutives de bilan très négatif. Cette année, c'est l'équivalent d'une lame de glace de 2,30 m qui a été rabotée sur l'ensemble de la surface, les parties basses perdant bien plus que les parties hautes.

Grâce à un hiver bien enneigé, les parties hautes du glacier ont cependant réussi à conserver un peu de neige. La zone d'accumulation est quand même en 2023 extrêmement réduite.

Grâce à des mesures LIDAR aéroportées réalisées en 2021, nous avons pu déterminer les bilans géodésiques de ce glacier (variations de masse et de volume) sur l'ensemble de la série de mesures. Ainsi, nous avons « recalé » notre série de bilans mesurés « in-situ ». Le glacier de Gébroulaz a perdu une lame d'eau de 38.5 m depuis 1907 sur l'ensemble de sa surface. L'analyse les pertes de masse du glacier sur le siècle indique que le glacier perd de la masse depuis le milieu des années 80, avec de très courtes périodes de répit, et que cette perte de masse s'est accentuée après 2003. Dorénavant, les 10 années les plus négatives depuis 1985 se situent après 2003. En conséquence, le glacier ralentit et l'épaisseur diminue.

La collaboration avec EDF sur le glacier de Gébroulaz a permis de déterminer les épaisseurs de glace restantes sur ce glacier via des observations RADAR menées en Juin 2023. Nos mesures montrent qu'il reste au maximum 110 m de glace aux alentours de 3000-3100 m, approximativement vers les balises d'ablation 23-24 et vers la balise d'accumulation 6.

Les observations du glacier de Gébroulaz sont essentielles dans le cadre des recherches sur les relations glaciers-climat et ce glacier fait partie d'un *Service d'Observation* national (GLACIOCLIM), reconnu par l'Institut National des Sciences de l'Univers (du CNRS) et le Ministère de la Recherche (<http://glacioclim.osug.fr>) et constitue l'une des plus longues séries d'observations dans les Alpes.

Le glacier de Gébroulaz est également intégré dans la base de données internationale du WGMS (*World Glacier Monitoring Service* de l'UNESCO) ainsi que dans le réseau CRYONET, programme du *Global Cryosphere Watch* (Organisation Météorologique Mondiale). Il fait partie aussi de la base de données de l'ONERC (*Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique*).

Le soutien du Parc de la Vanoise est indispensable à ce suivi récurrent du glacier et nous tenons à remercier le Parc pour son engagement auprès de l'IGE depuis de nombreuses années. En particulier, nous remercions nos contacts privilégiés en les personnes de Vincent AUGÉ et Nicolas GOMEZ, tous deux facilitateurs de nos échanges scientifiques, techniques et administratifs. Delphine Six tient à présenter ses excuses au Parc pour le rendu tardif de ce rapport.

A Saint Martin d'Hères, IGE, 06 Février 2024

Delphine SIX, Olivier LAARMAN, Christian VINCENT

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 Polset	Profil Pecllet	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
14.08.2007			6.2 m/an	3.5 m/an	rocher
27.08.2008	28.0 m/an	20.7 m/an	6.3 m/an	2.7 m/an	rocher
31.08.2009	27.5 m/an	19.0 m/an	6.0 m/an	2.5 m/an	rocher
10.08.2010	26.2 m/an	16.7 m/an	5.2 m/an	Non mesurable	rocher
23.08.2011	27.4 m/an	17.1 m/an	5.0 m/an	2.5 m/an	rocher
14.08.2012	27.0 m/an	17.5 m/an	4.7 m/an	2.2 m/an	rocher
20.08.2013	24.8 m/an	14.8 m/an	4.5 m/an	2.0 m/an	rocher
25.08.2014	Non mesurée	16.2 m/an	3.8 m/an	1.4 m/an	rocher
26.08.2015	Balises trop éloignées du profil	15.3 m/an	3.2 m/an	1.0 m/an	rocher
01.09.2016			3.1 m/an		rocher
23.08.2017	/	15.2 m/an	2.1 m/an	0.8 m/an	rocher
26.09.2018	23.4 m/an	13.9 m/an	1.9 m/an	0.4 m/an	rocher
09.09.2019	21.7 m/an	12.1 m/an	1.9 m/an	0.3 m/an	rocher
26.08.2020	22.7 m/an	/	1.7 m/an	/	rocher
06.09.2021	22.0 m/an	11.7 m/an	1.4 m/an	0.3 m/an	rocher
22.08.2022	20.0 m/an	9.6 m/an	0.9 m/an	*	rocher
01.09.2023	19.2 m/an	9.4 m/an	0.9 m/an	*	rocher

ANNEXE II : Variations du front de 1983 (m) à 2020, à partir d'une référence correspondant au front de 1911 environ.

1983	-254,4
1984	-263,0
1985	- 263,7
1986	263,7
1988	-271,0
1990	-315,2
1991	-319,1
1992	-324,2
1993	-329,9
1998	-364,5
2000	-370,7
2001	-376,5
2003	-405,6
2005	-406,2
2006	-410,61
2007	-415
2010	-430
2011	-437,5
2014	-455,2
2015	-460
2016	-465
2017	/
2018	-484
2019	-485
2020	-495
2021	/
2022	/
2023	/

ANNEXE III: Variations des épaisseurs aux profils transversaux

Profils Peclet et Polset :

Date	Altitude Peclet NGF (m)	Altitude Polset NGF (m)
14.08.2007	2851.8	3001.7
27.08.2008	2850.3	3000.7
31.08.2009	2848.0	2999.0
10.08.2010	2847.2	2999.5
23.08.2011	2845.7	2998.8
14.08.2012	2844.2	2997.6
20.08.2013	2843.2	2998.0
25.08.2014		2999.3 (neige)
26.09.2015	2840.0	2997.6
01.09.2016	2839.3	2997.3
23.08.2017	2837.6	2996.7
26.09.2018	2835.5	2994.4
09.09.2019	2833.6	2993.5
26.08.2020	2832.3	2992.8
06.09.2021	2830.7	2992.7
22.08.2022	2827.7	2990.8
01.09.2023	2824.8	2989.3

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
09.08.2005	2751.7	2747.0
18.08.2006	2749.8	2745.1
14.08.2007	2747.4	2742.7
27.08.2008	2746.0	2741.3
31.08.2009	2743.0	2738.3
10.08.2010	2741.8	2737.1
23.08.2011	2738.9	2734.3
14.08.2012	2737.2	2732.5
20.08.2013	2735.3	2730.6
25.08.2014	2733.8	2729.1
26.09.2015	2730.5	2725.8
01.09.2016	2728.7	2724.0
23.08.2017	2726.1	2721.4

26.09.2018	2723.7	2719.0
09.09.2019	2721.4	2716.7
26.08.2020	2719.8	2715.1
06.09.2021	2717.3	2712.6
22.08.2022	2714.1	2709.4
01.09.2023	2710.0	2705.5

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 (m)	Altitude NGF (m)
12.08.1983	2713.1	2724.4
21.08.1984	2712.8	2724.1
25.10.1985	2712.3	2723.6
20.08.1986	2712.3	2723.6
1987		
25.08.1988	2709.2	2720.5
01.09.1989	2707.9	2719.2
01.09.1990	2707.2	2718.5
30.08.1991	2705.1	2716.4
20.08.1992	2704.5	2715.8
17.08.1993	2700.3	2711.6
11.08.1994	2700.4	2711.7
17.08.1995	2699.1	2710.4
05.09.1996	2697.3	2708.6
02.09.1997	2696.3	2707.6
01.09.1998	2693.9	2705.2
31.08.1999	2692.9	2704.2
24.08.2000	2691.6	2702.9
28.08.2001	2690.7	2702.0
21.08.2002	2688.5	2699.8
27.08.2003	2685.6	2696.9
16.08.2004	2684.1	2695.4
09.08.2005	2681.5	2692.8
18.08.2006	2678.9	2690.2
14.08.2007	2676.6	2687.9
27.08.2008	2674.2	2685.5
31.08.2009	2671.4	2682.7
10.08.2010	2669.7	2681.0
23.08.2011	2666.7	2678.0
14.08.2012	2664.6	2675.9
20.08.2013	2662.2	2673.5
25.08.2014	2660.2	2671.5
26.08.2015	2656.8	2668.1
01.09.2016	2654.5	2665.8
23.08.2017	2651.7	2663.0
26.09.2018	2649.2	2660.5
09.09.2019	2646.5	2657.8
26.08.2020	2644.5	2655.8
06.09.2021	2641.8	2653.1
22.08.2022	*	*
01.09.2023	*	*

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) Plaquette	935932.67 343518.90 2588.70		XYZ contrôlées en 2020
Station crête 2003 N°82	935748.35 342126.59 3007.62		Plaquette
Station 50	936777.26 342659.72 2839.35		Repère métallique LGGE
Profil 50 Pecllet RD	936664.03 341663.75		Installé en 2007 Longueur du profil : 230 m
RG	936444.07 341596.64		
Profil 60 Polset RD	936895.85 340900.19		Installé en 2007 (sur le plateau vers 3000 m) Longueur du profil : 168 m
RG	936727.92 340896.87		
Plaquette Col	935748.350 342126.590		Z= 3007.620
Vis Col	935733.929 342151.654		Z = 3010.320 (coord. recalculées en 2017) 3010.68 (corrigeés en 2018)

ANNEXE V: Coordonnées des extrémités des profils

	Latitude	longitude
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
Profil Peclet RD	45°17'45.096	6°37'48.182
Profil Peclet RG	45°17'43.297	6°37'37.941
Profil Polset RD (vers 3000 m)	45°17'20.008	6°37'56.978
Profil Polset RG	45°17'20.184	6°37'49.275

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
Balise 22	45°17'20.0	6°37'56.9
Balise 23	45°17'20.1	6°37'53.8
Balise 24	45°17'20.1	6°37'51.6
Balise 25	45°17'20.2	6°37'49.3

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: Coordonnées des secteurs utilisés pour le calcul des bilans

Coordonnées origine	936200 341500
Taille de la maille	200 m
Largeur du secteur (X)	1000 m
Longueur du secteur (Y)	1400 m
Observations	Zone d'ablation

ANNEXE IX : 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 X : 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

En 2007 ont été rajoutés deux nouveaux profils :

- le profil de Pecllet ou profil 50-50b
- le profil Polset ou profil 60-60b

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 XI: Bilans et vitesses mesurées à partir des balises

Zone d'accumulation, balises 2023

point	date	x	y	z	haut. enf.	neige m	dens neig	bilan equiv. eau	vites hor. m/an	vites pente m/an
122	5.10.23	937160.00	340510.00	3130.00	0.01	0.00	0.00	1.66	0.0	0.0
123	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	4.28	4.28	0.39			
322	5.10.23	937580.00	339780.00	3390.00	0.01	0.00	0.00	1.44	0.0	0.0
323	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	4.25	4.25	0.34			
323	13.10.23	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.50	-1.35	0.0	0.0
422	5.10.23	937370.00	340310.00	3200.00	0.01	0.00	0.00	1.67	0.0	0.0
423	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	4.55	4.55	0.37			
423	1. 9.23	0.00	0.00	0.00	0.30	0.30	0.47	-1.54	0.0	0.0
522	5.10.23	936910.00	340890.00	3005.00	0.01	0.00	0.00	1.03	0.0	0.0
523	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	2.60	2.60	0.40			
622	5.10.23	936846.00	340600.00	3070.00	0.01	0.00	0.00	1.97	0.0	0.0
623	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	4.95	4.95	0.40			
1122	5.10.23	936860.00	339630.00	3425.00	0.01	0.00	0.00	2.03	0.0	0.0
1123	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	5.99	5.99	0.34			
1123	1. 9.23	0.00	0.00	0.00	2.22	2.22	0.47	-0.99	0.0	0.0
1123	13.10.23	0.00	0.00	0.00	2.12	2.12	0.48	-0.03	0.0	0.0

Nota: la hauteur enfouie est totale: glace+neige

Zone d'ablation, balises 2022

point	date	x	y	z	haut. enf.	neige m	dens neig	bilan equiv. eau	vites hor. m/an	vites pente m/an
122	22. 8.22	936529.74	341369.54	2864.69	9.78	0.00	0.00	-0.81	0.0	0.0

122	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.88	0.00	0.00			
123	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	12.14	3.26	0.37	1.21	0.0	0.0
123	1. 9.23	936522.66	341378.43	2860.06	6.69	0.00	0.00	-3.18	11.0	11.3
123	13.10.23	0.00	0.00	0.00	6.20	0.00	0.00	-0.44	0.0	0.0

222	22. 8.22	936595.22	341474.58	2861.91	9.98	0.00	0.00			
222	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.92	0.00	0.00	-0.95	0.0	0.0
223	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	11.02	2.10	0.37	0.78	0.0	0.0
223	1. 9.23	936587.89	341486.70	2855.55	6.13	0.00	0.00	-3.29	13.8	14.2
223	13.10.23	0.00	0.00	0.00	5.58	0.00	0.00	-0.49	0.0	0.0

322	22. 8.22	936674.87	341548.80	2853.63	9.85	0.00	0.00			
322	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.91	0.00	0.00	-0.85	0.0	0.0
323	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	11.48	2.57	0.37	0.95	0.0	0.0
323	1. 9.23	0.00	0.00	0.00	6.00	0.00	0.00	-3.57	0.0	0.0
323	13.10.23	0.00	0.00	0.00	5.42	0.00	0.00	-0.52	0.0	0.0

422	22. 8.22	936662.68	341672.76	2826.51	9.82	0.00	0.00			
422	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.91	0.00	0.00	-0.82	0.0	0.0
423	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	11.69	2.78	0.37	1.03	0.0	0.0
423	1. 9.23	0.00	0.00	0.00	6.02	0.00	0.00	-3.63	0.0	0.0
423	13.10.23	0.00	0.00	0.00	5.32	0.00	0.00	-0.63	0.0	0.0

522	22. 8.22	936574.27	341633.59	2829.78	9.80	0.00	0.00			
522	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.88	0.00	0.00	-0.83	0.0	0.0
523	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	11.71	2.83	0.37	1.05	0.0	0.0
523	1. 9.23	936571.00	341642.63	2824.93	6.07	0.00	0.00	-3.58	9.3	9.5
523	13.10.23	0.00	0.00	0.00	5.33	0.00	0.00	-0.67	0.0	0.0

622	22. 8.22	936401.68	341536.22	2830.98	9.90	0.00	0.00			
622	5.10.22	0.00	0.00	0.00	8.84	0.00	0.00	-0.95	0.0	0.0
623	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	11.02	2.18	0.37	0.81	0.0	0.0
623	1. 9.23	936398.69	341541.72	2826.94	5.60	0.00	0.00	-3.72	6.1	6.1
623	13.10.23	0.00	0.00	0.00	4.75	0.00	0.00	-0.76	0.0	0.0

722	22. 8.22	936593.18	341903.71	2790.94	10.40	0.00	0.00			
								-0.95	0.0	0.0
722	5.10.22	0.00	0.00	0.00	9.34	0.00	0.00			
								1.29	0.0	0.0
723	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	12.64	3.30	0.39			
								-3.48	0.0	0.0
723	1. 9.23	0.00	0.00	0.00	6.90	0.00	0.00			
								-1.58	0.0	0.0
723	13.10.23	0.00	0.00	0.00	5.14	0.00	0.00			

822	22. 8.22	936533.64	341894.69	2785.73	10.65	0.00	0.00			
								-1.08	0.0	0.0
822	5.10.22	0.00	0.00	0.00	9.45	0.00	0.00			
								1.68	0.0	0.0
823	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	13.75	4.30	0.39			
								-3.76	3.6	3.9
823	1. 9.23	936533.18	341898.39	2781.83	7.13	0.00	0.00			
								-0.68	0.0	0.0
823	13.10.23	0.00	0.00	0.00	6.37	0.00	0.00			

922	22. 8.22	936373.72	341882.42	2789.14	12.55	0.00	0.00			
								-1.03	0.0	0.0
922	5.10.22	0.00	0.00	0.00	11.40	0.00	0.00			
								1.31	0.0	0.0
923	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	14.64	3.14	0.39			
								-3.96	4.2	4.4
923	1. 9.23	936373.00	341886.71	2785.00	8.46	0.00	0.00			
								-0.80	0.0	0.0
923	13.10.23	0.00	0.00	0.00	7.57	0.00	0.00			

1222	22. 8.22	936461.05	342379.57	2708.72	10.59	0.00	0.00			
								-1.34	0.0	0.0
1222	5.10.22	0.00	0.00	0.00	9.10	0.00	0.00			
								1.28	0.0	0.0
1223	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	12.39	3.29	0.39			
								-4.73	1.1	2.4
1223	1. 9.23	936461.83	342380.38	2702.66	5.27	0.00	0.00			
								-1.18	0.0	0.0
1223	13.10.23	0.00	0.00	0.00	3.96	0.00	0.00			

1322	22. 8.22	936307.88	342366.68	2713.32	9.84	0.00	0.00			
								-0.55	0.0	0.0
1322	5.10.22	0.00	0.00	0.00	9.23	0.00	0.00			
								1.64	0.0	0.0
1323	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	13.44	4.21	0.39			
								-3.64	0.9	1.1
1323	1. 9.23	936308.03	342367.56	2710.44	7.01	0.00	0.00			
								-0.71	0.0	0.0
1323	13.10.23	0.00	0.00	0.00	6.22	0.00	0.00			

1122	22. 8.22	936518.68	342341.42	2706.17	10.50	0.00	0.00			
								-1.35	0.0	0.0
1122	5.10.22	0.00	0.00	0.00	9.00	0.00	0.00			
								1.35	0.0	0.0
1123	27. 4.23	0.00	0.00	0.00	12.47	3.47	0.39			
								-4.39	0.4	1.5
1123	1. 9.23	936518.72	342341.86	2701.28	5.63	0.00	0.00			
								-0.84	0.0	0.0
1123	13.10.23	0.00	0.00	0.00	4.70	0.00	0.00			

```

-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1622!22. 8.22! 936334.17! 342641.42!2678.44!10.60! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1622! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 9.35! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1623!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00!12.55! 3.20!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1623! 1. 9.23! 936333.89! 342641.42!2673.14! 5.67! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1623!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 4.49! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1722!22. 8.22! 936342.18! 342684.90!2670.58! 7.48! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1722! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 6.31! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1723!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00! 9.59! 3.28!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1723! 1. 9.23! 936342.02! 342684.87!2664.89! 2.14! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 1723!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 1.02! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2222!22. 8.22! 936892.50! 340905.33!2991.02! 9.85! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2222! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 9.05! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2223!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00!11.93! 2.88!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2223! 1. 9.23! 936894.39! 340924.11!2984.74! 6.90! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2223!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 6.56! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2322!22. 8.22! 936832.54! 340898.12!2991.05! 9.81! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2322! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 9.02! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2323!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00!12.48! 3.46!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2323! 1. 9.23! 936834.18! 340917.81!2985.61! 7.13! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2323!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 6.66! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2422!22. 8.22! 936771.44! 340904.77!2988.59! 9.82! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2422! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 8.92! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2423!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00!12.50! 3.58!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2423! 1. 9.23! 0.00! 0.00! 0.00! 7.60! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2423!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 7.18! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
-----
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2522!22. 8.22! 936730.37! 340902.34!2990.25! 9.83! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2522! 5.10.22! 0.00! 0.00! 0.00! 8.84! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2523!27. 4.23! 0.00! 0.00! 0.00!13.46! 4.62!0.40! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2523! 1. 9.23! 936731.97! 340920.98!2987.10! 8.40! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !
! 2523!13.10.23! 0.00! 0.00! 0.00! 7.18! 0.00!0.00! ! ! ! !
! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! ! !

```

```
! 2523!13.10.23!      0.00!      0.00!      0.00! 7.84! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
```

Nota: la hauteur enfouie est totale: glace+neige

Zone d'ablation, balises 2020

```
-----
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
!point! date !      x      !      y      !      z      !haut.!neige!dens!bilan !vites!vites!
!      !      !      m      !      m      !      m      !enf. !neig!neig!equiv.!hor. !pente!
!      !      !      m      !      m      !      m      !     !eau !m/an !m/an !
-----
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 120!26. 8.20! 936543.28! 341368.08!2870.61! 8.80! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 120!20.10.20!      0.00!      0.00!      0.00! 8.20! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 121!10. 6.21!      0.00!      0.00!      0.00!12.47! 4.27!0.47!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 121! 6. 9.21! 936533.57! 341380.85!2866.90! 7.32! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 121!18.10.21!      0.00!      0.00!      0.00! 6.92! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 122!12. 5.22!      0.00!      0.00!      0.00! 9.64! 2.72!0.49!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 122!22. 8.22! 936526.00! 341390.27!2861.64! 3.75! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 122! 5.10.22!      0.00!      0.00!      0.00! 2.85! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 123!27. 4.23!      0.00!      0.00!      0.00! 6.11! 3.26!0.37!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 123! 1. 9.23! 936518.61! 341399.93!2857.00! 0.53! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 123!13.10.23!      0.00!      0.00!      0.00! 0.04! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
-----
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2520!26. 8.20! 936726.78! 340901.20!2993.07! 8.48! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2520!20.10.20!      0.00!      0.00!      0.00! 8.08! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2521!10. 6.21!      0.00!      0.00!      0.00!13.38! 5.30!0.47!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2522!22. 8.22! 936730.64! 340940.45!2986.94! 6.00! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2522! 5.10.22!      0.00!      0.00!      0.00! 5.12! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2523!27. 4.23!      0.00!      0.00!      0.00! 9.74! 4.62!0.40!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2523! 1. 9.23! 936732.80! 340959.19!2984.41! 4.76! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2523!13.10.23!      0.00!      0.00!      0.00! 4.20! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
-----
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2420!26. 8.20! 936779.99! 340902.95!2989.78! 8.36! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2420!20.10.20!      0.00!      0.00!      0.00! 7.96! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2421!10. 6.21!      0.00!      0.00!      0.00!12.46! 4.50!0.47!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2421! 6. 9.21! 936781.84! 340925.44!2986.54! 7.82! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2421!18.10.21!      0.00!      0.00!      0.00! 7.45! 0.00!0.00!      !      !      !
!      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !      !
! 2422!12. 5.22!      0.00!      0.00!      0.00!10.95! 3.50!0.49!      !      !      !
```