Auscultation photogrammétrique sur le glacier du Baounet (Savoie, France). Premiers résultats et retours d'expérience

Sylvain Jobard (1), Yoann Jobard (2), Pierre Carreaud (3)

Résumé :

Le glacier du Baounet, situé en Haute Maurienne (Savoie, France), est suivi par une station de mesure hydrométéorologique qui permet d'estimer l'ablation estivale journalière depuis 2002. Dans le but de caler les résultats saisonniers, une quantification de la variation de volume annuelle a été réalisée à partir de relevés photogrammétriques avec un drone grand public. Sept campagnes de relevés ont été menées entre 2016 et 2021. Les relevés réalisés entre septembre 2017 et septembre 2021 ont permis de calculer des variations de volume à partir des modèles numériques de surface. Un bilan de masse moyen annuel de -1.87 mètres équivalents en eau a été calculé entre les années 2018 et 2021 à partir de couvertures quasi complètes du glacier. Les traitements produisent également des orthophotographies utilisées pour cartographier en détail les évolutions de la morphologie supraglaciaire et étudier la dynamique du glacier. Ces données de surface montrent notamment que les vitesses de surface sont devenues très faibles. L'objectif pour les prochaines années est de corréler les variations de structuration du réseau de drainage avec les indices morphologiques de surface et d'affiner les modélisations journalières de l'ablation estivale.

Mots clés : photogrammétrie, drone, relevé topographique, variation de masse, dynamique glaciaire, Baounet

1- Introduction

Le glacier du Baounet est suivi activement depuis 2002 par des mesures automatiques météorologiques et hydrologiques qui permettent de modéliser les volumes d'eau de fusion provenant de l'ablation journalière (Jobard et Dzikowski, 2016). Cette approche permet d'atteindre des résolutions temporelles détaillées, mais nécessite d'être régulièrement calibrée par des mesures d'ablation indépendantes. Des relevés par des balises d'ablation ont été réalisés entre 2009 et 2011 pour caler les premiers travaux de modélisation. Ces mesures glaciologiques auraient besoin d'être renouvelées tout en améliorant la précision des résultats. Or, les progrès récents sur l'acquisition de photographies aériennes par des drones grand public et le traitement de données par des applications dédiées ouvrent la possibilité de réaliser des bilans topographiques très détaillés (Benoit et al, 2019 ; Bernard et al., 2017).

Dans ce but, des essais ont été menés depuis quelques années sur le glacier du Baounet, initialement avec un avion de tourisme et des photographies obliques (Mertes et al. 2017) mais la résolution était insuffisante. Des tentatives ont également été réalisées avec des vecteurs à voilures fixes puis avec un quadricoptère grand public dont l'efficacité a été largement démontrée pour des applications scientifiques (Ely et al. 2017). Les traitements ont rapidement montré un potentiel très prometteur des résultats, notamment pour l'estimation du bilan de masse du glacier.

2- Le site d'étude

Le glacier du Baounet est situé dans la vallée d'Avérole, en Haute Maurienne (Savoie, France) et s'étend entre 2800m et 3300m sur une longueur de 1,5km (Fig. 1) Sa superficie actuelle est d'environ 90ha. C'est un glacier blanc, constitué dans les années 1990 d'une langue principale et de 2 affluents latéraux qui se sont maintenant séparés en raison du retrait accéléré des dernières décennies. La marge proglaciaire est active et évolue rapidement à mesure que le front du glacier recule et génère des dépôts fluvioglaciaires.

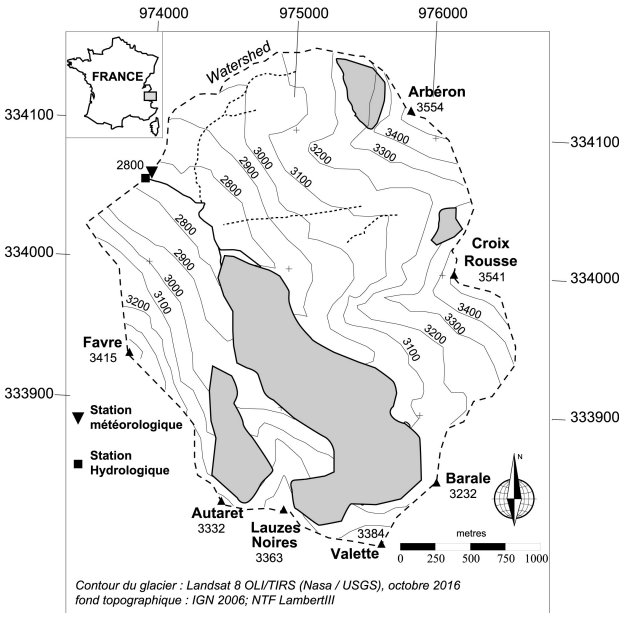

Fig.1. : localisation du glacier du Baounet

(1) Indépendant, sylvain.jobard@gmail.com
(2) SITES, Yoann.JOBARD@sites.fr
(3) SITES, Pierre.CARREAUD@sites.fr

3- Méthodologie

3.1- Matériel utilisé

Le matériel utilisé est un drone quadricoptère de marque DJI, modèle Phantom 3SE entre 2016 et 2019, puis un modèle Mavic Air entre 2020 et 2021. L'autonomie utile à cette altitude et pour ce type de mission est d'environ 15min. Le glacier est découpé en secteurs d'une surface d'environ 15 à 20ha permettant de conserver un visuel en permanence avec le drone. Les photos sont acquises le capteur photo et sa nacelle installés d'usine sur le vecteur. Les plans de vol avec un déclenchement automatique des photos sont générés par l'application Pix4D pour le Phantom 3 et Drone Harmony pour le Mavic Air.

3.2- Campagnes de relevés

L'altitude est fixée par défaut entre 100m et 120m du sol, ce qui permet d'atteindre une résolution de 3 à 4 cm/pixel. 5 vols de 10 à 15min sont nécessaires pour couvrir l'ensemble du glacier. Les missions sont répétées tous les ans, en fin de saison d'ablation, au cours du mois de septembre.

5 missions d'acquisition ont été réalisées entre 2016 et 2019 (*Fig. 2*), dont les premières ne couvraient que la moitié inférieure du glacier. La première couverture quasi complète a été obtenue en septembre 2018, mais le relevé de septembre 2019 a été limité par la présence de brouillard et de neige, bloquant la mesure sur la dernière station dans la zone d'accumulation. Le taux de couverture en septembre 2019 est donc comparable au relevé de 2017.

N° de campagne	date	couverture
1	11/09/2016	8%
2	13/07/2017	34%
3	29/09/2017	57%
4	08/09/2018	93%
5	07/09/2019	63%
6	06/09/2020	49%
7	11/09/2021	90%

Fig.2 : taux de couvertures des campagnes de relevés

3.3- Traitements photogrammétriques

Les missions d'acquisition produisent environ 1500 clichés qui sont ensuite traités avec une application spécialisée (Agisoft Metashape) pour produire le modèle numérique de surface et une orthophotographie. Le traitement nécessite un calage soigneux du modèle pour pouvoir ensuite être exploité en comparaison avec d'autres missions. Pour le moment, toutes les missions sont calées relativement les unes par rapport aux autres et une mission de relevé avec un GPS différentiel (DGPS) sera nécessaire pour établir un calage raccordé au nivellement général. Ce calage relatif est toutefois suffisant pour calculer des variations de volume du glacier d'un relevé au suivant.

4- Résultats

4.1- Evolution du front

A partir des orthophotographies, une carte d'évolution du front est tracée pour suivre le retrait et les variations du contour du glacier dans la zone latéro-frontale. Ces relevés permettent de quantifier précisément le retrait qui était jusque là suivi avec un simple GPS de randonnée dont l'incertitude horizontale est de quelques mètres. Le front du glacier a reculé d'une dizaine de mètres par an entre 2016 et 2019 (*Fig. 3*). Ces valeurs sont élevées mais conformes aux observations précédentes, avec une tendance nette à l'accélération. Le retrait reste hétérogène en fonction de la présence d' « anomalies », comme par exemple la présence d'ancienne cavité d'effondrement qui atteignent le front. L'émergence du torrent émissaire perturbe aussi le front avec une zone de plus grande ablation par sous-tirage de glace par le torrent. Le relevé par photogrammétrie permet de mieux documenter ces petites évolutions et de les mettre en relation avec la dynamique globale de retrait du glacier. La quantification est également bien plus précise qu'avec le pointage au GPS qui été utilisé jusqu'à présent.

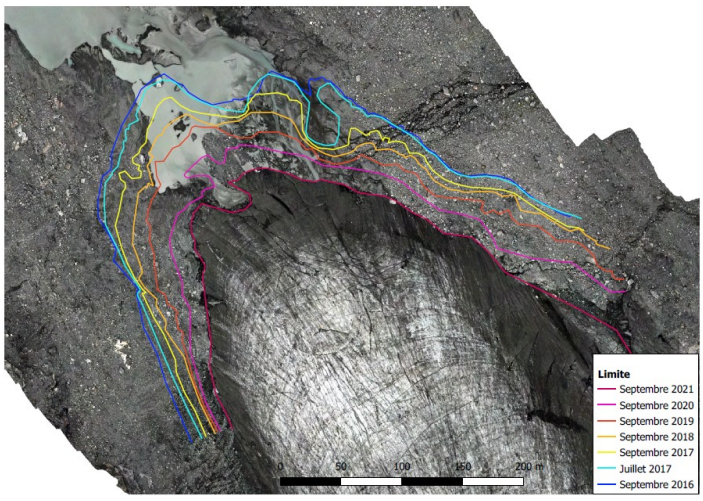

Fig.3 : Evolution du front du glacier entre 2016 et 2021

4.2- Variations de volume et bilan de masse

Les variations de volume peuvent être quantifiées à chaque couplet de relevés avec une représentation spatiale (*Fig. 4*). Toutefois, le premier frein est de disposer de deux relevés successifs avec un taux de couverture élevé. Pour approcher un véritable bilan de masse, les relevés de 2018 et 2021 ont été utilisés pour estimer un bilan de masse cumulée sur trois cycles hydrologiques. Le glacier a perdu **5.65 millions de m3** de glace sur une surface totale de **100.8 ha.**

L'observation de la surface nous indique que ces variations de volume se sont produites quasi exclusivement dans de la glace, la zone d'accumulation ayant quasiment disparue sur ce glacier ces dernières années. Nous pouvons donc en déduire que cette variation de volume, en prenant en compte une densité de la glace de 0,89, est équivalente à un **bilan de masse spécifique annuel de -1,87m équivalent en eau par an.**

Les autres relevés ne peuvent être exploités qu'en extrapolant les variations de surface vers l'amont et n'ont donc pas été retenus pour l'estimation du bilan de masse.

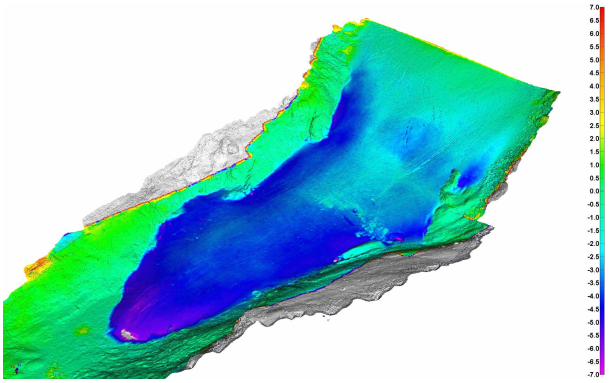

Fig.4 : Variation d'épaisseur entre 2018 et 2019 (échelle en mètres)

4.3- Orthophotographies et cartographie glacio-morphologique

Les orthophotographies servent de base à une cartographie détaillée de la surface du glacier pour inventorier les principales formes liées à l'ablation estivale et au réseau de drainage (*Fig. 5*). En effet, la très haute résolution comparée aux photographies aériennes existantes permet d'ouvrir un champ nouveau de recherche sur ce site (Rippin et al, 2015).

Dans les prochaines années, le but principal sera de corréler la densité de moulins avec le niveau de structuration du réseau de drainage du glacier, modélisé par ailleurs avec les données hydro-météorologiques. La cartographie de la couverture détritique peut apporter également des informations nouvelles sur la dynamique du glacier dans la zone frontale et la marge proglaciaire (Perolo et al., 2019). Les résultats obtenus appartiennent donc à deux grandes familles : la cartographie glacio-morphologique et le suivi dans le temps des marqueurs glaciologiques (moulins, crevasses, gros blocs rocheux, …). Les évolutions plus importantes pourront également être mieux documentées, comme l'apparition d'un lac supraglaciaire éphémère et les indices de vidange naturelle.

4.4- Retour d'expérience

Les points de calage utilisés pour les traitements photogrammétriques sont sélectionnés dans les espaces autours du glacier. Ceux-ci sont parfois peu ou mal stabilisés en raison de la présence fréquente de lentilles de glace sous les sédiments proglaciaires. Des erreurs de calage peuvent donc être induites par des mouvements non voulus des points d'appui en raison de mouvements des blocs rocheux d'une année à l'autre. La multiplication des points permet d'assurer un calage correct du modèle. Par ailleurs, et par définition, il est impossible de prendre des points de calage sur le glacier. Le modèle peut donc subir des artefacts de traitement sur la surface du glacier, mais la variation globale de la surface reste représentative.

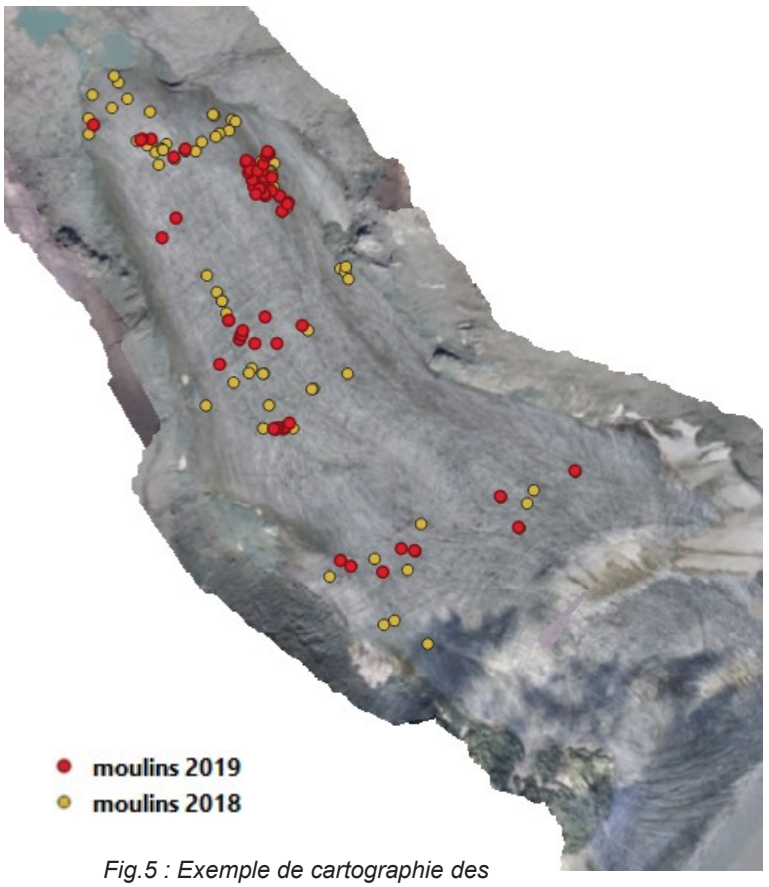

Fig.5 : Exemple de cartographie des moulins en 2018 et 2019

Des précautions sont donc à prendre dans l'interprétation des variations locales sur le glacier.

L'altitude induit des problèmes techniques sur la performance des batteries qui est limitée par les faibles températures. Le maintien des batteries au chaud avant les vols permet de limiter ce problème, les batteries ayant tendance naturellement à s'échauffer pendant le vol.

L'altitude dégrade également la dynamique du vol en raison de la faible pression atmosphérique et de la baisse de portance des hélices. Le vent est également un facteur météorologique important, le vecteur étant limité à une vitesse maximale de vent d'une quinzaine de mètres par seconde. Globalement, le vent crée un risque de perte de contrôle, comme par exemple aux abords du col de la Valletaz, et tend également à une surconsommation. La combinaison de ces facteurs contribue à induire des incertitudes sur le déroulement du relevé et à diminuer la durée de vol par rapport à un usage en fond de vallée ou en plaine.

L'altitude a un dernier effet non négligeable : le manque d'oxygène et l'effort nécessaire pour atteindre le site d'étude affecte les performances mentales du télépilote, ce qui accroit le risque d'erreur humaine. Ce risque est limité par l'entraînement et la formalisation des procédures à l'aide de check-listes.

L'acquisition des images sur le glacier pose également la question des plans de vol. La grande majorité des applications de planification est conçue pour des terrains relativement plans et il n'est généralement pas possible d'incliner le plan de vol pour suivre la topographie naturelle. Cette limitation logicielle nécessite de bien contrôler les plans de vol pour vérifier que la distance entre le vecteur et le sol est suffisante. De plus, si l'altitude du sol est mal estimée, il y a un risque de crash par interception du plan de vol avec la topographie.

5- Conclusion et perspectives

Les méthodes d'acquisition et de traitement des données sont maintenant bien rodées et permettent d'envisager des relevés systématiques en fin de saison d'ablation. Cependant, les mesures sont très sensibles aux conditions climatiques au moment des prises de vues pour permettre de réaliser une couverture complète du glacier, condition indispensable pour permettre de calculer un bilan de masse complet sur le glacier. La photogrammétrie est également envisagée pour le suivi de l'accumulation en réalisant une campagne de mesure en fin de période d'accumulation, couplée à des carottages du névé pour étalonner les densités.

La principale perspective est d'utiliser les résultats de bilan de masse topographiques pour caler le modèle hydrologique qui permet d'obtenir des ablations journalières. Ce projet est prévu pour l'année hydrologique 2021-2022 avec la réinstallation complète de la station de monitoring hydro-météorologique en 2021. Il sera également possible de comparer le degré de structuration et d'efficacité du réseau de drainage intra et sous glaciaire avec l'état du réseau hydrographique de surface cartographié à partir des orthophotographies en fin de saison d'ablation.

La dynamique du glacier sera aussi particulièrement suivi pour confirmer un quasi arrêt du glacier. Par ailleurs, le poinçon rocheux apparu en 2021 suggère une séparation à très court terme (Fig.6). Le suivi topographique permettra aussi de documenter cette évolution majeure dans la dynamique du glacier et de quantifier les impacts sur le réseau de drainage.

L'évolution de la marge proglaciaire pourra également être étudiée en détail sur la base des orthophotographies, en particulier la dynamique sédimentaire proglaciaire.

Le recours à un drone équipé de la technologie RTK serait une évolution importante du matériel pour affiner la résolution et réduire les temps de traitement (Grayson, et al., 2018).

L'acquisition de photos aériennes par un drone en haute montagne glaciaire reste un défi renouvelé à chaque campagne de mesure. La qualité des données et la résolution inégalée des orthophotographies méritent largement les efforts fournis pour ces expérimentations, d'autant que chaque mesure qui n'est pas réalisée dans ce contexte de changement climatique accéléré est perdue.

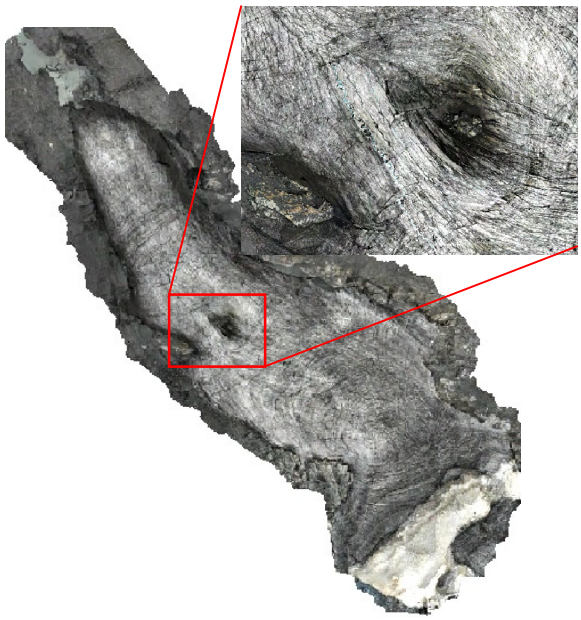

Fig.6 : apparition d'un poinçon rocheux sur le glacier en 2021

Références bibliographiques

Benoit, L., Gourdon, A., Vallat, R., Irarrazaval, I., Gravey, M., Lehmann, B., Prasicek, G., Gräff, D., Herman, F., and Mariethoz, G. 2019. A high-resolution image time series of the Gorner Glacier – Swiss Alps – derived from repeated unmanned aerial vehicle surveys, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 579–588, https://doi.org/10.5194/essd-11-579-2019.

Bernard, É., Friedt, J.M., Tolle, F., Griselin, M., Marlin, C. and Prokop, A. 2017. Investigating snowpack volumes and icing dynamics in the moraine of an Arctic catchment using UAV photogrammetry. *Photogram Rec*, 32: 497-512. doi:10.1111/phor.12217

Ely, J. C., Graham, C., Barr, I. D., Rea, B. R., Spagnolo, M., and Evans, J. 2017 Using UAV acquired photography and structure from motion techniques for studying glacier landforms: application to the glacial flutes at Isfallsglaciären. *Earth Surf. Process. Landforms*, 42: 877– 888. doi: 10.1002/esp.4044.

Grayson, B., Penna, N.T., Mills, J.P., and Grant, D.S. 2018. GPS precise point positioning for UAV photogrammetry. *Photogram Rec*, 33: 427-447. doi:10.1111/phor.12259

Jobard, S., Dzikowski, M. 2016. A hydrological approach to estimating daily glacier ablation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2016, 53:1-9, https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0107

Mertes, J. R., Gulley, J. D., Benn, D. I., Thompson, S. S., and Nicholson, L. I. 2017. Using structure-from-motion to create glacier DEMs and orthoimagery from historical terrestrial and oblique aerial imagery. *Earth Surf. Process. Landforms*, 42: 2350– 2364. doi: 10.1002/esp.4188.

Perolo, P., Bakker, M., Gabbud, C., Moradi, G., Rennie, C., and Lane, S. N. 2019. Subglacial sediment production and snout marginal ice uplift during the late ablation season of a temperate valley glacier. *Earth Surf. Process. Landforms*, 44: 1117–1136. https://doi.org/10.1002/esp.4562.

Rippin, D. M., Pomfret, A., and King, N. 2015. High resolution mapping of supra-glacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness and surface reflectance. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, 1279– 1290. doi: 10.1002/esp.3719.

Document couleur disponible en téléchargement :

https://veilleursduclimat.ovh/wp-content/uploads/2022/01/SHF-2022_auscultation-photogrammetrie-baounet.pdf