



Un atlas mondial pour caractériser la réponse des glaciers au changement climatique

Romain Hugonnet, Romain Millan, Jérémie Mouginot, Antoine Rabatel, Étienne Berthier

► To cite this version:

Romain Hugonnet, Romain Millan, Jérémie Mouginot, Antoine Rabatel, Étienne Berthier. Un atlas mondial pour caractériser la réponse des glaciers au changement climatique. *La Météorologie*, 2023, 120, pp.037. 10.37053/lameteorologie-2023-0015 . hal-04240438

HAL Id: hal-04240438

<https://hal.science/hal-04240438>

Submitted on 3 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un atlas mondial pour caractériser la réponse des glaciers au changement climatique

Romain Hugonnet^{1,2,3*}, Romain Millan^{4,5}, Jérémie Mouginot^{4‡},
Antoine Rabatel⁴, Étienne Berthier¹

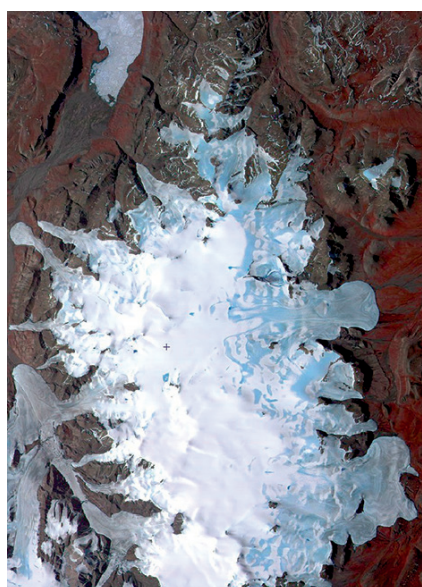
1. Laboratoire d'études en géophysiques et océanographie spatiales, Université de Toulouse / CNES / CNRS / IRD, Toulouse, France
2. Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zürich, Zürich, Suisse
3. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), Birmensdorf, Suisse
4. Institut des géosciences de l'environnement, Université Grenoble Alpes / CNRS / IRD / Grenoble-INP, Grenoble, France
5. Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen, Copenhagen, Danemark

Résumé

Cet article présente notre capacité actuelle à élaborer, à partir de données satellitaires, des produits relatifs aux glaciers à l'échelle globale afin de documenter leur réponse au changement climatique. Notre atlas cartographie, d'une part, les vitesses d'écoulement en surface pour caractériser la dynamique glaciaire et quantifier la répartition des épaisseurs de glace et, d'autre part, les changements d'altitude de la surface à l'échelle pluriannuelle pour quantifier les variations de volume des glaciers des 20 dernières années. Ces produits, issus de chaînes de traitement en grande partie automatisées, sont mis à disposition de la communauté par le biais du pôle national de données Theia.

Abstract – A global atlas to characterize glacier response to climate change

This article presents our current ability to derive global-scale glacier products from satellite data to document their response to climate change. We map, on the one hand, surface flow velocities to characterize glacier dynamics and quantify ice thickness distribution and, on the other hand, surface elevation changes to quantify glacier volume variations over the last 20 years. These products, derived from largely automated processing chains, are made available to the community through the Theia national data center.



Glaciers de l'île Axel Heiberg (Arctique canadien).
© Aster.

* romain.hugonnet@gmail.com

Environ 200 millions de personnes vivent dans des régions côtières qui pourraient être submergées d'ici la fin du XXI^e siècle en raison de la hausse du niveau des mers (Kulp et Strauss, 2019). Par ailleurs, plus d'un milliard de personnes pourraient être confrontées à une pénurie d'eau et à l'insécurité alimentaire dans les trois prochaines décennies (IPCC, 2019). Les glaciers, distincts des deux grandes calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique, et leurs évolutions durant les prochaines décennies, constituent des acteurs majeurs au cœur de ces problématiques environnementales et sociétales. En effet, même si leur masse totale est modeste par rapport aux calottes polaires, leur fonte est si rapide que les glaciers contribuent fortement à la hausse actuelle du niveau de la mer (Cazenave *et al.*, 2015). Ils sont aussi de véritables châteaux d'eau naturels, capables de fournir

de l'eau liquide aux saisons où les populations et les écosystèmes en ont le plus besoin, c'est-à-dire en été et durant les périodes de sécheresse (Pritchard, 2019). Il est donc essentiel de connaître la quantité totale d'eau renfermée dans les glaciers et de quantifier leurs changements de masse actuels et futurs.

Si les inventaires glaciologiques, qui cartographient l'emplacement et la délimitation des glaciers, sont aujourd'hui exhaustifs à l'échelle globale (RGI Consortium, 2017), les estimations des volumes totaux des glaciers, de leurs vitesses d'écoulement et de leurs variations de masse demeurent incomplètes.

Nous dédions cet article à notre collègue Jérémie Mouginot brutalement disparu fin 2022. Un hommage lui est rendu dans ce numéro, page 19.

Ces caractéristiques ne peuvent pas être documentées à l'échelle globale par les mesures *in situ* qui ne sont disponibles que sur un nombre très limité (quelques centaines) des près de 220 000 glaciers sur Terre.

Malgré les progrès dans la surveillance des glaciers depuis l'espace au cours des dernières décennies (voir par exemple Rabatel *et al.*, 2017), les études globales des glaciers ont été jusqu'à présent limitées par : (i) la résolution spatiale très faible (300 à 400 km) de la méthode gravimétrique (avec en particulier la mission *Grace*, pour *Gravity Recovery and Climate Experiment*) qui mesure un changement de masse total au niveau régional se mélangeant aux effets hydrologiques et aux mouvements de la Terre solide ; (ii) l'échantillonnage clairsemé de l'altimétrie laser (avec par exemple la mission *Icesat*, pour *Ice, Cloud and land Elevation Satellite*) qui, de plus, n'a fonctionné que sur de courtes périodes et (iii) la couverture non homogène des estimations optiques et radar des mesures de vitesse et des changements d'altitude de la surface des glaciers.

Cependant, l'évolution récente des moyens de calcul, et donc de notre capacité à traiter massivement des centaines de milliers de données satellitaires, combinée à la mise en libre accès de nouvelles archives satellitaires, a permis d'étendre cette surveillance à l'ensemble des glaciers sur Terre. Ainsi, nous avons pu quantifier à la fois les changements de masse des glaciers au cours des deux dernières décennies, ainsi que leurs vitesses d'écoulement en surface et leur volume total (Hugonnet *et al.*, 2021 ; Millan *et al.*, 2022). Ces nouvelles données ouvrent la voie à une meilleure compréhension de la variabilité spatiale de la réponse des glaciers au changement climatique, ainsi qu'à l'amélioration des outils de modélisation pour simuler leur évolution future.

Vitesse d'écoulement en surface des glaciers

Les glaciers se déforment sous l'effet de la gravité et s'écoulent ainsi de la zone d'accumulation où ils gagnent de la masse (par exemple, enneigement) vers la zone d'ablation où ils perdent de la masse (par exemple, fonte). Ainsi, l'écoulement du glacier contrôle en grande partie la distribution spatiale du volume de glace. Bien que la vitesse d'écoulement soit une contrainte

essentielle pour obtenir des simulations réalistes dans les modèles de glaciers, elle est longtemps restée difficile à cartographier à grande échelle en raison du nombre limité de données. Avec le lancement au cours de la dernière décennie de capteurs optiques sur *Sentinel-2A* et *2B* et de capteurs radar à synthèse d'ouverture sur *Sentinel-1A* et *1B* (ESA, Copernicus), ainsi que l'ouverture des archives *Landsat* (Nasa, US Geological Survey), ces limitations peuvent aujourd'hui être surmontées. La disponibilité mondiale d'observations à une résolution décimétrique ouvre la possibilité de cartographier la vitesse d'écoulement en surface de tous les glaciers, y compris pour des petits glaciers de quelques dizaines d'hectares.

Principe de la méthode

Nous avons établi la première cartographie à haute résolution de la vitesse d'écoulement en surface de l'ensemble des glaciers du monde à partir de 135 000, 670 000 et 7 000 paires d'images acquises entre 2017 et 2018 par *Landsat-8*, *Sentinel-2* et *Sentinel-1*, respectivement. Toutes les paires d'images possibles ont été formées avec des écarts temporels entre les deux images allant d'un cycle orbital du capteur (5-16 jours) à 400 jours. Pour chaque paire d'images, le mouvement des glaciers est quantifié par une approche de corrélation croisée suivant le déplacement de motifs caractéristiques en surface (Bindschadler et Scambos, 1991). Cette approche permet de quantifier la vitesse d'écoulement en surface du glacier, ce qui donne un indicateur important sur l'écoulement de la colonne de glace complète (voir ci-dessous). Pour les régions comportant des calottes glaciaires et des champs de glace (par exemple, la Patagonie, l'Islande, l'Arctique canadien, le Svalbard et l'Arctique russe) où la couverture nuageuse est dense et l'homogénéité des surfaces réduit la qualité des corrélations, le traitement des données radar de *Sentinel-1* (cycles de répétition de 6 à 24 jours) basé sur le suivi du « chatolement »¹ a permis d'augmenter la couverture spatiale et de réduire les incertitudes. Les cartes de déplacement en surface des glaciers issues de chaque paire d'images sont corrigées des distorsions géométriques et des erreurs de géolocalisation. Pour cela, les zones englacées sont masquées pour estimer au mieux la valeur du déplacement résiduel sur le reste du terrain, considéré stable. Ce résidu est finalement retiré de toute la carte de déplacement pour obtenir une vitesse d'écoulement en surface centrée sur zéro sur terrain stable.

Dans chaque zone étudiée, nous avons construit des mosaïques composites pour chaque capteur en calculant une moyenne pondérée pixel à pixel, de toutes les observations de déplacement. La pondération est attribuée en fonction de l'erreur sur la vitesse d'écoulement en surface, qui dépend de la précision de l'algorithme de corrélation. Cette précision est calculée à partir de l'écart type pour chaque paire, de la résolution spatiale et de l'écart temporel entre les images (Millan *et al.*, 2019). Ensuite, les valeurs aberrantes sont supprimées des mosaïques à l'aide d'un filtrage médian et lissées par le biais d'un filtre gaussien. La taille des fenêtres de filtrage est adaptée en fonction de la distance au bord du glacier afin de préserver la structure du flux de glace pour les langues glaciaires les plus étroites. Ainsi, aucun lissage n'est appliqué lorsque la distance d'un pixel au bord du glacier est inférieure à 150 mètres. Le lissage augmente ensuite progressivement pour atteindre une taille maximale de 2 km lorsque le pixel est éloigné de plus de 6 km du bord du glacier. Ces lissages fournissent des résultats plus robustes tout en préservant les plus petites structures d'écoulement de la glace. Sur la base d'un travail méthodologique (Millan *et al.*, 2019 ; Mouginot *et al.*, 2023), nous estimons en comparaison à des mesures *in situ* que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de la vitesse d'écoulement en surface des glaciers est de 12 m/an, bien qu'elle puisse être localement plus importante en raison du nombre limité d'observations (dû par exemple aux nuages, à la nuit polaire) ou d'erreurs géométriques dans les images originales.

Une forte variabilité des vitesses d'écoulement glaciaire

Notre cartographie couvre plus de 98 % de la surface des glaciers. La figure 1 illustre quelques exemples dans différents massifs autour du monde. Les données sont assemblées en 62 cartes régionales à une résolution de 50 mètres. Les glaciers de type alpin sont présents dans toutes les chaînes de montagnes étudiées, avec des vitesses d'écoulement en surface dépassant rarement les 500 m/an. Il existe cependant quelques vitesses d'écoulement exceptionnellement rapides pour

1. Issu de *speckle* en anglais, terme traduisant une texture sur les images produite par l'interférence aléatoire provenant des diffusions multiples au sein de chaque pixel.

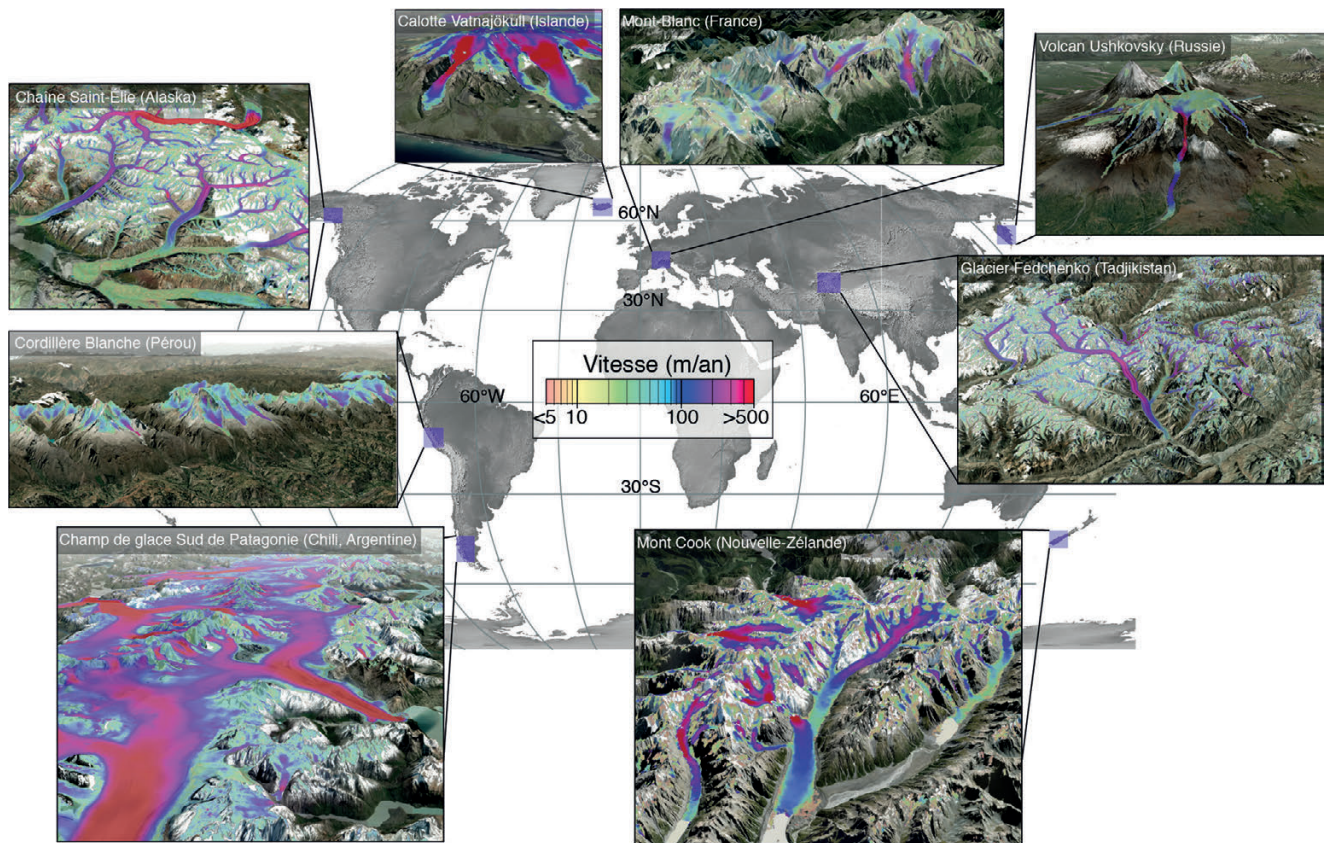


Figure 1. Exemples de cartes de vitesse d'écoulement en surface des glaciers. Les vitesses d'écoulement (en mètres par an) sont représentées en trois dimensions et sur une échelle de couleur logarithmique. La carte du monde au centre indique la position géographique des massifs englacés illustrés sur les vues en 3D.

des glaciers de montagne, comme le glacier Gotley qui s'écoule depuis le pic Mawson sur l'île Heard, dans le sud de l'océan Indien, avec des vitesses atteignant 1 500 m/an ou le glacier Bualtar, dans le Karakoram, qui atteint 2 300 m/an sur la période étudiée. Au niveau des calottes glaciaires de l'Arctique (par exemple, celles de Severnaya Zemlya, Franz Josef et Devon), la cartographie des vitesses s'étend jusqu'au centre des calottes où les vitesses sont inférieures à quelques dizaines de mètres par an, alors qu'à leur périphérie les langues glaciaires se terminant dans l'océan peuvent s'écouler à des centaines voire à des milliers de mètres par an.

Les glaciers à terminaison marine, qui naissent au cœur des grands champs de glace en Alaska, dans l'Arctique canadien et en Patagonie sont les glaciers les plus rapides de la planète. Dans le sud de la Patagonie, le glacier Penguin s'écoule à une vitesse d'environ 12 000 m/an (33 mètres par jour) à son extrémité. Des vitesses aussi importantes ne sont atteintes que par certains glaciers émissaires de la calotte groenlandaise, comme le glacier Jakobshavn, qui est le plus rapide de la planète.

Distribution des épaisseurs de glace

Cette nouvelle cartographie des vitesses d'écoulement de l'ensemble des glaciers sur Terre offre la possibilité de contraindre le calcul du volume de glace contenu dans les glaciers et les calottes glaciaires du monde entier. En effet, l'écoulement et les pentes observés en surface d'un glacier peuvent être reliés à l'épaisseur de la glace, en supposant que la glace ne se déforme qu'en cisaillement simple (Cuffey et Paterson, 2010). Dans cette relation, les paramètres liés à la rhéologie de la glace et au glissement basal sont étalonnés en utilisant des mesures *in situ* de l'épaisseur de la glace provenant de la base de données internationales GlaThiDa (Welty *et al.*, 2020), de l'observatoire français Glacioclim² et d'autres campagnes indépendantes. Nous avons calculé l'épaisseur de la glace en utilisant une approche tridimensionnelle à l'échelle régionale (voir la partie « Methods » dans Millan *et al.*, 2022). Ainsi, nous avons généré des cartes d'épaisseur de tous les glaciers de la planète, avec les cartes d'erreur correspondantes, à la même résolution que les cartes de vitesse de la glace. La comparaison des résultats d'inversion avec des

observations de terrain de la base de données GlaThiDa a permis d'estimer une incertitude moyenne de 30 % sur le modèle. La moyenne de la différence avec les épaisseurs observées est de 9 m, et l'écart type des différences est de 87 m.

Une image différente de la géométrie des glaciers révélée

En utilisant la nouvelle contrainte fournie par la vitesse en surface, le volume global des glaciers sur Terre est estimé à $141 \pm 40 \times 10^3 \text{ km}^3$. Les plus grands réservoirs de glace sont situés dans la région arctique (incluant la périphérie du Groenland, l'Arctique canadien et russe, l'Islande et le Svalbard), en Amérique du Nord et dans la périphérie de l'Antarctique, avec $70 \pm 20 \times 10^3 \text{ km}^3$, $19 \pm 6 \times 10^3 \text{ km}^3$ et $35 \pm 9 \times 10^3 \text{ km}^3$, respectivement. En comparaison, le volume de glace dans les hautes montagnes d'Asie est de $9 \pm 4 \times 10^3 \text{ km}^3$, soit 7 % de l'estimation globale.

Ainsi, le volume total au-dessus de la flottaison contenu dans l'inventaire mondial des glaciers correspond à une

2. <https://glacioclim.osug.fr>

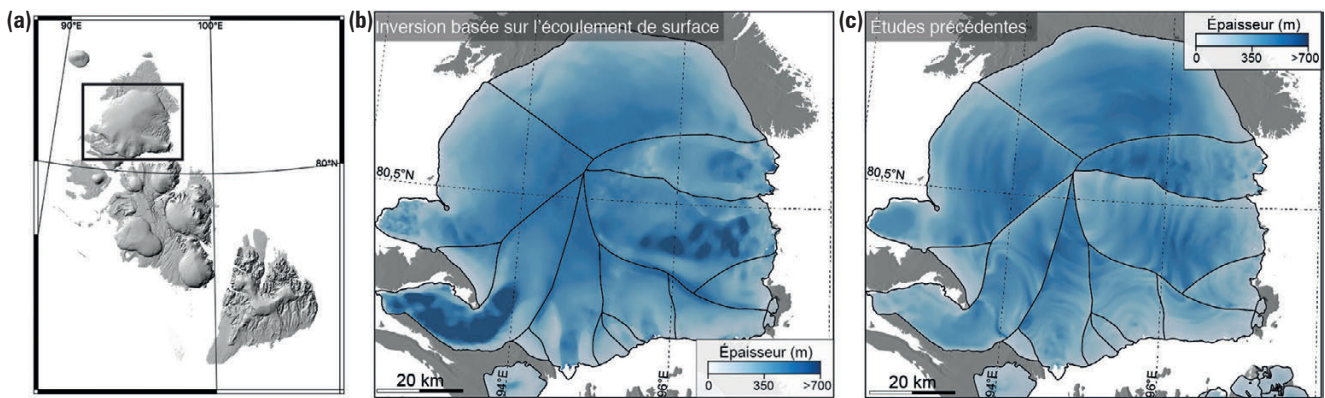


Figure 2. Cartes des épaisseurs de glace pour la calotte « Academy of Science » située en terre du Nord, dans l'Arctique russe : (a) localisation de la calotte ; (b) inversion basée sur l'utilisation des vitesses d'écoulement en surface ; (c) inversion issue du consensus de 2019 (Farinotti *et al.*, 2019). Figure adaptée de Millan *et al.* (2022).

contribution potentielle au niveau de la mer de 31 ± 10 mm, proche des estimations précédentes (Farinotti *et al.*, 2019). Au niveau régional, nos résultats montrent des différences substantielles par rapport aux estimations précédentes, ce qui peut avoir un impact important sur la réponse future des glaciers aux évolutions climatiques. Ces différences s'expliquent en partie par le fait que le consensus de 2019 (Farinotti *et al.*, 2019) prend en compte le volume de glace au-dessus du niveau de la mer et non au-dessus de la flottaison. En effet, la glace située sous le niveau de la mer, ainsi que celle en dessous du niveau d'équilibre hydrostatique, ne contribuent pas à la hausse du niveau de la mer. De manière plus importante encore, l'utilisation ici d'une méthodologie d'inversion régionale basée sur les données de vitesse d'écoulement de surface est une amélioration par rapport aux études précédentes qui ne disposaient pas de ces données. Ainsi, des volumes de 15 à 25 % inférieurs sont quantifiés pour la périphérie de l'Antarctique, la périphérie du Groenland et l'Arctique canadien. Bien que nos estimations soient généralement plus basses dans les autres régions, nous trouvons en Asie un volume de glace 34 % plus grand que celui de Farinotti *et al.* (2019). Les différences en Asie peuvent provenir de l'utilisation de données d'épaisseur *in situ* plus nombreuses dans notre étude, ce qui améliore de manière significative l'étalonnage au niveau régional. Néanmoins, les observations dans cette région du monde restent très rares, ce qui implique une incertitude élevée en Asie, car les inversions sont peu contraintes.

En outre, la plupart des approches précédentes étaient basées sur une modélisation à une dimension, le long de la ligne d'écoulement centrale du glacier. Ceci engendre des biais importants notamment pour les calottes, telles que

des discontinuités aux limites entre les bassins de glaciers adjacents ou des artefacts liés à la pente de surface conduisant à des géométries de glaciers irréalistes. À l'inverse, l'utilisation d'une inversion de la vitesse d'écoulement de surface des glaciers (indépendamment des limites des inventaires des glaciers) nous permet de proposer une nouvelle représentation, plus réaliste physiquement, de la topographie sous-glaciaire (figure 2). Notre estimation de l'épaisseur de la glace à l'échelle mondiale réconcilie donc la distribution spatiale des masses de glace avec la dynamique, la morphologie et les divisions des glaciers, soulignant l'importance d'utiliser les observations de la vitesse d'écoulement pour contraindre les modèles d'épaisseur de glace. Les différences entre nos résultats et les estimations existantes suggèrent que les similitudes dans le volume total de glace sur Terre sont probablement fortuites et qu'un consensus définitif n'a pas encore été atteint. À cet égard, il faut garder à l'esprit que des incertitudes localement importantes sur l'estimation de la distribution des épaisseurs de glace devraient perdurer encore longtemps, eu égard à la difficulté de bien contraindre les modèles d'inversion, la rhéologie de la glace pouvant varier fortement, y compris au sein d'un même glacier. Cela étant, cette nouvelle vision de la géométrie des glaciers appelle à une réévaluation de l'évolution des glaciers du monde dans les modèles numériques.

Changement d'altitude de la surface des glaciers

Mesurer l'évolution topographique des glaciers permet, entre autres, de quantifier les pertes ou gains de volume et, moyennant une hypothèse sur la densité

de la glace, d'estimer leur changement de masse. Ce bilan de masse est la résultante de processus de perte de masse (ou ablation) comme la fonte de surface, la sublimation ou le vélage d'icebergs³, et les processus de gain de masse (ou accumulation) tels que l'enneigement, l'apport de neige depuis les pentes voisines par des avalanches ou encore le regel de la pluie. Un déséquilibre entre ablation et accumulation entraîne une adaptation géométrique rapide, ce qui fait des glaciers des indicateurs importants dans la reconstruction des climats passés et, aujourd'hui, des icônes du changement climatique. Bien que le bilan de masse soit une contrainte essentielle pour obtenir des prévisions réalistes dans les modèles glaciologiques, la cartographie du changement d'altitude glaciaire est longtemps restée difficile à grande échelle en raison du nombre limité de données. La mise en accès libre d'observations durant la dernière décennie ouvre la possibilité de cartographier de manière répétée l'altitude des glaciers, y compris pour des petits glaciers de montagne de quelques dizaines d'hectares, et en déduire leurs changements récents.

Principe de la méthode

Pour estimer les changements d'altitude de tous les glaciers du globe entre janvier 2000 et décembre 2019, nous nous sommes appuyés principalement sur l'archive de 20 ans d'images stéréoscopiques constituée grâce au capteur optique stéréo Aster (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) à bord du satellite Terra lancé fin 1999 (Raup *et al.*, 2000). Nous avons généré près d'un demi-million de modèles numériques de terrain (MNT) à une résolution horizontale de 30 mètres. Nous y avons ajouté des

3. Quand les glaciers se terminent dans l'océan ou dans un lac.

MNT dérivés d'images WorldView disponibles via les projets ArcticDEM et Rema (Reference Elevation Model of Antarctica) (Porter *et al.*, 2018 ; Howat *et al.*, 2019), couvrant les zones polaires (latitudes supérieures à 60 degrés) à partir de 2010. Ces MNT ont tous été recalés par rapport à la topographie de référence de la mission satellitaire *Tandem-X*, en s'appuyant sur les zones stables en périphérie des glaciers. Ensuite, ces données sont filtrées et traitées dans un processus de régression gaussienne pour calculer des séries temporelles d'altitude de surface à une résolution horizontale de 100 mètres, couvrant 97,4 % de la surface des glaciers, avec une moyenne de 39 observations entre 2000 et 2019.

Un important effort de validation a été mené. D'une part, nous avons évalué nos séries temporelles d'altitude grâce à 25 millions de mesures de haute précision provenant du satellite *Icesat* et de la mission aéroportée *IceBridge* de la Nasa, couvrant la période de 2003 à 2019. Nous avons complété cette validation et vérifié la fiabilité de nos incertitudes à l'échelle des glaciers individuels en les comparant avec des cartes de changement d'altitude de

haute précision (par exemple venant de capteurs haute résolution du Cnes comme ceux de *Spot 5* ou de *Pléiades*) pour 588 glaciers répartis à travers le monde. En moyenne, nos incertitudes sur le taux de changement d'altitude intégré sur tout un glacier sont d'environ $\pm 0,2$ m/an (niveau de confiance à 95 %) pour des glaciers d'une taille d'au moins 100 km², $\pm 0,3$ m/an pour une taille entre 1 et 100 km², et $\pm 0,5$ m/an pour les glaciers plus petits que 1 km² (relatif à un changement d'altitude par glacier très variable, entre -3 m/an et +1 m/an). Ces incertitudes sont faibles pour des taux de changement d'altitude estimés sur des périodes allant de 5 à 20 ans environ à l'intérieur de la période de 2000 à 2019, grâce à la bonne couverture répétée de MNT. Cependant, celles-ci augmentent substantiellement pour des périodes plus courtes, en raison d'erreurs grandissantes d'interpolation temporelle face aux fortes variabilités saisonnières et interannuelles du signal.

L'intégration des changements d'altitude sur chacun des près de 220 000 glaciers inventoriés à l'échelle globale a fourni un changement de volume, ensuite converti en changement de masse. Cette conversion est fondée sur

des hypothèses de densité estimées par des modèles de densification de névés, encore peu contraints. Ainsi, cette conversion représente notre plus grande source d'incertitude sur le changement de masse. Enfin, nous avons agrégé nos estimations au sein des 19 grandes régions glaciaires (figure 3).

Des pertes de masse s'accroissant et de forts contrastes régionaux

De 2000 à 2019, la perte de masse de l'ensemble des glaciers mondiaux a atteint 267 ± 16 Gt (gigatonnes) par an, une perte équivalente à 4,5 % du volume de glace au début des années 2000 (figure 3). Pour se représenter cette quantité, c'est comme s'il fondait, chaque année, une couche de glace de 50 cm d'épaisseur recouvrant toute la France métropolitaine. En supposant que toutes les eaux de fonte glaciaires atteignent l'océan, la contribution à l'élévation du niveau de la mer a été de $0,74 \pm 0,04$ mm/an, soit 21 ± 3 % de l'élévation observée par les satellites altimétriques durant cette période (Ablain *et al.*, 2019). La perte de masse des glaciers mondiaux s'est accélérée

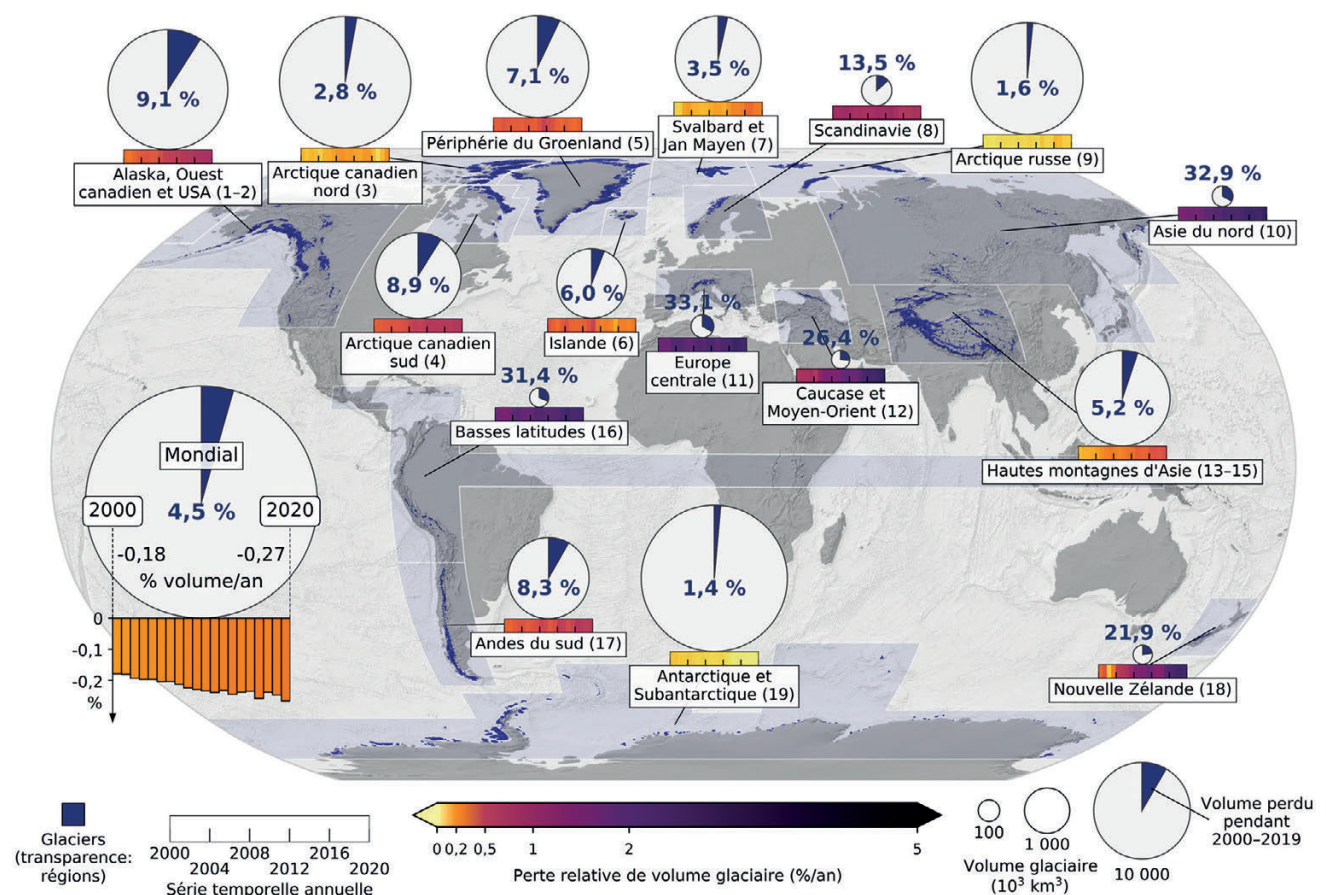


Figure 3. Perte relative de volume des glaciers durant les deux dernières décennies. Volumes et pertes de volume régionaux et mondiaux de 2000 à 2019 (diagrammes circulaires) avec séries temporelles annuelles de perte relative de volume (frises) pour les 19 « grandes » régions glaciaires du RGI 6.0 (Randolph Glacier Inventory).

au cours de ces deux décennies, passant de 227 Gt/an entre 2000 et 2004 à 298 Gt/an entre 2015 et 2019. Cette accélération a été plus forte que celle des pertes de la calotte groenlandaise et similaire à celle de la calotte antarctique. L'accroissement des pertes a été particulièrement fort en Alaska, dans les hautes montagnes d'Asie ou dans l'Ouest canadien. En Nouvelle-Zélande, le taux de perte de masse a même été près de sept fois plus fort en 2015-2019 que durant la période 2000-2004. À l'inverse, en Islande, en Scandinavie ou pour les glaciers au sud-est du Groenland, les pertes de masse se sont ralenties après 2010, esquisant une « anomalie » de l'Atlantique Nord.

Sept régions englacées ont été responsables à elles seules de 83 % de la perte de masse globale : l'Alaska (25 %), les glaciers en périphérie du Groenland mais déconnectés de la calotte elle-même (13 %), le nord et le sud de l'Arctique canadien (10 % chacun), l'Antarctique et la zone subantarctique, les hautes montagnes d'Asie et les Andes du sud (8 % chacune). En relatif par rapport au volume de glace initial, ce sont l'Europe centrale, l'Asie du Nord et la zone intertropicale (nommées Basses latitudes sur la figure 3) qui connaissent les pertes les plus importantes (plus de 30 % chacune), suivies de près par le Caucase et la Nouvelle-Zélande (autour de 25 % chacun) et la Scandinavie (14 %). Malgré leurs forts volumes initiaux, l'Alaska, l'Arctique canadien sud et les Andes du Sud en perdent une portion conséquente (10 % chacun). Les trois régions avec le plus gros volume – Arctique russe et canadien nord, et l'Antarctique – sont aussi celles avec les plus faibles taux d'amincissement, et en ont ainsi perdu seulement 1 à 3 % au cours des deux dernières décennies (figure 3).

De 2000 à 2019, le changement de masse spécifique (c'est-à-dire le changement de masse divisé par la superficie) montre d'intéressants contrastes latitudinaux. Dans les régions arctiques les plus septentrionales, composées de l'Arctique canadien nord, de la périphérie nord du Groenland, du Svalbard et de l'île Jan Mayen, et de l'Arctique russe, les bilans de masse ont été modérément négatifs, avec une moyenne de $-0,28 \pm 0,04$ mètre d'équivalent eau (noté par la suite m_{we} , *we* pour *water equivalent*) par an. Plus au sud dans l'Arctique, à des latitudes englobant l'Alaska, l'Arctique canadien sud, les glaciers au sud du Groenland, l'Islande et la Scandinavie,

les taux de changement de masse spécifique ont été fortement négatifs, en moyenne de $-0,74 \pm 0,10$ m_{we} par an,

le record de perte ayant été de $-0,88 \pm 0,13$ m_{we} par an en Islande. Les régions non polaires ont également subi

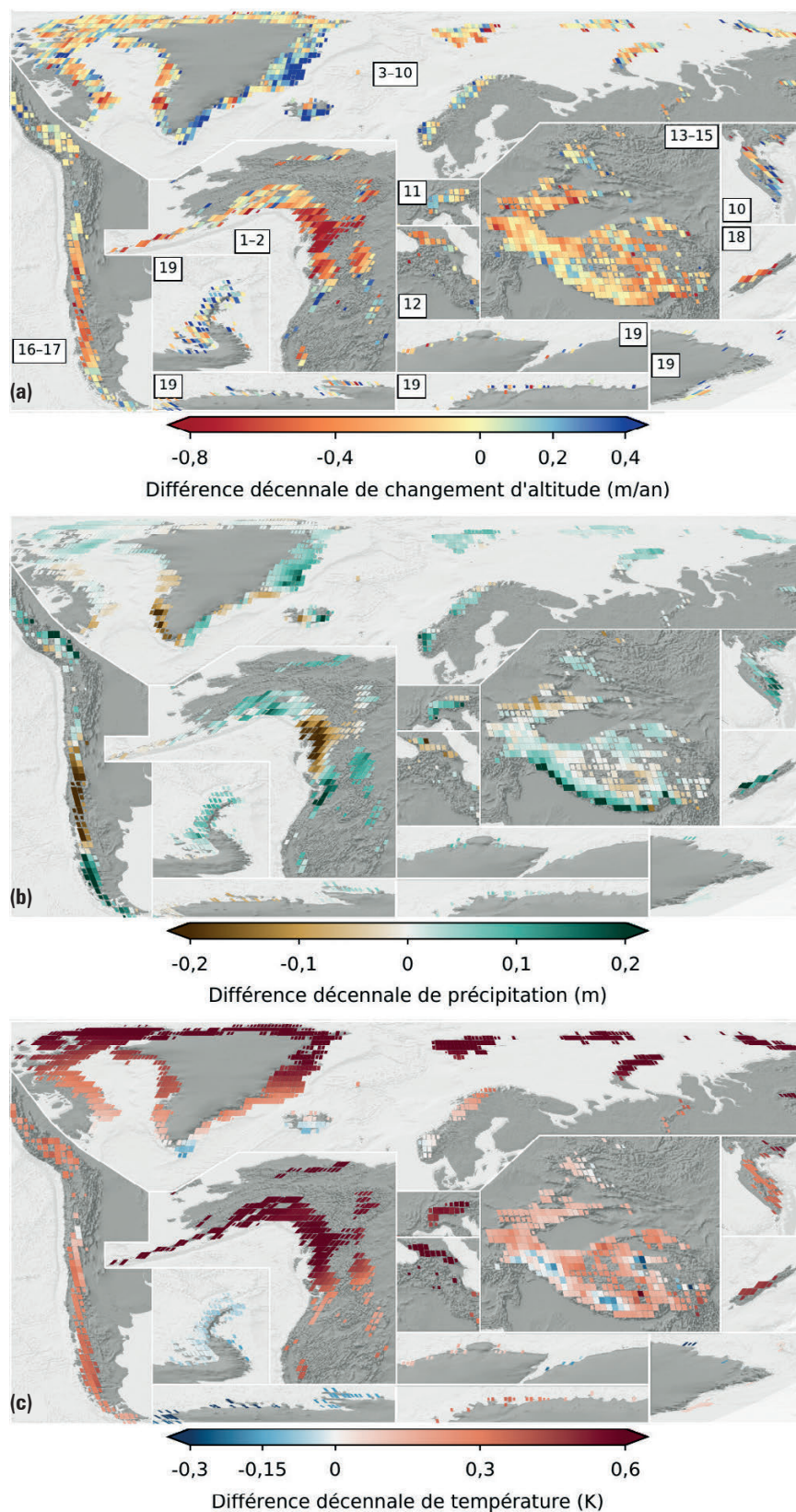


Figure 4. Des schémas d'amincissement glaciaires décennaux concordants avec ceux de variations décennales de précipitation et température. Différence entre 2010-2019 et 2000-2009 pour : (a) les taux moyens de changement d'altitude, (b) les précipitations annuelles moyennes et (c) la température annuelle moyenne de ERA5. Les encarts correspondent à la numérotation de région de la figure 3. Chaque tuile colorée est centrée sur la zone de $1^\circ \times 1^\circ$, dont elle représente la moyenne, et a une taille inversement proportionnelle à l'incertitude du changement d'altitude. Figure adaptée de Hugonnet *et al.* (2021).

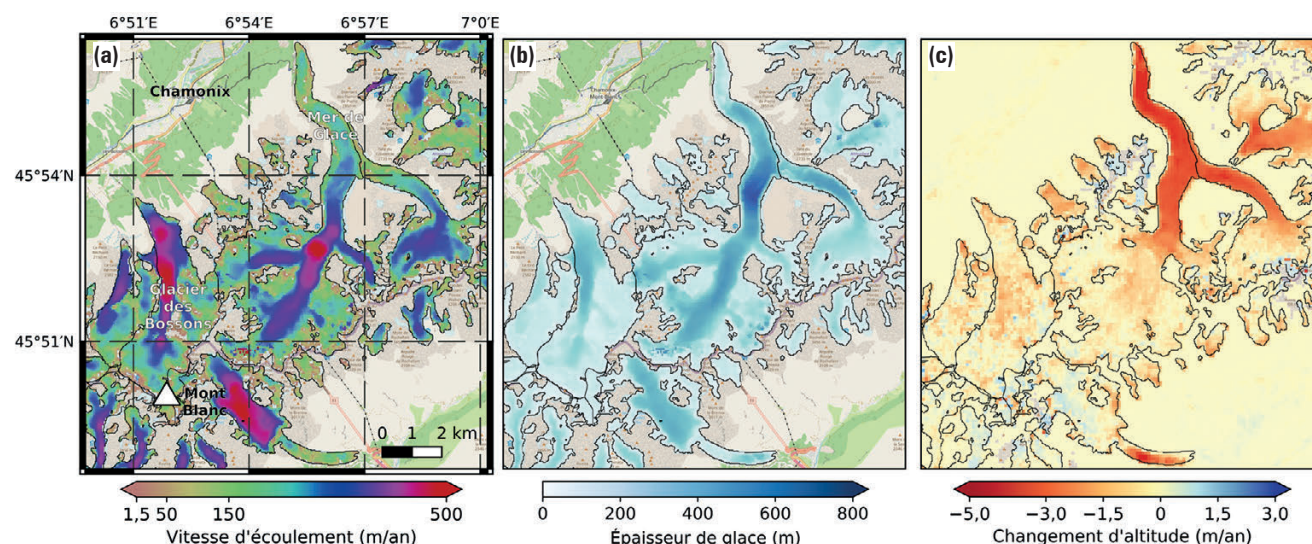


Figure 5. Les trois produits présentés dans cet article. Extraits sur la zone centrale du massif du Mont-Blanc, la mer de Glace au centre, avec : (a) vitesse d'écoulement en surface, moyenne 2017-2018, (b) épaisseurs de glace et (c) changement d'altitude de la surface pour la période 2000-2019.

une perte de masse substantielle ($-0,69 \pm 0,11 \text{ m}_{\text{we}}$ par an), à l'exception des glaciers des hautes montagnes d'Asie ($-0,22 \pm 0,05 \text{ m}_{\text{we}}$ par an). Les glaciers en périphérie de la calotte Antarctique et ceux de la zone subantarctique ont connu le taux de changement de masse spécifique le moins négatif, soit $-0,17 \pm 0,04 \text{ m}_{\text{we}}$ par an.

Causes de la variabilité temporelle des pertes de masse

La réanalyse climatique ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020) révèle que la variabilité décennale de la masse des glaciers est cohérente avec les changements à grande échelle des précipitations et des températures annuelles (figure 4). En particulier, les cartes de changements des précipitations entre la première (2000-2009) et la seconde décennie (2010-2019) révèlent des variations à l'échelle régionale concordant avec les changements de masse dans le nord-ouest de l'Amérique, le sud du Groenland et les Andes. Ainsi, la méga-sécheresse qui affecte les Andes centrales depuis 2010 a entraîné une augmentation de la perte de masse des glaciers de cette région. Dans la chaîne côtière de l'ouest du Canada et dans le sud-est de l'Alaska, les glaciers ont également été frappés par la baisse des précipitations, donc de l'accumulation neigeuse, alors que plus au nord de l'Alaska ou plus au sud, l'accroissement des précipitations a permis de stabiliser ou freiner la perte de masse des glaciers. L'anomalie de l'Atlantique Nord, décrite ci-dessus, a coïncidé avec des conditions plus fraîches et plus humides après 2010.

Bien que les changements décennaux des précipitations expliquent en partie les anomalies régionales des pertes de masse des glaciers, l'accélération de ces pertes reflète le réchauffement global de l'atmosphère. Moyennées sur tous les glaciers du globe, les données des réanalyses climatiques indiquent une tendance faible des taux de précipitation entre 2000 et 2019 (2 mm/an), alors que l'augmentation de la température est forte (0,03 K/an). Combinée à notre estimation de l'accélération des pertes de masse, ce réchauffement suggère une sensibilité du bilan de masse des glaciers mondiaux à la température de $-0,27 \text{ m}_{\text{we}}$ par an et par degré de réchauffement, résultat en accord avec une estimation précédente issue de la modélisation (Raper et Braithwaite, 2006). Nous concluons que l'accélération pluridécennale de la perte de masse des glaciers est induite par la hausse de la température, tout en étant modulée régionalement par des fluctuations sub-décennales importantes de précipitations.

Mise à disposition

Avec pour objectif une science ouverte et un partage des données, la communauté scientifique française a mis en place des pôles nationaux de données au sein de l'infrastructure de recherche nationale Data Terra⁴. Le pôle Theia⁵, créé en 2012, regroupe des données, produits et services concernant les surfaces continentales.

Theia est structuré en thématiques nommées centres d'expertise scientifique (CES), dont le CES Glaciers⁶. Ce dernier a été mis en place en 2018

avec comme objectif de développer et mettre à disposition des produits issus de données de télédétection relatifs aux glaciers et à leur évolution.

Ainsi, les produits présentés dans cet article sont accessibles sans restriction par le biais du CES Glaciers. Le téléchargement peut se faire soit massivement via ftp, soit par dalles via une interface cartographique⁷ qui permet de visualiser les différents jeux de données (figure 5).

Nouveaux enjeux

Améliorer les produits

Parmi les enjeux auxquels nous devons faire face dans les prochaines années figure l'amélioration de la qualité des produits, pas uniquement en termes de précision ou d'incertitude, mais aussi d'un point de vue de la résolution spatiale et de la fréquence temporelle. Par exemple, s'agissant des vitesses d'écoulement en surface des glaciers, le produit actuel est un champ moyenné sur deux années 2017-2018. Obtenir des champs annuels est techniquement faisable sans développement numérique majeur, il s'agit avant tout d'avoir la puissance de calcul adéquate pour reproduire ce que nous avons fait ici au pas de temps annuel. Il est raisonnable d'envisager pouvoir obtenir des champs annuels depuis 2015-2016, c'est-à-dire depuis le lancement des satellites *Sentinel-2A* et *2B*. Ce travail est actuellement en cours

4. <https://www.data-terra.org/>

5. <https://www.theia-land.fr/>

6. <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-glaciers/>

7. <http://maps.theia-land.fr>

8. <https://eo4society.esa.int/projects/alpglacier/>

à l'échelle des Alpes européennes dans le cadre du projet « Glacier Science in the Alps » financé par l'ESA⁸.

Atteindre une fréquence plus élevée (par exemple trimestrielle ou mensuelle) n'est pas encore envisageable à l'échelle de l'ensemble des glaciers. En effet, compte tenu du rapport signal sur bruit des champs de déplacement que l'on peut actuellement générer (lié à la résolution spatiale des capteurs, à la vitesse en surface et à l'écart temporel entre les images formant une paire), il est difficile d'obtenir une valeur fiable à une échelle infra-annuelle en dessous d'une vitesse de 50 à 80 mètres par an (et pour les glaciers de montagne, nombreuses sont les zones où les vitesses sont faibles).

Concernant la répartition des épaisseurs de glace, les produits actuels sont toujours limités, d'une part, par les hypothèses physiques utilisées dans l'inversion des données (dans le cas présent, la déformation de la glace en cisaillement simple), et d'autre part, par la faible quantité de mesures *in situ* permettant d'étalonner le modèle. Cependant, depuis la publication de notre jeu de données, d'autres chercheurs s'en sont saisi pour développer de nouvelles approches d'inversion. Par exemple, Juvet (2022) a développé une approche reposant sur l'apprentissage profond (*deep learning*) via un réseau de neurones convolutionnel qui se substitue à un modèle d'écoulement glaciaire de type full-Stokes pour inverser les vitesses d'écoulement et quantifier les épaisseurs de glace.

Il convient de noter qu'un moyen d'améliorer le produit « épaisseurs de glace » serait de disposer de données d'entrée pour les inversions (contour des glaciers, MNT, champs de vitesse) qui soient les plus synchronisées possibles. Par exemple, dans le produit présenté ici, l'inventaire global des glaciers date du début des années 2000, tandis que le MNT global est, faute de mieux, une mosaïque des MNT acquis à des échelles régionales durant les deux dernières décennies et le champ de vitesse date de 2017-2018. Les futures missions *CO3D* et *Sentinel-HR* (cf. ci-après) pourraient contribuer à fournir des images permettant d'établir des données synchronisées à quelques années près.

Pour les changements d'altitude de la surface des glaciers, une mise à jour régulière de notre estimation n'est pas envisagée. Elle pourrait devenir pertinente en 2023 ou 2024 quand la

mission *Aster* sera achevée afin de retravailler l'ensemble de l'archive. Du point de vue méthodologique, une attention particulière a été apportée à l'analyse d'incertitudes de MNT (Hugonnet *et al.*, 2022) et des corrélations spatiales associées. Cependant, la propagation d'incertitudes liées à l'interpolation spatio-temporelle gaussienne pourrait être améliorée pour éviter la surestimation actuelle d'incertitudes sur les bilans des petits glaciers de montagne. De plus, la fusion de multiples sources de données pourrait conduire à des estimations réconciliées et de plus fine résolution à partir des années 2010. Cela implique d'abord une correction de biais des MNT liés à la résolution, mais aussi à la pénétration dans le névé et la glace dans le cas de données radars ; cependant, ces biais restent encore mal contraints.

Étalonnage des modèles, analyse croisée des données

Nos nouvelles estimations des vitesses d'écoulement, des volumes et des variations d'épaisseur des glaciers à l'échelle globale devraient permettre un meilleur étalonnage des modèles glaciologiques. Pour la première fois, nous sommes en effet en mesure d'étalonner les modèles de projection de l'évolution glacier par glacier, alors que toutes les études précédentes s'appuyaient sur des étalonnages régionaux qui ne reflétaient pas la diversité des réponses et des sensibilités des glaciers. Avec ce travail affiné à l'échelle du glacier, nous gagnons en confiance sur l'évolution de chaque glacier et sommes en mesure de simuler le nombre de glaciers qui vont disparaître selon différents scénarios socio-économiques.

Ces nouveaux produits ouvrent également la voie vers des nouvelles analyses conjointes des changements de géométrie et de dynamique de glaciers. Par exemple, à l'échelle des hautes montagnes d'Asie, Dehecq *et al.* (2019) ont montré que, sur la période 2000-2017, le ralentissement observé des glaciers dans cette région est concomitant à leur amincissement. Une étude similaire à l'échelle globale pourrait être entreprise.

Pérennité des missions spatiales

Améliorer, voire simplement mettre à jour des produits aujourd'hui disponibles, est directement dépendant de la

pérennité des capteurs mis en orbite, c'est-à-dire des missions spatiales en cours et à venir.

Concernant les données optiques et radar pour la quantification des déplacements de surface, malgré les déboires toujours possibles sur les satellites en cours de mission (cf. défaillance de *Sentinel-1B* en décembre 2021), le nombre de missions en cours côté Nasa avec *Landsat-8* (2013-...), 9 (2021-...) et le projet *Landsat-Next*, comme côté ESA avec le programme Copernicus et les satellites *Sentinel-1* et 2, laisse présager de belles perspectives de travail. Cela étant, afin de pouvoir documenter des changements dans les vitesses d'écoulement à court pas de temps (par exemple hebdomadaire) pour les glaciers de montagne, un gain en résolution spatiale serait un avantage. Idéalement, une résolution spatiale du type de celle proposée par *Spot-6* ou 7 (1,5 mètre en panchromatique) et une fréquence d'acquisition systématique similaire à *Sentinel-2* (tous les 5 jours) seraient adaptées. C'est justement l'objet de la proposition de mission *Sentinel-HR*¹⁰.

Concernant les changements d'altitude de la surface des glaciers, comment continuer à réaliser des cartographies résolues des glaciers et suivre leur perte de masse après la mission *Aster* dont la fin est prévue en 2023/24 ? Malheureusement, aucune mission dédiée n'est encore programmée par les agences spatiales. La mission du Cnes *CO3D*⁹ pourrait assurer en partie la continuité de la couverture globale stéréoscopique d'*Aster*, même si la revisite sera moins bonne que pour *Aster* (sa fauchée étant de 60 km, alors que celle des satellites de *CO3D* sera de 14 km) et les hautes latitudes ne seront pas observées. Sur le long terme, seule une mission de moissonnage continu de la topographie des terres émergées comme le concept *Sentinel-HR* pourrait permettre de poursuivre un suivi exhaustif et à haute résolution spatio-temporelle des glaciers.

Conclusion

En quelques années, nous sommes passés d'une situation où seulement quelques glaciers étaient suivis sur le terrain à un atlas mondial de leurs vitesses, leurs épaisseurs et leurs changements d'épaisseur déduits des données

9. <https://co3d.cnes.fr/>

10. <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/phase-0-sentinel-hr-fr/>

satellites. Via la modélisation, on y ajoute de nouvelles estimations des épaisseurs des glaciers. Combinées, ces nouvelles données révèlent pour la première fois la vitesse relative des pertes de masse des glaciers. Ainsi, en seulement 20 ans, certaines régions, comme les Alpes européennes, ont perdu un tiers de leur volume de glace. Ces résultats doivent interpeller les citoyens et les décideurs compte tenu de la rapidité de ces changements et des impacts sociétaux majeurs qui en résultent.

Remerciements

Les auteurs remercient le Cnes pour son soutien continu via son programme Tosca, la mise à disposition d'images satellitaires (programmes Dinamis et Kalideos), de moyens de calculs et une bourse post-doctorale pour Romain Millan. Romain Hugonnet a bénéficié d'une bourse de l'école doctorale Sciences de l'Univers, de l'environnement et de l'espace (université de Toulouse) ainsi que de financement

du Fonds national suisse, bourse #184634. L'initiative Glims (Global Land Ice Measurement from Space) a permis de constituer une vaste archive d'images stéréoscopiques *Aster* des glaciers. Les auteurs remercient aussi Jean-Baptiste Barré (IGE) pour la visualisation en 3D des champs de vitesses de surface, ainsi que l'équipe du pôle national de données Theia, notamment Nicolas Baghdadi, Anne Puissant, Isabelle Biagiotti et Arnaud Sellé.

Bibliographie

- Ablain M., Meyssignac B., Zawadzki L., Jugier R., Ribes A., Spada G., Benveniste J., Cazenave A., Picot N., 2019. Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration. *Earth Sys. Sci. Data*, 11, 1189-1202. doi: 10.5194/essd-11-1189-2019
- Bindschadler R.A., Scambos T.A., 1991. Satellite-image-derived velocity field of an Antarctic ice stream. *Science*, 252(5003), 242-246. doi: 10.1126/science.252.5003.242
- Cazenave A., Berthier E., Le Cozannet G., Masson-Delmotte V., Meyssignac B., Salas y Méla D., 2015. Le niveau de la mer : variations passées, présentes et futures. *La Météorologie*, 88, 69-82.
- Cuffey K.M., Paterson W.S.B., 2010. The physics of glaciers. Academic Press, 704 p.
- Dehecq A., Gourmelen N., Gardner A.S., Brun F., Goldberg D., Nienow P.W., Berthier E., Vincent C., Wagnon P., Trouvé E., 2019. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia. *Nat. Geosci.*, 12, 22-27. doi: 10.1038/s41561-018-0271-9
- Farinotti D., Huss M., Fürst J.J., Landmann J., Machguth H., Maussion F., Pandit A., 2019. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat. Geosci.*, 12, 168-173. doi: 10.1038/s41561-019-0300-3
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J. et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 146, 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P., 2019. The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere*, 13, 665-674. doi: 10.5194/tc-13-665-2019
- Hugonnet R., McNabb R., Berthier E., Menounos B., Nuth C., Girod L., Farinotti D., Huss M., Dussaillant I., Brun F., Kääb A., 2021. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726-731. doi: 10.1038/s41586-021-03436-z
- Hugonnet R., Brun F., Berthier E., Dehecq A., Mannerfelt E.S., Eckert N., Farinotti D., 2022. Uncertainty analysis of digital elevation models by spatial inference from stable terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1-17. doi: 10.1109/JSTARS.2022.3188922
- IPCC, 2019. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge UK, New York USA, 755 p. doi: 10.1017/9781009157964
- Jouvet G., 2022. Inversion of a Stokes glacier flow model emulated by deep learning. *J. Glaciol.*, 1-14. doi: 10.1017/jog.2022.41
- Kulp S.A., Strauss B.H., 2019. New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nat. Commun.*, 10, 1-12. doi: 10.1038/s41467-019-12808-z
- Millan R., Mouginot J., Rabatel A., Jeong S., Cusicanqui D., Derkacheva A., Chekki M., 2019. Mapping surface flow velocity of glaciers at regional scale using a multiple sensors approach. *Remote Sensing*, 11, 2498. doi: 10.3390/rs11212498
- Millan R., Mouginot J., Rabatel A., Morlighem M., 2022. Ice velocity and thickness of the world's glaciers. *Nat. Geosci.*, 15, 124-129.
- Mouginot J., Rabatel A., Ducasse E., Millan R., 2023. Optimization of cross-correlation algorithm for annual mapping of alpine glacier flow velocities; application to Sentinel-2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Accepted.
- Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., et al., 2018. ArcticDEM. National Science Foundation & National Science Foundation, Trans. Harvard Dataverse. doi: 10.7910/DVN/OHHUKH
- Pritchard H.D., 2019. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. *Nature*, 569(7758), 649-654. doi: 10.1038/s41586-019-1240-1
- Rabatel A., Berthier E., Arnaud Y., Dedieu J.P., Dumont M., Gascoin S., Gay M., Guerreiro K., Karbou F., Kouraev A., Picard G., Rémy F., Sirguey P., Trouvé E., Zakharova E., 2017. Télédétection satellitaire des surfaces enneigées et englacées. *La Météorologie*, 97, 78-85.
- Raper S.C.B., Braithwaite R.J., 2006. Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, 439, 311-313. doi: 10.1038/nature04448
- Raup B.H., Kieffer H.H., Hare T.M., Kargel J.S., 2000. Generation of data acquisition requests for the ASTER satellite instrument for monitoring a globally distributed target: Glaciers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38, 1105-1112. doi: 10.1109/36.841989
- RGI Consortium, 2017. *Randolph Glacier Inventory 6.0*. Global land ice measurements from space, Colorado, USA. Digital Media, 10. doi: 10.7265/N5-RGI-60
- Welty E., Zemp M., Navarro F., Huss M., Fürst J.J., Gärtner-Roer I., Landmann J., Machguth H., Naegeli K., Andreassen L.M., Farinotti D., Li H., GlaThiDa Contributors, 2020. Worldwide version-controlled database of glacier thickness observations. *Earth Sys. Sci. Data*, 12, 3039-3055. doi: 10.5194/essd-12-3039-2020