

# Disparition anticipée du glacier de Saint-Sorlin vers 2050

Christian Vincent<sup>1\*</sup>, Delphine Six<sup>1</sup>, Olivier Laarman<sup>1</sup>, Bruno Jourdain<sup>1</sup>, Diego Cusicanqui<sup>1</sup>, Samuel Morin<sup>2</sup>, Deborah Verfaillie<sup>3</sup>, Emmanuel Le Meur

1. Institut des géosciences de l'environnement, Université Grenoble Alpes, CNRS / IRD / Grenoble INP, Grenoble
2. Centre national de recherches météorologiques, Météo-France / CNRS, Toulouse
3. Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement, Aix-Marseille Université / CNRS / IRD / Inrae, Aix-en-Provence

## Résumé

Nos simulations numériques du glacier de Saint-Sorlin (massif des Grandes Rousses) indiquent que ce glacier devrait disparaître vers 2050, quels que soient les scénarios climatiques envisagés. La comparaison de ces résultats avec les projections réalisées dans des études précédentes il y a une quinzaine d'années montre que l'évolution est beaucoup plus rapide que le scénario médian qui avait été envisagé auparavant. Étant donné que la grande majorité (environ 75 %) des glaciers des Alpes françaises a une zone d'accumulation qui ne dépasse pas 3 400 mètres d'altitude, similaire au glacier de Saint-Sorlin, nos résultats tendent ainsi à montrer que tous ces glaciers pourraient disparaître vers 2050.

## Abstract – Anticipated disappearance of the Saint-Sorlin glacier during the 21<sup>st</sup> century

Numerical modelling of the evolution of Saint-Sorlin glacier (massif des Grandes Rousses) shows that the glacier should disappear by 2050, regardless of the climatic scenario taken into account. These results, compared to those obtained from previous studies carried out 15 years ago, show that the evolution is much faster than the median of the previous projections. Given that about 75 % of French alpine glaciers have an accumulation zone below 3 400 m a.s.l., similarly to Saint-Sorlin glacier, it means that all these glaciers will be gone by 2050.



Forage effectué au pied du Saint-Sorlin.

Les glaciers sont des indicateurs extrêmement sensibles des changements climatiques. Cette sensibilité s'explique en particulier par les rétroactions de la diminution de l'albédo entre la neige et la glace, et de l'altitude de la limite pluie-neige qui augmente avec le réchauffement. En effet, un surplus d'énergie entraîne une disparition précoce du manteau neigeux qui va laisser place à une surface de glace qui absorbe plus d'énergie que la surface de neige. L'évolution des glaciers impacte les écosystèmes et les sociétés. Les fluctuations glaciaires affectent le régime des rivières. Dans les Alpes, la perte de masse des glaciers entraîne, dans un premier temps, un surplus d'eau de fonte, étant donné qu'il y a un déstockage de la masse glaciaire. Mais au-delà d'une certaine date, la réduction de la surface glaciaire est telle que la quantité d'eau de fonte diminue. Cette date seuil est estimée entre 2030 et 2040 en moyenne pour les glaciers alpins (Huss, 2011), mais elle varie considérablement d'un glacier à l'autre. Le devenir des glaciers reste aussi une question importante pour les aménagements touristiques et les risques potentiels d'origine glaciaire. Depuis le milieu de la décennie 1980, la perte de

masse des glaciers alpins est très forte en comparaison de leurs fluctuations connues au cours des 150 dernières années (WGMS, 2017), en particulier à cause de la fonte qui a fortement augmenté (Vincent *et al.*, 2017).

Des études précédentes ont montré que les glaciers qui culminent en dessous de 3 500 mètres d'altitude dans les Alpes risquent de disparaître peu avant la fin de ce siècle (Compagno *et al.*, 2021). L'évolution future du glacier de Saint-Sorlin a été simulée par Le Meur et Vincent (2003) et Le Meur *et al.* (2007) il y a plus de quinze ans. Nous avons voulu réviser ces simulations avec les dernières données glaciologiques disponibles (jusqu'à 2022), et des scénarios et modèles climatiques plus récents. Les simulations de l'évolution du glacier de Saint-Sorlin peuvent être étalonnées précisément, du fait que les bilans de masse de surface et changements d'épaisseur sont connus depuis 1957 et que la topographie de son socle rocheux est très bien connue. La présente étude a pour objectif de simuler l'évolution du glacier de Saint-Sorlin au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, en utilisant différents scénarios et modèles climatiques.

\* christian.vincent@univ-grenoble-alpes.fr



Figure 1. Glacier de Saint-Sorlin en 1999 (à gauche) et en 2022 (à droite) photographié du même point de vue.

## Les fluctuations du glacier de Saint-Sorlin dans le passé

Le glacier de Saint-Sorlin (figures 1 et 2) est situé dans le massif des Grandes Rousses des Alpes françaises (45°10' N, 6°10' E) et fait l'objet d'observations glaciologiques depuis plus de 100 ans (Mougin, 1927). La première carte

précise de ce glacier a été établie en 1905 (Flusin *et al.*, 1909). Le glacier avait alors une surface de 3,6 km<sup>2</sup> environ. Différentes cartes, dites photogrammétriques, effectuées à partir de photographies aériennes, ont été réalisées entre 1952 et 2019 (Vincent, 2002 ; Glacioclim<sup>1</sup>). Ces différentes cartes permettent de calculer des variations de volume, ensuite converties en bilans de masse géodésiques, en prenant en compte la densité. Depuis 1957, les

bilans de masse annuels ont été mesurés *in situ* à l'aide de carottages et de balises d'ablation (Six et Vincent, 2014) qui font de cette série l'une des plus longues, complètes et continues dans les Alpes. Les observations glaciologiques sur le glacier de Saint-Sorlin se sont intensifiées à partir de 1993 (Vincent, 2002), date à laquelle un réseau d'observations de bilans de masse hivernal et estival a été mis en place sur toute la surface du glacier, à la fois en zone d'accumulation (zone de bilans positifs) et en zone d'ablation (zone de bilans négatifs). Elles ont été intégrées dans le service national d'observations Glacioclim en 2002.

Les bilans de masse cumulés sont reportés sur la figure 3. Ils montrent que, depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, le glacier de Saint-Sorlin a perdu 72,3 mètres équivalents en eau, soit environ 80 mètres d'épaisseur de glace, en moyenne, sur toute sa surface. On peut noter que, entre 1955 et 1985, le glacier est proche de l'état d'équilibre, sans variation d'épaisseur notable. Cette stabilité sur la même période se retrouve dans l'ensemble de la chaîne alpine (Huss, 2011). Les bilans de masse sont devenus très négatifs après 1985. Nous avons montré que les fluctuations des bilans de masse glaciaires sont très similaires à l'échelle des Alpes (Vincent *et al.*, 2017). Par exemple, deux glaciers situés à 10 km l'un de l'autre ont une variance commune supérieure à 80 % (et 50 % quand la distance est de 400 km). Ainsi, les fluctuations des bilans de masse du glacier de Saint-Sorlin sont très représentatives des autres glaciers des Alpes.

La figure 3 montre une accélération de la perte de masse du glacier de Saint-Sorlin après 2002. Elle est en moyenne de 0,8 mètre d'eau par an au cours de la période 1985-2001, puis

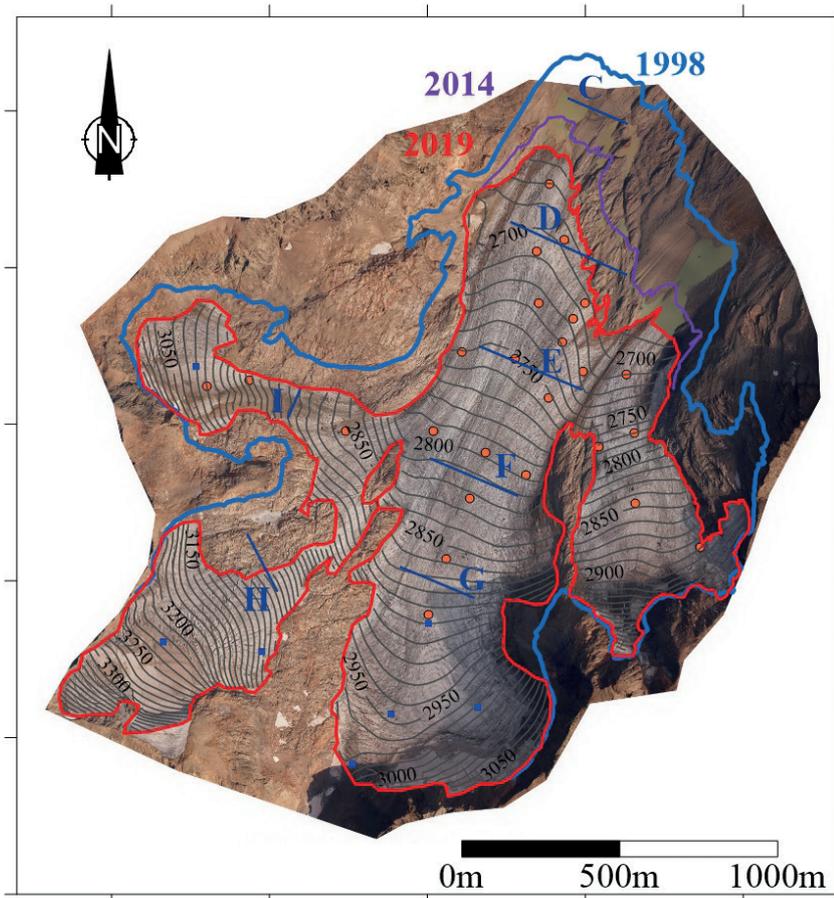


Figure 2. Carte du glacier de Saint-Sorlin. Les points orange représentent les balises d'ablation, les points bleus les sites de carottage et les traits bleus de C à H les profils transversaux. L'arrière-plan est une orthophotographie aérienne de 2019. Les contours du glacier sont en bleu, violet et rouge en 1998, 2014 et 2019, respectivement. Le contour de 2014 est reporté uniquement sur la partie frontale par souci de lisibilité.

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

de 2 mètres d'eau par an entre 2002 et 2022. L'isotherme 0 °C, située vers 2 600 mètres d'altitude en moyenne au cours de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, s'est élevée à 2 700 mètres d'altitude au cours des deux dernières décennies. En parallèle au réchauffement de l'atmosphère, la durée de la saison d'ablation s'est allongée de trois semaines environ. Au cours de l'année hydrologique 2021-2022, le bilan de masse du glacier de Saint-Sorlin est de -3,8 mètres d'eau, valeur jamais atteinte depuis 1957 (Six *et al.*, 2023). À l'automne 2022, le glacier était entièrement en zone d'ablation et la ligne d'équilibre était donc au-dessus de 3 400 mètres d'altitude.

Les variations d'altitude de la surface des sections transversales reportées sur la figure 2 sont bien documentées depuis 1950 et indiquent des changements d'épaisseur qui atteignent plus de 90 mètres dans la partie basse du glacier entre 1950 et 2022 (figure 4).

Pour simuler les évolutions passée et future du glacier, la connaissance de la topographie du socle rocheux est cruciale. Celle du glacier de Saint-Sorlin est bien connue et issue de nombreuses campagnes de terrain, sismiques et gravimétriques (Belin, 1962), complétées par quelques forages profonds. En 2022, l'épaisseur maximum du glacier est de 65 mètres environ.

### Les modèles de calcul des changements d'épaisseur et de longueur du glacier

Nous avons modélisé les évolutions passée et future du glacier de Saint-Sorlin à l'aide de l'approche que nous avons utilisée pour la simulation des glaciers d'Argentière et de la Mer de Glace

(Vincent *et al.*, 2019). Nous utilisons un modèle de calcul de bilans de masse de surface (accumulation et ablation) et un modèle de calcul des changements d'épaisseur en réponse aux bilans de masse de surface. En ce qui concerne les bilans de masse de surface, la fonte s'exprime simplement comme une fonction de la température de l'air (quand elle est supérieure à 0 °C) en utilisant un facteur de 3,5 et 6,5 mm équivalents en eau de fonte par degré positif journalier pour la neige et la glace, respectivement (Réveillet *et al.*, 2018). Ces facteurs ont été déterminés à partir des régressions entre la fonte (de neige ou de glace) et les degrés de température supérieurs à 0 °C en différents sites du glacier (Vincent, 2002 ; Réveillet *et al.*, 2018). L'accumulation de la neige est déterminée à partir des précipitations, en appliquant des facteurs correctifs pour tenir compte de la redistribution de la neige par le vent ou des avalanches. Ces facteurs sont établis en comparant les

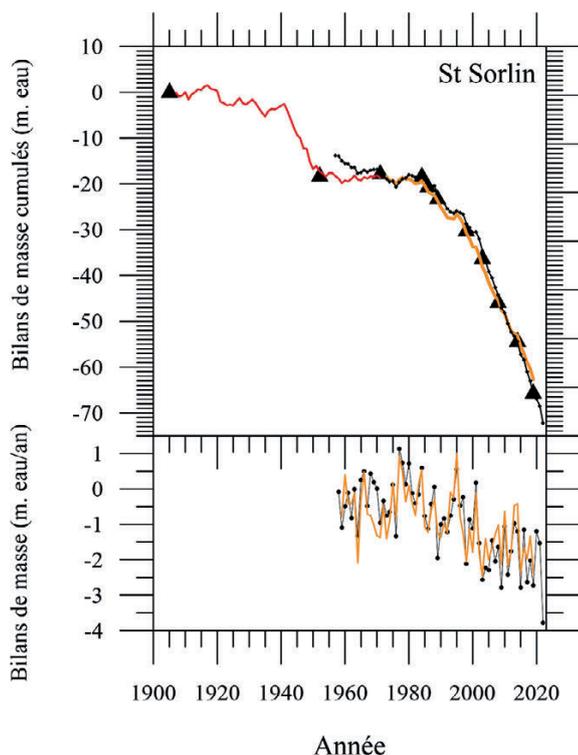


Figure 3. Haut : bilans de masse de surface cumulé du glacier de Saint-Sorlin de 1905 à 2022. Les triangles correspondent aux mesures géodésiques (photogrammétrie aérienne ou lidar aérien). Les points noirs reliés résultent des observations directes de terrain, chaque année, depuis 1957. La courbe en rouge représente une reconstitution des bilans de masse à partir de variables météorologiques (Vincent, 2002). La courbe orange résulte de la reconstitution des bilans de masse depuis 1971, à partir du modèle degré-jour utilisé dans cette étude en utilisant la réanalyse Safran. Bas : bilans annuels observés (en noir) et simulés à partir de la réanalyse Safran (en orange).

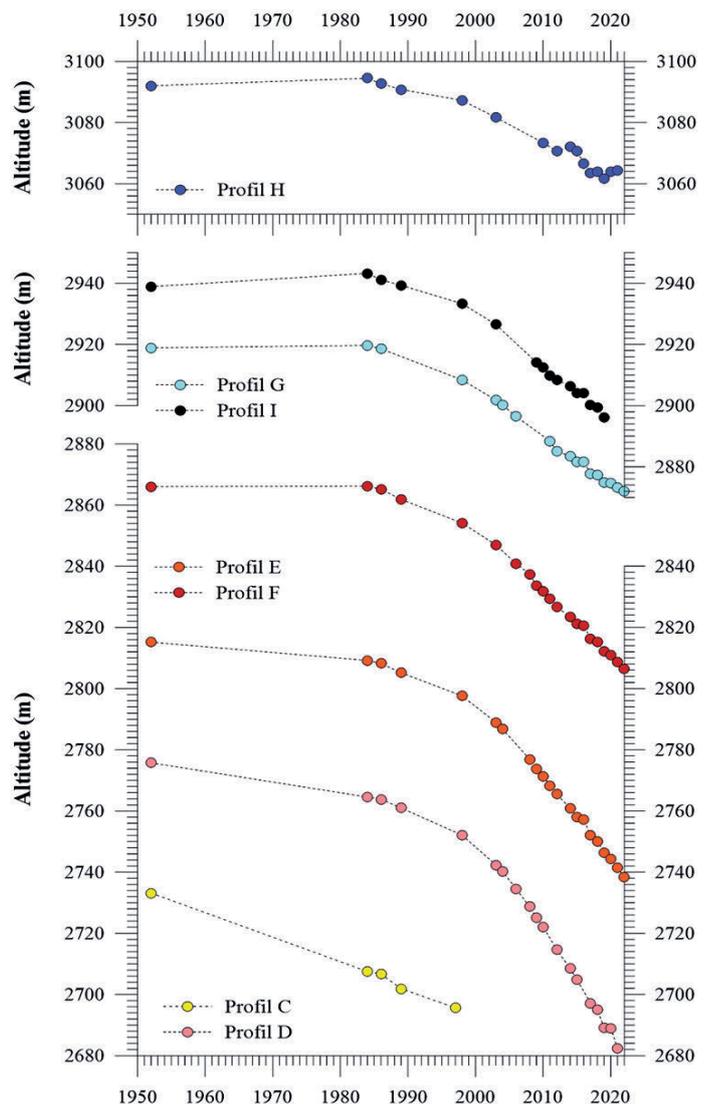


Figure 4. Variations d'altitude de la surface du glacier de Saint-Sorlin aux sections transversales localisées sur la figure 2.

bilans de masse de surface hivernaux depuis 1993 en une trentaine de sites sur le glacier. On peut ainsi établir une relation empirique entre l'accumulation mesurée sur le glacier et la précipitation solide (neige) mesurée ou estimée indépendamment en dehors du glacier. Les bilans de masse annuels (accumulation et fonte) sont calculés pour chaque tranche d'altitude. Nous obtenons ainsi le bilan de masse intégré sur l'ensemble du glacier (moyenne sur tout le glacier). En outre, les bilans de masse de l'ensemble du glacier sont bien connus à l'échelle décennale ou pluridécennale depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle grâce aux mesures géodésiques. Ainsi, la comparaison de ces bilans de masse géodésiques avec ceux obtenus par le modèle permet d'ajuster les paramètres d'accumulation.

Les bilans de masse de surface sont calculés en chaque point du glacier et pour chaque jour. Intégrés sur toute la surface, ces bilans de masse de surface permettent de calculer un bilan de masse d'ensemble du glacier. Pour cette étude, nous avons utilisé la réanalyse Safran (Durand *et al.*, 2009 ; Vernay *et al.*, 2022) disponible pour la période de 1958 à 2021, fournissant les valeurs quotidiennes de précipitation et de température par niveau d'altitude de 300 mètres dans le massif des Grandes Rousses.

À partir des bilans de masse d'ensemble du glacier, les variations d'épaisseur en chaque point du glacier, qui dépendent à la fois du bilan de masse de surface et de l'écoulement du glacier, sont calculées avec une approche paramétrée

(Huss *et al.*, 2010). Ce modèle, qui ne représente pas explicitement la dynamique, garantit la conservation de la masse. Beaucoup d'observations de variations d'épaisseur sont nécessaires pour étalonner ce modèle paramétré. La méthode est donc très adaptée au glacier de Saint-Sorlin. Elle consiste à calculer des changements d'épaisseur à différentes altitudes à partir du bilan de masse total du glacier et d'une fonction dite normalisée, décrite ci-après, qui est supposée stable dans le temps. Pour cela, nous avons sélectionné deux périodes durant lesquelles les variations d'épaisseur sont bien connues sur l'ensemble de la surface du glacier grâce à des cartes topographiques précises (figure 5a). Ces variations d'épaisseur sont divisées par la perte d'épaisseur maximum et les dénivelés divisés par le dénivelé total du glacier (figure 5b). On obtient ainsi une fonction dite normalisée, assez homogène, avec, malgré tout, des disparités dans la partie haute du glacier, probablement liées aux incertitudes de mesures par rapport aux faibles changements d'épaisseur observés dans ces régions supérieures. Cette fonction normalisée est ainsi utilisée dans l'évolution future moyennant la connaissance du bilan de masse d'ensemble et en faisant l'hypothèse de stationnarité de cette relation. Notons que cette fonction normalisée est stable pour des périodes de déclin du glacier, mais peut être très différente lors de bilans de masse positifs.

Pour résumer notre approche, le bilan de masse de surface est calculé en chaque point du glacier par le modèle degré-jour et les données

météorologiques de réanalyses ou de résultats de simulations climatiques. Ce bilan de masse est ensuite intégré sur toute la surface pour déterminer le bilan d'ensemble. La fonction normalisée permet alors de calculer les variations d'épaisseur et donc les nouvelles altitudes de la surface glaciaire en chaque point du glacier. Cette itération annuelle des altitudes permet de tenir compte de la rétroaction de la baisse de l'altitude du glacier sur les bilans de masse de surface. En effet, avec la diminution d'épaisseur, les bilans de surface sont de plus en plus négatifs. Lorsque le lit rocheux est atteint, la surface est déglacée. La position du front et une nouvelle surface du glacier sont calculées pour l'année suivante. Cette approche a été testée et évaluée, en comparant les résultats à ceux issus de modèles d'écoulement 3D, sur des glaciers suisses (Huss *et al.*, 2010), sur la Mer de Glace et le glacier d'Argentière (Vincent *et al.*, 2019).

## Les scénarios et modèles climatiques utilisés

Les données de précipitations et de températures journalières utilisées pour nos simulations d'évolution future sont issues des résultats de modèles de climat régionaux, contraints par les modèles climatiques à l'échelle planétaire utilisés pour les travaux du Giec. En l'occurrence, nos travaux se sont appuyés sur les projections de plusieurs couples de modèles globaux

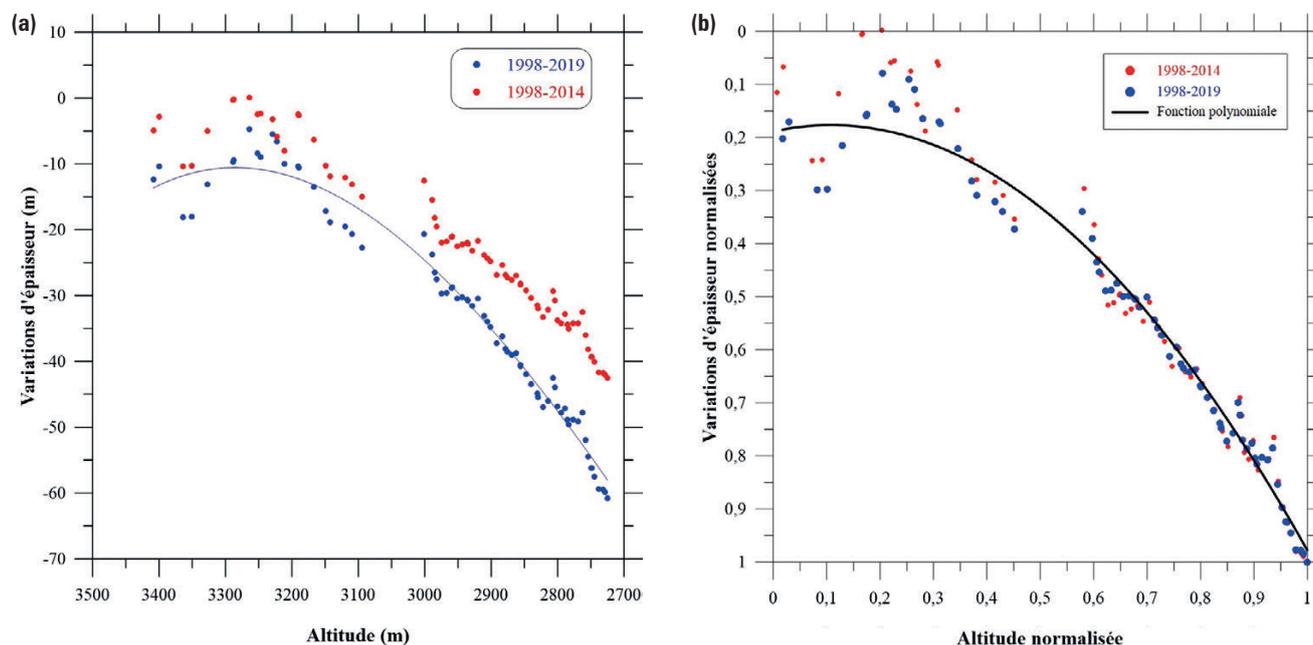


Figure 5. (a) Variations d'épaisseur du glacier de Saint-Sorlin en fonction de l'altitude, pour différentes périodes. (b) Variations d'épaisseur normalisées.

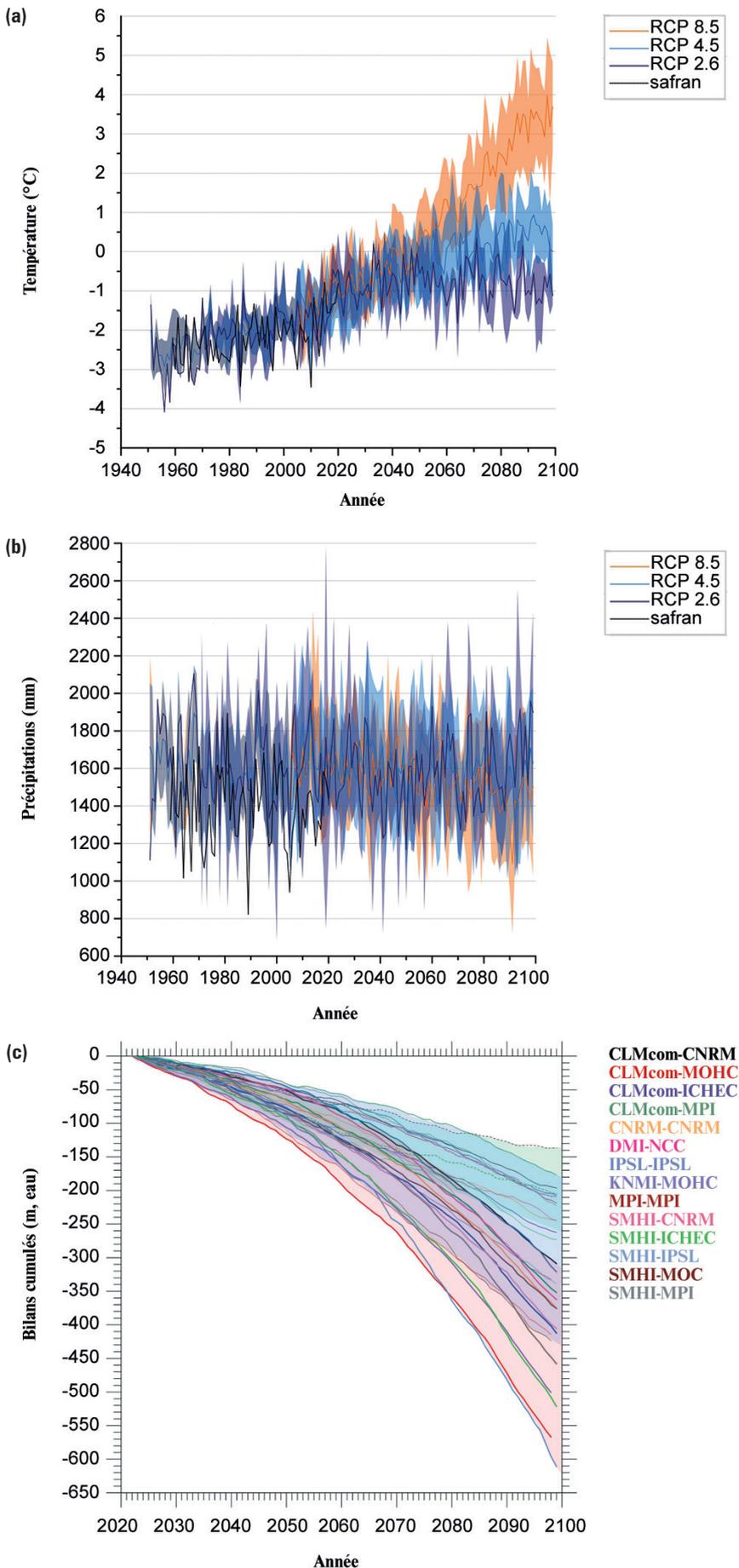


Figure 6. Évolution des températures (a) et précipitations (b) annuelles à 3 000 mètres d'altitude dans le massif des Grandes Rousses, pour les différents scénarios climatiques (moyenne et écart type des valeurs fournies pour chaque année par les couples GCM/RCM d'un RCP donné). Simulations des bilans de masse de surface à l'altitude de 2850 m suivant les différents couples GCM/RCM (c).

(GCM) et régionaux (RCM) produits dans le cadre du projet Euro-Cordex, dont les résultats ont été ajustés pour les rendre applicables en zones de montagne en utilisant la méthode Adamont (Verfaillie *et al.*, 2017).

Ces méthodes utilisent les données climatologiques issues de la réanalyse Safran (Durand *et al.*, 2009 ; Vernay *et al.*, 2022) disponibles sur la période de 1958-2021 dans le massif des Grandes Rousses. Elles permettent d'établir les liens statistiques entre Safran et chaque simulation climatique pendant la période historique (1950-2005). Ces relations sont ensuite utilisées pour ajuster les projections futures de 2006 à 2100, en utilisant les simulations correspondant à plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP (*Representative Concentration Pathways*). Ces données sont appelées Adamont dans la suite de cet article.

Les évolutions des températures et des précipitations annuelles à 3 000 mètres d'altitude sont reportées sur la figure 6 pour 29 réalisations de ce système de projection climatique, entre 1958 et 2100. Ce sous-ensemble de projections climatiques (Verfaillie *et al.*, 2018) couvre une bonne partie de la gamme de variation climatique pour la période d'intérêt. Sur la figure 6, on distingue une forte tendance sur l'évolution des températures, très différenciée selon les scénarios à partir de 2050. La tendance des précipitations est beaucoup moins nette. Pour le scénario RCP8.5, correspondant à de fortes émissions de gaz à effet de serre tout au long du XXI<sup>e</sup> siècle, l'accroissement de température sur l'ensemble de la période atteint 6 à 7 °C, alors que pour les RCP2.6 et RCP4.5, qui réduisent plus ou moins rapidement les émissions de gaz à effet de serre, l'accroissement moyen est de l'ordre de 2 et 3 °C, respectivement. Les valeurs des précipitations montrent surtout de fortes fluctuations avec une variabilité élevée aux échelles décennales et l'absence de tendance marquée sur l'ensemble de la période.

## Simulations du glacier de Saint-Sorlin entre 1998 et 2019

Nous avons d'abord simulé le comportement du glacier pendant les deux dernières décennies, sur une période pour laquelle les topographies de surface du glacier et les bilans de masse sont

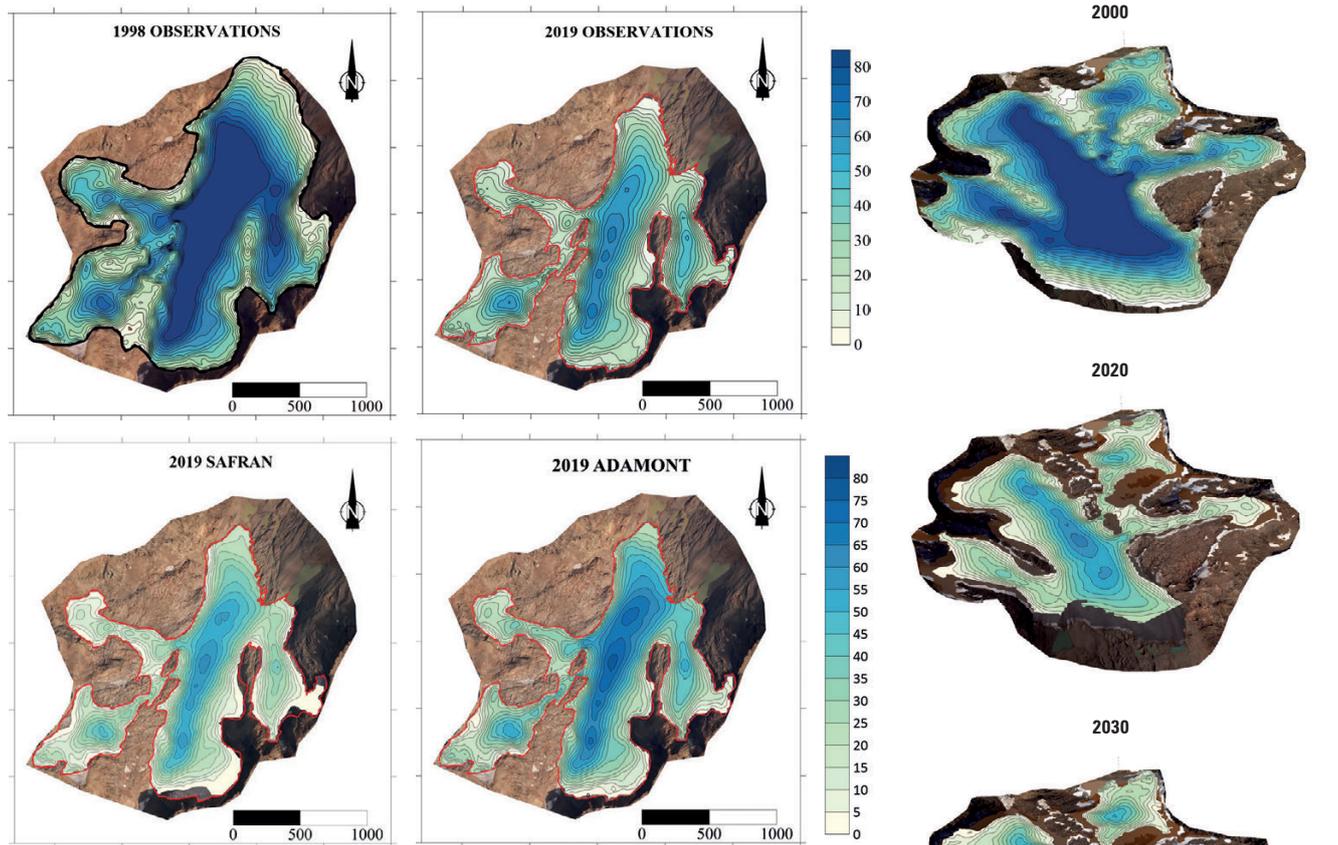


Figure 7. Épaisseurs (en m) du glacier de Saint-Sorlin : (a) observées en 1998 et 2019, (b) simulées avec les bilans de surface calculés à partir de Safran et d'Adamont (CNRM/CNRM-CM5, RCP4.5) (Verfaillie *et al.*, 2018).

parfaitement connus. En effet, nous disposons de modèles numériques de terrain en 1998, 2003, 2007, 2014 et 2019, avec une précision décimétrique. En outre, les bilans de masse sont également très bien contraints par les observations, puisqu'ils sont observés *in situ*, sur cette période et sur l'ensemble du glacier, à partir d'une trentaine de balises, plusieurs fois par an (figure 2). Pour ce test, nous avons utilisé trois jeux de données de bilans de masse de surface. Le premier est issu des observations, le deuxième est issu du modèle degré-jour utilisant les données de températures et précipitations Safran et le troisième est issu du modèle degré-jour en utilisant les données des simulations climatiques sur la période historique (Adamont) pour un couple de GCM/RCM, en tenant compte du RCP4.5 de 2006 à 2019. Pour ces deux derniers jeux de données, on peut noter que les bilans de masse de surface issus des données Adamont et Safran sont étalonnés sur les observations au cours de la période 1971-2005. La simulation débute avec la topographie observée en 1998 et se termine en 2019, en comparant les épaisseurs obtenues en 2019 pour chacun des trois jeux de données (figure 7). Les limites du glacier observées en 2019 sont reportées en rouge sur la figure 7. Sur la période

1998-2019, le glacier a perdu 40 mètres d'épaisseur de glace dans sa partie centrale. Les épaisseurs simulées avec les données Safran sont très similaires aux épaisseurs observées. Les différences d'épaisseur sont de quelques mètres et les changements de surface calculés sont très similaires aux observations. Ce résultat est tout à fait conforme aux calculs des bilans de masse cumulés obtenus avec Safran (figure 3, ligne orange). Les épaisseurs simulées avec les données Adamont sont surestimées en comparaison des observations d'environ 10 mètres au centre du glacier et légèrement sous-estimées dans le haut du glacier. Ces différences s'expliquent par le fait que la chronologie de la simulation climatique Adamont utilisée ici diffère des conditions observées, les simulations climatiques n'étant pas contraintes par les observations.

## Simulations du glacier de Saint-Sorlin au XXI<sup>e</sup> siècle

Une fois le modèle évalué sur les deux dernières décennies, l'évolution du glacier de Saint-Sorlin est simulée dans le futur suivant différents scénarios et



Figure 8. Extensions et épaisseurs du glacier de Saint-Sorlin au XXI<sup>e</sup> siècle avec un scénario climatique « modéré » et simulations climatiques issues d'un couple de modèles global/régional (CNRM/CNRM-CM5, RCP4.5). L'échelle des couleurs représente les épaisseurs de glace en mètres.

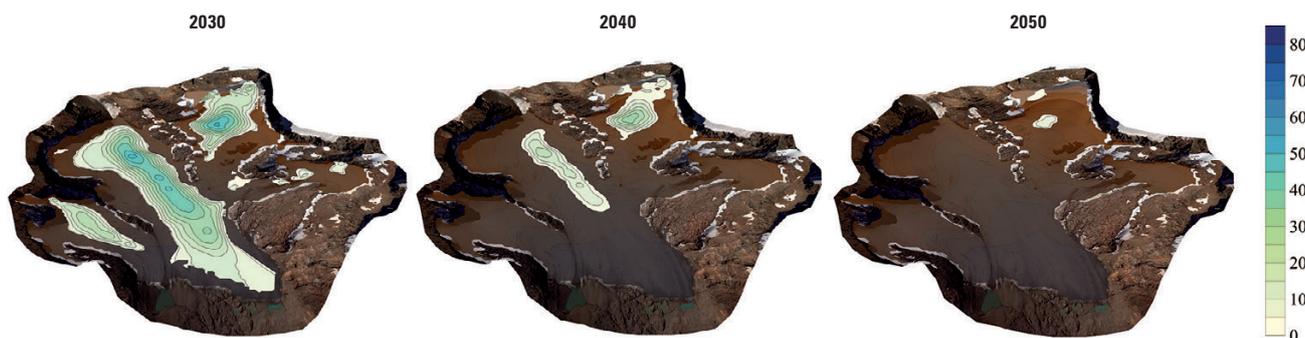


Figure 9. Extensions et épaisseurs du glacier de Saint-Sorlin au XXI<sup>e</sup> siècle avec un scénario climatique « optimiste » et les simulations climatiques issues d'un couple de modèles global/régional (RCP 2.6, SMHI-ICHEC.26) qui est médian parmi les différents modèles. L'échelle de couleur représente les épaisseurs de glace (en mètres).

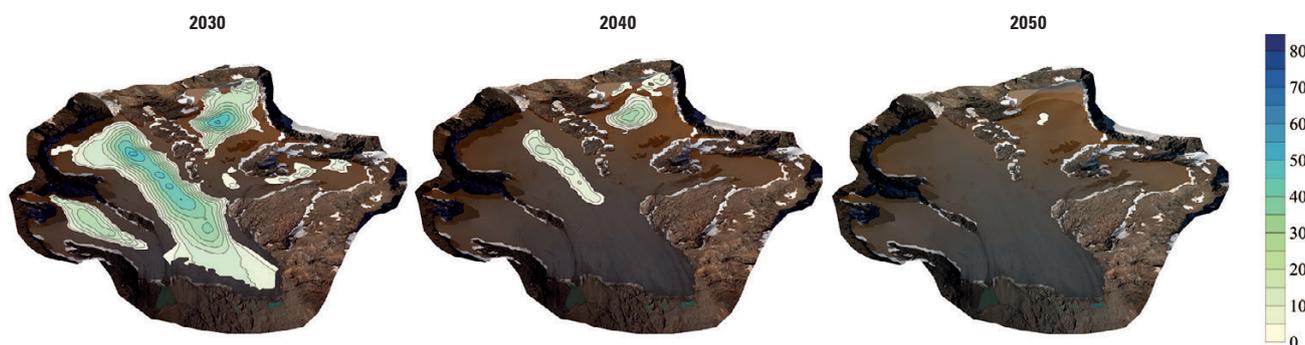


Figure 10. Extensions et épaisseurs du glacier de Saint-Sorlin au XXI<sup>e</sup> siècle avec un scénario climatique « pessimiste » et les simulations climatiques issues d'un couple de modèles global/régional (RCP 8.5, CLMcom-CNRM-RCP85) qui est médian parmi les différents modèles. L'échelle de couleur représente les épaisseurs de glace (en mètres).

modèles climatiques. Pour chacun des scénarios, nous avons sélectionné une projection climatique moyenne. Nous avons ainsi reporté sur la figure 8 les résultats d'une simulation à partir d'un couple RCM/GCM-CNRM/CNRM-CM5 pour le scénario RCP4.5. Cette simulation climatique se rapproche de la moyenne d'ensemble des différentes simulations disponibles pour le RCP4.5 (figure 6c). La simulation débute en 2019 afin de bénéficier du dernier modèle numérique de terrain disponible sur le glacier de Saint-Sorlin. Les simulations issues des autres scénarios de concentration en gaz à effet de serre (RCP2.6 et RCP8.5) sont reportées sur les figures 9 et 10.

Ces simulations indiquent que le glacier de Saint-Sorlin devrait disparaître vers 2050. Comme le montrent les figures 8, 9 et 10, la vitesse de régression du glacier et sa date de disparition ne dépendent quasiment pas des scénarios climatiques. Ce résultat s'explique par le fait que les scénarios climatiques sont relativement similaires jusqu'en 2050, étant donné la poursuite d'émissions relativement proches dans les premières années de simulation, avant que l'effet cumulé ne devienne plus marqué (figure 6). Notez que nous avons sélectionné, pour chacun de ces scénarios,

un modèle climatique médian. Les simulations indiquent que le glacier se scinde en deux parties peu après 2020 et en quatre parties peu après 2030. Ces résultats sont conformes aux observations récentes, puisque le glacier s'est séparé en deux parties en septembre 2022 (voir figure 1). Ainsi, depuis l'automne 2022, la partie haute du glacier qui constituait l'essentiel de la zone d'accumulation n'alimente plus la partie basse. Cela signifie que la branche principale du glacier est désormais presque entièrement en zone d'ablation et condamnée.

Les résultats de ces simulations peuvent être analysés au regard des bilans, des changements d'épaisseur et des vitesses de la branche principale du glacier qui est la partie la plus épaisse du glacier. Le bilan de masse d'ensemble du glacier est de  $-2,0$  mètres d'eau par an en moyenne au cours des dernières décennies, soit  $2,2$  mètres de glace par an en moyenne. En son milieu, vers  $2\ 850$  mètres d'altitude, dans sa partie la plus épaisse (environ  $65$  mètres en 2019), le bilan de masse de surface est d'environ  $-1,8$  mètre d'eau par an, soit  $2,0$  mètres de glace par an, au cours des deux dernières décennies. Par ailleurs, suivant nos observations sur les profils transversaux (figure 4), la branche

principale perd  $2,2$  mètres d'épaisseur de glace par an à  $2\ 850$  mètres d'altitude. La vitesse d'émergence qui caractérise la contribution du flux de glace au bilan de surface est donc très faible, puisqu'elle contribue pour environ  $0,2$  m/an au bilan de surface dans cette région du glacier. Ce résultat est corroboré par les vitesses d'écoulement observées dans cette région, qui ont fortement diminué et qui sont inférieures aujourd'hui à  $4$  m/an. Ainsi, dans le futur, les changements d'épaisseur seront au moins de  $2$  m/an dans cette région, ce qui situe, à ce rythme, une disparition de la branche principale avant 2055. Cette estimation grossière est tout à fait conforme à nos résultats de modélisation reportés plus haut.

En complément des simulations présentées ci-dessus, nous avons effectué quelques expériences numériques supplémentaires pour évaluer le comportement du glacier suivant différents scénarios de bilans de masse de surface. La première expérience consiste à sélectionner les bilans de masse moyens de la période 1970-2000 et les utiliser pour la simulation future. Dans cette hypothèse, le glacier disparaît peu après 2080 (figure 11). Dans la deuxième expérience, nous avons sélectionné les bilans de masse

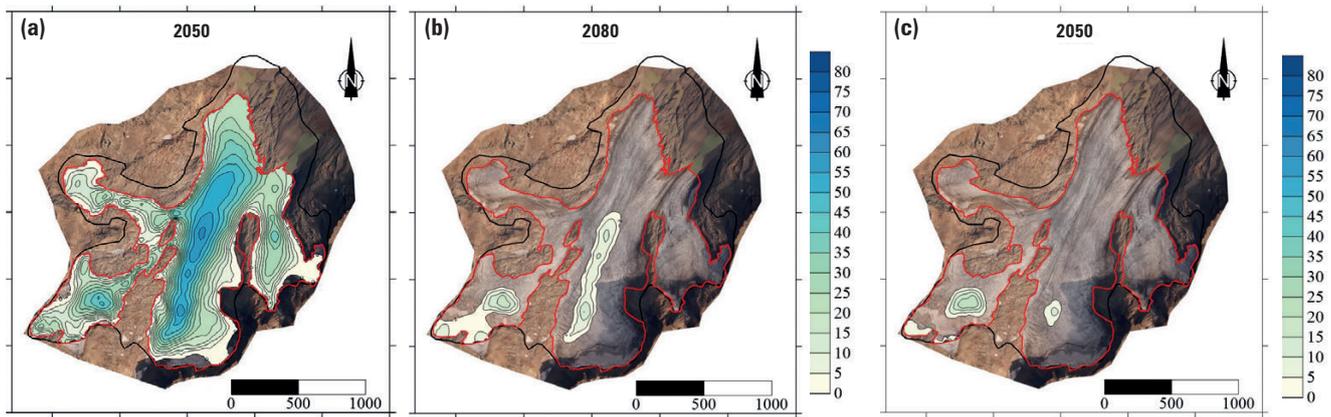


Figure 11. Simulations de l'évolution du glacier de Saint-Sorlin : (a et b) avec des bilans de surface similaires à ceux des décennies 1970-2000 (en 2050 et 2080), (c) avec des bilans de surface similaires à ceux de la décennie 2000-2019 (pour 2050 uniquement). Les simulations débutent en 2000 et en 2019 respectivement. L'échelle de couleur représente les épaisseurs de glace (en mètres).

des décennies 2000-2019. Dans cette hypothèse, le glacier disparaît peu après 2050. Cette dernière expérience montre que les bilans de masse observés au cours des deux dernières décennies sont très négatifs, proches de ceux des bilans modélisés pour les deux prochaines décennies.

## Discussion et conclusion

L'évolution du glacier de Saint-Sorlin et des glaciers de la même tranche d'altitude est très rapide (WGMS, 2017). Le glacier de Saint-Sorlin, qui perdait en moyenne 0,3 mètre d'eau par an au cours du XX<sup>e</sup> siècle, perd en moyenne 2,0 mètres d'eau par an depuis 2000. Nos simulations indiquent que ce glacier devrait disparaître vers 2050 et que cette date de disparition dépend peu des scénarios climatiques envisagés dans le futur. En effet, les projections climatiques d'ici 2050 sont peu différenciées et les impacts sur le bilan de masse de surface jusqu'en 2050 sont similaires. Ces modélisations sont corroborées par l'amincissement très rapide observé au cours des deux dernières décennies, qui atteint 1,2 mètre de glace par an vers 3 100 mètres d'altitude et 2,2 mètres de glace par an vers 2 850 mètres d'altitude. En effet, une simple extrapolation des changements d'épaisseur des deux dernières décennies conduit à une disparition du glacier vers 2055. Nos simulations ne tiennent pas compte du changement d'albédo potentiel de la glace sur le long terme qui pourrait être lié à une accumulation d'aérosols en surface ou à une concentration plus importante des poussières en surface en raison de l'augmentation de la fonte. Ces modifications de l'albédo pourraient alors accélérer la fonte dans le futur. Dans le

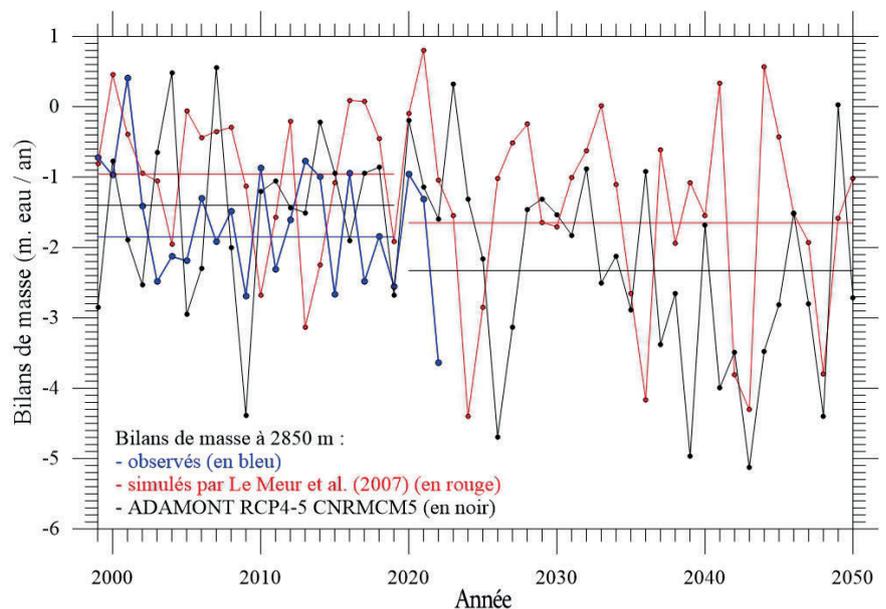


Figure 12. Bilans de masse de surface à 2850 m d'altitude, observés, simulés par la présente étude (scénario médian Adamont CNRM/CNRMCM5, RCP4.5) et simulés par l'étude de Le Meur *et al.* (2007) à partir d'un scénario SRESB1.

sens inverse, l'accumulation de débris de plus grande taille pourrait diminuer la fonte, mais, dans le cas du glacier de Saint-Sorlin, les parois fournissent une quantité de matériaux limitée. Le glacier s'est scindé en deux parties à l'automne 2022 et sera scindé en quatre parties peu après 2030. En 2022, l'ensemble de la surface du glacier était en zone d'ablation, le manteau neigeux de l'hiver ayant complètement disparu au cours de l'été sur l'ensemble de la surface du glacier. La ligne d'équilibre se situe pour cette année hydrologique 2021-2022 au-dessus de 3 400 mètres d'altitude et le bilan du glacier est de -3,8 mètres d'eau. La branche principale du glacier, déconnectée de la zone d'accumulation principale, est désormais presque complètement en zone d'ablation. Étant donné que l'épaisseur moyenne du glacier est d'environ 26 mètres en 2022, on peut en conclure

que le glacier a perdu environ 16 % de son volume sur la seule année hydrologique 2021-2022.

Des travaux de modélisations antérieurs (Le Meur et Vincent, 2003 ; Le Meur *et al.*, 2007) avaient montré que suivant un scénario IPCC SRESB1 de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001), le glacier devait disparaître vers 2070. Cet ancien scénario de l'IPCC, qui envisageait une stabilisation des gaz à effet de serre à 550 ppm et un réchauffement de 1,1 à 2,9 °C en 2100, est relativement proche du scénario RCP4.5<sup>2</sup>. Dans tous les cas, nos simulations indiquent que le futur du glacier de Saint-Sorlin est peu sensible aux scénarios climatiques et que le glacier devrait disparaître vers

2. <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/175>

2050, soit avec 20 années d'avance par rapport à la médiane des précédentes simulations. Cette disparition précoce s'explique principalement par les conditions météorologiques particulièrement chaudes des vingt dernières années, qui ont conduit à des bilans de masse très déficitaires. Une comparaison à une altitude donnée (2 850 m) indique que les bilans simulés par Le Meur *et al.* (2007) sont en moyenne de -0,96 mètre d'eau par an entre 1999 et 2019, alors que les bilans observés sont de -1,85 mètre d'eau par an à cette altitude sur la même période (figure 12). Les bilans issus des données Adamont à la même altitude sont de -1,40 mètre d'eau par an sur la même période et ne sont donc pas assez négatifs par rapport aux observations. Cette dernière comparaison explique bien la surestimation des épaisseurs modélisées à partir des données Adamont

au cours de la période 1998-2019 (figure 7). La figure 12 indique également que, entre 2020 et 2050, la modélisation de Le Meur *et al.* (2007) qui utilise un scénario IPCC SRESB1 produit des bilans moins négatifs que les simulations issues des données Adamont. Bien que le scénario IPCC SRESB1 soit proche du scénario RCP4.5, les modèles climatiques régionaux peuvent conduire à des différences assez significatives.

Enfin, nous avons vérifié que nos simulations sont assez peu sensibles à la date du début de la simulation. Même en débutant la simulation en 1998, le glacier disparaît aussi vers 2050.

Le glacier de Saint-Sorlin est représentatif des glaciers alpins situés en dessous de 3 400 mètres d'altitude. On

peut en conclure que ces glaciers de basse altitude sont condamnés suivant des échéances similaires.

## Remerciements

Cette étude a bénéficié du soutien de l'Institut des Sciences de l'Université (Insu) et de l'Osug (université Grenoble Alpes) dans le cadre du service d'observation Glacioclim (<https://glacioclim.osug.fr>). Cette étude utilise des résultats produits dans le cadre du projet GICC Adamont financé par le ministère de la Transition écologique et solidaire et l'Onerc de 2015 à 2018, ainsi que dans le cadre du projet CDP Trajectories (Idex Université Grenoble Alpes) et Interreg OPCC2 Clim'Py.

## Bibliographie

- Belin M., 1962. Sondage sismique du glacier de Saint-Sorlin. *C. R. Séances Acad. Sci. (Paris)*, 255, 546-548.
- Compagno L., Eggs S., Huss M., Zekollari H., Farinotti D., 2021. Brief communication: Do 1.0, 1.5, or 2.0°C matter for the future evolution of Alpine glaciers? *Cryosphere*, 15, 2593-2599. doi: 10.5194/tc-15-2593-2021
- Durand Y., Laternser M., Giraud G., Etchevers P., Lesaffre B., Merindol L., 2009. Reanalysis of 44 Yr of climate in the French Alps (1958-2002): Methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 48, 429-449. doi: 10.1175/2008JAMC1808.1
- Flusin G., Jacob C., Offner J., 1909. *Études glaciaires, géographiques et botaniques dans le massif des Grandes Rousses : rapport des campagnes de 1905 et 1906*. Paris, Ministère de l'Agriculture. Direction Générale des Eaux et Forêts. Rapports du Service d'Étude des Grandes Forces Hydrauliques (Études glaciologiques).
- Huss M., 2011. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resour. Res.*, 47, W07511. doi: 10.1029/2010WR010299
- Huss M., Jouvett G., Farinotti D., Bauder A., 2010. Future high-mountain hydrology: a new parameterization of glacier retreat. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 815-829. doi: 10.5194/hess-14-815-2010
- IPCC, 2001. *Climate Change: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, New York.
- Le Meur E., Vincent C., 2003. A two-dimensional shallow ice flow of glacier de Saint-Sorlin, France. *J. Glaciol.*, 49, 167.
- Le Meur E., Gerbaux M., Schafer M., Vincent C., 2007. Disappearance of an Alpine glacier over the 21st Century simulated from modeling its future surface mass balance. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 261, 367-374. doi: 10.1016/j.epsl.2007.07.022
- Mougouin P., 1927. Variations historiques des glaciers des Grandes Rousses. In: *Études Glaciologiques*, tome 6, Observations glaciologiques faites en Dauphiné jusqu'en 1924, 139-149.
- Réveillet M., Six D., Vincent C., Rabatel A., Dumont M., Lafaysse M., Morin S. *et al.*, 2018. Relative performance of empirical and physical models in assessing the seasonal and annual glacier surface mass balance of Saint-Sorlin Glacier (French Alps). *Cryosphere*, 12, 1367-1386. doi: 10.5194/tc-12-1367-2018
- Six D., Vincent C., 2014. Sensitivity of mass balance and equilibrium-line altitude to climate change in the French Alps. *J. Glaciol.*, 60, 867-878. doi: 10.3189/2014JoG14J014
- Six D., Vincent C., Bonnefoy-Demongeot M., Thibert E., René P., 2023. 2022 : année record pour la fonte des glaciers français. *La Météorologie*, 120, 13-15. doi: 10.37053/lameteorologie-2023-0008
- Verfaillie D., Deque M., Morin S., Lafaysse M., 2017. The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283. doi: 10.5194/gmd-10-4257-2017
- Verfaillie D., Lafaysse M., Deque M., Eckert N., Lejeune Y., Morin S., 2018. Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *Cryosphere*, 12, 1249-1271. doi: 10.5194/tc-12-1249-2018
- Vernay M., Lafaysse M., Monteiro D., Hagenmuller P., Nheili R., Samacois R., Verfaillie D., Morin S., 2022. The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas: description and evaluation (1958–2021). *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1707-1733. doi: 10.5194/essd-14-1707-2022
- Vincent C., 2002. Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107. doi: 10.1029/2001JD000832
- Vincent C., Fischer A., Mayer C., Bauder A., Galos S. P., Funk M., Thibert E. *et al.*, 2017. Common climatic signal from glaciers in the European Alps over the last 50 years. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 1376-1383. doi: 10.1002/2016GL072094
- Vincent C., Peyaud V., Laarman O., Six D., Gilbert A., Gillet-Chaulet F., Berthier E., Morin S., Verfaillie D., Rabatel A., Jourdain B., Bolibar J., 2019. Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI<sup>e</sup> siècle : Argentièrre et Mer de Glace. *La Météorologie*, 106, 49-58.
- WGMS (World Glacier Monitoring Service), 2017. *Global Glacier Change Bulletin*, No. 2. (2014-2015). doi: 10.5904/wgms-fog-2017-10