

## 2.4 Impact sur les glaciers alpins

Christian Vincent - Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

Christian Vincent est Ingénieur de Recherche au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement du CNRS à St Martin d'Hères. Il est responsable du Service d'Observations des glaciers alpins, et correspondant national du World Glacier Monitoring Service (WGMS).

### MESSAGES CLÉS

- Les glaciers alpins sont très sensibles aux variations climatiques. Leurs fluctuations ont une forte variabilité naturelle, ceci à l'échelle centennale, décennale et annuelle.
- L'évolution des glaciers alpins est un excellent indicateur du climat passé et à venir. Elle constitue un indicateur fiable du réchauffement climatique qui fait l'objet d'un suivi intense de la part de la communauté scientifique internationale.
- Depuis 1840 environ les glaciers alpins sont globalement en récession. Depuis 1982, la récession s'est accélérée sous l'effet d'un réchauffement estival évident. Les glaciers alpins ont aujourd'hui régressé à un niveau encore jamais atteint au cours des quatre derniers siècles.
- Quels que soient les scénarii envisagés pour le climat futur, les glaciers français seront fortement affectés. Ceux dont les sommets sont situés à des altitudes inférieures à 2900 m sont condamnés à disparaître car ils ne sont pas encore en équilibre avec le climat moyen du 20ème siècle. Les autres connaîtront des réajustements selon l'amplitude du réchauffement à venir.
- Pour un réchauffement supérieur à 1°C les glaciers alpins connaîtront des réajustements et des retraits importants. Pour un réchauffement supérieur à 3°C la plupart des glaciers français seront réduits à néant, seuls les plus hauts glaciers du massif du Mont Blanc pourraient résister, au prix d'un fort réajustement de leurs surfaces et de leurs longueurs.

### INTRODUCTION

L'évolution des glaciers est l'un des indicateurs importants sélectionnés par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour situer la variabilité et les

tendances climatiques au cours du dernier siècle (GIEC, 2001). La sensibilité des bilans de masse glaciaire aux variations climatiques est largement reconnue par la communauté scientifique internationale (Oerlemans, 1986 ; Haeberli,

1995) et a été étudiée en détail dans les Alpes françaises (Vincent, 2002). Les glaciers constituent désormais un indicateur climatique essentiel pour le passé comme pour le futur (Haeberli, 1998 ; GIEC, 2001).

## LES DONNÉES

Le premier paramètre étudié est le bilan de masse des glaciers alpins. Le bilan de masse est le résultat de l'accumulation dues aux précipitations neigeuses, et des ablations par fusion de la neige et/ou de la glace induites par les flux énergétiques (rayonnement solaire, température,...) provenant de l'atmosphère. Ainsi, les mesures des bilans de masse hivernaux (octobre à mai) et estivaux (juin à septembre) fournissent respectivement une image directe des précipitations hivernales et des bilans énergétiques estivaux<sup>1</sup>. Des observations de ce paramètre sont réalisées sur quelques glaciers depuis plus de 50 ans. Depuis 1994, ces observations sont systématiques et continues sur l'ensemble de la surface de 5 glaciers français (Argentière, Mer de Glace, Gébroulaz, Saint Sorlin et Sarennes) et sont aujourd'hui intégrées dans un Service d'Observation géré par le LGGE et soutenu par l'Institut National des Sciences de l'Univers.

Un autre paramètre est la longueur des glaciers. Les fluctuations de longueur dépendent non seulement des conditions climatiques mais aussi de la géométrie du glacier et de ses conditions d'écoulement. Ces fluctuations de longueur, une fois traitées par un modèle mathématique d'écoulement, permettent de fournir une image indirecte du climat. Ce type

d'observations existe depuis 150 ans environ sur quelques glaciers alpins. D'autres données indirectes, telles que les données dendroclimatiques<sup>2</sup> ou les archives historiques, permettent de reconstituer sur une période de plusieurs milliers d'années les fluctuations de ce paramètre.



(c) Sammlung der Gesellschaft für die alpine Forschung, Mer de Glace bei Montanvert, Chamonix/Frankreich, vor 1918.



(c) Gesellschaft für die alpine Forschung, Wolfgang Drey, Mer de Glace bei Montanvert, Chamonix / Frankreich, 14.8.2001.

<sup>1</sup> Le schéma est nettement plus complexe dans d'autres régions climatiques pour lesquelles les périodes d'accumulation et de fusion en un même site peuvent se succéder à l'échelle mensuelle ou même journalière.

<sup>2</sup> L'étude du climat à partir des troncs d'arbres fossiles dans les moraines.

## LES FLUCTUATIONS PASSÉES

Au cours des 3000 dernières années, les fluctuations d'une poignée de glaciers ont été reconstituées grâce à la datation des troncs d'arbres et des tourbes retrouvés dans les moraines glaciaires (Holzhauser et al., 2005). Ces données montrent de fortes fluctuations des glaciers alpins au cours de cette période ; en particulier, ces glaciers ont connu une forte

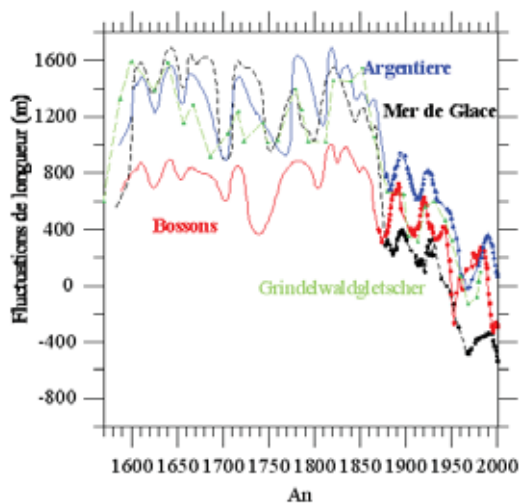
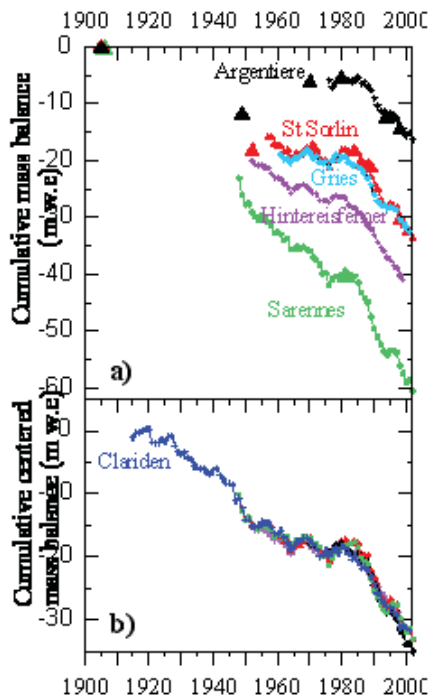


Figure 2 : Evolution de quelques glaciers dans l'ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés de ces glaciers : ils représentent des variations d'épaisseur moyennes. Par exemple, la perte de 32 m d'eau du glacier de St Sorlin au cours du 20ème siècle signifie qu'il a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 32 m en moyenne sur l'ensemble de sa surface. Ces données sont issues d'observations directes de terrain (points) ou de comparaison de cartes (larges triangles). b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin. Ces courbes mettent en évidence un signal commun à l'échelle des Alpes au cours des 50 dernières années. Source : adapté de Vincent et al., 2004.

période de récession il y a 3200 ans et les dernières recherches dendroclimatiques indiquent que leurs surfaces étaient plus réduites qu'aujourd'hui. La période romaine, il y a 2000 ans, montre également une forte contraction des glaciers, avec des surfaces équivalentes à celles de la fin du 20ème siècle (Holzhauser et al., 2005). D'autres périodes, au contraire, sont marquées par des crues impressionnantes comme celle que l'on nomme le « Petit Age de Glace » entre la fin du 16ème siècle et le milieu du 19ème. Lors de la dernière extension du Petit Age de Glace (vers 1830), les glaciers alpins avaient des longueurs supérieures de 800 m à 2.5 km par rapport à l'actuel (Figure 1). A partir de 1850, la grande majorité des glaciers alpins entame une forte régression qui se prolonge jusqu'à aujourd'hui, bien que cette récession générale ait été interrompue par des réavancées marquées à la fin du 19ème siècle et au cours du 20ème siècle.

L'analyse de longues séries de bilans de masse observés dans les Alpes autrichiennes, suisses et françaises ont permis de comprendre les causes de ces fluctuations au cours du 20ème siècle (Vincent et al., 2004). Ces séries ont une cinquantaine d'années, à l'exception de la série de Clariden (Suisse) qui est exceptionnelle puisqu'elle date de 1914. Cette série est unique pour l'étude de l'accumulation hivernale et de la fusion estivale à l'échelle du siècle. Les bilans de masse glaciaires moyens annuels sont très différents d'un site à l'autre (Figure 2a) puisque le glacier de Sarennes perd en moyenne 0.62 m d'eau par an (l'équivalent d'une lame d'eau de 62 cm sur toute sa surface) alors que le glacier d'Argentière perd seulement 15 cm d'eau par an. Mais si l'on retire ces tendances (figure 2b), on met alors en évidence un signal climatique remarquablement commun à l'échelle de l'ensemble des



Alpes (de Sarennes, en France à Hintereisferner, en Autriche, à 400 km de distance) pour les 50 dernières années. (Figure 2b). Quel signal climatique ?

Une analyse détaillée a montré que le 20<sup>ème</sup> siècle pouvait être divisé grosso modo en 4 périodes (Vincent, 2002) : entre le début du 20<sup>ème</sup> siècle et 1941, les glaciers alpins ont peu perdu de masse ; entre 1942 et 1953, ils ont subi des déficits très importants à la fois à cause des faibles précipitations

Figure 2 : Evolution de quelques glaciers dans l'ensemble des Alpes, a) bilans de masse cumulés de ces glaciers : ils représentent des variations d'épaisseur moyennes. Par exemple, la perte de 32 m d'eau du glacier de St Sorlin au cours du 20<sup>ème</sup> siècle signifie qu'il a perdu l'équivalent d'une lame d'eau de 32 m en moyenne sur l'ensemble de sa surface. Ces données sont issues d'observations directes de terrain (points) ou de comparaisons de cartes (larges triangles). b) bilans de masse cumulés centrés et ajustés sur la tendance de St Sorlin. Ces courbes mettent en évidence un signal commun à l'échelle des Alpes au cours des 50 dernières années. Source : adapté de Vincent et al., 2004.

hivernales et à cause des fortes ablations estivales ; entre 1954 et 1981, les bilans de masse sont en général positifs et provoquent une réavancée importante du front de certains glaciers (plusieurs centaines de mètres pour les glaciers de la Mer de Glace, d'Argentière et des Bossons dans le Massif du Mont Blanc). Enfin, depuis 1982, les bilans de masse sont très déficitaires. Cette forte régression ne s'explique que par les chaleurs estivales (les précipitations hivernales n'ont pas diminué dans les Alpes françaises sur cette période).

L'étude détaillée des 2 séries de bilans de masse hivernaux et estivaux de Sarennes et Clariden (Vincent et al., 2004) a montré que la forte augmentation de la fusion estivale des 20 dernières années était très similaire pour ces 2 glaciers situés à 290 km l'un de l'autre ce qui signifie que les variations des bilans d'énergie (rayonnement, température...) en surface sont similaires à l'échelle des Alpes : on observe en effet une augmentation de la fusion estivale identique à Sarennes et à Clariden entre 1954-81 et 1982-2002 (0.5 cm d'eau par jour). En outre, dans les zones basses des glaciers, en dessous de 2900 m d'altitude, cette augmentation a une incidence directe sur l'albedo<sup>3</sup> de la surface, puisque le glacier est découvert de neige plus tôt dans la saison ; comme l'albedo

de la glace est très inférieur à celui de la neige, la glace absorbe beaucoup plus de radiations et cette modification de l'albedo amplifie la fusion (on parle de rétroaction positive). L'intérêt de ces observations de la fusion de la glace réside principalement dans le fait que l'on peut traduire directement ces valeurs de fusion en énergie ( $W/m^2$ ). De ce point de vue, les glaciers constituent des indicateurs climatiques naturels sans équivalent. Ainsi, l'augmentation du taux de fusion journalier (environ 0.5 cm eau /jour) observée à la fois à Clariden et à Sarennes entre 1954-81 et 1982-2002 correspond à une élévation des flux d'énergie en surface de 20  $W/m^2$  (indépendante de l'albedo de surface) ce qui représente une augmentation très importante des quantités d'énergie qui arrivent à la surface. Ces fluctuations des bilans de masse glaciaires montrent ainsi que le climat varie fortement à l'échelle décennale et à l'échelle séculaire. La variabilité annuelle est très forte aussi : par exemple, la valeur d'ablation de 2003 dépasse de deux écarts types la valeur moyenne de 1982-2002 et trois écart types la valeur moyenne de 1954-1981. De telles valeurs d'ablation n'ont jamais été atteintes au cours des 50 dernières années. Il faut remonter à 1947 pour retrouver une valeur équivalente.

En résumé, les fortes fluctuations décennales du 20ème siècle dépendent pour une très large part des bilans estivaux. La variabilité des bilans hivernaux est beaucoup plus faible. Il semble que ce ne soit pas vrai pour le 19ème siècle. En effet, dans une étude récente (Vincent et al., 2005), nous avons montré que les précipitations hivernales sont responsables de la dernière crue des glaciers alpins à la fin du Petit Age de Glace (vers 1830). Au cours de cette période (1760-1830),

les précipitations hivernales ont été supérieures d'au moins 25% à celles du 20ème siècle. La décrue glaciaire de la fin du Petit Age de Glace, après 1830, n'est pas due à un réchauffement mais à une diminution des précipitations

Dans les Alpes, le réchauffement atmosphérique affectera directement la fonte du manteau nival et de la glace.

hivernales. Ce n'est que vers le début du 20ème siècle que le réchauffement est visible dans les Alpes sur les courbes de températures (Bohm et al., 2001) et affecte les glaciers.

## LES IMPACTS FUTURS

Dans les Alpes, le réchauffement atmosphérique affectera directement la fonte du manteau nival et de la glace. Mais d'autres effets sont à attendre : d'abord, la saison hivernale des précipitations solides (sous forme de neige) risque d'être plus courte; ça veut dire, d'une part, que le manteau nival sera moins épais ; d'autre part, à partir du mois de mai/juin, le manteau neigeux disparaîtra plus tôt et la ligne de neige du manteau hivernal s'élèvera plus rapidement en altitude. Ainsi, dans la partie basse du glacier, la fonte sera plus active du fait d'un albedo de surface plus faible. En outre, en fin de saison estivale, les arrivées de neiges hivernales (septembre/octobre) risquent aussi d'être plus tardives. Tout cela contribue à allonger la saison d'ablation (au cours des 20

<sup>3</sup>Rapport entre la quantité de lumière que reçoit un corps et celle qu'il réfléchit ou diffuse. Celui de la neige est très élevé, de l'ordre de 80%

dernières années, la saison d'ablation s'est allongée d'une quinzaine de jours dans les Alpes françaises). En résumé, un réchauffement augmentera les taux de fonte journaliers et allongera la saison d'ablation. Dans ces conditions, la fonte en sera fortement affectée. Dans certaines régions, une augmentation de l'accumulation hivernale (liée à des précipitations de neige hivernale plus importantes) pourrait en partie compenser l'élévation de la fonte estivale. Des études récentes ont montré que, pour compenser une augmentation de température de 1°C, il faut augmenter les précipitations hivernales de 25 à 30 %. Des variations aussi importantes de précipitations ne se sont pas produites au cours du 20ème siècle dans les Alpes (à l'échelle décennale). De telles variations de précipitations dans les régions alpines ne sont pas envisagées dans le futur par les modèles climatiques. En tous les cas, une augmentation des précipitations qui pourraient compenser une élévation des températures supérieure à 1°C (conforme aux prévisions du 21ème siècle) reste fortement improbable.

Alors, que vont devenir nos glaciers ? Ils dépendent de la position de leur ligne d'équilibre (limite entre la zone d'accumulation et la zone d'ablation) et donc de la taille de leur zone d'accumulation. En moyenne sur la dernière cinquantaine d'années, l'altitude de la ligne d'équilibre des glaciers alpins est d'environ 2800-2900 m, en face Nord. Plusieurs scénarios peuvent être envisagés : à climat constant, similaire à celui du 20ème siècle, la plupart des glaciers vont continuer de régresser car, encore aujourd'hui, ils ne sont pas en équilibre avec les conditions climatiques du 20ème siècle. Les petits glaciers, dont les sommets sont au dessous de 2900 m, ne sont plus alimentés et par conséquent sont condamnés à

disparaître (mais ils étaient condamnés dès la fin du Petit Age de Glace). Les autres glaciers dont le bassin d'accumulation se situe au dessus de 2900 m, peuvent résister à un climat moyen équivalent à celui du 20ème siècle mais au prix d'un réajustement : par exemple, la langue du glacier de Saint Sorlin (massif des Grandes Rousses), devrait reculer de 600 à 700 m environ avant d'atteindre une position d'équilibre

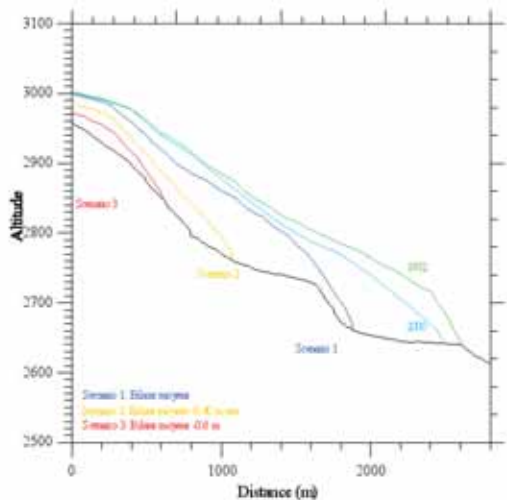


Figure 3 : Evolution du glacier de Saint Sorlin (3km<sup>2</sup>, Massif des Grandes Rousses) : profils en long du glacier observés en 1952, en 2000 et calculés pour différents scénarios. Scénario 1 : Profil calculé pour des conditions climatiques équivalentes à celles du 20ème siècle (bilans de masse moyens du 20ème siècle) : le glacier devrait reculer d'environ 600 à 700 m par rapport à sa position de 2000. Scénario 2 : Profil simulé avec des conditions climatiques équivalentes à celles des 20 dernières années (températures estivales supérieures de 0.7°C par rapport à la moyenne du 20ème siècle ; bilans -0.4 m d'eau) : dans ce scénario, le glacier reculerait de 1.4 km. Scénario 3 : Profil simulé avec des conditions encore plus chaudes (températures estivales supérieures de 1 à 1.5 °C par rapport à la moyenne du 20ème siècle ; bilans -0.6 m d'eau). Adapté de (Vincent et al., 2000) et de (Le Meur et Vincent, 2003).

(Figure 3). Les plus grands glaciers tels que ceux du massif du Mont Blanc régresseront encore un peu mais retrouveront assez rapidement une position d'équilibre. Néanmoins, les temps de réponse des langues glaciaires sont longs et, lors d'une variation climatique, il faut compter 50 à 200 ans avant qu'un glacier retrouve une surface en accord avec les nouvelles conditions climatiques.

Avec des conditions climatiques similaires à celles des 20 dernières années (températures estivales supérieures de 0.7 °C par rapport à la moyenne du 20ème siècle), les glaciers devraient subir une récession encore plus importante : en effet, la ligne d'équilibre moyenne des 20 dernières années se situe à 2900-3000 m. Si ces conditions perdurent, le glacier de St Sorlin devrait reculer de 1.4 km par rapport à aujourd'hui, avant de retrouver une position d'équilibre (Figure 3). Pour un réchauffement supérieur à 3°C par rapport à la moyenne du 20ème siècle, les lignes d'équilibre pourraient s'élever de plus de 300 à 400 m de dénivelé; dans ce scénario, la plupart des glaciers en France seraient réduits à presque rien, exceptés les plus gros glaciers situés au dessus de 4000 m, dans le massif du Mt Blanc.

## RÉFÉRENCES

- Böhm, R., I. Auer, M. Brunetti, M. Maugeri, T. Nanni and W. Schönher, *Regional temperature variability in the European Alps 1760-1998*, *Int. J. Climatol.*, 21, 1779-1801, 2001.
- Haeberli, W., *Glacier fluctuations and climate change detection*, *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 18, 191-199, 1995.
- Haeberli, W., M. Hoelzle, S. Suter, and R. Frauenfelder (Compilers), *Fluctuations of Glaciers, 1990-1995*, vol. VII, UNESCO, Paris, 1998.
- Holzhauser, H., M. Magny and H.J. Zumbühl, *Glacier and lake level variations in west-central Europe over the last 3500 years*, *The Holocene*, 15, 6, 789-801, 2005
- IPCC: *Climate Change 2001, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2001.
- Le Meur, E. and C. Vincent. *A two-dimensional shallow ice flow of glacier de Saint Sorlin, France*. *Journal of Glaciology*. *Journal of Glaciology*, Vol. 49, n° 167, 2003.
- Oerlemans, J., *Glaciers as indicators of a carbon dioxide warming*, *Nature*, 320, 607-609, 1986.
- Vincent, C., M. Vallon, L. Reynaud and E. Le Meur, *Dynamic behaviour analysis of glacier de Saint Sorlin, France, from 40 years of observations, 1957-1997*. *Journal of Glaciology*, Vol. 46, n° 154, 2000.
- Vincent, C., *Influence of climate change over the 20th Century on four French glacier mass balances*, *J. Geophys. Res.*, 107 (D19), 4375, doi:10.1029/2001JD000832, 2002.
- Vincent, C., G. Kappenberger, F. Valla, A. Bauder, M. Funk, and E. Le Meur, *Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th Century*, *J. Geophys. Res.*, 109, D10104, doi:10.1029/2003JD003857, 2004.
- Vincent, C., E. Le Meur, D. Six and M. Funk, *Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps*, *Geophys. Res. Letters.*, 32 (9), doi : 10.1029/2005GL022552.

Pour en savoir plus :  
 Service d'Observation des Glaciers alpins:  
[www.lggee.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm](http://www.lggee.obs.ujf-grenoble.fr/ServiceObs/index.htm)