
Bilans de masse des glaciers alpins. Méthodes de mesure et répartition spatio-temporelle

Mass variations of Alpine glaciers. Measuring methods and space/time distribution.

A. Letréguilly

CNRS — Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement
BP 96, Saint-Martin-d'Hères Cedex

Résumé du mémoire ayant obtenu le 2^e prix Henri Milon 1985 de la Société hydrotechnique de France

Il existe de nombreux glaciers dans le monde dont on suit l'évolution au cours du temps en mesurant leur bilan (variation de masse) annuel; mais peu de synthèses ont été réalisées jusqu'à présent. Cette étude a pour but l'analyse des séries disponibles, afin de voir dans quelle mesure ce bilan peut être utilisé comme indicateur climatique.

There are many glaciers in the world whose evolution over the course of time can be followed by measuring their annual variation (density variation), but few syntheses have been made up until now. This study seeks to analyse the series available so as to determine to what extent this variation can be used as a climatic indicator.

Introduction

Il existe de nombreux glaciers dans le monde dont on suit l'évolution au cours du temps en mesurant leur bilan (variation de masse) annuel; mais peu de synthèses ont été réalisées jusqu'à présent. Cette étude a pour but l'analyse des séries disponibles, afin de voir dans quelle mesure ce bilan peut être utilisé comme indicateur climatique. Elle a été réalisée de la façon suivante :

Tout d'abord, pour connaître l'origine des diverses valeurs de bilan, on a analysé les différentes méthodes de mesure utilisées; puis une recherche bibliographique a permis de rassembler les séries de bilans effectuées dans plusieurs régions du monde. Leurs fluctuations au cours du temps ont ensuite été comparées à l'aide du modèle de variations linéaires de Lliboutry (1974); Enfin, les séries les plus remarquables, celles qui atteignent un siècle de longueur, ont fait l'objet d'une analyse particulière.

1. Méthodes de mesures

Suivant la topographie du glacier, son étendue et les renseignements disponibles, plusieurs méthodes ont été développées.

Ce sont les méthodes dites :

- cartographique ou volumétrique
- directe ou glaciologique
- hydrologique.

Elles sont assez laborieuses à réaliser. La première nécessite deux cartes du glacier à des époques différentes. Ces cartes peuvent être obtenues, soit par des levés topographiques de toute la surface du glacier, soit par photogrammétrie aérienne. Dans les deux cas, le coût de l'opération est élevé pour des résultats de précision médiocre.

La méthode hydrologique est appliquée avec succès sur le glacier d'Aletsch, en Suisse, depuis 1923. Elle est bien adaptée au suivi annuel des grands systèmes glaciaires. Mais les mesures de précipitations et de débit de l'eau de fonte exigent une surveillance continue tout au long de l'année.

Enfin, la méthode directe qui consiste à peser des carottes de névé en zone d'accumulation, et à mesurer l'émergence de balises en zone d'ablation est la plus adaptée aux besoins des glaciologues. Malheureusement, une seule mesure de bilan annuel d'un glacier mobilise 3 à 4 personnes pendant une semaine; or un tel travail est souvent trop lourd pour les organismes de glaciologie lorsqu'ils s'intéressent à une dizaine de glaciers.

C'est pourquoi on a développé de nouvelles méthodes, visant à réduire le travail de terrain; elles sont basées sur une meilleure compréhension de la répartition spatio-temporelle du bilan de masse. En effet, le modèle de variations linéaires du bilan de Lliboutry permet de séparer ce qui dépend uniquement du lieu de ce qui varie avec le temps; la fluctuation de ce dernier terme est la même pour tout le glacier. Il est donc inutile d'échantillonner toute sa surface chaque année: un secteur apportera tout autant de renseignements sur l'évolution du bilan au cours du temps que la totalité du glacier.

Ce résultat constitue une première méthode de simplification des mesures. C'est ainsi que sont mesurés les bilans du glacier d'Argentière depuis 1976, à l'aide de 5 profils en travers de la langue d'ablation. Les valeurs ainsi obtenues montrent une remarquable concordance avec celles d'Aletsch et de Saint Sorlin.

Une deuxième méthode issue du modèle linéaire est l'exploitation des levés topographiques. En effet, les mesures de vitesses et d'altitude de profils transversaux implantés sur les langues glaciaires n'ont jamais été utilisées dans le but de calculer des bilans.

2. Localisation géographique des glaciers

Dans le but d'analyser l'évolution des glaciers de différentes régions du monde, une part de cette étude a été consacrée à la recherche des mesures de bilans dans les ouvrages de publications. En effet, peu de synthèses ont été effectuées, et aucune n'est mise à jour régulièrement.

Ce recensement fait apparaître des séries qui vont de la mesure simple, jamais renouvelée, jusqu'aux séquences de 30 valeurs. Les séries de moins d'une dizaine de valeurs ne sont pas retenues car elles sont trop courtes pour permettre une comparaison valable sur l'évolution des glaciers.

Des séries ont été trouvées, dans quatre régions du monde:

- l'Amérique du Nord
- l'Union Soviétique
- la Scandinavie
- les Alpes.

L'ensemble des mesures, très inégalement réparti sur la planète, montre une concentration importante d'abord sur le massif des Alpes, ensuite sur l'hémisphère nord: aucune série comparable n'a été mise à jour dans l'hémisphère sud; il faudra attendre pour cela les résultats des forages sur la calotte de glace du Calcaya (Pérou).

Or l'équation de continuité du flux de glace à travers une zone délimitée par des sections perpendiculaires relie ces variables au bilan de cette zone. De plus, ces mesures sont bien antérieures aux premiers bilans de masse effectués, car elles ont débuté dans les années 20 sous l'impulsion des Eaux et Forêts. Cette méthode a été utilisée sur quatre glaciers des Alpes:

- le glacier Blanc, dans le massif des Ecrins
- le glacier de Gébroulaz, dans la Vanoise
- la Mer de Glace, dans le massif du Mont Blanc
- le glacier Unteraar, en Suisse

Les résultats que l'on obtient sont variables: dans le cas du glacier Blanc et de la Mer de Glace, il semble que les mesures de vitesses soient trop discontinues. Pour les glaciers de Gébroulaz et Unteraar, cependant, on retrouve les mêmes séquences de variations de bilans que celles qui sont connues dans les Alpes.

La méthode de l'équation de continuité fournit donc un nouvel outil de calcul du bilan qui exploite les anciennes mesures réalisées lors des débuts de la glaciologie. Les résultats sont suffisamment prometteurs pour envisager son utilisation, non seulement pour reconstituer les données du passé, mais aussi comme une véritable méthode de mesure. En effet, avec les mesureurs de distance, les levés d'altitude et de vitesse sont beaucoup moins longs à exécuter que ceux de bilans: ils demandent à la fois moins de personnel à mobiliser et moins de matériel à transporter.

3. Analyse des mesures

Il est bien connu que la comparaison entre les bilans de différents glaciers ne montre guère de ressemblances. En effet ces bilans dépendent non seulement du climat, mais aussi de caractéristiques locales propres à chaque glacier, telles que l'altitude, l'orientation, etc. Pour s'en affranchir, on utilise la variation par rapport au bilan moyen de la période de mesures, c'est-à-dire le β_i du modèle linéaire de Lliboutry (1974).

Et effectivement, les comparaisons entre β_i donnent de bien meilleurs résultats:

Dans les Alpes, où l'on a 5 séries de 1954 à 1981 on observe les mêmes variations du bilan au cours du temps: la dispersion des valeurs d'une même année est de l'ordre de 50 cm, alors que les variations annuelles vont jusqu'à 2 mètres.

Pour avoir une estimation plus objective de ces similitudes, une méthode statistique a été employée: l'analyse en composantes principales. Cette méthode chiffre la ressemblance des séries comparées suivant plusieurs axes. Dans les Alpes, les pourcentages d'explication des fluctuations de bilan sont de 81 et 10% suivant les 2 premiers axes. Les 81% du premier axe sont interprétés comme le caractère commun décrit par le modèle linéaire, qui est un signal purement climatique. Les 10% du deuxième axe reflètent des composantes beaucoup plus dispersées, dont la répartition rappelle celle des glaciers le long de la chaîne Alpine. La dispersion géographique intervient donc bien, mais elle est relativement faible.

On retrouve les mêmes caractéristiques en Scandinavie, en Union Soviétique et en Amérique du Nord: — les fluctuations du bilan sont identiques à 67% pour le groupe

des 9 glaciers de part et d'autre de la frontière USA-Canada, à 86 % pour les 6 glaciers du sud de la Norvège, et à 92 % pour les 9 glaciers de la vallée Malaya Almatinka en URSS.

Suivant la dimension du massif montagneux considéré, 5 à 10 % de la variance peut être expliquée par la distribution géographique. Cela laisse 5 à 15 % de variance inexpliquée, sur les autres axes, qui sont interprétés comme étant des erreurs de mesure, des imprécisions, ou du bruit de fond.

4. Les longues séries

La question que l'on peut alors se poser est la suivante : Y-a-t-il synchronisme de variations entre les différents massifs ?

La réponse est non, comme l'a montré W. Shytt (1981) avec le Storglönciären (Suède) et le Hintereisferner (Autriche). Ils sont même parfois en opposition de phases.

Et pourtant, les courbes de variation des fronts glaciaires scandinaves présentent des fluctuations dans le temps qui sont très proches de celles des Alpes.

Les glaciers des deux massifs ont connu des avances vers 1920, 1940, puis la grande décrue des années 40 à 50, suivie par la reprise actuelle. Il existe donc probablement un signal d'alimentation commun, que les trop courtes séries directes ne permettent pas de voir.

C'est pourquoi on a songé à utiliser les reconstitutions pour allonger les séries de bilans disponibles, et ainsi mieux les comparer. Ces reconstitutions sont obtenues à partir de variables météorologiques, en général les précipitations hivernales et les températures estivales. Une équation de régression est calculée par corrélation multiple entre ces variables et le bilan mesuré. L'équation permet ensuite d'étendre les valeurs de bilan à toute la période météorologique.

Ce travail a été effectué pour 5 glaciers :

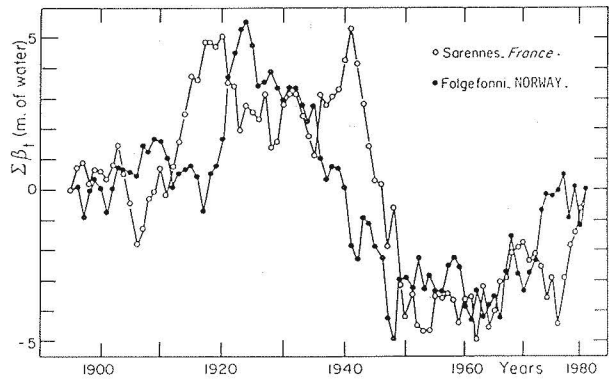
- le glacier de Sarennes, en France (S. Martin, 1977)
- le glacier de Folgefonna, en Norvège (A. Tvède, 1980)
- le glacier de South Cascade aux U.S.A. (W.V. Tangborn, 1980)
- le glacier Igan, dans l'Oural Polaire, en URSS (V.G. Khodakov, 1966)
- le glacier Dzhankuat, dans le Caucase, en URSS (M.B. Diurgerov, V.V. Popovin, 1980)

Les 3 premiers sont issus de massifs montagneux déjà étudiés pour leur répartition spatio-temporelle du bilan, tandis que les 2 glaciers Soviétiques sont situés dans 2 nouveaux massifs. Chacune de ces séries est considérée représentative de sa région montagneuse.

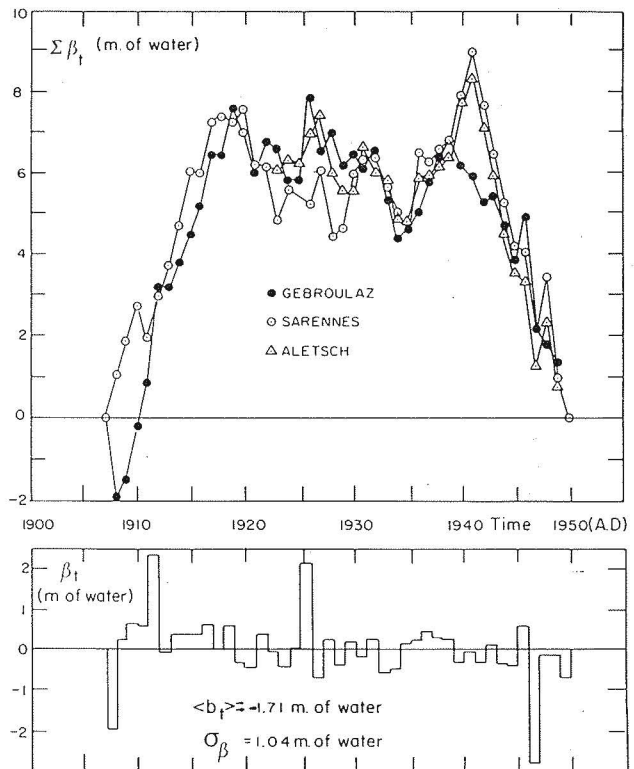
Les variations de bilans d'un massif à l'autre n'étant pas synchrones, on s'intéresse plutôt à la somme de ces variations; cela permet d'observer l'évolution générale du stock de glace, tout en comparant des grandeurs qui ne dépendent que du climat.

On s'affranchit donc de la dérive qui est un caractère propre à chaque glacier, dépendant de l'altitude, de l'orientation, et de phénomènes locaux.

Les quatre glaciers Européens et Soviétiques montrent des tendances communes très nettes (croissance jusque vers 1940, puis une grande diminution qui coupe le siècle, suivie par la lente reprise actuelle) tandis que le glacier



La comparaison des séries des écarts à la moyenne des bilans de masse (β_t) permet de retrouver sur 2 glaciers éloignés les mêmes périodes favorables (années 20 et 70) et défavorables (années 40 et 50) bien qu'à l'échelle de la décennie les séries de bilans puissent être différentes.



Les Eaux et Forêts ont déterminé régulièrement de 1907 à 1966 vitesses et variations de niveau du glacier de Gébroulaz. Avec l'étude de la topographie sous-glaciaire faite en 1971, on dispose de tous les éléments permettant de calculer les bilans de masse. Malgré les hypothèses (fluage parallèle, vitesse moyenne en surface égale à la vitesse moyenne sur une section verticale), et quelques données manquantes interpolées, la reconstitution obtenue est très voisine des observations faites sur le glacier d'Aletsch depuis 1920 et permet de confirmer la qualité de la reconstitution des bilans de Sarennes à partir des données météorologiques.

Américain a un comportement très différent : jusqu'en 1900, il croît avec les autres, mais à partir de cette date, il décroît rapidement et régulièrement jusqu'en 1950, puis augmente de nouveau.

Il n'a pas du tout connu la période plutôt croissante de 1900 à 1940 qui caractérise les autres glaciers. Cependant il n'y a pas, pour ce glacier, de vérification possible de l'histoire décrite par les bilans, car on ne possède pas,

comme pour les Alpes, d'enregistrements de fronts, ni aucune autre valeur de bilans avant 1950 pour ce continent.

On ne peut donc rien en conclure :

La reconstitution est peut-être erronée, ou bien le glacier, qui est beaucoup plus distant en raison de sa situation sur un continent différent, a véritablement connu l'évolution décrite par les bilans.

Conclusion

Cette étude a permis de recenser tous les glaciers possédant des séries de bilans de masse annuels suffisamment longues pour montrer une évolution, et de faire le point sur les méthodes de mesures. Aux trois méthodes connues, on a pu en ajouter 2 nouvelles, basées sur l'utilisation du modèle de variations linéaires du bilan : la première offre une simplification et une *réduction du travail de terrain* nécessaire. La deuxième exploite les *séries anciennes d'altitude et de vitesse* sur des profils transversaux des glaciers, les plus longs relevés glaciologiques existant actuellement.

Une fois les différentes séries collectées, on a cherché à préciser leur valeur en tant qu'indicateur climatique. On a ainsi montré qu'il existe une homogénéité de variations

dans un grand massif de montagne, ce qui permet de définir une fluctuation moyenne du bilan glaciaire représentative de toute la région considérée.

Mais, avec la trentaine d'années de mesures directes dont on dispose, l'homogénéité de fluctuation semble s'arrêter aux frontières de chaque massif.

La comparaison des séries reconstituées portant sur un siècle ou plus apporte des renseignements supplémentaires et montre des *tendances très semblables d'un massif à l'autre pour les quatre glaciers Eurasiens*, en dépit des méthodes de calcul parfois hasardeuses qui ont été employées.

Bien que quelques unes des reconstitutions aient besoin d'être revues, ces résultats confirment l'idée que l'alimentation annuelle des glaciers constitue un signal climatique.

Bibliographie

- MARTIN S., 1977. — Analyse et reconstruction de la série des bilans annuels du glacier de Sarennes, sa relation avec les fluctuations du niveau de trois glaciers du massif du Mont-Blanc (Bossons, Argentières, Mer de Glace). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, Vol. 13, p. 127-153.
- LLIBOUTRY L., 1974. — Multivariate statistical analysis of glacier annual balance. *Journal of Glaciology*, Vol. 13, No. 69, p. 371-392.
- DYURGEROV M.B., POPOVNIN V.V., 1980. — Reconstruction of mass balance, position and liquid run off from the Dzhankuat glacier since the second half of the XIX century. *Data of Glaciological Studies*, Vol. 40, Nov., p. 73-82. (En Russe).
- KODAKOV V.G., 1966. — Water balance of glaciers (Reconstruction of the mass balance of glacier IGAN since 1818). *Results of researches on the International geophysical projects, Glaciology IX section of I.G.Y. program*, Vol. 16.
- SCHYTT V., 1981. — The net mass balance of Storglaciaren, Kebrekaise, Sweden, related to the height of the 500 mb surface. *Geografica Annaler*, Vol. 64A, No. 3-4, p. 219-223.
- TANGBORN W.V., 1980. — Two models for estimating climate-glacier relationships in the North Cascade, Washington, U.S.A. *Journal of Glaciology*, vol. 23, No. 91, p. 3-21.
- TVEDE A.M., 1982. — Influence of glacier on the variability of long runoff series. *Proceedings of the 4 Northern Research Basin Symposium Workshop*, Ullensvang, Norway, March 1982.