



**HAL**  
open science

# Évaluation de l'influence des facteurs climatiques sur le bilan de masse du glacier Austre Loven (Spitsberg, 79°N) par une approche multivariée

Sophie Schiavone, Florian Tolle, Eric Bernard, Jean-Michel Friedt, Madeleine Griselin, Daniel Joly

► **To cite this version:**

Sophie Schiavone, Florian Tolle, Eric Bernard, Jean-Michel Friedt, Madeleine Griselin, et al.. Évaluation de l'influence des facteurs climatiques sur le bilan de masse du glacier Austre Loven (Spitsberg, 79°N) par une approche multivariée. 29ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Jul 2016, Besançon, France. pp.173-178. hal-01360394

**HAL Id: hal-01360394**

**<https://hal.science/hal-01360394>**

Submitted on 21 Dec 2017

**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.

## EVALUATION DE L'INFLUENCE DES FACTEURS CLIMATIQUES SUR LE BILAN DE MASSE DU GLACIER AUSTRE LOVEN (SPITSBERG, 79°N) PAR UNE APPROCHE MULTIVARIEE

SCHIAVONE S.<sup>1</sup>, TOLLE F.<sup>1</sup>, BERNARD E.<sup>1</sup>, FRIEDT J. M.<sup>2</sup>, GRISELIN M.<sup>1</sup>,  
JOLY D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UMR 6049 ThéMA, CNRS – Université Bourgogne Franche-Comté, 32 rue Mégevand 25030 Besançon, sophie.schiavone@univ-fcomte.fr

<sup>2</sup>UMR 6174 FEMTO-ST, CNRS - Université Bourgogne Franche-Comté, 26 ch. De l'Épitaphe 25030 Besançon

**Résumé** – L'Arctique est la région du globe où le réchauffement est le plus rapide. Ses effets sont particulièrement visibles sur les glaciers dont la dynamique est très sensible. Par une approche statistique, l'objectif de notre étude est d'identifier puis hiérarchiser les principaux facteurs climatiques et nivologiques ayant influencé le bilan de masse d'un petit glacier du Spitsberg entre 2007 et 2014. Afin de mettre en évidence les disparités spatiales l'outil cartographique a été aussi mobilisé. Les résultats montrent que le cumul des températures positives joue un rôle majeur dans l'explication du bilan de masse contrairement aux précipitations pluvieuses qui ont un effet marginal. De plus, des années aux conditions climatiques et nivologiques très différentes peuvent donner lieu à un bilan de masse similaire.

**Mots-clés** : statistiques multivariées, bilan de masse, glacier arctique.

**Abstract** – *Evaluation of the climatic factors impacting the mass balance of the Austre Lovén glacier (Spitsberg, 79°N) by a multivariate approach.* Arctic is a region where a quick warming is ongoing. Effects are particularly visible on glaciers of which dynamics is very sensitive to climate change. The goal of this study is to identify and rank the main climatological and nivological factors influencing the mass balance of a small arctic glacier in Svalbard using a statistical approach. Cartography was also used to highlight spatial trends. Results show that positive degree-days play an important role in explaining mass balance contrary to liquid precipitations that had a marginal effect over the studied period (2007-2014). Moreover, years with very different climatic conditions can lead to a similar mass balance.

**Keywords**: multivariate statistics, mass balance, arctic glacier.

### Introduction

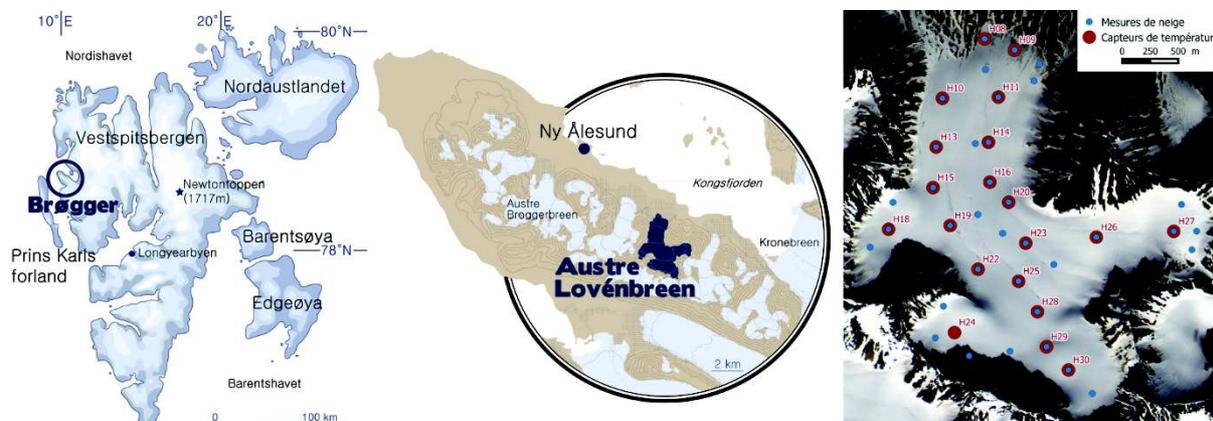
Les glaciers arctiques sont connus pour être particulièrement sensibles au changement climatique, notamment au Spitsberg où tous les glaciers sont en récession depuis leur dernier maximum du Petit Age Glaciaire. Parce que l'Arctique est la région du globe où les effets du réchauffement sont les plus prononcés, il est nécessaire de comprendre les causes mais aussi les conséquences de ces évolutions climatiques sur ces glaciers qui y sont très sensibles (Oerlemans *et al.*, 2005).

Comprendre la réponse, traduite par le bilan de masse, d'un glacier à des conditions climatiques et nivologiques variables permettrait de mieux appréhender les effets induits par le changement global sur les systèmes glaciaires (Karner *et al.*, 2013). L'originalité de notre étude réside dans la prise en compte à grande échelle, par une approche statistique, de l'ensemble des facteurs expliquant le bilan de masse d'un petit glacier arctique. L'étude est conduite à l'échelle d'un bassin versant permettant ainsi de distinguer des dynamiques spatiales potentiellement hétérogènes aux échelles temporelles intra- et inter-annuelles.

L'objectif de ce travail est d'identifier et de qualifier les combinaisons de facteurs qui influencent le bilan de masse d'un petit glacier arctique de type alpin. Il s'agira notamment de hiérarchiser les paramètres qui ont la plus grande influence sur les dynamiques glaciaires puis d'en donner une représentation spatiale.

## 1. Site d'étude et instrumentation

L'Austre Lovén est un petit glacier de type alpin d'une superficie de 4,6 km<sup>2</sup> situé sur la péninsule de Brøgger à 78,87°N dans le nord-ouest du Spitsberg, la plus grande île de l'archipel du Svalbard (Figure 1).



**Figure 1.** Localisation du glacier Austre Lovén au Svalbard (78.87°N) et instrumentation du site.

Depuis 2007, l'Austre Lovén est un glacier observatoire équipé de nombreux appareils de mesure. Le bilan de masse glaciaire annuel (différence entre l'accumulation et l'ablation du glacier) est mesuré en septembre (en fin d'année hydrologique) à partir de 36 balises d'ablation. Il permet de dériver, par interpolation spatiale, les zones d'accumulation et d'ablation de glace. Au même endroit sont effectuées au printemps (début mai avant la période de fonte) des carottages de neige afin de mesurer l'accumulation hivernale. Théoriquement, cette mesure doit permettre de connaître la hauteur maximale du manteau neigeux et son équivalent en eau (exprimé en mm.water equivalent ou mm.weq – par pesée). Enfin, le glacier est équipé de 20 capteurs de température de l'air enregistrant une mesure horaire. Ils sont répartis de manière homogène sur le glacier selon 2 axes longitudinaux (de la langue au sommet) et 3 axes transversaux (correspondant aux cirques du glacier) (Figure 1).

Les mesures enregistrées grâce à ce réseau d'observation constituent la base de notre travail. Ce sont des données brutes auxquelles il faut d'abord appliquer des traitements préliminaires afin de les rendre exploitables.

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Jeu de données à traiter

Les données mobilisées pour ce travail sont issues d'observations faites entre 2007 et 2014. Sont donc prises en compte les données de température, d'accumulation de neige (ou bilan spécifique) et de bilan de masse auxquelles sont ajoutées des données de précipitations. En raison de l'absence d'instruments de mesure de précipitations sur le bassin glaciaire, ces dernières sont issues de la station météorologique de Ny-Ålesund située à 6 km au nord-ouest de l'Austre Lovén à 8 m d'altitude et gérée par le Norwegian Meteorological Institute. Les données de Ny-Ålesund sont donc extrapolées en chacun des vingt points du glacier où nous disposons de mesures de température. Ainsi, un gradient altitudinal de +15% /100 m jusqu'à 400 m puis de +10% /100 m au-delà est appliqué (Joly, 1994). Les précipitations pluvieuses ayant un effet très négatif sur le manteau neigeux par des phénomènes de lessivage par exemple, une quantification de ce paramètre est dérivée en fonction de la température enregistrée (positive ou non) par chaque capteur sur le glacier.

Les températures positives, et ce d'autant plus si elles sont élevées, ont un impact très négatif sur le bilan de masse du glacier. La variable qui en est dérivée tient donc compte uniquement des degrés-jours positifs cumulés.

## **2.2. Traitements statistiques**

Après une succincte mais néanmoins nécessaire étape de statistique descriptive des variables de chaque année, une succession d'analyses multivariées sont menées. Des régressions linéaires multiples sont d'abord effectuées (une par année) dans le but de décrire la structure de corrélation du tableau de données. Ainsi, il s'agit d'expliquer la variable bilan de masse de l'Austre Lovén par la conjonction des variables explicatives énoncées précédemment : degrés-jours positifs, précipitations liquides et bilan spécifique (Jiskoot *et al.*, 1998). La qualité globale de la régression est mesurée par le coefficient de détermination ( $R^2$ ) et le Cp de Mallow sert à choisir le meilleur sous ensemble de variables ayant joué un rôle significatif sur le bilan de masse pour l'année étudiée.

Dans le but de simplifier la description des données corrélées, des analyses en composantes principales (ACP) sont réalisées sur les variables. L'ACP centrée-réduite offre l'avantage de décrire et synthétiser sous forme graphique l'information contenue dans le tableau de données. C'est également un moyen de schématiser les liaisons entre variables mais aussi de localiser les regroupements d'observations qui peuvent ensuite faire l'objet d'une classification (Delmas *et al.*, 2015). Cette étape permet de renforcer et généraliser les résultats obtenus par régression linéaire multiple afin d'identifier les variables ayant eu un impact positif ou négatif sur le bilan de masse.

Les différentes zones du glacier ne réagissent pas de la même manière d'une année sur l'autre. Il nous a semblé intéressant de nous pencher sur les disparités spatiales du bilan de masse de l'Austre Lovén en utilisant des méthodes de classification. Deux approches différentes sont combinées : la classification par agrégation (Classification Ascendante Hiérarchique) et la classification par partition (k-means) (Sagredo and Lowell, 2012). Les groupes obtenus présentent des caractéristiques communes qui peuvent ensuite être cartographiées afin de visualiser spatialement les réponses du glacier en terme de bilan de masse par rapport aux propriétés climatiques et nivologiques auxquelles il a été soumis.

## **3. Résultats préliminaires et discussion**

L'objectif de ce travail est de parvenir à identifier et qualifier les combinaisons de facteurs qui influencent le bilan de masse de l'Austre Lovén. Le recours à des méthodes statistiques multivariées permet d'avancer des éléments de réponse.

### **3.1. Comparaison de deux années aux bilans de masse très négatifs (2011 et 2013)**

Les plus mauvais bilans de masse de l'Austre Lovén depuis 2007 ont été enregistrés en 2011 et 2013 avec respectivement une perte moyenne de glace de -120 cm et -123 cm sur la totalité du glacier. Aucune zone d'accumulation n'a été observée ces années-là. Les facteurs explicatifs montrent chacun des valeurs extrêmes : la somme des degrés-jours est élevée, les précipitations pluvieuses ont également été importantes et le cumul de neige faible (Tableau 1). Aucune valeur de ces facteurs n'est favorable à un bilan de masse à l'équilibre. L'ACP réalisée sur les variables renseigne sur le rôle positif ou négatif de chacune d'entre elles sur le bilan de masse. En effet, les précipitations liquides ainsi que les degrés-jours positifs ont un effet très négatif sur le bilan de masse à l'inverse du bilan spécifique qui, lui, influence positivement ce dernier.

**Tableau 1.** Résumé des moyennes annuelles pour chaque variable étudiée.

Année	Degrés-jour positifs (°C)	Précipitations liquides (mm)	Bilan spécifique (mm.weq)	Bilan de masse (mm.weq)
2008	226	174	833	-104
2009	321	155	826	-148
2010	270	120	694	-165
2011	454	254	515	-1053
2012	322	315	840	-241
2013	381	305	406	-1110
2014	247	105	744	10
Moy.	317	204	694	-402

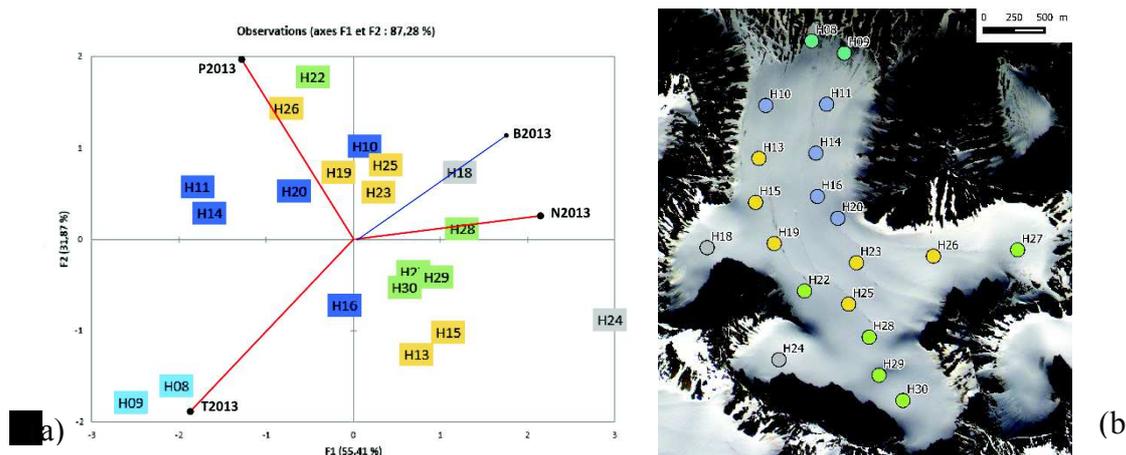
La régression linéaire multiple permet de distinguer les facteurs qui auraient eu un rôle plus important pour l'une ou l'autre année (Tableau 2). En 2011, le meilleur modèle pour expliquer le bilan de masse prend en compte l'ensemble des variables explicatives. La saison de fonte 2011 a été chaude et pluvieuse, et le glacier n'a pas pu bénéficier d'une couverture neigeuse importante qui l'aurait protégé et alimenté. Toutefois, avec un  $R^2$  de 0,62, les degrés-jours positifs semblent être la principale raison du bilan de masse catastrophique observé.

**Tableau 2.** Résultats des régressions linéaires et sélection du meilleur modèle (en gris) pour 2011 et 2013.

	<b>Variables prises en compte par le modèle (2011)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	Degrés-jour 2011	0,625
2	Degrés-jour 2011 / Précipitations liquides 2011	0,708
3	Degrés-jour 2011 / Précip. liquides 2011/ Bilan spécifique 2011	0,759
	<b>Variables prises en compte par le modèle (2013)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
1	Degrés-jour 2013	0,678
2	Degrés-jour 2013 / Bilan spécifique 2013	0,821
3	Degrés-jour 2013 / Bilan spécifique 2013/ Précip. liquides 2013	0,826

Tout comme en 2011 ce sont les températures positives qui ont eu un rôle prépondérant en 2013 puisque que c'est la première variable qui sort du modèle de régression linéaire ( $R^2=0,68$ ). L'accumulation de neige est également prise en compte pour construire le meilleur modèle explicatif du bilan de masse catastrophique de 2013. C'est en effet en 2013 qu'a été enregistrée la plus faible accumulation de neige depuis 2007 (Tableau 1). En revanche, bien que les précipitations liquides aient été plus élevées qu'en 2011, elles ne contribuent pas à expliquer le bilan de masse en 2013.

Les classifications tendent à montrer que, au cours des années extrêmes, les stations représentées sur les facteurs statistiques (F1 et F2) ne répondent pas à un ordre rigoureux (Figure 2a) or il existe une structure spatiale que révèle la cartographie (Figure 2b). Les cirques ont été préservés : ils n'ont pas été soumis à des températures aussi élevées qu'ailleurs sur le glacier et leur manteau neigeux plus épais a été un facteur « protecteur ». A l'inverse la langue de l'Austre Lovén a été grandement affectée (bilan de masse = -2574 mm.weq).



**Figure 2.** (a) Résultat de l'ACP réalisée sur les stations de mesure (Hn) et les variables en 2013 (P : précipitations liquides, T : degrés-jours, N : bilan spécifique, B : bilan de masse). Les couleurs se réfèrent aux classes élaborées par la CAH qui ont ensuite été cartographiées (b).

### 3.2. 2012 et 2013, deux années pour lesquelles un seul facteur semble expliquer des bilans de masse très différents

La comparaison des modèles de régression linéaire multiples de 2012 et 2013 montre de grandes similarités. Or le bilan de masse observé a été très différent. L'année 2013 présente un résultat très négatif (-1110 mm.weq en moyenne) alors que l'année 2012 se rapproche de la moyenne de la dernière décennie (-241 mm.weq). Chacun des deux modèles identifie les variables degrés-jours positifs et accumulation de neige comme facteurs explicatifs essentiels pour comprendre le bilan de masse. Les valeurs pour la variable degrés-jours positifs sont élevées et quasiment identiques pour les deux années (322°C en 2012 et 381°C en 2013). Il en est de même pour les précipitations liquides qui sont d'ailleurs légèrement plus élevées en 2012 (315mm en moyenne sur le glacier) qu'en 2013 (305 mm). La différence majeure réside dans l'accumulation de neige qui a été bien supérieure en 2012 qu'en 2013 (respectivement 840mm.weq et 406 mm.weq). Ainsi, les températures positives ont grandement influencé le bilan de masse en 2012 et 2013 mais l'accumulation de neige bien plus importante en 2012 qu'en 2013 a permis de protéger le glacier et de le nourrir en zone d'accumulation, ce qui explique un bilan de masse nettement plus raisonnable.

Les traitements d'ACP et de classification confortent les résultats précédents. Les deux premiers facteurs de l'ACP résument près de 96% de l'information contenue dans le tableau de données initial. La variable qui contribue le plus régulièrement (sur chaque axe) à expliquer le bilan de masse est la variable de bilan spécifique. Les variables précipitations liquides et degré-jours positifs contribuent également mais de manière moins significative et moins régulière selon les axes (Tableau 3). La classification quant à elle semble avoir donné un poids supérieur à cette même variable pour maximiser les écarts inter-classes.

**Tableau 3.** Contributions des variables (en %) à la définition de chaque facteur (Fn - axes). La variable bilan spécifique (N2012) a une contribution élevée et constante. (P : précipitations liquides, T : degrés-jours, N : bilan spécifique)

	F1	F2	F3
T2012	38,919	2,672	58,410
P2012	27,330	66,289	6,381
N2012	33,751	31,039	35,210

### 3.3. Une année exceptionnelle au bilan de masse positif : 2014

2014 a été une année au bilan de masse positif (+10 mm.weq en moyenne) ce qui signifie que pour la première fois depuis 2007 l'Austre Lovén a potentiellement gagné de la glace. Le meilleur modèle pour l'expliquer, généré par régression linéaire multiple, tient compte de l'accumulation de neige et du cumul des températures positives. C'est le bilan spécifique qui semble jouer le rôle le plus significatif pour expliquer le bilan de masse positif en 2014. Toutefois lorsque l'on compare les moyennes annuelles, 2014 ne se dégage aucunement et présente un bilan spécifique médian (744 mm.weq – Tableau 1). D'autre part, le cumul des températures positives était faible mais pas autant qu'en 2008 où il y avait un bilan spécifique supérieur à 2014.

Les traitements factoriels appliqués à 2014 montrent la spécificité de l'accumulation de neige pour expliquer le bilan de masse positif. Les classes élaborées par la CAH montrent qu'il y a eu une accumulation de neige homogène sur tout le glacier. Il y a peu d'écart d'accumulation entre le front (560 mm.weq) et l'amont de l'Austre Lovén (832 mm.weq) contrairement à d'autres années où il peut y avoir un facteur de 1 à 10 entre ces deux secteurs du glacier. Les conditions d'enneigement sont les mêmes sur la partie haute du glacier alors que le front a un bilan spécifique bien plus élevé que la normale le protégeant ainsi de la fonte estivale. C'est donc le fait que la langue de l'Austre Lovén a significativement moins fondu que les autres années qui explique principalement le bilan 2014.

### Conclusion

Ces résultats préliminaires montrent avant tout que le cumul des températures positives a un rôle très important sur le bilan de masse de l'Austre Lovén. Des degrés-jours positifs élevés vont influencer négativement le bilan de masse. L'accumulation de neige, quant à elle, semble favorable essentiellement pour son effet protecteur sur la glace. Les précipitations liquides en revanche ne semblent avoir qu'un rôle marginal sur le bilan de masse des années étudiées. C'est un point qu'il faudra approfondir en étudiant l'ensemble des années disponibles.

Enfin, on constate que des valeurs annuelles extrêmes ne conduisent pas systématiquement à un bilan de masse qui suive la même logique. C'est en réalité la combinaison de facteurs explicatifs qui est primordiale. L'étude a mis en évidence que deux bilans de masse équivalents peuvent être le résultat de combinaisons de facteurs différentes.

### Bibliographie

- Delmas M., Gunnell Y., Calvet M., 2015. A critical appraisal of allometric growth among alpine cirques based on multivariate statistics and spatial analysis. *Geomorphology*, **228**, 637–652.
- Jiskoot H., Boyle P., Murray T., 1998. The incidence of glacier surging in Svalbard: evidence from multivariate statistics. *Computers & Geosciences*, **24**, 387–399.
- Joly D., 1994. Ambiances climatiques instantanées au Spitsberg : pour une approche méthodique par niveau d'échelle. Dans *Annales littéraires de l'Université de Franche-Comté*. Paris, Diffusion Les Belles Lettres, 404p.
- Karner F., Obleitner F., Krismer T., Kohler J., Greuell W., 2013. A decade of energy and mass balance investigations on the glacier Kongsvegen, Svalbard. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 3986–4000.
- Oerlemans J., Bassford R. P., Chapman W., Dowdeswell J. A., Glazovsky A. F., Hagen J.-O., Melvold K., de Ruyter de Wildt M., van de Wal R. S. W., 2005. Estimating the contribution of Arctic glaciers to sea-level change in the next 100 years. *Annals of Glaciology*, **42**, 230–236.
- Sagredo E. A., Lowell T. V. 2012. Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change*, **86–87**, 101–109.