UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Océan Atmosphère et Hydrologie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Deborah Verfaillie

Thèse dirigée par **Hubert Gallée** et **Vincent Favier**

préparée au sein du **Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE, UMR 5183, CNRS - UJF)**
dans l'École Doctorale **Terre Univers Environnement**

Suivi et modélisation du bilan de masse de la calotte Cook aux îles Kerguelen

lien avec le changement climatique

Thèse soutenue publiquement le **24 novembre 2014**,
devant le jury composé de :

M. Michiel R. van den BROEKE
Professeur, IMAU Utrecht (Rapporteur)
M. Pierre RIBSTEIN
Professeur, UPMC Paris (Rapporteur)
Mme Sandrine ANQUETIN
Directrice de Recherche CNRS, LTHE (Examinatrice)
Mme Masa KAGEYAMA
Directrice de Recherche CNRS, LSCE (Examinatrice)
Mme Françoise VIMEUX
Directrice de Recherche CNRS, LSCE (Examinatrice)
M. Hubert GALLÉE
Directeur de Recherche CNRS, LGGE (Directeur de thèse)
M. Vincent FAVIER
Physicien Adjoint OSUG, LGGE (Co-Directeur de thèse)

Résumé

Les glaciers des régions sub-polaires entre 45 et 60° S ont reculé dramatiquement au cours du dernier siècle. L'archipel des Kerguelen (49° S, 69° E) constitue un site unique dans ces régions où peu d'observations sont disponibles pour comprendre le recul glaciaire. Situés à faible altitude et proches de l'océan, ses glaciers ont montré une sensibilité particulière aux variations atmosphériques et océaniques. Ainsi, depuis les années 60, la calotte Cook (∼400 km^2) a reculé de manière spectaculaire, perdant 20% de sa surface en 40 ans. L'objectif de mon travail de thèse était d'évaluer l'état actuel et futur de la calotte, et de comprendre les causes de ce recul tout en les replaçant dans un contexte global.

Pour ce faire, un réseau météorologique et glaciologique a été mis en place en 2010 sur l'archipel et des campagnes de mesures ont depuis été réalisées annuellement. L'analyse de ces mesures nous permet de confirmer le bilan de masse négatif de la calotte. Parallèlement, l'étude de l'albédo de l'ensemble de la calotte Cook à partir d'images satellites MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) permet d'évaluer l'évolution de la ligne de neige de la calotte depuis 2000, mettant en évidence une réduction importante de sa zone d'accumulation au cours des dix dernières années. La modélisation du bilan de masse de la calotte Cook à l'aide d'un modèle degré-jour couplé à une routine dynamique révèle par ailleurs que son retrait est principalement dû à une forte diminution des précipitations sur l'archipel depuis les années 60.

Afin de replacer le recul des glaciers aux îles Kerguelen dans un contexte global, les tendances climatiques sur l'ensemble des zones subpolaires sont étudiées, faisant apparaître que la zone sub-Antarctique est actuellement celle où les retraits sont les plus forts à l'échelle du globe. Pour comprendre ces variations, nous analysons un ensemble complet de jeux d'observations de terrain, de satellites et de résultats de modélisation : réanalyses, modèles de l'exercice CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5), observations de température atmosphérique et océanique, précipitations, etc. Ceux-ci révèlent un réchauffement et un assèchement quasi généralisé de l'ensemble de la zone 40-60° S, lié à un déplacement vers le sud des zones dépressionnaires en réponse aux phases de plus en plus fréquemment positives du mode annulaire austral (Southern Annular Mode, SAM). Le recul récent des glaciers des îles Kerguelen, mais également d'autres zones glaciaires des régions subpolaires de l'hémisphère sud, est donc principalement lié à un déficit d'accumulation causé par le SAM, et amplifié par le réchauffement atmosphérique.

L'évolution future du bilan de masse de la calotte Cook aux îles Kerguelen est évaluée grâce au Modèle Atmosphérique Régional (MAR), forcé à ses frontières par les modèles de l'exercice CMIP5. Des simulations du bilan de masse récent sont d'abord effectuées sur base des réanalyses ERA-Interim et NCEP1, et comparées aux observations in situ. Parallèlement, des simulations d'un an sont réalisées avec le désagrégateur de précipitations SMHiL (Surface Mass balance High resolution downscaLing) en sortie du MAR, à différentes échelles, afin d'évaluer l'impact du changement d'échelle sur la représentation des précipitations. Une évaluation des modèles CMIP5 par rapport à ERA-Interim sur la période récente est ensuite réalisée sur base de certaines variables climatiques-clé. Le modèle le plus proche d'ERA-Interim sur la période récente, et les deux modèles les plus extrêmes sont ensuite utilisés pour forcer le MAR sur le prochain siècle, et les sorties de bilan de masse de surface sont analysées de manière critique.

L'analyse du retrait de la calotte des îles Kerguelen à l'aide de différents outils a permis de mieux comprendre le lien entre glaciers et climat, mettant en évidence le rôle majeur du SAM, mais a également soulevé de nouvelles questions.

Abstract

Glaciers of the southern hemisphere sub-polar regions between 45 and 60° S have declined dramatically over the last century. The islands of Kerguelen archipelago (49° S, 69° E) represent a unique location in regions where few data are available to understand glacier retreat. Situated at low altitudes and close to the ocean, their glaciers have shown particular sensitivity to atmospheric and oceanic variations. Thus, since the 1960s, the Cook Ice Cap ($\sim$400km^2) has retreated spectacularly, losing 20% of its area in 40 years. The aim of my thesis was to assess the present and future state of the ice cap, and to understand the causes of this decline while putting them in a global context.

To do so, a meteorological and glaciological network was set up in 2010 on Kerguelen archipelago and field campaigns have been carried out annually since then. Analysis of these measurements confirms the negative mass balance of Cook Ice Cap. In parallel, the study of the albedo over the whole ice cap from MODIS satellite images (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) gives us access to the evolution of the snow line since 2000, highlighting an important reduction of Cook Ice Cap accumulation area over the last decade. Mass balance modelling of the Cook Ice Cap using a degree-day model coupled to a simple ice motion routine further reveals that its retreat is mainly due to a strong decrease in precipitation over the Kerguelen Islands since the 1960s.

In order to put the decline of the cryosphere on Kerguelen in a global context, climatic trends over the whole sub-polar regions are studied, revealing that the sub-Antarctic area is currently the one where glacier retreat is the strongest. To understand these variations, we analyse a complete set of field and satellite observations and modelling results : reanalyses, models from the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) experiment, atmospheric and oceanic temperature and precipitation observations, etc. The latter show warming and quasi-generalised drying of the whole 40-60° S area, linked to the southward shift of storm tracks in response to the more frequent positive phases of the Southern Annual Mode (SAM). Recent glacier retreat on Kerguelen archipelago, and for other glaciers and ice caps located at similar latitudes, is thus mainly due to a deficit of accumulation caused by the SAM, and amplified by atmospheric warming.

The future evolution of Cook Ice Cap mass balance is evaluated using the MAR (Modèle Atmosphérique Régional) model, forced at its boundaries by CMIP5 models. Recent mass balance simulations are first carried out using ERA-Interim and NCEP1 reanalyses, and compared to in situ observations. In parallel, one-year simulations are produced with the precipitation desagregation scheme SMHiL (Surface Mass balance High resolution downscaLing) on MAR outputs, at various scales, in order to evaluate the impact of downscaling on precipitation. An evaluation of CMIP5 models over the recent period against ERA-Interim is then carried out, considering certain key climatic variables. The model closest to ERA-Interim as well as the two most extreme models are then used to force the MAR model over the next century, and surface mass balance outputs are critically analysed.

The analysis of the decline of the Kerguelen ice cap using different tools and techniques brought new insights on the link between glaciers and climate, highlighting the major role of the SAM, but also raised new questions.