ETH zürich

ETH Library

Dynamical aspects of polar stratospheric cloud formation, denitrification and ozone loss

Doctoral Thesis

Author(s):
Buss, Sandro

Publication date:
2003

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004702167

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH No. 15267

Dynamical aspects of polar stratospheric cloud formation, denitrification and ozone loss

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
SANDRO BUSS
Dipl. sc. nat.
born 27 November 1970
citizen of Kirchberg BE, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Huw C. Davies, examiner
Prof. Dr. Thomas Peter, co-examiner
Prof. Dr. Heini Wernli, co-examiner
Dr. Bjoern Knudsen, co-examiner

2004

Abstract

> De sorte que je me dis, Le bourdonnement ne sert point à souligner la danse, mais au contraire à la varier. Et la même figure exactement change de sens selon le bourdonnement qui l'accompagne. Et j'avais recueilli et classé un grand nombre d'observations à ce sujet non sans résultat. Mais il ne s'agissait pas seulement de la figure et du bourdonnement, mais aussi de la hauteur à laquelle la figure s'exécutait.
>
> *Samuel Beckett, Molloy*

The scientific issues addressed in this study emerged in the frame of an international scientific field experiment: SOLVE/THESEO (SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment / Third European Stratospheric Experiment on Ozone). A main objective of this project was to improve our knowledge on the role of orographically induced polar stratospheric clouds in the activation of passive reservoir compounds into active forms that destroy ozone. The unprecedented observation of very large nitric acid hydrate particle observations achieved during the mission deployment aboard the NASA ER-2 high-altitude aircraft in addition raised the need to investigate the potential mechanisms for the formation of these denitrifying particles.

In a first part, making use of mesoscale meteorological simulations, an analisis is presented of the dynamical mechanisms leading to a stratospheric ice cloud, observed over Greenland by an aircraft-borne lidar. An alternative forcing mechanism to orographically induced gravity waves is proposed, which might be generally relevant for polar stratospheric cloud formation. Waves emitted from breaking Rossby-wave regions with an associated unbalanced jet stream at the tropopause level can also lead to mesoscale temperatures fluctuations in the stratosphere that are sufficiently strong to induce mesoscale cooling below the frost point.

As stratospheric winter temperatures play a key role in the chain of microphysical and chemical processes that lead to the formation of polar stratospheric clouds, chlorine activation and eventually to stratospheric ozone depletion, we present, in a second part, a quantitative assessment on the temperature data quality for two Arctic winters and the implications on microphysical processes. Using independent data (from ER-2 measurements and non-assimilated radiosondes) the validation of the ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) temperature analyses in the stratosphere shows generally a high accuracy of the ECMWF data. However, if only the coldest temperatures are considered, the model has a warm bias. When comparing with mesoscale simulations, which better resolve vertically propagating gravity waves, the volume of air below the frost point, the number of nucleated ice particles and activated chlorine compounds are significantly too low in the global analyses.

A Lagrangian model study on the life-cycle of the observed large nitric acid trihydrate particles is presented in the third part, for several potential nucleation mechanisms. It is shown that the non-resolved gravity-wave induced mesoscale cooling might remain a critical issue to determine the most likely nucleation mechanism, and that the stratospheric temperatures and the background concentrations of nitric acid are key factors in the calculation of the particle growth process. Many uncertainties remain in the model as indicated by the significant sensitive dependencies on a wide range of parameters. The initialization of the particles remains a major issue as none of the implemented nucleation mechanisms fits perfectly with the observations. However, based on this Lagrangian model study, the ice nucleation scenarios cannot be ruled out. The model results also support the hypothesis that several nucleation mechanisms might occur in the stratospheric polar vortex.

This thesis is a serious and uniquely comprehensive attempt to combine a variety of observational data, challenging high-resolution numerical model simulations over complex topography and extensive diagnostic investigations to tackle an outstanding and top-priority problem in environmental sciences. The future prediction of the stratospheric ozone layer relies strongly on our knowledge of temperature conditions, polar stratospheric cloud formation and denitrification.

Résumé

> Or ce n'est pas le moment de m'attirer des incrédules. On dirait quelquefois que j'écris pour le public. Et malgré tout le travail que j'avais consacré à ses questions, j'étais plus que jamais étourdi par la complexité de cette danse innombrable, où devaient intervenir d'autres déterminants dont je n'avais pas la moindre idée. Et je me disais, avec ravissement, Voilà une chose que je pourrai étudier toute me vie, sans jamais la comprendre.
>
> *Samuel Beckett, Molloy*

C'est dans le cadre d'une campagne scientifique internationale, SOLVE/THESEO (SAGE III Ozone Loss and Validation Experiment / Third European Stratospheric Experiment on Ozone) que les résultats présentés ci-après ont été obtenus. Un des objectifs principaux de cette campagne stratosphérique était d'approfondir les connaissances sur le rôle des ondes orographiques sur l'activation des réservoirs de chlore inertes en composés actifs, qui détruisent l'ozone. Des observations sans précédent de très grosses particules composées d'hydrates d'acide nitrique, effectuées à bord de l'avion de haute altitude de la NASA ER-2, ravivèrent la nécessité d'explorer les mécanismes de formation de ces particules au large potentiel de dénitrification.

Dans une première partie, en utilisant des simulations à méso-échelle, une analyse est faite des mécanismes dynamiques conduisant à la formation d'un nuage stratosphérique de glace, observé par un lidar aéroporté au dessus du Groenland. Un mécanisme alternatif aux ondes de montagne est proposé pour la génération d'ondes de gravité, potentiellement importantes pour la formation de nuages stratosphériques et donc pour l'activation des composés de chlore inertes. Dans les régions où les ondes de Rossby se brisent, associées à un fort jet, courbé anticycloniquement, hors équilibre géostrophique et à hauteur de la tropopause, des ondes de gravité qui se propagent verticalement peuvent être émises et baisser la température stratosphérique en-deçà du point de congélation.

Comme la température joue un rôle essentiel dans la longue chaîne de processus micro-physiques et chimiques qui mènent finalement à la décomposition des molécules d'ozone stratosphérique, dans une deuxième partie, une appréciation quantitative de la qualité des données de température ainsi que de leurs implications micro-physiques pour deux hivers arctiques est présentée. A l'aide de mesures de température indépendantes et non assimilées (provenant du système météorologique à bord de l'ER-2 et de ballons-sondes) la validation des analyses de température du CEPMMT (centre européen de prévision météorologique à moyen terme) pour la stratosphère montre que celles-ci sont précises, sauf pour les températures très basses qui sont biaisées vers le haut. En comparant les analyses CEPMMT avec des simulations à méso-échelle qui résolvent mieux les ondes de gravité se propageant verticalement, il est montré que le volume d'air dont la température est plus basse que le point de congélation, le nombre de particules de glace créées, ainsi que la quantité de composés chlorés activés, sont inférieurs dans les analyses globales que dans le modèle à méso-échelle.

Dans la troisième partie, une étude Lagrangienne du cycle de vie des grosses particules observées est menée, pour différents mécanismes de formation. Il y est montré que les ondes de gravité à méso-échelle non-résolues demeurent une question critique et que les températures stratosphériques et les concentrations de fond d'acide nitrique sont des éléments clefs pour calculer la croissance, la sédimentation et l'évaporation de ces particules d'acide nitrique trihydrate. Plusieurs incertitudes demeurent quant au modèle, comme l'indiquent les fortes sensibilités à la majorité de ses paramètres. L'initialisation des particules demande une attention particulière tant il est vrai qu'aucun des mécanismes de formation n'est capable de reproduire exactement les observations. Cependant, basé sur cette étude Lagrangienne, la formation des particules contenant de l'acide nitrique depuis la glace stratosphérique ne peut être exclue. Les résultats n'excluent pas non plus que ces particules qui dénitrifient les tourbillons polaires soient formés par plusieurs mécanismes.

Cette thèse représente une tentative sérieuse, compréhensive et à longue vue de mettre en synergie des observations diversifiées, des simulations numériques à haute résolution au-dessus de topographies complexes et des explorations diagnostiques poussées afin d'aborder un problème essentiel et d'actualité en sciences environnementales. La prévision de la couche d'ozone stratosphérique pour les prochaines décennies dépend de notre connaissance des conditions de température, de la formation de nuages stratosphériques et de la dénitrification.