

Diss. ETH No. 20291

# Impacts of large volcanic eruptions on the stratosphere and climate

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCE

presented by  
FLORIAN ARFEUILLE

Dr. sc. ETH Zurich  
born 16 August 1984  
citizen of France

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Thomas Peter, examiner  
Prof. Dr. Stefan Brönnimann, Dr. Eugene Rozanov, Dr. Kirstin Krüger,  
co-examiners

2012

# Abstract

Large volcanic eruptions may influence the Earth's climate for several years. The strong stratospheric perturbation produced by aerosols from large eruptions leads to important tropospheric anomalies. A number of observational and modeling studies have shown that large tropical eruptions produce a global cooling effect as a consequence of the volcanic aerosols which scatter a part of the incoming solar radiation back to space. However, major uncertainties remain in the representations of the magnitude and spatial distributions of the stratospheric and tropospheric perturbations in climate models. The radiative, chemical and dynamical impacts of volcanic aerosols in the stratosphere need to be closely examined in order to decrease the uncertainties on the climatic impacts of large eruptions.

This dissertation makes use of a sequence of models ranging from a 1-D model for the initial eruption plume, via a 2-D model for the detailed global stratospheric aerosol microphysics, to a 3-D coupled global chemistry-climate model (CCM). The dissertation follows 3 detailed goals: Firstly, it aims at identifying the uncertainties in the volcanic aerosol forcings used for climate model simulations, and by a systematic investigation of the Pinatubo eruption proposes new approaches to provide improved aerosol boundary conditions of this eruption for climate models. Secondly, it applies the eruption plume and global microphysics models individually to 26 volcanic eruptions between 1600 and 2011, using the latest available ice cores aerosol mass estimates and historical data on the latitude and date of eruptions, and deriving climate forcing data for these eruptions. Thirdly, the chemistry-climate model (CCM) SOCOL was used to assess the stratospheric response to the eruption of Tambora in 1816, which likely triggered the year without summer of 1816, in order to test the model and our understanding of the important impacts caused by this extreme event.

We first analyzed the uncertainties present in volcanic aerosol forcings by investigating the contribution of the aerosol external boundary conditions to the common model overestimation of the stratospheric warming following the Pinatubo 1991 eruption. This large tropical eruption is the best characterized eruption on record and is of high interest for the modelling of volcanic eruptions in general. We applied different aerosol size distributions derived from satellite observations and from a microphysical model (AER-2D). We analyzed their validity by comparing their optical properties with observations of visible and infrared extinctions. The different datasets were further tested through their impact on stratospheric temperature perturbations, as calculated with the CCM SOCOL. From our calculations, it can be concluded that using an aerosol forcing in agreement with observed post-Pinatubo extinctions in the visible and infrared leads to an overestimation of the tropical stratospheric warming in the CCM SOCOL with temperatures above 70 hPa being even higher than the already too high values found by

many models in recent general circulation model (GCM) and CCM intercomparisons. Conversely, at lower altitudes close to the tropical tropopause the temperature response could be better described by these models if they used our dataset. The present work also shows that some of the good agreements in stratospheric warming calculated in previous GCM/CCM assessments was due to a fortuitous error cancellation by using an outdated SAGE II dataset with  $1\ \mu\text{m}$  extinctions too low by factors 2-3. Furthermore, the use of surface area density information together with an assumption on the aerosol size distribution widths to derive extinctions in the whole wavelength spectrum, as done in previous work, does not lead to satisfactory results and should be avoided. The use of AER-2D results in too large extinctions in the equatorial region but good agreement in the extra-tropics and can provide valuable information for studies focusing on observationally inaccessible applications, such as geoengineering or eruptions before the satellite era.

In pursuing the second goal, we followed a model-based approach to develop a volcanic forcing covering the 1600-2011 period for use in climate models. The method makes use of information from state-of-the-art ice core data and involves a set of numerical models to simulate the initial volcanic plume and the subsequent chemical and aerosol microphysical processes and spreading of the plume into both hemispheres. The use of the AER-2D sulfate aerosol model to generate the forcing allows a physically consistent representation of the volcanic aerosol size and spatial distributions after the eruptions. Twenty-six eruptions were analyzed and simulated in this way, taking into account their locations, date of eruptions, and estimating the initial altitude distribution of  $\text{SO}_2$ . Comparing our results to previous reconstructions shows good agreement in the global mean  $0.5\ \mu\text{m}$  optical depths but large differences in the latitudinal distributions. Comparisons with observations from the Agung 1963 eruption (which exhibited a strong asymmetry in its hemispheric partitioning) and from the Pinatubo eruption give satisfactory results despite a tendency to overestimate equatorial  $0.5\ \mu\text{m}$  extinctions right after the eruptions. Overall, this forcing provides a credible alternative approach to reconstructions, which base the latitudinal distribution of the aerosols solely on separate estimates of northern and southern hemisphere loadings as derived from Greenland and Antarctica ice core calibrations, and which supplement this information by parametrized aerosol transport and assumptions on the size and altitude distributions of the aerosols. The use of the volcanic aerosol dataset presented here for climate simulations covering the last four centuries will help to assess the full uncertainty range in the volcanic forcing.

Third, we focused on the characteristics of the aerosol forcing and stratospheric impacts of the largest eruption in the 400 year dataset: The Tambora 1815 eruption. This eruption was likely the trigger of the “year without summer” of 1816. It constitutes an interesting case study of an extreme event which had large climatic impacts. We performed sensitivity simulations with the CCM SOCOL to assess the uncertainties in the aerosol input and in sea surface temperatures. In our model, the transport of the Tambora aerosols is predominantly made to the southern hemisphere as a consequence of the season of eruption. As a consequence, the radiative perturbation does not reach high values in the northern hemisphere extra-tropics. The aerosol size distribution exhibits large radii due to intense coagulation right after the large 60 Mt  $\text{SO}_2$  release from the eruption. This leads to a more limited and shorter radiative impact than expected, and indeed shorter than that of a less extreme eruption such as that of Mt. Pinatubo.

The ozone is found to increase due to the slowing of the natural  $\text{NO}_x$ -induced ozone destruction cycle after the eruption compares well with studies of the Agung eruption which also erupted in a period of relatively low stratospheric chlorine concentrations. Finally, the simulations suggest a strengthening of the northern hemisphere polar vortex in the first winter after the eruption, similar to that observed for recent eruptions. The nonlinearities in the radiative, chemical and dynamical perturbations scaled by eruption sizes are further highlighted by idealized volcanic eruptions simulations, releasing between 5 and 200 Mt of sulfur dioxide.

# Résumé

Les grandes éruptions volcaniques influencent le climat durant plusieurs années. La forte perturbation stratosphérique produite par les aérosols formés après une éruption provoque d'importantes anomalies dans la troposphère. Plusieurs études basées sur des observations ou des simulations ont montré que les importantes éruptions tropicales produisent un refroidissement global comme conséquence de la réflexion du rayonnement solaire par les aérosols volcaniques. Cependant, des incertitudes demeurent sur la représentation de la magnitude et de la distribution spatiale des perturbations stratosphériques et troposphériques dans les modèles. Les impacts radiatifs, chimiques, et dynamiques des aérosols volcaniques dans la stratosphère doivent être affinés pour réduire les incertitudes dans la modélisation des impacts climatiques des grandes éruptions. Cette thèse a en premier lieu pour but d'identifier les incertitudes sur le forçage par les aérosols volcaniques utilisé dans les modèles climatiques, et de proposer de nouvelles approches pour apporter des conditions aux limites pour les modèles plus précises. Le modèle de chimie-climat (CCM) SOCOL a ensuite été utilisé pour évaluer la réponse stratosphérique à l'importante éruption du Tabora pour tester le modèle et notre compréhension des impacts importants causés par cet événement extrême.

Nous avons dans un premier temps analysé les incertitudes présentes dans le forçage volcaniques en étudiant la contribution du forçage externe des aérosols dans la fréquente surestimation par les modèles climatiques du réchauffement stratosphérique suivant l'éruption du Pinatubo en 1991. Cette importante éruption tropicale fut la mieux observée et est d'un grand intérêt pour la modélisation des éruptions volcaniques en général. Nous avons utilisé différentes calculations pour la distribution des tailles des aérosols, dérivées d'observations satellitaires et d'un modèle de microphysique des aérosols (AER-2D). Nous avons analysé la validité des différentes approches en comparant leurs propriétés optiques avec des observations dans le visible et l'infrarouge. Les différentes approches ont ensuite été testées à travers leurs impacts sur les températures dans la stratosphère, comme modélisé dans le modèle SOCOL. A partir de nos résultats, il a pu être conclu qu'utiliser un forçage pour le Pinatubo en accord avec les observations d'extinctions dans l'infrarouge amène à une surestimation du réchauffement de la stratosphère dans les tropiques avec le CCM SOCOL et amènerait à une augmentation du réchauffement au dessus de 70 hPa dans les CCMs utilisant des données satellitaires dépassées qui présentent des extinctions plus faibles. A l'inverse, la tropopause tropicale pourrait être mieux décrite par ces modèles s'ils utilisaient ces nouvelles données. L'utilisation des informations de densités surfaciques conjointes à un choix fixe de la largeur de la distribution en tailles des aérosols pour dériver des extinctions sur tout le spectre n'apporte pas de résultats satisfaisants et doit être évité. Le modèle AER-2D simule de trop importantes extinctions dans la région équatoriale mais a des résultats satisfaisants dans les régions extra-tropicales et peut proposer des informations de valeur pour des études mettant l'accent sur la géo-ingénierie ou

analysant des éruptions volcaniques ayant eu lieu avant la période satellitaire.

Dans un second temps, nous avons effectué une approche basée sur la modélisation pour développer un forçage volcanique sur la période 1600-2011, utilisant des informations récentes issues de forages polaires et un ensemble de modèles numériques pour simuler le nuage volcanique initial et les processus microphysiques des aérosols. L'utilisation du modèle d'aérosol AER-2D permet une représentation physiquement cohérente de la distribution spatiale et en tailles des aérosols après chaque éruption. Vingt-six éruptions ont été simulé, en prenant en compte les lieux et dates des éruptions, et l'altitude initial des émissions de  $\text{SO}_2$ . La comparaison de nos résultats avec des reconstructions précédentes montre un bon accord pour les extinctions globales à  $0.5 \mu\text{m}$  mais d'importantes différences dans les distributions latitudinales. La comparaison avec des observations de l'éruption du volcan Agung en 1963 (éruption ayant montré une très grande disymmetrie dans la répartition des ses aérosols entre les deux hémisphères) ainsi que du mont Pinatubo ont montré un bon accord malgré la tendance à la surestimation des extinctions au niveau de l'équateur immédiatement après les éruptions. De manière générale, ce forçage propose une alternative crédible aux reconstructions basées sur les informations des forages polaires pour estimer la répartition des aérosols dans chaque hémisphère séparément. Ces reconstructions utilisent aussi un transport paramétrisé et des hypothèses sur les distributions spatiales et en tailles des aérosols. L'utilisation de ces nouvelles données d'aérosols volcaniques dans des simulations climatiques couvrant les quatre derniers siècles pourrait aider à mieux évaluer les incertitudes sur le forçage volcanique.

Finalement, nous avons étudié les propriétés optiques et les impacts stratosphériques de la plus importante éruption présente dans la reconstruction 1600-present: L'éruption du Tambora en 1815. Cette éruption a probablement provoqué "l'année sans été" de 1816 et constitue un cas intéressant pour l'étude des impacts des éruptions volcaniques. Nous avons effectué différentes simulations pour juger du rôle des incertitudes dans les données sur les aérosols et dans les températures de surface des océans. Dans notre modèle, le transport des aérosols du Tambora se fait en majorité dans l'hémisphère sud du fait de la saison de l'éruption. Les perturbations radiatives restent ainsi relativement faibles dans les moyennes latitudes de l'hémisphère nord. Les aérosols ont de larges diamètres du fait de l'importante coagulation juste après l'émission des 60 Mt de  $\text{SO}_2$ . Cela cause un impact radiatif plus limité et plus court qu'attendu. L'augmentation de l'ozone simulé après l'éruption est similaire aux résultats d'études pour l'éruption du volcan Agung qui a aussi eu lieu lors d'une période de faible concentration stratosphériques de chlore. Finalement, une intensification du vortex polaire dans l'hémisphère nord durant le premier hiver après l'éruption est simulée dans notre modèle, comme observé pour des éruptions plus récentes. Les non-linéarités des perturbations radiative, chimique, et dynamique relativement à différentes tailles d'éruption sont soulignées plus en détails par l'analyse de simulations d'éruptions idéalisées, rejetant entre 5 et 200 Mt de dioxyde de soufre.