

Diss. ETH No. 21369

From the past to the future: Influences of solar variability and volcanic activity on Earth's climate

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
JULIEN GÉRARD ANET

Master of Science ETH in Atmospheric and Climate Science
born 27 November 1986
citizen of Genève (GE)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. T. Peter, examiner
Prof. em. Dr. Dr. h.c. H. Wanner, co-examiner
Dr. E. Rozanov, co-examiner

2013

Abstract

Climate on Earth is strongly linked to solar activity and volcanic eruptions. Both factors imply several ways to influence not only climate, but also atmospheric chemistry over time scales from months to tenths of years. It goes without saying that past short-range climatic changes on Earth were linked to risk of famine for civilizations. Although the last most severe cold period, the Dalton Minimum (DM) including the “year without summer” in 1816, was most probably linked to combined solar decline and major volcanic activity in 1809 and 1815, it is the uncertainty of the solar contribution and the possibility of a solar decline in near future, which raised the awareness of the scientific community in the recent past. Conjectures that the Sun may enter a new “Grand Solar Minimum” during the second half of the 21st century are based on statistical analyses of the past solar activity and by an extraordinarily weak current solar maximum. Speculations are that future anthropogenic climate change might be partly compensated if a strong decline in solar activity were to occur.

It is a well-known fact that the Sun not only undergoes a regular 11-year cycle, but also varies periodically in intensity over timescales of seconds to hundreds of years. In the last millennium, five so-called “grand minima” were found in proxies: The Oort, Wolf, Spörer, Maunder and Dalton Minima. All of them have been made responsible for strong regional to global changes in surface temperatures and precipitation. Linked to solar activity there are changes in the penetration of energetic particles (among them galactic cosmic rays, coming from outer space, as well as solar energetic protons and low energetic electrons, originating from the Sun), leading to varying ionization rates of basic atmospheric constituents such as nitrogen or oxygen in the upper and middle atmosphere creating NO_x and HO_x . These chemical compounds are both involved in the ozone destruction cycle in the stratosphere and are precursors for the ozone production cycles in the troposphere.

The first and major aim of this thesis is to perform a climate simulation extending from

the 17th century to the year 2100. For this task, a new coupled atmosphere-ocean climate chemistry model (AO-CCM) is developed based on the chemistry-climate model (CCM) SOCOL3 and the ocean model MPIOM. Energetic particle parameterizations have been implemented and the model spin-up has been carefully investigated. Driven by the strong solar forcing reconstruction of Shapiro et al. (2011), a transient simulation is then launched, spanning the period from 1600 AD to 2100 AD, with embedded scenarios and ensemble calculations starting i) in 1780 AD to investigate the DM (1780-1840) and ii) in 2000 AD to investigate the impact of a potential grand solar minimum in the 21st century.

The second aim of this thesis is to separate, attribute and quantify the impact on global and regional climate of solar irradiance decreases, energetic particles and volcanic eruptions during the DM, and the third aim is doing about the same for the 21st century with a hypothetical new grand solar minimum, focusing especially on the solar contribution of the probable climate change. For both periods the state of the climate and atmospheric chemistry are compared to an “unperturbed” state of the climate forced by a constant forcing factors.

The first part of this thesis based on two simulations modeling the climate change over the last 400 and the future 100 years. The analysis of the results revealed that our model did not well represent the Maunder Minimum, however very well reproduced the volcanic and solar-induced cooling period during the DM. As well, the anthropogenic warming of the last hundred years is well recreated, although the sensitivity to increasing greenhouse gas concentrations in the beginning of the 20th century seems to be on the higher edge. Yet, when simulating the 21st century by using IPCCs RCP 4.5 scenario, we find a similar global warming of surface temperatures by around 2 K than the CMIP5 reference simulations.

For the period of the DM, a series of sensitivity experiments (“scenario runs”) is carried out, varying independently either the solar ultra-violet (UV) irradiance, the solar visible and near infrared irradiance (VIS, NIR), the EPP and the stratospheric aerosol burden due to volcanic eruptions. We show that while the changes in the UV spectrum of the Sun and volcanic eruption have a strong effect on stratospheric chemistry and dynamics, the changes in VIS and NIR irradiance and EPP do not. Conversely, tropospheric climate is rather influenced by the VIS and NIR solar spectrum decrease and by the volcanic eruptions than by changes in the UV solar spectrum. Again,

EPP do not show a significant impact on tropospheric chemistry or climate. In the stratosphere, a reduction of UV irradiance by 15% causes a global ozone decrease below the stratopause reaching 8% in the midlatitudes at 5 hPa and a significant stratospheric cooling of up to 2 K in the midstratosphere and to 6 K in the lower mesosphere. Volcanic aerosols heat the tropical lower stratosphere and tropopause allowing more water vapor to enter the tropical stratosphere, which, via HO_x reactions, decreases upper stratospheric and mesospheric ozone by roughly 4%. Conversely, heterogeneous chemistry on aerosols reduces stratospheric NO_x , leading to a 12% ozone increase in the tropical lower and middle stratosphere, whereas a decrease in ozone of up to 5% is found over Antarctica in boreal winter. On the Earth's surface, the calculated decrease of 0.3% of the VIS and NIR irradiance causes a drop of global temperatures by 0.2 K and a drop of north hemispheric temperatures by up to 0.4 K. The global ocean heat content (OHC) of the uppermost 300 meters of depth drops by nearly 2% when reducing only the VIS and NIR irradiance. Reduction of the UV irradiance or change in the energetic particle precipitation does not influence global temperatures. However, small seasonal changes are visible in the polar regions. Volcanic eruptions have a significant influence on the tropospheric climate by inducing a global cooling of up to 0.6 K and a drop in the OHC of the uppermost 100 meters of depth by up to 2.5% over 2 years after the eruptions. However, the eruptions do not explain the long-lasting cold period following the period after 1817 AD. As well, we show that volcanic eruption can significantly modify the global circulation, altering the precipitation patterns globally, but also locally over Europe. We thus conclude that volcanic eruptions “kicked-in” the cool DM period, which then was sustained by the lower solar irradiance.

For the 21st century, the constant and declined solar activity scenarios reveals that about 20% or 0.4 K of the expected future greenhouse warming might become compensated by a grand solar minimum. However, the climate for the solar activity minimum case still would be warmer by 1.4 K near the end of the century when being forced by the optimistic IPCC RCP 4.5 scenario. We show that the anticipated total column ozone recovery would be delayed or even cancelled in some parts of the globe mostly by the decreased UV radiation, possibly leading to an increase of skin cancer in the equatorial and subtropical region and thus requiring stronger limitations on the ozone depleting substances regulated by the original Montreal protocol.

Résumé

Le climat de la Terre est fortement lié à l'activité solaire et aux éruptions volcaniques. Ces deux facteurs impliquent différentes façons d'influencer non seulement le climat, mais aussi la constitution chimique de l'atmosphère sur des échelles de temps s'étendant de quelques mois à des dizaines d'années. Il va de soit que les derniers changements climatiques avaient pour conséquences des risques de famine pour les civilisations. La dernière période froide, dénommée le minimum de Dalton (MD), incluant "l'année sans été" de 1816, était très probablement lié à un déclin solaire et à une activité volcanique majeure en 1809 et 1815. C'est surtout l'incertitude de la contribution solaire exacte et - de plus - la possibilité d'une nouvelle baisse d'activité solaire dans l'avenir proche qui ont sensibilisé la communauté scientifique ces dernières années. Les spéculations qu'un nouveau minimum solaire puisse se passer durant la deuxième partie du 21^{ème} siècle sont basés sur des analyses statistiques de l'activité solaire historique et sur le maximum solaire actuel étant plutôt faible. Basées sur ces faits, des hypothèses existent que le réchauffement climatique pourrait être partiellement compensé par une nouvelle période de faible activité solaire.

C'est un fait connu que le Soleil subit non seulement un cycle d'activité régulier de 11 ans, mais aussi des cycles d'intensité ayant une période de quelques secondes à plusieurs centaines d'années. Durant le dernier millénaire, cinq "grands minimums solaires" ont pu être reconstruit à partir d'indicateurs climatiques ("proxy"): Les minimums de Oort, de Wolf, de Spörer, de Maunder et de Dalton. Tous ont été rendu responsables pour des changements de température et de précipitation globaux. Liée aux changements d'activité solaires, une variation de la pénétration des rayons cosmiques et des particules énergétiques solaires, menant à des variations du taux d'ionisation des constituants basiques de notre atmosphère (comme l'azote ou l'oxygène) est observée. Les produits, parmi d'autres surtout de l'oxide d'azote et de l'hydroxyle, sont des réactifs efficaces dans les réactions de destructions d'ozone dans la stratosphère et de production d'ozone dans la troposphère.

L'objectif primaire de cette thèse est d'accomplir une simulation du climat de la période de 1600 à 2100 ap. J.-C.. Pour effectuer cette simulation, d'abord, un nouveau modèle couplé océan-atmosphère de chimie-climat (AO-CCM) basé sur le modèle de chimie-climat (CCM) SOCOL3 et sur le modèle océan MPIOM a été développé. Les paramétrisations pour les particules énergétiques ont été implémentées et une analyse de la stabilisation du climat simulé par le modèle a été faite. Entraîné par la reconstruction de l'irradiance solaire d'une haute amplitude de Shapiro et al. (2011), une simulation transitoire a été lancée, simulant la période de 1600 à 2100 ap. J.-C., contenant des scénarios débutants en i) 1780 ap. J.-C. pour l'investigation du MD (1780-1840) et en ii) 2000 ap. J.-C. pour examiner l'impact d'un minimum solaire dans le courant du 21^{ème} siècle sur notre climat.

Le deuxième but de cette thèse est de séparer, d'attribuer et de quantifier l'impact global et régional d'un grand minimum solaire, des particules énergétiques et d'éruptions volcaniques sur le climat terrestre pendant le MD. Le troisième but est de faire la même chose pour le 21^{ème} siècle, en admettant le scénario d'un nouveau grand minimum solaire, en focussant surtout l'aspect du ralentissement éventuel du réchauffement climatique. Pour ces deux périodes, l'état du climat terrestre est comparé à un état "non-perturbé", forcé par des facteurs externes (volcans, irradiation solaire, ionisation par les particules énergétiques) gardés constants.

La première partie de la thèse est basée sur deux simulations simulant le changement de climat sur les dernières 400 et les futures 100 années. L'analyse de ces résultats a révélé que notre modèle n'a pas réussi à représenter le minimum de Maunder correctement. Par contre, la période froide pendant le MD induite par un minimum solaire et par deux violentes éruptions volcaniques a bien été reproduite. De même, le réchauffement anthropogénique des dernières 100 années est correctement simulée, même si la sensibilité de notre modèle à une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre est relativement haute. Malgré cela, la simulation du 21^{ème} siècle suivant le scénario du GIEC RCP 4.5 démontre que nos résultats - notamment un réchauffement global de 2 K - sont tout à fait comparables à ceux trouvés par les simulations de référence du CMIP5.

Pour la période du MD, une série d'expériences ("scénarios") est simulée, permettant de varier indépendamment soit l'irradiance solaire dans l'ultra-violet (UV), dans le

visible et l'infra-rouge proche (VIS, IRP), l'intensité des particules énergétiques ainsi que les éruptions volcaniques. Nous démontrons que si les variations dans le spectre UV du Soleil et des éruptions volcaniques ont un effet majeur sur la chimie et la dynamique de la stratosphère, cela n'est pas le cas avec les variations dans le spectre VIS/IRP du soleil et des particules énergétiques. Inversement, le climat de la troposphère est plutôt influencée par le spectre VIS et IRP du Soleil et par les éruptions volcaniques que par les variations dans l'UV. A nouveau, les particules énergétiques sont sans action dans la troposphère. Dans la stratosphère, une réduction de l'UV de 15% cause une baisse globale de l'ozone sous la stratopause, atteignant une perte d'ozone de jusqu'à 8% dans les latitudes moyennes, à 5 hPa de hauteur. De même, un refroidissement de la stratosphère de près de 2 K à la hauteur de la couche d'ozone et de près de 6 K dans les régions de la basse mésosphère.

Les aérosols volcaniques réchauffent la région de la tropopause tropicale, permettant une augmentation du transport de vapeur d'eau de la troposphère dans la stratosphère. Cette vapeur d'eau va - via diverses réactions - diminuer la concentration d'ozone dans la haute stratosphère et la mésosphère d'environ 4%. Inversement, des réactions hétérogènes sur les aérosols volcaniques réduisent la concentration stratosphérique de l'oxide d'azote, permettant une hausse de 12% d'ozone dans les régions tropicales. Sur la surface de la Terre, la diminution de l'irradiance du spectre VIS/IRP de 0.3% cause un refroidissement global de 0.3 K et une baisse de températures sur la partie hémisphérique du nord de 0.4 K. La chaleur globale des premiers 300 mètres de profondeur des océans diminue de près de 2% en réduisant seulement le rayonnement VIS/IRP. La baisse de température est négligeable si le modèle n'est forcé que par la baisse du rayonnement UV. Par contre, les éruptions volcaniques ont un effet significatif en induisant un refroidissement global de près de 0.3 K et une baisse de la chaleur océanique des premiers 100 mètres de profondeur de jusqu'à 2.5% sur les deux années qui suivent les éruptions. Malgré cela, les éruptions volcaniques pour elles-mêmes ne peuvent pas expliquer la longue période froide qui suit l'année 1817 ap. J.-C.. De plus, les éruptions volcaniques sont capables de modifier la circulation globale, menant à des anomalies de précipitations globales, mais aussi régionales (Europe). De ce fait, nous concluons que les éruptions volcaniques ont initié la période froide du MD, laquelle a été soutenue par une baisse d'irradiance solaire.

Pour le 21^{ème} siècle, la comparaison des scénarios d'un soleil gardant une activité constante et d'un soleil entrant dans un nouveau grand minimum révèle que environ 20% - ou 0.4 K - du réchauffement climatique prédit pourrait être compensé par un

nouveau minimum solaire. Cependant, le climat se réchaufferait quand-même de 1.4 K d'ici la fin de ce siècle, en suivant le scénario optimiste RCP 4.5 du GIEC. Additionnellement, nous démontrons que la récupération de la couche d'ozone sera retardée ou même anihilée dans ceraines régions du globe, à cause de la réduction de l'irradiance UV. Cela pourrait impliquer une augmentation du risque du cancer de la peau dans le régions équatoriales; une limitation encore plus stricte des substances détruisant la couche d'ozone, réglée par le protocole de Montréal, serait nécessaire.