

Diss. ETH No. 19488

Statistical uncertainty analysis in an ensemble of global climate models

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

David Masson

Dipl. Phys. ETH Zurich
born on 13 April 1979
citizen of Ecublens (VD)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reto Knutti, examiner
Dr. Benjamin Sanderson, co-examiner
Dr. Andreas Weigel, co-examiner

Zurich 2011

Abstract

This PhD thesis examines several ensembles of general circulation models from a statistical point-of-view. These models not only play a central role in detection and attribution studies on climate change, but also often serve as basis for projections and adaptation planning for policy makers. While scientific consensus points to human activities as the primary cause of the observed 20th century warming, the details of future climate change remain uncertain. Apart from an agreement on the positive sign of future temperature change, all climate models disagree to a certain extent, depending on the variable, time horizon and spatial scale considered. While this disagreement is not a problem in itself, quantifying uncertainty from an ensemble of simulations whose performance and model dependence are not well identified remains challenging.

Model evaluation is often performed on a grid-point basis despite the fact that models are known to often be unreliable at such small spatial scales. A first study examines how different spatial and temporal scales affect the robustness of temperature and precipitation projections. One finding suggests that increasing the native resolution of a model does not substantially improve the simulation of present-day global mean annual temperature. Another finding is the preservation of small spatial scale model bias until the end of the century, when the deviations from the observations are considered independently from the present-day global bias. This justifies the common practice to focus on anomalies from a control simulation rather than absolute values.

The second study investigates why the predicted amount of global warming by different general circulation models is so difficult to constrain by the observations. The comparison between these state-of-the-art climate models with another ensemble made of a single model whose parameters have been perturbed suggests that parameter calibration plays an important role. As model calibration might have used all the information contained in the observation, then model climate sensitivity cannot be constrained a second time by the same observation. Moreover, if model parameters are tuned, this might give a false impression of validity for present-day while systematic biases could appear in the future.

The third study focuses on the relationships between general climate models from a statistical point of view. We find that models from the same institutions generally share similar behavior even after significant development. As a consequence, considering the climate models as independent is not justified and multi-model averages are probably biased towards certain model designs.

Finally, a fourth study explores the risks associated with weighting climate models according to their present-day performance. A conceptual experiment is constructed where two hypothetical IPCC reports are created at the same time. The consistency of both climate projections depends on the ensemble size and how strongly parameters are calibrated to match the observations.

Overall, this thesis has demonstrated the importance an appropriate spatial scale for model evaluation and the crucial role played by model inter-dependence and calibration for the uncertainty range sampled by future climate simulations.

Résumé

Cette thèse étudie divers ensembles de modèles climatiques d'un point de vue statistique. L'importance de tels modèles numériques n'est plus à démontrer : détection et attribution des changements climatiques ou études d'impact destinées aux décideurs politiques sont des exemples fréquemment cités. Bien qu'un large consensus attribue aux activités humaines le réchauffement climatique observé durant le 20ème siècle, de larges incertitudes persistent sur l'ampleur et la répartition géographique des futurs changements. Si les modèles s'accordent tous sur un réchauffement global, ils divergent en revanche plus ou moins dans les détails selon la variable considérée, l'éloignement dans le futur ou l'échelle spatiale à laquelle on les compare. Ce désaccord n'est pas problématique en soi ; le véritable enjeu consiste plutôt à correctement estimer les incertitudes reflétant l'état de nos connaissances. Le défi est de taille surtout lorsque des notions de performance ou d'inter-dépendance au sujet des modèles ne sont pas clairement définies.

L'évaluation des modèles est fréquemment effectuée à la plus petite échelle spatiale possible, c'est à dire celle de la cellule élémentaire du maillage global, ceci en dépit du fait que les simulations sont rarement fiables à une telle échelle. C'est ainsi que la première étude de cette thèse s'applique à définir une échelle spatiale et temporelle optimale à laquelle les modèles seraient consistants entre eux ou avec les observations. Il en ressort que l'accroissement de la résolution native d'un modèle n'apporte pas d'avantages pour la simulation de la température à l'échelle globale. Un autre résultat rend compte de la bonne préservation des erreurs à l'échelle locale jusqu'à la fin ce siècle, abstraction faite de l'erreur à l'échelle globale pour la période présente. Un tel résultat justifie une pratique répandue qui consiste à se focaliser sur les anomalies d'une simulation par rapport à sa version de contrôle plutôt que d'en analyser les valeurs absolues.

L'étude suivante consiste à comprendre pourquoi si peu de variables basées sur les observations sont à même de réduire l'incertitude sur la sensibilité climatique prédite par les modèles. Une comparaison est établie avec, d'un côté un ensemble de modèles à l'état de l'art, et de l'autre, un large ensemble de simulations générées par la perturbation des paramètres d'un seul modèle. Cette comparaison suggère que la calibration des modèles joue un rôle important : si toutes les informations disponibles sont intégrées par les modèles au travers de la calibration, il n'est pas étonnant que les observations ne peuvent fournir davantage de contraintes quant à la réduction de l'incertitude touchant la sensibilité climatique. De surcroît, il se peut que les modèles compensent certains mécanismes afin de reproduire fidèlement les observations.

Un tel réglage pourrait produire une spécieuse apparence de validité et causer des déviations systématiques dans le futur.

Une troisième étude se focalise sur les similarités existantes entre les modèles d'un point de vue statistique. Nous démontrons que des modèles différents mais provenant des mêmes institutions produisent des simulations apparentées, ceci également au fil des développements successifs des modèles. Ainsi, le fait de considérer tous les modèles comme autant d'approches indépendantes ne reflète pas la réalité. En conséquence, l'incertitude des futures projections climatiques est probablement biaisée par certains concepts redondants.

Enfin, l'idée de donner à chaque modèle un poids reflétant son habileté à reproduire les observations est analysée dans une quatrième étude. Nous utilisons une expérience conceptuelle qui tend à démontrer que l'usage de tels coefficients est risqué s'il n'existe pas de relation entre la performance mesurée aujourd'hui et les projections climatiques futures. Le rôle du nombre de modèle dans un ensemble ainsi que celui de la calibration est également pris en compte.

Globalement, cette thèse démontre de quelle manière l'incertitude relative aux futurs changements climatiques est affectée par le choix de l'échelle spatiale, par la calibration des paramètres régissant les modèles et par certaines interdépendances conceptuelles.