

Sujet de Thèse: Caractérisation de l'incertitude de modélisation associée aux projections climatiques globales à résolution kilométrique

Thesis topic: Characterization of modeling uncertainty associated with global kilometer-scale climate projections

Encadrement: Olivier Geoffroy, Julien Cattiaux, David Saint-Martin (Groupe Climat GMGEC)

Mots clefs : projections climatiques, physique atmosphérique, incertitudes, extrêmes

Résumé

Le modèle d'atmosphère globale ARP-GEM (Geoffroy et Saint Martin, 2025a,b), une version optimisée et multi-résolution du modèle ARPEGE/IFS, permet de réaliser des simulations climatiques jusque des résolutions kilométriques. La configuration à résolution kilométrique permet la réalisation de simulations à l'échelle centennale. Ce modèle global présente plusieurs avantages pour étudier le climat et le changement climatique aux échelles régionales à locales: toutes les régions d'intérêt peuvent être couvertes par une simulation unique (pas de modèles ou domaines imbriqués), représentant explicitement les processus méso-échelle (relief et îles, mouvements convectifs les plus profonds, cyclones tropicaux, extrêmes de précipitations locaux), tout en tenant compte des modes de variabilité et téléconnexions d'échelle planétaire. Une première simulation globale de changement climatique de 120 ans à 2,6 km a déjà été réalisée (Saint-Martin et al., en préparation), démontrant la faisabilité de ce nouveau type de simulations, sa qualité dans les phénomènes de fine échelle simulés, et son intérêt pour les applications de type « services climatiques » ; cette simulation a notamment permis de consolider l'ensemble de projections climatiques distribué par Météo-France (portail DRIAS).

Une limite importante de ces simulations concerne la difficulté à quantifier l'incertitude de modélisation qui leur est associée. Cette incertitude est classiquement explorée au moyen de grands ensembles multi-modèles ou de simulations à paramètres perturbés. Toutefois, de tels ensembles ne sont pas envisageables aux résolutions considérées ici en raison de leur coût numérique trop élevé. L'objectif de cette thèse sera donc d'étudier comment caractériser de manière pertinente l'incertitude de modélisation à partir d'un ensemble restreint de simulations à haute résolution kilométrique, ne comprenant qu'un nombre limité de membres.

Dans cette optique, des combinaisons de paramètres et d'options de physique représentatives de la dispersion du modèle seront définies afin de construire les quelques membres à haute résolution, réalisés en mode couplé avec un modèle d'océan, en ciblant particulièrement la dispersion de la réponse des précipitations et de leurs extrêmes. Pour explorer différentes représentations et réglages de la physique, notamment la turbulence et la microphysique, on utilisera les versions à basse résolution du modèle ARP-GEM (jusqu'à 50 km), moins coûteuses en ressources de calcul, en configuration atmosphère seule. Ces travaux permettront également de documenter l'effet du degré de complexité physique et de certains choix de modélisation sur les biais présents et les changements futurs dans des simulations climatiques à l'échelle kilométrique.

Summary

The global atmosphere model ARP-GEM (Geoffroy and Saint-Martin, 2025a,b), an optimized and multi-resolution version of the ARPEGE/IFS model, enables climate simulations at resolutions up to the kilometer scale. The kilometer-resolution configuration allows for centennial-scale simulations. This global model offers several advantages for studying climate and climate change at regional to local scales: all regions of interest can be covered by a single simulation (without nested models or

domains), explicitly representing mesoscale processes (such as orography and islands, deep convective motions, tropical cyclones, and local precipitation extremes), while also accounting for planetary-scale variability modes and teleconnections. A first 120-year global climate change simulation at 2.6 km resolution has already been completed (Saint-Martin et al., in preparation), demonstrating the feasibility of this new type of simulation, the quality of the fine-scale phenomena represented, and its relevance for climate services applications; this simulation has also helped consolidate the set of climate projections distributed by Météo-France (DRIAS portal).

A major limitation of these simulations is the difficulty in quantifying the associated modeling uncertainty. This uncertainty is typically explored using large multi-model ensembles or perturbed parameter simulations. However, such ensembles are not feasible at the resolutions considered here due to their prohibitively high computational cost. The objective of this thesis will therefore be to investigate how to meaningfully characterize modeling uncertainty using a limited ensemble of high-resolution kilometer-scale simulations, comprising only a small number of members.

To this end, combinations of parameters and physical options representative of the model's spread will be defined in order to construct the few high-resolution members, run in coupled mode with an ocean model, with a particular focus on the dispersion in the response of precipitation and its extremes. To explore different physical representations and settings—especially turbulence and microphysics—the lower-resolution versions of ARP-GEM (up to 50 km), which are less computationally demanding, will be used in atmosphere-only configuration. This work will also document the effect of the degree of physical complexity and certain modeling choices on the biases present and future changes in kilometer-scale climate simulations.

Références

Geoffroy, O., and D. Saint-Martin, 2025: The ARP-GEM1 Global Atmosphere Model: Description, Speedup Analysis, and Multiscale Evaluation up to 6 km. *J. Climate*, **38**, 4739–4762, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0547.1>.

Geoffroy, O., and D. Saint-Martin, 2025: Global Kilometer-Scale Simulations with ARP-GEM2: Effect of Parameterized Convection and Calibration, submitted to *J. Climate*, preprint arXiv, <https://arxiv.org/html/2511.00829v1>