



HAL
open science

La modélisation du climat: défis et opportunités

Masa Kageyama, Olivier Boucher, Yann Meurdesoif, Sylvie Joussaume

► **To cite this version:**

Masa Kageyama, Olivier Boucher, Yann Meurdesoif, Sylvie Joussaume. La modélisation du climat: défis et opportunités. Clefs CEA, 2021, 73, pp.18-19. hal-03460695

HAL Id: hal-03460695

<https://hal.science/hal-03460695>

Submitted on 1 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La modélisation du climat : défis et opportunités

— L'essor des modèles de climat depuis les années 1970, leur utilisation à des fins de prévisions et de compréhension du système climatique terrestre, ont été rendus possibles grâce aux progrès ininterrompus du HPC [1,2] et à la croissance exponentielle de la puissance de calcul mise à disposition.

AUTEURS



Masa Kageyama
(CNRS)

Directrice de recherche au
Laboratoire des Sciences du
Climat et de l'Environnement
(unité mixte CEA/CNRS/UVSQ).



Olivier Boucher
(CNRS)

Directeur adjoint de l'Institut
Pierre-Simon Laplace (IPSL).



Yann Meurdesoif

(Direction de la recherche
fondamentale)

Ingénieur HPC au Laboratoire
des Sciences du Climat et
de l'Environnement (unité mixte
CEA/CNRS/UVSQ).



Sylvie Joussaume
(CNRS)

Directrice de recherche au
Laboratoire des Sciences du
Climat et de l'Environnement
(unité mixte CEA/CNRS/UVSQ).

Issus des premiers modèles de circulation atmosphérique pour la prévision météorologique développés dès les années 1950, les modèles de climat ont incorporé, au fil des décennies, de plus en plus de processus physiques, à des échelles spatiales et temporelles toujours plus fines [2]. Ils sont aujourd'hui de véritables modèles du «système Terre», incluant des représentations de l'atmosphère, de l'océan, de la banquise et des surfaces continentales, tout en prenant en compte leurs interactions physiques et biogéochimiques.

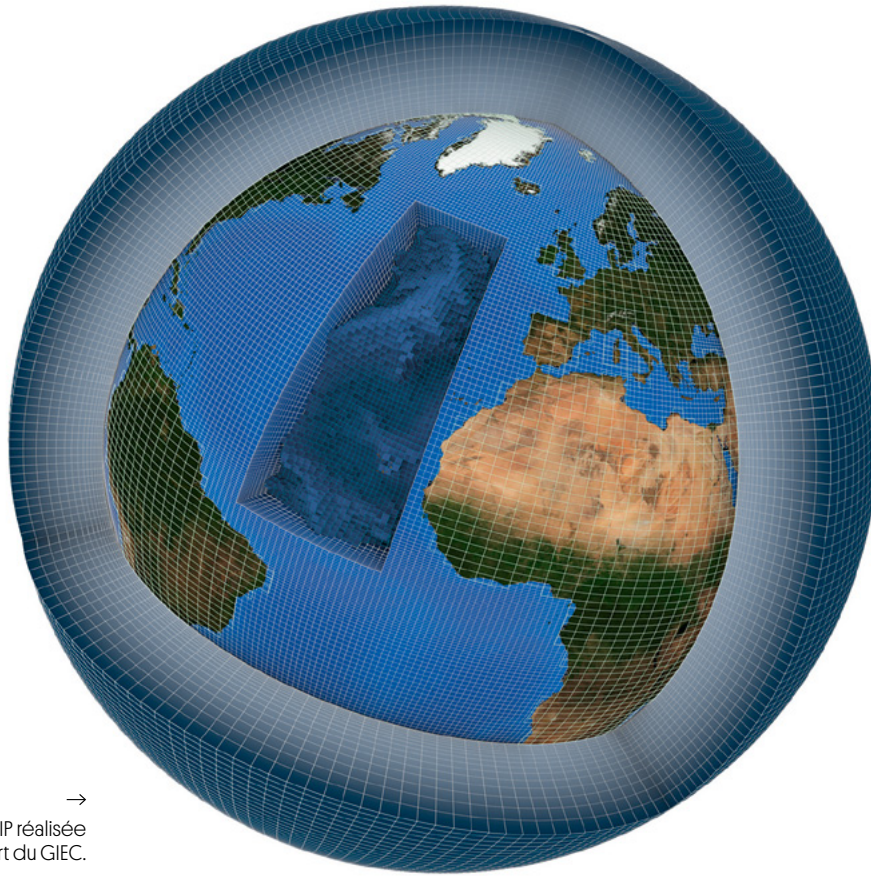
Ces modèles permettent de prévoir l'évolution future du climat en fonction de scénarios socio-économiques, comme l'ont encore montré les simulations du projet international **CMIP** dont les résultats ont servi de base scientifique pour le sixième rapport du **GIEC** publié en août 2021 [3]. Mais ces modèles sont aussi et surtout des outils de recherche pour comprendre l'évolution du climat et mettre en évidence les mécanismes des changements climatiques observés, dans le passé proche ou lointain. Au cours des précédentes décennies, la croissance régulière des performances des supercalculateurs a permis d'augmenter la complexité et la résolution des modèles de climat et on pourrait penser qu'il en sera de même pour la prochaine décennie. En réalité, les évolutions futures des architectures des supercalculateurs, mais aussi les nouvelles interrogations soulevées par la société sur le climat, invitent aujourd'hui la communauté des modélisateurs à une réflexion approfondie sur l'avenir de leurs outils de travail.

Les modèles actuels de climat ont pour piliers les modèles de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan. Ceux-ci résolvent les équations de la mécanique des fluides sur la sphère en rotation, en tenant compte des équations d'état des fluides, des flux d'énergie et des flux d'humidité (pour l'atmosphère) ou de sel (pour l'océan). Ces modèles ont été régulièrement adaptés pour utiliser de manière optimale

les différentes architectures de calcul qui se sont succédé. Un modèle de climat actuel intègre près d'une dizaine de composantes, toutes couplées entre elles, et dont chacune comprend plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de lignes de code.

L'arrivée de machines à architecture hybride complexe, incluant notamment des accélérateurs (de type **GPU** ou autres...), très différentes des précédentes, pousse la communauté à reconsidérer la structure des codes et les algorithmes retenus pour résoudre les différents équations. D'ores et déjà, le cœur de dynamique atmosphérique a été entièrement redéveloppé pour s'adapter à ces nouvelles architectures [4]. Mais le défi technique pour les autres composantes (près de 500 000 lignes de code) reste immense et nécessitera une coopération active entre climatologues et experts du HPC pour passer le cap de l'**exascale**.

Parallèlement à ces nouveaux développements techniques, la communauté des modélisateurs de climat est confrontée à l'évolution des questions qui lui sont posées. Depuis l'Accord de Paris en 2015, la société et les décideurs politiques semblent avoir pris la mesure des dangers liés au changement climatique. Deux grandes catégories d'actions s'imposent : l'atténuation, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et l'adaptation, pour préparer nos infrastructures, nos économies, nos sociétés aux changements climatiques à venir. Ces actions représentent de lourds investissements sur la période relativement courte des décennies à venir, à mettre en regard des coûts liés aux impacts du changement climatique si aucune mesure n'est prise. Les acteurs économiques et politiques demandent donc aux modélisateurs de quantifier l'impact de ces actions potentielles : sont-elles appropriées pour réduire les risques liés au changement de climat ? Sont-elles suffisantes ? Sont-elles fiables à long terme, même si le climat change ? Des mesures prises en une région du globe peuvent-elles avoir un impact



→
Modélisation CMIP réalisée
pour le 6e rapport du GIEC.

néгатif dans une autre région ? Enfin, il est important d'être en mesure de prendre ces décisions en ayant connaissance des incertitudes non seulement liées aux scénarios futurs, mais aussi à la variabilité climatique et aux incertitudes paramétriques des modèles eux-mêmes. Cette dernière est aujourd'hui principalement estimée sur la base des résultats d'un ensemble de modèles, comme par exemple dans le projet CMIP, même si cette méthode reste imparfaite.

Face à ces nouveaux défis, une partie de la communauté internationale des modélisateurs se propose d'élaborer des modèles à ultra-haute résolution (quelques kilomètres pour l'atmosphère) afin de résoudre les processus de fine échelle dans l'atmosphère et l'océan et d'analyser leur rôle dans le changement climatique [5]. Le potentiel de cette voie reste incertain car les besoins en calcul augmentent comme le cube de la résolution horizontale. Même avec des développements majeurs en termes d'algorithmique, d'utilisation des supercalculateurs, d'analyse et de distribution des données, il ne sera pas possible de réaliser des simulations sur plus de quelques décennies, donc de quantifier les impacts de plus long terme, comme ceux dus à la fonte des calottes glaciaires, ni de mener les grands ensembles de simulations nécessaires à l'étude de nombreux scénarios d'atténuation et d'adaptation,

et à la quantification des événements rares et de leurs incertitudes.

La communauté française propose une philosophie complémentaire, plus pragmatique mais néanmoins novatrice, qui consiste à disposer de modèles flexibles, en termes de résolution et de complexité, pour être en capacité de répondre à un large ensemble de questions de recherche, et à quantifier l'impact des incertitudes paramétriques des modèles, et ce sur des échelles de temps pluri-centennales si besoin. Cela nécessite de grands ensembles de simulations, donc d'adapter les codes et de revoir les chaînes de calcul pour traiter de grandes masses de données. Le développement de méthodes novatrices d'émulateurs de certaines composantes ou sous-composantes, basés sur les méthodes en plein essor de l'intelligence artificielle, est une autre opportunité dans cette stratégie. Elle pourrait permettre de mieux quantifier les incertitudes liées aux paramétrisations des modèles ou de leurs forçages, mais aussi de mieux considérer les différentes échelles spatiales et temporelles, et d'optimiser l'utilisation des ressources de calcul. Ainsi, l'arrivée prochaine des nouvelles architectures de calcul et l'essor de méthodes innovantes de développement nécessiteront une refonte de nos codes de calcul, mais ce défi mérite d'être relevé. La modélisation du climat en sortira probablement profondément changée. ●

GLOSSAIRE

HPC

Acronyme de High Performance Computing [calcul haute performance en français].

CMIP

Acronyme de Coupled Model Intercomparison Project. www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip

GIEC

Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat. www.ipcc.ch/languages-2/francais

GPU

Accélérateur graphique, acronyme de Graphics Processing Unit.

Exascale

Capacité d'un supercalculateur à exécuter un milliard de milliards [10^{18}] d'opérations par seconde [exaflops].

RÉFÉRENCES

- [1] V. Balaji, «Climbing down Charney's ladder: machine learning and the post-Dennard era of computational climate science», *Phil. Trans. R. Soc. A* 379: 20200085. DOI: 10.1098/rsta.2020.0085 [2021].
- [2] P. N. Edwards, «History of Climate Modelling, WIREs climate change», DOI: 10.1002/wcc.95 [2011].
- [3] V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), IPCC, 2021: *Climate Change 2021: «The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change»*. Cambridge University Press. In Press.
- [4] T. Dubos, et al. «DYNAMICO-1.0, an icosahedral hydrostatic dynamical core designed for consistency and versatility», DOI: 10.5194/gmd-8-3131-2015 [2015].
- [5] P. Bauer, et al. «A digital twin of Earth for the green transition», *Nature Climate Change*, DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y [2021].