

# Réflexion sur l'avenir de la modélisation globale

Frédéric Hourdin, mai 2025

23 septembre 2025

Certaines polémiques récentes autour d'un possible remplacement des modèles globaux à physique paramétrée par des modèles kilométriques sans paramétrisations de la convection, la révolution récente de l'intelligence artificielle, ou encore l'arrivée des ordinateurs avec cartes accélératrices forçant à repenser en partie le codage informatique, sont autant d'éléments de contextes qui ont bousculé récemment les groupes de modélisation du climat<sup>1</sup>. Ceci a renforcé le besoin de repenser les objectifs et priorités de la modélisation du climat. Ce document donne une vision personnelle, mais appuyée sur une recherche collective, au sein des collectifs LMDZ et Dephy.

## 1 Eléments de contexte

### Modélisation globale et projections climatiques

Les modèles de circulations générale, couplant atmosphère et océan, ont évidemment joué un rôle déterminant dans l'alerte sur le réchauffement global, dès la fin des années 70s. Encore aujourd'hui, les simulations globales couplées sont les seules capables d'anticiper l'ampleur du réchauffement et les répercussions sur les différentes régions du globe, qu'elles passent ensuite ou non par une descente d'échelle physique ou statistique. Une fois passée l'acceptation de l'alerte par le plus grand nombre, et d'un point de vue de l'éclairage des politiques publiques, les enjeux principaux de la modélisation globale sont :

- Quantifier l'incertitude sur le réchauffement global qui dépend au premier chef de la sensibilité climatique à la concentration de dioxyde de carbone.
- Réduire les biais des projections climatiques, de façon à minimiser les besoins de corrections en entrée des modèles de descente d'échelle.
- Evaluer et améliorer si nécessaire la représentation de la variabilité et des événements extrêmes, ceux dont on pense qu'il peuvent être résolus aux échelles considérées.
- Améliorer la représentation de la physique à la fois pour une question de confiance dans les projections, et pour améliorer la représentation de la météorologie en surface, essentielle pour les études d'impact.

Le succès de ces modèles, tant pour la prévision numérique du temps que pour la l'anticipation du changement climatique (l'ampleur du réchauffement était prédite dès 1980 alors que les observations montraient une température stable depuis 20 ans), ont sans doute fait en partie oublier leur vocation de modèle, c'est à dire d'outils de compréhension du système climatique. La séparation entre d'une part la circulation tri-dimensionnelle représentée par le coeur dynamique des modèles de circulation générale, et d'autre part des transferts verticaux d'énergie, d'eau (et autres constituants) et de quantité de mouvement par des mouvements sous-maille, des changements de phase et du rayonnement, représentés au travers de paramétrisations, n'est pas seulement une commodité calculatoire et une façon d'accélérer les simulations. C'est notre pensée du fonctionnement du système climatique qui est accrochée à ce modèle.

Et bien sûr comme toujours : la recherche, y compris sur les modèles de circulation générale, va s'intéresser aux endroits où le modèle est mis en défaut. Une des grosses questions du moment : tout ce qui frotte avec la séparation d'échelle entre résolue et sous maille horizontalement, ou avec

les hypothèses de convergence statistiques et de quasi stationarité à la base du cadre formel du découpage entre coeur dynamique et paramétrisations. A 300 km de résolution, la plupart des processus nuageux sont sous maille et le problème est bien défini. A 50 m de résolutions, une grande partie des phénomènes convectifs est résolue explicitement. Entre les deux, on se retrouve systématiquement avec beaucoup d'énergie dans l'échelle de coupure. On parle de zone grise de la convection. A 30 à 100 km de résolution, on est dans la zone grise de l'organisation de la convection. De 2 à 30 km dans la zone grise de la convection profonde. De 200 m à 2 km dans la zone grise de la convection peu profonde. Pour des GCMs à quelques dizaines de km de résolution, la question de la propagation des systèmes convectifs, et des poches froides associées, commence à se poser sérieusement.

## **DEPHY : une communauté nationale fortement engagée dans le développement des paramétrisations**

La communauté nationale de modélisation du climat est fortement engagée dans l'amélioration de la physique des modèles de climat et de prévision du temps. Cette recherche est structurée par le projet national Dephy (ancien projet Insu, physique commune puis Dephy, devenu GdR du CNRS puis GdR de de Climeri).

Le va et vient entre simulations explicites de la convection en mode LES (5-20 m de résolution pour la convection peu profonde et 50-200 m pour la convection profonde) et paramétrisations est un des piliers de cette recherche.

Les LES sont à la fois source d'inspiration, d'évaluation et d'ajustement des paramétrisations. Cette approche a montré toute sa puissance au cours des deux dernières décennies et a fortement contribué à l'amélioration du modèle de l'IPSL et à la compréhension du couplage entre climat et processus convectif : rôle de la convection de couche limite dans le contrôle de l'humidité en surface et des températures de surfaces océaniques, rôle de la convection peu profonde et des poches froides dans le cycle diurne des pluies continentales orageuses, contrôle des la transition entre stratocumulus et cumulus par le mélange d'air entre panaches convectifs et environnement.

De plus en plus, le collectif Dephy s'intéresse également à la paramétrisation des mouvements sous maille et des nuages dans la zone grise de la convection, aux couplages à la surface et à l'utilisation des données sur site, à la transition entre convection peu profonde et profonde et au rôle et à la possible prise en compte dans les paramétrisation de l'organisation de la convection.

Ces travaux mettent en évidence notamment l'importance d'étendre les domaines des simulations LES et la difficulté voir l'incapacité des simulations à résolution kilométriques explicite (sans paramétrisation même de la convection peu profonde) pour la représentation de la transition entre convection peu profonde et profonde.

## **Exploration paramétrique et tuning**

Si il y a bien un sujet d'actualité et d'avenir qui n'était pas là dans l'équipe il y a 10 ans, c'est celui de l'utilisation de techniques d'apprentissage machine pour l'ajustement paramétrique des modèles.

Suite à une conférence que nous avons organisé en 2014 avec Thorsten Mauritsen<sup>2</sup>, nous avons monté avec le CNRM et Daniel Williamson, statisticien anglais rencontré lors de cette conférence, le projet ANR HighTune.

Il avait pour but d'utiliser le cadre des comparaisons entre LES et versions uni-colonne des modèles (SCM, pour Single Column Model) pour tester des techniques d'apprentissage machine particulières, à savoir l'approche dite de l'accord aux données historiques (ou history matching). Cette approche, basée sur l'utilisation d'émulateurs pour calculer à moindre coup des métriques apprises typiquement sur quelques centaines de simulations, est particulièrement adaptée à l'ajustement de modèles coûteux, ne pouvant fournir que des bases d'apprentissages petites, à l'opposée des approches à la mode dans l'I qui travaillent sur d'énormes bases d'apprentissage. Cette ANR avait aussi pour vocation de faire le pont avec une communauté de collègues physiciens des sciences

de l'ingénieur, pour se doter de la capacité d'effectuer des calculs radiatifs de référence sur des scènes nuageuses 3D.

L'arrivée de ces nouveaux outils a ouvert un nouveau champ de recherche. En libérant le modélisateur de la quasi impossibilité de recalibrer les modèles après l'introduction d'un nouveau développement physique, il a permis aux physiciens que nous sommes de réinvestir de front la paramétrisation, c'est à dire la modélisation physique au plus intime du climat<sup>3</sup>.

Autre élément fondamental : ces nouvelles approches ouvrent pour la première fois la possibilité de quantifier les incertitudes des simulations climatiques<sup>4</sup>.

## **Coeurs dynamiques, accélération, couplages, portages**

Un autre élément majeur de ces dernières dix années et l'arrivée de nouveaux coeurs dynamiques, renouant avec une tradition du LMD. Le nouveau coeur global dynamico et sa version à aire limité sont maintenant opérationnels dans le modèle LMDZ.

Ils ouvrent là aussi tout une palette de possibilités.

Le travail réalisé il y a 30 ans sur la formalisation du découpage dynamique/physique et qui a guidé aux choix informatiques du codage, font que, encore aujourd'hui, ces nouveaux coeurs dynamiques sont de fait partagé entre les physiques du modèle global terrestre et de ses versions planétaires.

Ces questions de couplage et de codage sont au coeur d'un certain nombre de développement actuellement, en lien en particulier avec le portage du modèle sur des machines avec cartes accélératrices.

## **Etudes locales et impact**

Les modélisateurs du climat sont très sollicités pour les études d'impact de par la connaissance qu'ils ont de la représentation du climat à la surface dans les modèles, de leurs atouts et limites. Le zoom de LMDZ est hérité de premières versions de modèles zoomés développés dans les années 80 pour étudier la mousson indienne en collaboration avec l'IIT Dehli. Le nouveau coeur dynamique à "aire limitée" vient compléter ce paysage en ouvrant de nouvelles possibilités.

L'histoire des études par descente d'échelle dite "dynamique" (on force les bords d'un modèle à aire limité ou les bords d'un zoom pour LMDZ) est longue au LMD et se font parfois en prise directe sur des études dites d'impact.

Récemment, l'approche par Monte Carlo mentionnée plus haut et mobilisée pour des calculs radiatif de référence a été étendue aux calculs de thermiques de l'habitat dans une ville. Cette technique revisite "en chemin" la physique des échanges thermiques<sup>5</sup>. Petit à petit, émerge la possibilité que ces algorithmes Monte Carlo puissent être mobilisés directement dans le GCM. Les paramétrisations, qui représentent une moyenne de mouvements non résolus, serait plus ou moins échantillonnées. Cette approche permettrait potentiellement de pouvoir rendre les paramétrisations beaucoup plus facilement "scale aware". C'est déjà plus ou moins ce qui est fait dans le déclenchement dit stochastique de la convection profonde<sup>6</sup>.

En parallèle des études climatiques locales, les modèles zoomés et à aire limité peuvent être mis en œuvre autour de sites de mesures ou de campagnes d'observations afin de travailler au plus près des observations en tenant compte du détails des forçages du terrain notamment.

Le nouveau coeur dynamique permet également de descendre en échelles jusqu'aux échelles kilométriques ou plus fines, pour commencer à simuler explicitement la convection profonde ou peu profondes. L'équipe LMDZ s'est rapprochée de l'équipe qui développe le code non hydrostatique mesoNH, largement utilisé jusque là pour les études de processus sur lesquels s'appuie le développement des paramétrisations de LMDZ depuis deux décennies. Le module PHYEX, physique externalisée contenant les paramétrisations des nuages, de la turbulence et de la convection de MesoNH a été interfacé avec LMDZ. Ce couplage entre physique de MesoNH et coeur dynamique de LMDZ a profité à nouveau de la formalisation de l'interface physique dynamique.

## 2 Opportunités et priorités de développement

### LMDZ composantes du modèle couplé de l'IPSL

LMDZ est un peu la brique maîtresse du modèle de l'IPSL. On sait que le bon fonctionnement d'un modèle climatique repose au premier chef sur le bon fonctionnement de la composante atmosphérique, avec notamment le rôle clé de la physique et les couplages entre turbulence, convection, nuages et rayonnement, sans oublier la pluie. L'amélioration de la représentation des flux d'eau et d'énergie en surface et de la variabilité à toutes les échelles de temps restent des enjeux permanents d'amélioration. L'arrivée des outils d'exploration paramétrique et de tuning mentionnés plus haut ouvre également des perspectives pour le modèle couplé. Mais il faut pour cela être capable de développer des stratégies qui tiennent compte de la lourdeur des simulations couplées, qui ne vient pas tant du fait que le modèle est typiquement deux fois plus coûteux, mais du fait que les constantes de temps océaniques nécessitent des temps d'intégration plus grands. Il faut donc soit réduire le nombre de simulations (et donc le nombre de paramètres), soit essayer d'identifier dans des simulations courtes des choses qui se mettent en place sur des dizaines d'années. Ces considérations qui semblent très "dans la technique" font en fait énormément progresser celles et ceux qui les portent dans la compréhension du système climatique, ou au moins de son avatar numérique. Il s'agit d'un véritable champ de recherche.

Comme ça a été dit plus haut, ce travail sur l'ajustement, avec les approches d'history matching, offre une opportunité de mieux quantifier l'incertitude des projections climatiques, tant en termes d'amplitude du réchauffement global qu'en termes de modifications des climats régionaux, une priorité importante pour l'éclairage des politiques publiques.

### Priorités d'amélioration

Les couplages entre turbulence, convection, nuages et rayonnement, restent une priorité de développement et un des champs de recherche les plus excitants des sciences du climat.<sup>7</sup> La représentation de ces processus et de leur couplage est fondamentale pour le bon comportement des simulations, y compris dans leur couplage avec la composition atmosphérique, les éco-systèmes, etc.

Les moyens de calcul disponibles permettent de réaliser de plus en plus de simulations LES, avec des mailles de plus en plus fines ou des domaines de plus en plus grands, qui nourrissent cette recherche sur les paramétrisations. De nombreuses pistes de développement sont travaillées actuellement, et d'autres dans les cartons. Ces développements se placent souvent en limite du cadre établi par la décomposition de Reynolds pour justifier la séparation entre dynamique et physique, à la fois en termes de quasi stationnarité et d'homogénéité spatiale horizontale. C'est le cas par exemple avec les poches froides de la convection dont la densité peut facilement devenir inférieur à une par maille, ou simplement de toutes les paramétrisations incluant des équations pronostiques, avec de nouvelles variables d'état. Les effets de brises ou de l'organisation de la convection à méso échelle sont autant d'enjeux qui commencent tout juste à être travaillés dans le GCM.

Un deuxième grand axe de développement concerne spécifiquement les schémas de nuages, avec notamment des développements déjà bien amorcés sur la phase mixte et la sursaturation et la nécessité qui apparaît par plusieurs origines de considérer certains moments de distribution de l'eau sous-maille comme des variables pronostiques, transportées dans la dynamique. L'arrivée du code ECrad pour le rayonnement ouvre également de nombreuses perspectives en termes de représentation des couplages nuages rayonnement, tant en ce qui concerne les hétérogénéités sous maille que les effets 3D des nuages.

De nombreux enjeux concernent également les couplages à la surface : représentation des distributions sous maille du vent pour le soulèvement des vagues ou des poussières désertiques ; prise en compte de structures verticales sous maille horizontalement mais plus hautes qu'une couche du modèle, comme les villes ou les arbres ; prise en compte des hétérogénéités sous maille.

## Paramétrisations stochastiques et insensibilité à l'échelle.

Le fait que le coeur de LMDZ offre la possibilité d'un raffinement local de la grille (ou zoom, le Z de LMDZ) ou plus récemment l'arrivée d'une version à aire limitée, et plus largement la montée en résolution des études, fait que le besoin de développer des paramétrisations "informées sur la résolution" (scale aware) devient un enjeu. Même si on préférerait d'un point de vue théorique passer directement de mailles de 300 km à des LES à 10 m de résolution, pour éviter de mettre la coupure en plein dans certains régimes convectifs, beaucoup d'éléments justifient de travailler à des échelles plus fines : centaines de kilomètres de résolution pour bien résoudre les ondes planétaires ; dizaines pour bien résoudre les cyclones, les circulations côtières ou l'effet de certains massifs montagneux qui affectent les climats régionaux ; résolution kilométrique pour mieux prendre en compte les détails du relief.

Mais toutes ces échelles posent des questions sur le fonctionnement des paramétrisations. A quelques dizaines de kilomètres, on est dans la zone grise de la convection profonde qui doit encore être paramétrisée mais ne devraient plus rester vraiment sous maille. C'est pareil pour la convection peu profonde pour des modèles à maille kilométrique. Une jolie question scientifique du moment est la suivante : sachant qu'il faut maintenir une paramétrisation de la convection peu profonde à ces résolutions, comment faire pour l'articuler avec une convection profonde explicite ?

Une des pistes qui peut aider à faire évoluer les paramétrisations davantage adaptables à l'échelle, c'est le développement de paramétrisations stochastiques. C'est le cas déjà dans le modèle de déclenchement de la convection profonde comme on l'a dit plus haut ou du traitement des recouvrement nuageux dans un des solveurs du code radiatif ECrad. Le fait de penser la paramétrisation comme la convergence d'un processus aléatoire ouvre d'énormes perspectives. On suppose fondamentalement dans Reynolds que ces statistiques ont convergé et on obtient ainsi des modèles déterministes. Si on se met à échantillonner les distributions plutôt qu'à calculer des moyennes, on peut aboutir à un modèle qui s'adapte davantage à l'échelle.

## Tuning et quantification des incertitudes

On l'a déjà dit plus haut. L'arrivée de l'history matching dans le paysage, comme un outil de base du travail de modélisation, est une petite révolution. Ça veut dire que c'est une nouvelle page de la recherche en modélisation du climat qui est en train de s'écrire.

## Potentiels offerts par l'apprentissage machine.

On a dit l'importance de l'apprentissage machine pour le tuning et l'exploration paramétrique, pour lesquels l'équipe LMDZ est en première ligne au niveau international, notamment sur la promotion de l'approche d'history matching qui se répand dans la communauté après les travaux pionniers de l'ANR HighTune.

Mais quid de la place possible des approches de l'IA dans la modélisation du climat et dans quelle mesure l'équipe doit-elle s'investir dans ces approches ? Ces approches fragilisent-elles le travail de modélisation physique ? Contrairement aux approches de l'history matching, on parle ici d'apprentissage sur des grandes bases de données.

Plusieurs pistes sont déjà explorées dans la communauté.

On peut penser bien sûr à remplacer des paramétrisations physiques dans une modélisation dite hybride. L'idée est simple. Il s'agit de remplacer les paramétrisations par des réseaux de neurones par exemple. Quelle base d'apprentissage ? Le plus simple est d'apprendre sur le GCM. On peut penser à équiper le GCM pour, dans une simulation, apprendre les sorties d'une paramétrisation (taux de chauffage, humidification, accélération) sur ses entrées (profils verticaux de température, humidité et quantité de mouvement). Cette approche a déjà montré quelques succès. Elle laisse évidemment toute sa place au travail physique sur les paramétrisations. Elle devrait bien marcher pour des paramétrisations classiques, développées dans un cadre quasi-stationnaire et convergé. Ça devient moins évident dans le cas où les paramétrisations pronostiques, intégrant l'histoire

de l'écoulement et sensible du coup indirectement non seulement aux variables d'état de la colonne à l'instant  $t$  mais a tout l'historique de façon non locale, et c'est justement là que se situe actuellement le front de la recherche sur les paramétrisations.

Une deuxième idée est d'utiliser des LES comme base d'apprentissage (ce qui n'enlève pas les bémols de l'approche précédente). Il est très difficile d'imaginer pouvoir garantir une base de LES suffisamment grande pour éviter des problèmes d'extrapolation en dehors des situations échantillonnées. C'est un des énormes avantages des modèles à base physiques. Les conservations fondamentales de la physique fournissent une très forte contrainte sur cette extrapolation. L'approche poursuivie actuellement dans l'équipe : développer des paramétrisations sur base physique et apprendre les paramètres sur des ensembles de LES mais qui n'ont du coup pas besoin d'être exhaustives. Cependant, un certain nombre de paramétrisations ne sont pas pronostiques, et certaines sont très coûteuses, comme le rayonnement. On peut donc dans ce cas penser que c'est une bonne idée de pouvoir, pour des soucis d'accélération, remplacer les paramétrisations physiques par de l'IA en option.

Une troisième idée est d'apprendre des éléments statistiques internes aux paramétrisations, à l'intérieur d'un cadre physique. Par exemple, si le transfert radiatif est écrit avec des fonction sources (soleil ou Planck dans le rayonnement thermique) et des transmissions (sensibles à la température, la composition, les nuages), alors les transmissions (la complexité du rayonnement) peuvent être apprises sans risque, et à nouveau sans doute sur un ensemble de référence non exhaustif. C'est sans doute une des perspectives les plus intéressantes pour l'utilisation de l'IA au niveau des paramétrisations.

Certains laissent entendre que l'apprentissage pourrait être fait directement sur les observations. Ça semble vraiment illusoire pour tout un tas de raisons [à développer éventuellement].

On sait que les prévisions du temps ont été battues par l'IA récemment. Dans ce cas, plus de cœur dynamiques ni de paramétrisations. En revanche, l'apprentissage est fait sur une base incroyable, à savoir les "analyses" ou "réanalyses", mélange optimal de modèles et d'observations bâtis sur des décennies dans les grands centres de prévision du temps.

De la même façon, on peut tenter de réaliser des simulations apprises sur la base de simulations climatiques, qui peuvent elles aussi générer d'immenses bases de données. L'expérience de la prévision du temps laisse entendre que cette approche devrait marcher sur des échelles de temps météorologiques et des études sont déjà en cours au LMD pour utiliser cette approche pour travailler sur les statistiques des événements extrêmes. Quel potentiel sur les échelles climatiques ? Un des enjeux du moment, à savoir de quantifier l'incertitude des projections liées à la physique (structurelle et paramétrique) ne peut pas elle, être attaquée par cette approche, puisque chaque jeu de paramètres ou choix de paramétrisations conduit à la nécessité de générer une nouvelle base d'apprentissage.

On voit bien que, dans tous les cas, la recherche sur la physique des GCM garde toute sa place.

## Aspects informatiques

L'arrivée des cartes accélératrices (GPU) nécessite un gros effort de recodage. Plutôt que de subir ce nouveau changement, il a été décidé d'en profiter pour passer un cap dans la conceptualisation du codage d'un GCM.

Les choix informatiques faits il y a 30 ans en lien avec la séparation dynamique/physique, ont été un atout énorme aussi bien pour le passage à la parallélisation que l'exploitation du nouveau cœur dynamique à la fois pour la terre et les planètes. Une chose extrêmement importante : il faut que les physiciens continuent à pouvoir coder directement dans le GCM.

Les pistes de développement ou "à travailler" sont nombreuses.

Le travail sur les GPU a permis par exemple d'aller un cran plus loin, avec notamment la mise au point d'un outil "replay" qui permet de rejouer une paramétrisation après avoir stocké automatiquement ses arguments d'entrée. Il se trouve que cet outil devrait permettre très facilement de mettre au point l'informatique nécessaire au remplacement automatique d'une paramétrisation par des algorithmes de l'IA.

De la même façon, un travail continu est mené dans l'équipe sur le côté "développement logiciel" du projet LMDZ. C'est une composante sûrement sous-estimée de la recherche dans le domaine. On ne peut pas espérer des progrès rapides et significatifs sur les performances des modèles de climat sans une réflexion sur ces aspects. Une des difficultés identifiées récemment : comment structurer le développement informatique de la physique alors que le découpage même de la physique en sous partie est au coeur de la recherche ?

## Sobriété énergétique

La sobriété énergétique est évidemment importante.

Les exercices d'intercomparaisons CMIP ont un côté exemplaire ce point de vue, en ce que les résultats des simulations sont rendus accessibles à tous de façon structurée et documentée. Ceci n'empêche pas bien sûr les dérives et la surenchère sur le nombre de simulations. Le fait de discuter sérieusement à chaque fois de l'utilité de ces simulations devrait être davantage discuté.

La nécessité de quantifier l'incertitude des projections climatiques ou les exercices de tuning automatiques, sont potentiellement la source de la multiplication des simulations. Ou placer le curseur ?

La sobriété motive en particulier

- le fait de travailler au maximum avec des modèles à résolution spatiale relativement basse
- le portage GPU
- le possible remplacement de certains bouts coûteux du modèle par des algorithmes de l'IA.
- l'utilisation d'émulateurs de trajectoires apprenant sur des simulations climatiques

## 3 En guise de conclusion ...

Comme on l'a dit plus haut, les modèles de circulation générale sont beaucoup plus que des outils efficaces pour prévoir le temps des prochains jours ou le climat des prochaines décennies. Le découpage dynamique/physique est un modèle qui nous donne à penser et comprendre le climat. Le travail sur ces modèles dans toutes ses dimensions, physique, numérique et informatique n'est pas prêt de s'éteindre. Ces modèles sont aussi un formidable outil de transmission. L'équipe est en pointe sur l'enseignement universitaire, par et pour la modélisation, avec le déploiement de versions ultra légères du même modèle. S'approprier toutes ces dimensions ne va pas sauver la planète, mais peut sûrement participer à appuyer, anticiper et penser les transformations nécessaires.

## Références

1. Balaji, V. *et al.* Are General Circulation Models Obsolete? *accepted in Proceedings of the National Academy of Science* (2022).
2. Hourdin, F. *et al.* The Art and Science of Climate Model Tuning. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **98**, 589–602 (2017).
3. Vignon, É. *et al.* Designing a Fully-Tunable and Versatile TKE-1 Turbulence Parameterization for the Simulation of Stable Boundary Layers. *J. of Adv. in Modeling Earth Systems* **16**, e2024MS004400 (2024).
4. Hourdin, F. *et al.* Toward machine-assisted tuning avoiding the underestimation of uncertainty in climate change projections. *Science Advances* **9**, eadf2758 (2023).
5. Villefranque, N. *et al.* The “teapot in a city” : A paradigm shift in urban climate modeling. *Science Advances* **8** (2022).
6. Rochetin, N., Couvreux, F., Grandpeix, J.-Y. & Rio, C. Deep Convection Triggering by Boundary Layer Thermals. Part I : LES Analysis and Stochastic Triggering Formulation. *J. Atmos. Sci.* **71**, 496–514 (2014).

7. Rio, C., Del Genio, A. D. & Hourdin, F. Ongoing breakthroughs in convective parameterization. *Curr. Clim. Change Rep.* **5**, 95–111 (2019).