

# e-Lettre CLIMERI-France N°1

Novembre 2020

## DANS CE NUMERO

*CMIP6 : la production  
et après ?*

• 2 •

*CMIP6 : modèles  
et simulations*

• 3 •

*CMIP6 : réponses  
atelier Bordeaux*

• 5 •

*CMIP6 : l'écho  
des MIPs*

• 9 •

*CORDEX*

• 27 •

*Projets dans lesquels  
CLIMERI est impliqué*

• 30 •

*L'écho des services  
de modélisation  
labellisés et des GDR  
rattachés à CLIMERI*

• 34 •

## L'édito du Conseil Scientifique

C'est avec un grand plaisir que nous lançons ce premier numéro de la e-Lettre CLIMERI-France. Nous remercions toutes les personnes ayant répondu à notre appel. Leurs contributions montrent la richesse des activités de modélisation du climat et de ses changements et la forte implication de la communauté française dans la réalisation et l'exploitation scientifique des simulations climatiques de référence à l'échelle globale et régionale. L'infrastructure de recherche CLIMERI s'est mise en place alors que l'exercice de modélisation CMIP6 était lancé par le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC). Elle a permis de consolider les relations entre les groupes de modélisation du climat initiées dans le projet MissTerre du programme national LEFE de l'INSU à l'échelle nationale. La mise en place de la plateforme nationale d'analyse, montée en partenariat avec le centre de calcul de l'IDRIS, représente une première réalisation concrète de ce qu'apporte l'infrastructure de recherche CLIMERI à la communauté nationale de recherche sur le climat. Les simulations CMIP6 peuvent être considérées comme une grande campagne numérique à l'échelle internationale où chaque pays apporte ses moyens et l'ensemble des groupes partage l'analyse. Les groupes de modélisation, les calculateurs de Météo-France et du TGCC ont été mobilisés ainsi que de nombreux collègues pour les analyses. Il semblait donc naturel d'ouvrir cette première e-Lettre par une synthèse de l'activité CMIP6 en cours, de façon à faire écho à la [conférence de presse du 17 septembre 2019](#) qui avait diffusé à un large public les premiers résultats des simulations réalisées avec les modèles du CNRM-Cerfacs et de l'IPSL. Les contributions montrent également comment les activités françaises s'insèrent dans le réseau européen.

Les actions menées par l'infrastructure CLIMERI ne concernent pas seulement les simulations CMIP6. Les simulations régionales du projet CORDEX sont aussi à l'honneur avec l'arrivée de nouvelles simulations attendues pour affiner les informations climatiques à l'échelle des régions du monde et faire le lien avec de nombreuses questions d'adaptation au changement climatique. Les publications issues de ces simulations sont également une source d'information pour les auteurs du 6ème rapport du GIEC. L'ensemble de ces résultats et l'accès aux simulations n'existeraient pas sans le développement continu des modèles, du point de vue des contenus scientifiques, des performances informatiques et de leur implémentation sur les gros calculateurs. Ils n'existeraient pas non plus sans le développement des bases de données et de l'ensemble des outils et logiciels permettant d'en partager l'exploitation. Quelques contributions à cette e-Lettre font aussi état de ces aspects. Elles mettent en relief des aspects directement portés par CLIMERI et d'autres pour lesquels CLIMERI apporte les éléments d'infrastructure sur lesquels s'appuient à la fois le développement des composantes des modèles et des activités scientifiques plus focalisées sur l'un des compartiments du système climatique, comme le GDR DEPHY pour la physique des modèles d'atmosphère.

Nous espérons que cette e-Lettre atteindra son public et vous en souhaitons une bonne lecture.

Le CS CLIMERI, Novembre 2020

# CMIP6 :

## La production et après ?

*D. Salas y Melia, O. Boucher, S. Joussaume et P. Braconnot*

Le Programme d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP) a été créé il y a plus de vingt ans par le Programme mondial de recherches sur le climat (PMRC). Ce projet a pour objectif de favoriser la coopération internationale entre les centres de modélisation du climat et de définir des expériences numériques standards qui facilitent la comparaison des résultats et conduisent in fine à une meilleure compréhension du système climatique. Le projet s'est considérablement développé avec cinq phases successives, passant d'une seule expérience en 1995 (CMIP1) à plus de deux cents expériences dans la phase CMIP6.

La phase CMIP6 a démarré en 2014, à l'issue de la publication du 5ème rapport du GIEC (IPCC, 2014). Elle s'est organisée autour de 3 grandes questions scientifiques : i) Comment le système climatique répond-il aux différentes perturbations externes ? ii) Quelles sont les origines et les conséquences des biais systématiques des modèles ? iii) Comment peut-on avoir une meilleure estimation du changement climatique tenant compte de la variabilité intrinsèque, de la prévisibilité du système et des incertitudes sur les scénarios ?

Cette phase CMIP6 s'appuie sur 21 projets d'intercomparaison (MIP) contribuant aux 7 grands défis du PMRC : Nuages, circulation et sensibilité climatique ; Changements affectant la cryosphère ; Extrêmes climatiques ; Disponibilité en eau ; Montée de la mer à l'échelle régionale ; Prévision décennale et forçage biogéochimiques et rétroactions.

L'IPSL, le CNRM et le CERFACS se sont engagés dans cet effort international pour fournir cette nouvelle génération d'expériences numériques sur le changement climatique, qui a nécessité le développement d'une nouvelle génération de modèles de climat avec IPSL-CM6A-LR et CNRM-CM6-1. Ceux-ci comportent de nombreuses améliorations dans la représentation du système climatique de la Terre ainsi qu'une meilleure résolution spatiale.

La contribution française pour CMIP6 peut être résumée en quelques chiffres :

- plus de 600 millions d'heures de calcul mises à disposition par le Genci (TGCC-CEA et IDRIS-CNRS pour les modèles de l'IPSL) et par Météo-France (modèles du CNRM-Cerfacs) avec un support utilisateur très réactif,
- 100 000 ans de climat simulé produits 24 heures/24 et 7 jours/7 pendant plus d'un an,
- la production de 20 pétaoctets de données climatiques,
- une centaine de scientifiques impliqués.

La gestion des données climatiques générées par CMIP6 est cruciale. Les jeux de données, hébergés à l'IPSL et à Météo-France, sont mis gratuitement à la disposition de tous via le réseau de distribution de données appelé Earth System Grid Federation. Ils permettent à une large communauté nationale et internationale de chercheurs d'analyser et d'examiner les résultats. En France, le mésocentre ESPRI offre une plateforme d'analyse des simulations CMIP6 ouverte à toute la communauté française, avec des espaces de stockage importants à l'IDRIS et au TGCC et un réseau haut débit de 10 Gb/s qui les relie aux serveurs de l'IPSL. La mise en place de cette plateforme d'analyse commune a constitué une étape importante dans le développement des services de l'infrastructure de recherche CLIMERI. Elle matérialise les nombreuses interactions entre les chercheurs des différents organismes impliqués et la volonté de faire bénéficier de nombreuses thématiques de l'expertise des groupes de modélisation développant les modèles, les protocoles expérimentaux, les simulations et les diagnostics de premier niveau.

Après une phase intense de développement des modèles et de production, s'ouvre une nouvelle phase d'analyse des résultats. On retrouvera les premières publications de description et d'évaluation des modèles et des simulations dans deux numéros spéciaux :

- The IPSL climate model used in CMIP6, JAMES special collection.
- The CNRM climate model and Earth System models for CMIP6, JAMES special collection.

Au-delà de ces articles de description et d'évaluation, de nombreuses publications issues des groupes de modélisation français sont déjà citées dans le 6e rapport d'évaluation du GIEC. Les articles suivants donnent un aperçu des collaborations internationales dans les différents MIPs (Model Intercomparison Projects) et de la complémentarité des nombreuses thématiques abordées. Pendant la décennie à venir, la base de données CMIP6, d'une richesse sans précédent, alimentera de nombreuses études scientifiques, la modélisation régionale du climat et servira aussi de base aux services climatiques en appui

à la décision face au changement climatique et ses impacts.

### Références

(Ces 2 publications sont d'un accès restreint. Pour y avoir accès, copier et coller l'url dans votre navigateur web)

- › The IPSL climate model used in CMIP6, JAMES special collection. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/%28ISSN%291942-2466.IPSLMOD1%20>
- › The CNRM climate model and Earth System models for CMIP6, JAMES special collection. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/toc/10.1002/%2528ISSN%25291942-2466.CNRMCLIMATE>

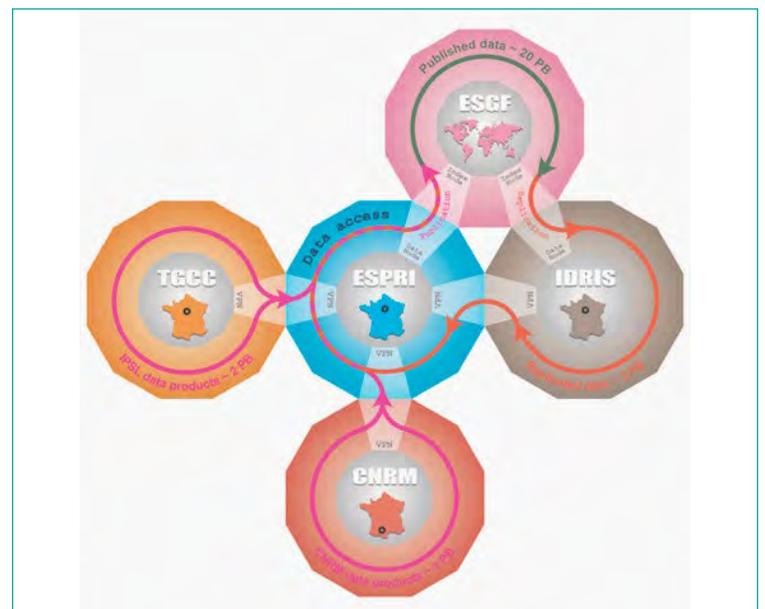
## CMIP6 : Modèles et simulations

### Plateforme d'analyse multi-modèles

*G. Levavasseur*

En s'appuyant sur les ressources et services numériques de l'IPSL (appelés ESPRI), l'infrastructure de recherche CLIMERI-France propose une plateforme d'analyse multi-modèles : ESPRI-MOD. A travers ESPRI-MOD, les utilisateurs et partenaires de CLIMERI-France peuvent accéder à un ensemble de données issues des simulations climatiques globales et régionales de référence qui alimentent les exercices internationaux CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) et CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling EXperiment). Cette plateforme multi-sites est construite en étroite collaboration avec les centres HPC partenaires (TGCC et IDRIS). Via une architecture réseau haut-débit, les utilisateurs d'ESPRI peuvent accéder de façon simple et directe (i) à l'intégralité des données de simulations climatiques produites par l'IPSL (soit 2Po de données hébergées au TGCC) et (ii) à un sous-ensemble de données multi-modèles téléchargées depuis la plateforme internationale ESGF (Earth System Grid Federation) à l'IDRIS (soit 1Po de données hors-IPSL disponibles). ESPRI offre également la possibilité d'agrémenter cette base de données multi-modèles à la demande.

En participant au projet GAIA-DATA, CLIMERI-France souhaite renforcer l'accès aux données du CNRM en construisant un lien réseau dédié vers ESPRI (cf. Figure). Elle permettra également à ESPRI-MOD de se doter de nouveaux services et technologies de recherche et d'exploitation interopérables avec les données d'observation du système Terre (données satellitaires, campagnes, etc.).



## CMIP6 : De la production à la publication de données

*M.-P. Moine, G. Rigoudy et G. Levavasseur*

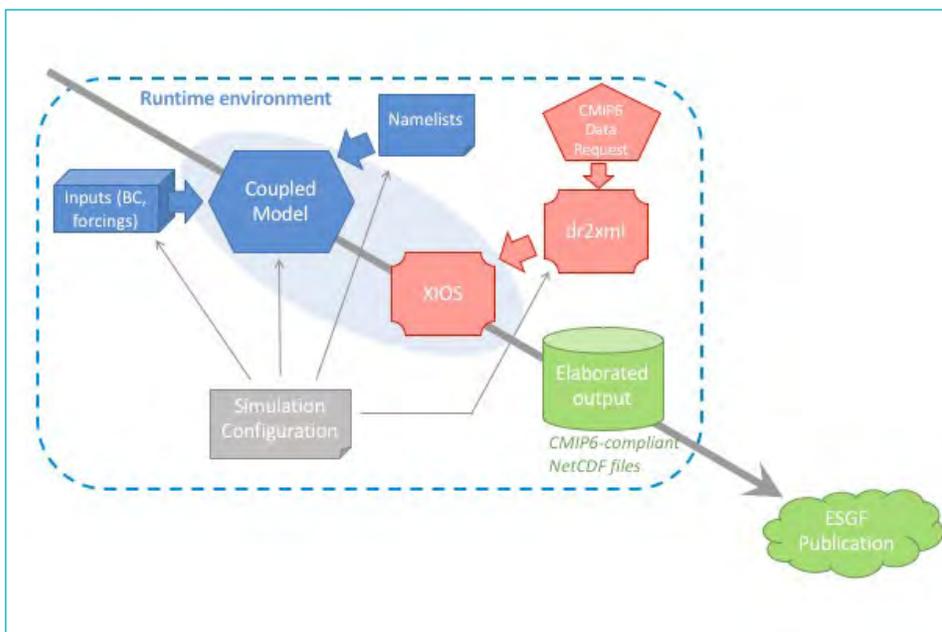
Avec CMIP6, l'exercice d'intercomparaison de modèles climatiques a atteint une dimension et une complexité sans précédent : nombre de simulations à réaliser, quantité et diversité des variables à produire selon les objectifs scientifiques visés par chaque expérience numérique (Data Request), exigences en termes de format de fichiers et de métadonnées. Les chaînes de production et de gestion/traitement de la donnée (workflows) ont dû être entièrement revisités pour permettre ce passage à l'échelle.

Pour les modèles de l'IPSL et du CNRM-CERFACS, deux outils ont joué un rôle déterminant : le serveur d'entrée-sortie de l'IPSL "XIOS", et un logiciel python, "dr2xml", permettant de créer les fichiers de configurations nécessaires à XIOS. "dr2xml" a été développé spécifiquement par le CNRM-CERFACS pour les besoins de l'exercice CMIP6 : il permet de configurer automatiquement XIOS selon la Data Request, et ce pour chaque simulation. XIOS, interfacé dans chacune des composantes des modèles (atmosphère, océan, surfaces continentales, glace

de mer, fleuves et rivières) a permis de produire les données standardisées, c'est-à-dire directement au format attendu par CMIP6 et de s'affranchir ainsi des anciennes chaînes de post-traitement. De nouvelles fonctionnalités ont notamment été implémentées dans XIOS pour effectuer, à la volée, sur les variables de sorties de modèle, les opérations requises par la Data Request.

L'ensemble des simulations réalisées représente plus de 110 000 ans de climat simulé et ont requis 670 Millions d'heures de calcul sur les plateformes de calcul haute performance : 330 Mh sur les super-calculateurs Curie et Joliot-Curie du TGCC-CEA et Ada de l'IDRIS-CNRS pour les modèles IPSL-CM6, et 340 Mh sur le calculateur Beaufix de Météo-France pour le CNRM-CERFACS, dont la configuration haute résolution CNRM-CM6-HR et la configuration "système terre" CNRM-ESM2.

Après une étape de contrôle qualité (qui permet de vérifier que les données ne sont pas corrompues et en conformité avec les standards exigés), les données produites par les modèles de l'IPSL et du CNRM-CERFACS sont mises à la disposition des utilisateurs, via le réseau ESGF (Earth System Grid Federation), une grille mondiale de données distribuées. A ce jour, nos deux centres ont publié près de 800 000 jeux de données pour plus de 2 000 simulations, ce qui représente un total de 1.5 Po. In fine, ce sont environ 2.3 Po attendus sur l'ESGF, soit pratiquement 5 fois l'exercice CMIP5.



*Vue simplifiée du nouvel environnement de modélisation utilisé pour CMIP6 à l'IPSL et au CNRM-CERFACS.*

*Le serveur d'entrée/sortie XIOS (IPSL) et l'outil dr2xml (CNRM) permettent de produire des fichiers netCDF directement conformes aux standards CMIP6 (compatibles CMOR3), évitant les étapes lourdes de post-processing pour calcul de diagnostics dérivés et réécriture des fichiers.*

# CMIP6 :

## Premières réponses aux questions identifiées lors de l'atelier CMIP6, Bordeaux – mai 2019

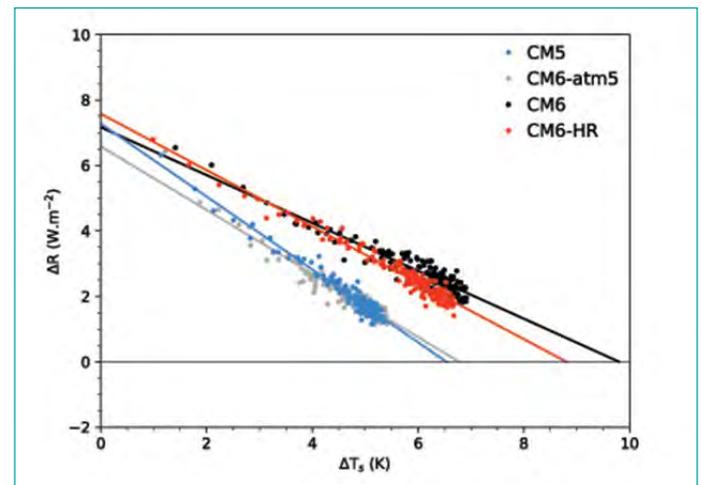
### Sensibilité climatique : quelles pistes pour expliquer son augmentation dans CNRM-CM ?

A. Voldoire et D. Saint-Martin

Comme dans d'autres modèles développés pour CMIP6, CNRM-CM6-1 présente une sensibilité climatique accrue par rapport à son prédécesseur CNRM-CM5.1. La sensibilité climatique à l'équilibre (ECS) est passée de 3.3°C à 4.9°C. Des expériences de sensibilité ont permis de montrer que cette augmentation d'ECS s'explique quasi-exclusivement par le changement des paramétrisations de la physique atmosphérique. L'effet des changements de paramétrisation des surfaces continentales sur la sensibilité climatique est négligeable. Entre la version CNRM-CM5.1 et CNRM-CM6-1, les changements de paramétrisations atmosphériques ont été nombreux. Le modèle repose maintenant sur une représentation pronostique des hydrométéores mais les schémas de turbulence et de convection ont également été changés. Des expériences de sensibilité additionnelles, en mode atmosphère seule, ont permis de mettre en avant l'effet important du changement de la paramétrisation de la convection atmosphérique, en passant du schéma de Bougeault (1989) au schéma PCMT (Piriou *et al.*, 2007 ; Guérémy, 2011). Le changement de schéma de convection entraîne une augmentation nette de la rétroaction positive du rayonnement infra-rouge sur la sensibilité climatique.

#### Références

- Bougeault, P., and Lacarrère, P. (1989) Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. Monthly Weather Review, 117(8), 1872–1890 [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2)
- Piriou, J.-M., *et al.* (2007) An approach for convective parameterization with memory: Separating microphysics and transport in grid-scale equations. Journal of the Atmospheric Sciences, 64(11), 4127–4139. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2144.1>
- Guérémy, J. F. (2011) A continuous buoyancy based convection scheme: One- and three-dimensional validation. Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 63(4), 687–706. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x>

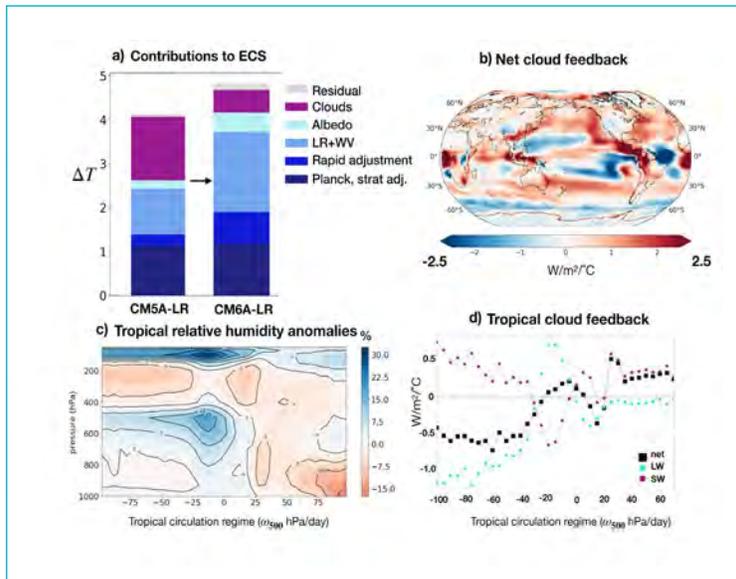


Évolution conjointe de la température moyenne globale en surface ( $\Delta T_s$ , unité K) et du déséquilibre radiatif net au sommet de l'atmosphère ( $\Delta R$ , unité:  $W m^{-2}$ ) dans des expériences abrupt-4xCO<sub>2</sub> pour différentes versions du modèle CNRM-CM : CNRM-CM5.1 (bleu), CNRM-CM6-atm5 (gris), CNRM-CM6-1 (noir) et CNRM-CM6-1-HR (rouge). Dans la configuration CNRM-CM6-atm5, seule la composante atmosphérique est modifiée par rapport à CNRM-CM6-1. Elle correspond à la composante atmosphérique de CNRM-CM5.1.

## Sensibilité climatique plus élevée dans l'IPSL-CM6A-LR que dans l'IPSL-CM5A-LR

A. L. Albright

La sensibilité climatique augmente de 4,0 à 4,5 K entre IPSL-CM5A-LR et l'IPSL-CM6A-LR. Nous calculons la sensibilité climatique (ECS) à partir des anomalies radiatives et de température en utilisant 150 ans de l'expérience *abrupt 4xCO<sub>2</sub>*, à la manière de Gregory (2004). Les principaux facteurs de cette plus grande sensibilité climatique dans l'IPSL-CM6A-LR sont des ajustements troposphériques rapides au CO<sub>2</sub> plus positifs et une rétroaction du lapse rate et de la vapeur d'eau plus forte (Fig. 1a). La rétroaction plus forte de la vapeur d'eau résulte principalement de fortes tendances à l'humidification dans les régimes de faible ascendance autour de 500 hPa (Fig. 1c), où les anomalies de l'humidité relative atteignent jusqu'à 15 %. Il a toutefois été démontré que le modèle IPSL-CM6A-LR est trop humide dans l'atmosphère tropicale par rapport aux données ERA-Interim (Boucher *et al.*, 2020, Fig. 4).



l'humidité relative tropicale en fonction de la pression atmosphérique (hPa) et du régime de circulation, diagnostiquées par la vitesse de la pression verticale,  $\omega_{500}$  en hPa jour<sup>-1</sup>. (c) Distribution de la rétroaction nette des nuages (en  $Wm^{-2} K^{-1}$ ) pour IPSL-CM6A-LR. (d) Réaction nette des nuages tropicaux (en  $Wm^{-2} K^{-1}$ ) en fonction du régime de circulation tel que diagnostiqué par la vitesse de la pression verticale,  $\omega_{500}$  en hPa jour<sup>-1</sup>. Les deux derniers diagnostics sont calculés sur l'océan tropical (30°N à 30°S).

La rétroaction nette des nuages, en revanche, est moins positive dans CM6A que dans la version précédente du modèle. La compensation des rétroactions positives et négatives dans les tropiques donne lieu à une rétroaction nuageuse tropicale moins positive (Fig. 1b, rétroaction nuageuse calculée à partir de la méthode des noyaux). Pour interpréter la discontinuité spatiale entre les régions de rétroactions nuageuses positives et négatives, nous projetons la rétroaction nuageuse nette dans la base  $\omega_{500}$  (vitesse verticale à 500 hPa), de manière analogue à ce qui a été fait pour les anomalies d'humidité relative (Bony *et al.*, 2004). Sur la base de cette décomposition, les régions de rétroaction nuageuse positive peuvent être liées à des régimes de faible ascendance [-20, 0 hPa/jour] et à des régimes de subsidence modérée à forte [25, 100 hPa/jour] (Fig. 1d). En revanche, les rétroactions nuageuses nettes négatives se produisent dans les régimes de convection profonde et dans une partie des régimes de faible subsidence. La distribution du facteur de rétroaction des nuages confirme que des valeurs positives sont trouvées dans les régions de subsidence à grande échelle, qui couvrent de grandes parties de l'océan tropical et sont associées aux nuages de la couche limite marine tels que le stratocumulus et les cumulus peu profonds (e.g. Bony et Dufresne 2005). En revanche, des valeurs négatives de rétroaction des nuages se produisent dans les régions de convection profonde, comme la Western Pacific Warm Pool. Une rétroaction négative se produit également au-dessus de l'océan Austral, qui pourrait résulter de changements de phase ou de changements thermodynamiques des nuages avec le réchauffement (e.g. Ceppi *et al.*, 2016). Ce schéma de rétroaction nuageuse pourrait être lié à ce qu'on appelle le «SST pattern effect» (e.g. Zhou *et al.*, 2016, Dong *et al.*, 2019) et mérite une étude plus approfondie.

(a) Diagramme à barres montrant les contributions relatives (en K) à l'ECS de l'ajustement stratosphérique, des ajustements rapides troposphériques, du taux de recouvrement combiné et de la vapeur d'eau (LR+WV), de l'albédo de surface et des rétroactions nuageuses pour les modèles IPSL-CM5A-LR et IPSL-CM6A-LR. Le terme résiduel est dû à des non-linéarités dans les termes de rétroaction. (b) Anomalies de

## Références

- > Gregory, JM, *et al.* (2004) A new method for diagnosing radiative forcing and climate sensitivity. *Geophysical Research Letters*, vol 31 (3), <https://doi.org/10.1029/2003GL018747>
- > Bony, S., *et al.* (2004) On dynamic and thermodynamic components of cloud changes, *Climate Dynamics*, vol 22 : 71–86. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-003-0369-6>
- > Bony, S. and Dufresne, J.-L. (2005) Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in climate models. *Geophysical Research Letters*, vol 32 (20) <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL023851>
- > Ceppi, P., *et al.* (2016) Mechanisms of the negative shortwave cloud feedback in middle to high latitudes. *J. Climate*, vol 29 (1) : 139-157, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0327.1>
- > Zhou, *et al.* (2016) Impact of decadal cloud variations on the Earth's energy budget. *Nature Geoscience*, vol 9 (12) : 871-874 <https://www.nature.com/articles/ngeo2828>
- > Dong, Y., *et al.* (2019) Attributing historical and future evolution of radiative feedbacks to regional warming patterns using a green's function approach: The preeminence of the Western Pacific. *J. Climate* vol 32 (17) : 5471-5491. <https://journals.ametsoc.org/jcli/article/32/17/5471/343956/>
- > Boucher, O., *et al.* (2020) Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol 12, (7) : 1-52. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>

## Variabilité multi-décennale : Le défi lancé par la variabilité centennale à multi-centennale des modèles climatiques

G. Gastineau, C. Cassou, J. Mignot et D. Swingedouw

Une des caractéristiques émergentes des versions CMIP6 des modèles de climat de l'IPSL et du CNRM est la présence d'une forte variabilité centennale à multi-centennale dans l'Atlantique Nord (voir la figure). Cette variabilité, d'origine interne ou spontanée, a une signature sur l'ensemble de l'hémisphère Nord et contrôle une fraction importante de la variance de la température globale.

Pourquoi une telle variabilité représente-t-elle un défi pour la communauté ? Sur la période instrumentale, de 1850 à aujourd'hui, elle pose des questions en termes de détection-attribution du réchauffement climatique observé, en particulier aux échelles régionales (Atlantique et continents adjacents), le niveau de variabilité interne étant de facto élevé en comparaison à la réponse forcée estimée par les deux modèles. De plus, la période instrumentale est insuffisante pour

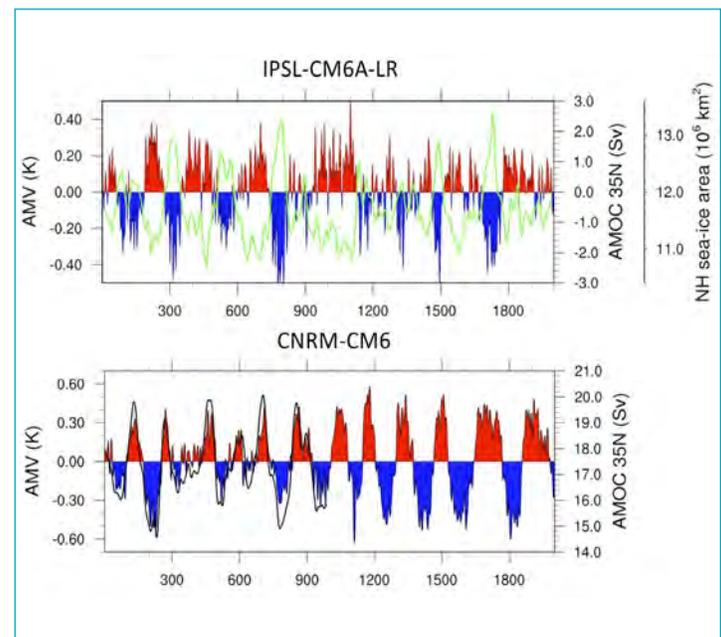


Illustration de la variabilité centennale à multi-centennale d'origine interne dans une simulation préindustrielle de 2 000 ans de IPSL-CM6A-LR (**haut**) et CNRM-CM-6-1 (**bas**). (Couleur) Indice de la variabilité multi-décennale Atlantique (AMV), en K. L'AMV est définie ici comme la moyenne annuelle de SST entre 0 et 60°N dans l'Atlantique. (Noir) Intensité de la circulation de retournement Atlantique à 35°N, en Sv (millions m<sup>3</sup>/s). (Vert) Surface de la banquise dans l'hémisphère Nord, en millions de km<sup>2</sup>.

juger du réalisme de cette variabilité multi-centennale. Seules les reconstructions paléo-climatiques peuvent permettre de conclure sur cette question, mais elles nécessitent d'être en nombre suffisant pour que leur signal climatique soit robuste.

Cette variabilité est forte au regard de l'ensemble des simulations produites dans le cadre de CMIP6 et il est perturbant que cette variabilité soit présente dans les deux modèles français, qui par ailleurs partagent le même code de modèle océanique. Des études en cours au LOCEAN montrent que, pour IPSL-CM6A-LR, cette variabilité est induite par des anomalies de salinité dans l'Atlantique Nord. Ces anomalies sont initialement générées via un stockage lent d'eau douce en sub-surface dans l'Arctique lorsque l'AMOC est intense, et lorsque la banquise Arctique est peu étendue. Quand la quantité d'eau douce dans l'Arctique atteint un seuil, celle-ci, soudainement, se déverse

dans l'Atlantique Nord induisant un changement de la position et de l'intensité des courants océaniques principaux contrôlant les transports de chaleur méridiens affectant ainsi l'ensemble de l'équilibre énergétique planétaire et donc la température globale. Ces changements entraînent en retour un affaiblissement de l'AMOC et engendrent la phase opposée de la variabilité.

De tels échanges entre Arctique et Atlantique sont-ils réalistes ? Une telle variabilité a-t-elle déjà été observée dans les enregistrements paléoclimatiques ? Ces mécanismes sont-ils également à l'œuvre dans CNRM-CM6 et les autres modèles de climat utilisant NEMO-ORCA1 et si oui pourquoi ? Ces questions sont l'objet de plusieurs recherches en cours.

## CMIP6 : L'écho des contributions françaises dans les différents MIPs

### AerChemMip : Projet d'intercomparaison des modèles d'aérosols et de chimie

#### Interactions chimie-climat en troposphère et stratosphère

Le projet d'intercomparaison des modèles de chimie et d'aérosols (AerChemMIP) est conçu pour quantifier les impacts des aérosols et des gaz chimiquement réactifs sur le climat. Il s'agit en particulier des forçeurs climatiques de courte durée (SLCF : méthane, ozone troposphérique et aérosols, et leurs pré-curseurs), du protoxyde d'azote et des composés halogénés qui appauvrissent la couche d'ozone. AerChemMIP regroupe entre autres les activités d'AeroCom (Aerosol Comparisons between Observations and Models) et de CCMI (Chemistry-Climate Modelling Initiative), plutôt centrées sur la stratosphère. L'objectif d'AerChemMIP est de répondre à quatre questions scientifiques

1. Comment les émissions anthropiques d'aérosols et de gaz chimiquement réactifs ont contribué au forçage

radiatif global et affecté le climat régional au cours de la période historique ?

2. Comment les politiques futures (sur le climat, la qualité de l'air et l'utilisation des terres) pourraient-elles affecter l'abondance des SLCF et leurs impacts sur le climat ?
3. Comment les incertitudes liées aux émissions historiques des SLCF peuvent-elles être mises en correspondance avec les changements de l'ère préindustrielle à nos jours ?
4. Quelle est l'importance des rétroactions du climat sur les émissions naturelles de SLCF, la composition de l'atmosphère et le forçage radiatif ?

Ces questions sont traitées par des simulations ciblées avec les modèles climatiques CMIP6 qui comprennent une représentation interactive des aérosols et de la chimie atmosphérique.

#### Simulations couplées chimie-aérosols-climat à l'aide du modèle IPSL-CM5A2-VLR-INCA de l'IPSL

*D. Hauglustaine, A. Cozic, J. Lathière, A. Caubel et P. Sepulchre*

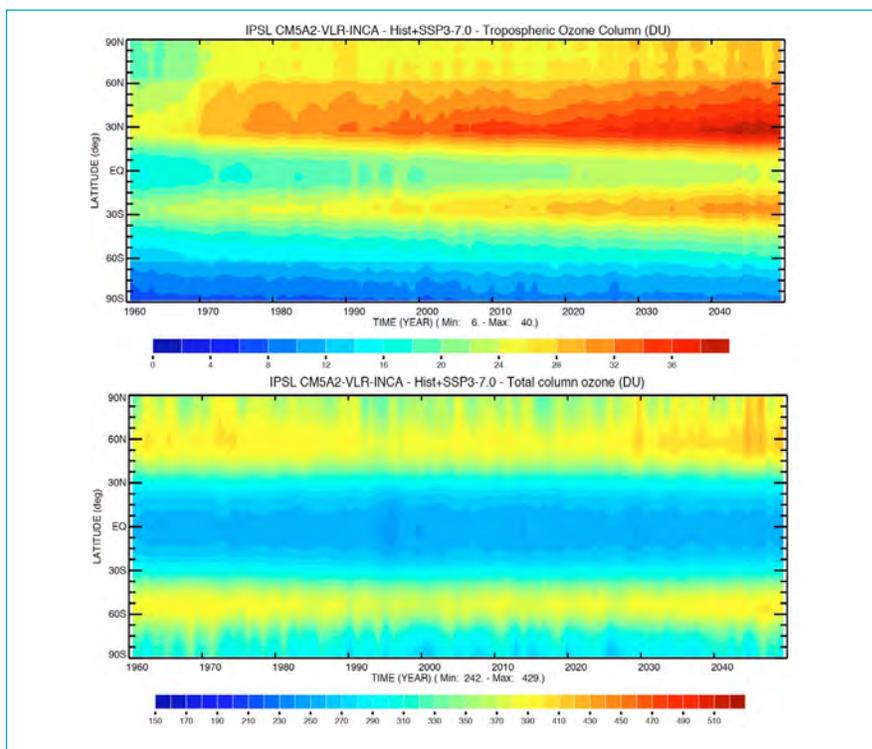
Le modèle de chimie atmosphérique et d'aérosols INCA a été couplé au modèle de l'IPSL CM5A2 pour effectuer plusieurs simulations dans le cadre du programme AerChemMIP. Pour ces simulations, c'est la version IPSL-CM5A2-VLR du modèle couplé de l'IPSL qui a été choisie en particulier pour permettre une utilisation à plus basse résolution horizontale (96x95) et verticale (39 niveaux), tout en gardant l'ancienne physique du modèle LMDz, bien évaluée pour nos simulations avec chimie et aérosols. C'est

également une version du modèle en phase avec les travaux effectués en paléoclimatologie, un autre intérêt pour des simulations des climats anciens demandant également la prise en compte de la chimie et des aérosols.

Pour les simulations effectuées pour CMIP6 dans le cadre du programme AerChemMIP, nous avons utilisé une version du modèle INCA incluant à la fois la chimie de l'ozone dans la troposphère et dans la stratosphère ainsi que les différents types d'aérosols troposphériques. Au total, ce sont 160 espèces chimiques et aérosols qui sont prises en compte, transportées par la dynamique atmosphérique, éliminées de l'atmosphère par dépôt au sol ou par les précipitations et transformées chimiquement dans l'atmosphère par 500 réactions chimiques. De plus, un module d'émissions permet au modèle de végétation ORCHIDEE de calculer les émissions biogéniques de composés organiques volatils qui alimentent ensuite la production photochimique d'ozone et la formation d'Aérosols Organiques Secondaires. Un couplage étroit est ainsi réalisé entre la biosphère, la chimie atmosphérique, les aérosols, et leurs interactions avec le rayonnement solaire et infrarouge dans LMDz, perturbant ainsi le climat.

Comme il s'agit d'une nouvelle configuration du modèle couplé de l'IPSL, il a été nécessaire d'effectuer les simulations imposées dans le cadre du DECK (en particulier *abrupt-4xCO<sub>2</sub>* et *1pctCO<sub>2</sub>*, des simulations de type AMIP ayant déjà été effectuées dans d'autres cadres de recherche). Par la suite nous avons effectué une simulation historique 1850-2014, poursuivie jusqu'en 2050 par deux simulations futures suivant les scénarios SSP3-7.0 et SSP1-2.6. Pour ces différentes simulations, l'évolution des émissions anthropiques de précurseurs des aérosols et de l'ozone sont imposées d'après les cadastres d'émissions CEDS pour le passé, SSP pour le futur. Plusieurs autres simulations sont actuellement en préparation pour étudier notamment les effets distincts des aérosols, des précurseurs de l'ozone troposphérique et des gaz destructeurs de l'ozone stratosphérique sur l'évolution de la composition chimique et le climat. Notons que ces simulations demandant beaucoup de temps de temps calcul, une seule réalisation est effectuée pour chaque expérience.

A titre d'exemple, la figure illustre l'évolution temporelle sur la période 1960-2050 de la colonne intégrée de l'ozone dans la troposphère et de la colonne totale d'ozone intégrée sur toute l'atmosphère et obtenue en combinant la simulation historique et la simulation future SSP3-7.0. Les résultats sont moyennés par année et sur la longitude. Sous l'effet des émissions anthropiques de précurseurs (NO<sub>x</sub>, CO, hydrocarbures), le contenu en ozone dans la troposphère augmente de manière presque continue sur la période au-dessus des régions continentales dans l'hémisphère Nord ainsi que dans les tropiques sous l'action des émissions par la combustion de la biomasse (figure du haut). Le contenu total en ozone fait, lui, apparaître un minimum au-dessus du continent Antarctique à partir de 1980, correspondant à l'apparition annuelle du « trou » dans la couche d'ozone. A partir de 2040, et avec la diminution du contenu en chlore dans la stratosphère, le contenu en ozone dans ces régions revient à des valeurs « pré-1980 ». Les études sont actuellement en cours pour finaliser les différentes simulations prévues et pour analyser l'ensemble de ces résultats.



Evolution temporelle (1960-2050) de l'ozone troposphérique (**haut**) et de l'ozone total (**bas**) simulés à l'aide du modèle IPSL-CM5A2-VLR-INCA dans le cadre de AerChemMIP. Les contenus en ozone intégrés sur la verticale sont moyennés sur la longitude et annuellement. Unités : DU (Dobson Unit ; 1DU = 2.687x10<sup>16</sup> molécules/cm<sup>2</sup>).

## Participation de l'IPSL aux simulations d'AerChemMIP

R. Checa-Garcia, A. Cozic, Y. Balkanski et O. Boucher

En plus de la version du modèle INCA (Interactions entre Chimie et Aérosols) décrite par D. Hauglustaine, une seconde version du modèle INCA a été utilisée pour participer au programme AerChemMIP. Il s'agit du modèle ayant une chimie simplifiée et des aérosols interactifs, qui est couplé au modèle de l'IPSL IPSL-CM6.1 avec 79 niveaux verticaux et une résolution horizontale de 144x142. Cette version permet d'évaluer le forçage radiatif des aérosols et des gaz réactifs pour le présent, ainsi que les rétroactions qu'ils produisent.

Nous participons à 2 publications AerChemMIP (cf. Références) qui incluent les résultats de ce modèle et pour lesquels nous avons aidé à l'analyse des aérosols minéraux et fourni des simulations permettant d'analyser le rôle des aérosols.

## Simulations couplées chimie-climat stratosphériques à l'aide du modèle LMDz-REPROBUS de l'IPSL

M. Marchand, L. Falletti, D. Cugnet, F. Lefevre, S. Bekki

Plusieurs simulations sur l'évolution de la stratosphère ont été réalisées avec le modèle de l'IPSL contenant un module de chimie stratosphérique interactive (IPSL-LMDz-REPROBUS). Ces données se trouvent sur la base de données du programme CCMI et ont déjà été utilisées dans des intercomparaisons avec les autres modèles de Chimie-Climat (Morgenstern *et al.*, 2017), des analyses et évaluations par des comparaisons avec des observations (e.g. Dohmse *et al.*, 2018 ; Ayarzagüena *et al.*, 2018 ; Amos *et al.*, 2020). La figure présente un exemple de résultats sur l'évolution du phénomène du «trou d'ozone» (colonne d'ozone en Antarctique en Octobre).

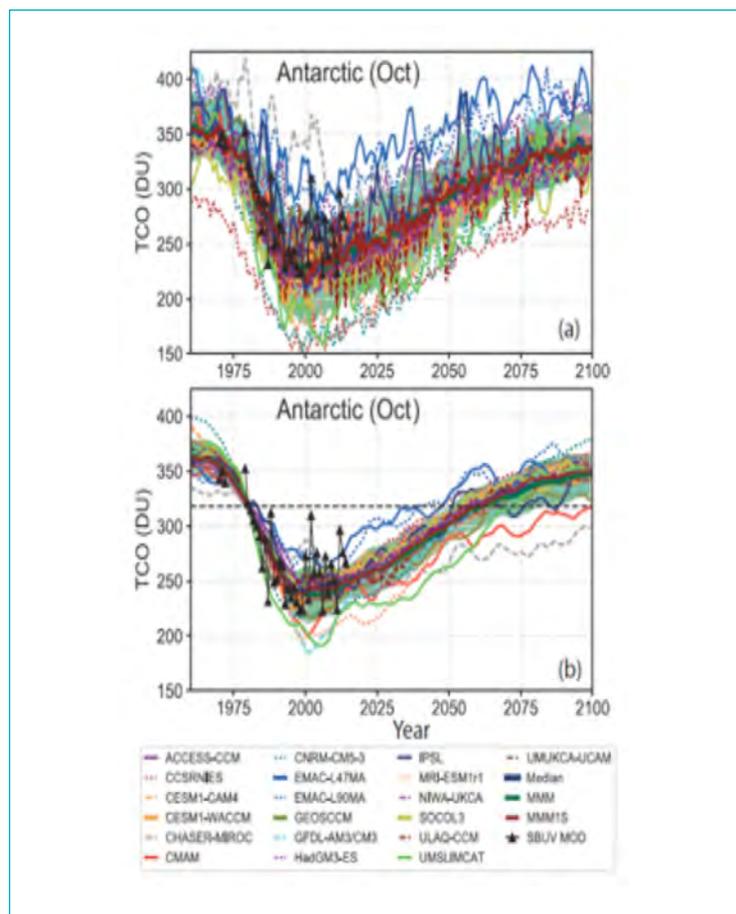
**(a)** Séries temporelles de la colonne totale d'ozone (DU) Antarctique en octobre issues de 19 modèles de chimie-climat pour les simulations REF-C2 ainsi que des observations du jeu de données fusionnées SBUV-MOD. Les différents types de moyennes des modèles (MMM, MedM et MMM1S) sont représentés par des lignes épaisses vertes, bleues et rouges, respectivement. Le panneau **(b)** est presque identique au panneau **(a)** excepté que chaque série d'ozone est ajustée selon son biais par rapport aux observations moyennes de 1980-1984 et lissée sur une fenêtre glissante à 10 points [Tiré de : Dohmse *et al.*, 2018]

Nos résultats sur le forçage radiatif effectif des aérosols sont cohérents avec ceux calculés pour les modèles CNRM-ESM2 et GFDL-ESM4, bien que les comparaisons multi-modèles montrent des différences relatives sur le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et le carbone suie (BC).

Nous projetons de réaliser également des simulations pour les scénarios SSP qui permettront d'évaluer les forçages radiatifs effectifs futurs.

### Références

- Thornhill, G. *et al.* (2019) Effective Radiative Forcing from emissions of reactive gases and aerosols - a multimodel comparison. Journal ACP, in review. <https://doi.org/10.5194/acp-2019-1205>
- Thornhill, G. *et al.* (2019) Climate-driven chemistry and aerosols feedbacks in CMIP6 Earth system models. Journal ACP, in review. <https://doi.org/10.5194/acp-2019-1207>



## Références

- › Morgenster *et al.* (2017) Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry–Climate Model Initiative (CCMI). *Geosci. Model Dev.*, 10, 639–671, 2017. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-639-2017>
- › Dohmse, S.S, *et al.* (2018) Estimates of ozone return dates from Chemistry–Climate Model Initiative simulations. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8409–8438, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8409-2018>
- › Ayarzagüena, B. *et al.* (2018) No robust evidence of future changes in major stratospheric sudden warmings: a multi-model assessment from CCMI. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11277–11287, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11277-2018>
- › Amos M., *et al.* (2020) Projecting ozone hole recovery using an ensemble of chemistry–climate models weighted by model performance and independence. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9961–9977, 2020. <https://doi.org/10.5194/acp-20-9961-2020>

# C4MIP : Projet d'intercomparaison des modèles couplés climat-carbone

P. Cadule

C4MIP (Jones *et al.*, 2016) est un projet d'intercomparaison des modèles couplés climat-carbone dont le principal objectif est de comprendre et de quantifier les changements futurs (à l'échelle du siècle) du cycle global du carbone, en prenant en compte ses rétroactions avec le système climatique, et en faisant le lien entre les émissions de CO<sub>2</sub> et le changement climatique. Cet objectif peut être atteint grâce à des simulations numériques – basées sur des scénarios idéalisés, historiques ou futurs – réalisées avec des modèles couplés climat-carbone.

Les simulations réalisées à l'IPSL nous ont permis de participer à la dernière étude internationale d'intercomparaison de 11 modèles couplés climat-carbone (Arora *et al.* 2020), qui s'inscrit dans le cadre du projet C4MIP et de l'exercice CMIP6.

L'analyse des simulations C4MIP permet, pour chacun de ces

modèles couplés climat-carbone, de quantifier l'amplitude de la rétroaction climat-carbone ainsi que de mettre en évidence l'effet de l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur le cycle du carbone (effets climatiques et biogéochimiques du CO<sub>2</sub>).

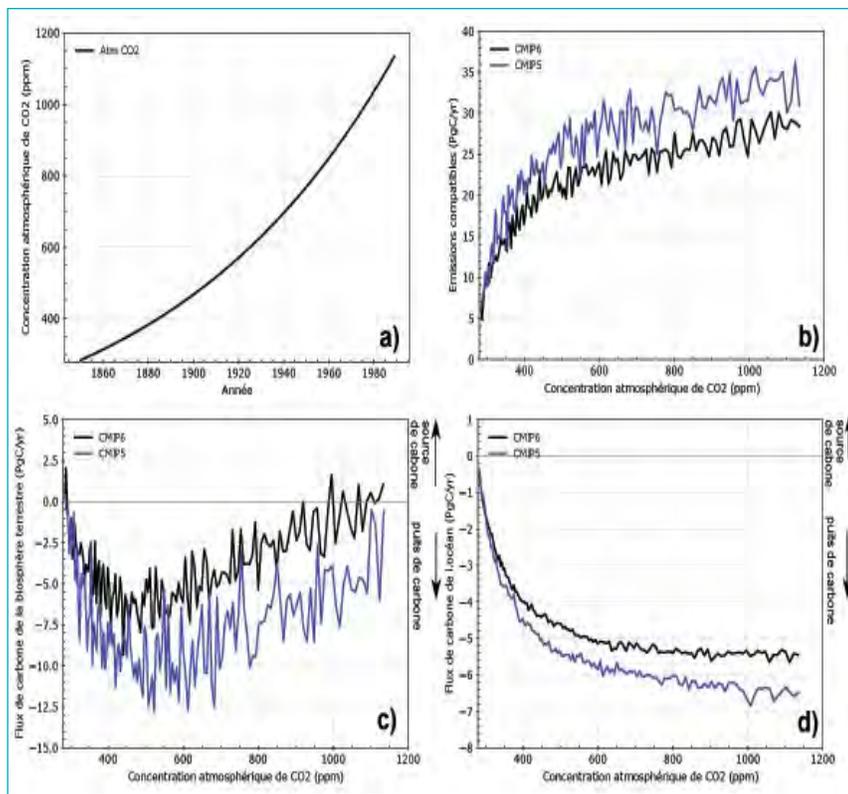
Dans l'étude d'intercomparaison menée par Arora *et al.* (2020), tous les modèles climat-carbone sont forcés par la même augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (Fig a).

En ce qui concerne l'IPSL, les émissions compatibles, c'est-à-dire les émissions qu'il aurait fallu injecter dans le modèle pour avoir la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> qui est imposée, sont plus faibles dans le modèle IPSL-CM6A-LR que dans son ancienne version qui a servi à réaliser certaines des simulations CMIP5 (IPSL-CM5A-LR) (Fig. b). Les valeurs de l'IPSL dans le cadre de CMIP6 s'expliquent par une diminution du carbone accumulé par la biosphère terrestre en réponse à l'augmentation

de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  lorsqu'on ne prend pas en compte le changement de température dû à l'effet radiatif du  $\text{CO}_2$  (Fig. b et c). Ces émissions compatibles contribuent à déterminer le scénario d'augmentation de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  qui pourrait permettre d'émettre dans l'atmosphère la plus grande quantité de  $\text{CO}_2$  anthropique (mise en place de politiques de mitigation), tout en minimisant l'impact sur le climat et les écosystèmes.

## Références

- > Jones, C. D., *et al.* (2016) C4MIP – The Coupled Climate–Carbon Cycle Model Intercomparison Project: experimental protocol for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 2853-2880. <https://gmd.copernicus.org/articles/9/2853/2016/>
- > Arora, V.K., *et al.* (2020) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models, and their comparison to CMIP5 models. *Biogeosciences Discussions*. 1–124. <https://doi.org/10.5194/bg-2019-473>



**a)** Concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  (avec une augmentation annuelle de 1%/an) imposée aux deux modèles de l'IPSL (modèles IPSL-CM5A-LR et IPSL-CM6A-LR), dans le cadre d'expériences idéalisées C4MIP pour l'exercice CMIP. **b)** Émissions compatibles des modèles IPSL-CM5A-LR (CMIP5) et IPSL-CM6A-LR (CMIP6), c'est-à-dire les émissions anthropiques de  $\text{CO}_2$  qu'il va falloir injecter dans le modèle pour avoir l'évolution de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  qui est imposée (Figure a). **c)** Réponse du cycle du carbone de la biosphère terrestre à l'augmentation de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  (effets biogéochimiques et climatiques), des modèles IPSL-CM5A-LR (CMIP5) et IPSL-CM6A-LR (CMIP6). **d)** Réponse du cycle du carbone de l'océan à l'augmentation de la concentration atmosphérique de  $\text{CO}_2$  (effets biogéochimiques et climatiques), des modèles IPSL-CM5A-LR (CMIP5) et IPSL-CM6A-LR (CMIP6).

## DAMIP :

# Projet d'intercomparaison des modèles de détection et d'attribution

## CMIP6 : Contrainte des projections climatiques par les observations aux échelles globale et locale

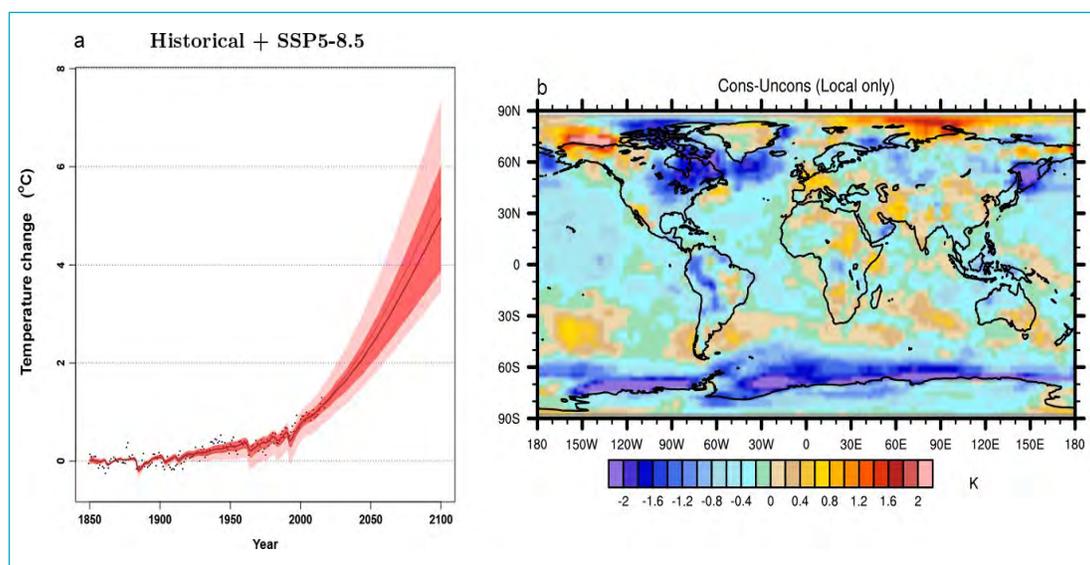
S. Qasmi

De nombreuses études ont cherché à réduire les incertitudes associées aux projections climatiques sur la base d'observations récentes. Celles-ci ont notamment été utilisées pour évaluer des ensembles de modèles de climat afin de ne retenir que les plus réalistes, et pour réduire (ou contraindre) leurs incertitudes dans leurs projections. Jusqu'à présent, l'impact de ces contraintes était limité, et les intervalles d'incertitude relatifs au changement climatique futur sont encore principalement déterminés par les sorties de modèles. Nous avons utilisé l'ensemble de modèles CMIP6, des observations améliorées, et une nouvelle méthode statistique inspirée du krigeage pour réduire l'incertitude sur les estimations du réchauffement d'origine anthropique à la fois dans le passé mais aussi dans le futur. Nous obtenons des estimations contraintes par les observations : du réchauffement global attribuable à l'activité humaine à ce jour (en utilisant les scénarios d'attribution DAMIP), du rythme de réchauffement attribuable, de la réponse pour plusieurs scénarios futurs, mais également de la sensibilité climatique. Notre méthode basée sur l'ensemble des observations disponibles réduit considérablement l'incertitude modèle sur l'augmentation de la température globale sur la période 1850-2018, mais également sur les projections climatiques,

avec une réduction d'environ 50 % sur la période 2080-2100 (Fig. a). Une validation croisée dite «en modèle parfait», i.e. en considérant chaque réalisation (membre) de chaque modèle CMIP6 comme autant de pseudo-observations, suggère que notre méthode fournit des résultats satisfaisants. Ces résultats suggèrent qu'utiliser l'ensemble CMIP6 en considérant chaque modèle comme équiprobable ne constitue plus la meilleure approche pour étudier les projections climatiques. La méthode que nous proposons est facilement transposable, ouvrant ainsi la possibilité de suivre le changement climatique et de réduire son incertitude qui lui est associée à la fois à l'échelle globale, mais aussi régionale (Fig. b) et/ou pour différentes variables climatiques.

### Références (fournies sur demande)

- › Ribes, A., *et al.* Making climate projections conditional on historical observations, *Sciences Advances*, en révision.
- › Qasmi, S. and, Ribes, A. Monitoring and reducing climate uncertainty at local scale, en préparation.



Contrainte observationnelle sur les simulations CMIP6 historiques et projections climatiques de la température globale annuelle ( $T_{glo}$ ) pour le scénario SSP5-8.5. La contrainte est appliquée aux simulations historiques (de 1850 à 2014) et sur les projections SSP5-8.5 (de 2014 à 2019). **a)** Les valeurs annuelles observées de  $T_{glo}$  (points noirs) sont comparées aux intervalles de confiance (5-95 %) de la réponse forcée, sans contrainte (rose) et avec contrainte (rouge), tels qu'ils sont estimés par 22 modèles CMIP6. Toutes les températures sont exprimées en anomalies par rapport à la période 1850-1900. **b)** Différences d'anomalies moyennes de température en 2081-2100 par rapport à la période 1850-1900 entre l'ensemble CMIP6 contraint après application de la méthode en utilisant les observations locales (une par point de grille) et l'ensemble non contraint.

## DCPP : Projet de prévisibilité climatique aux échelles décennales

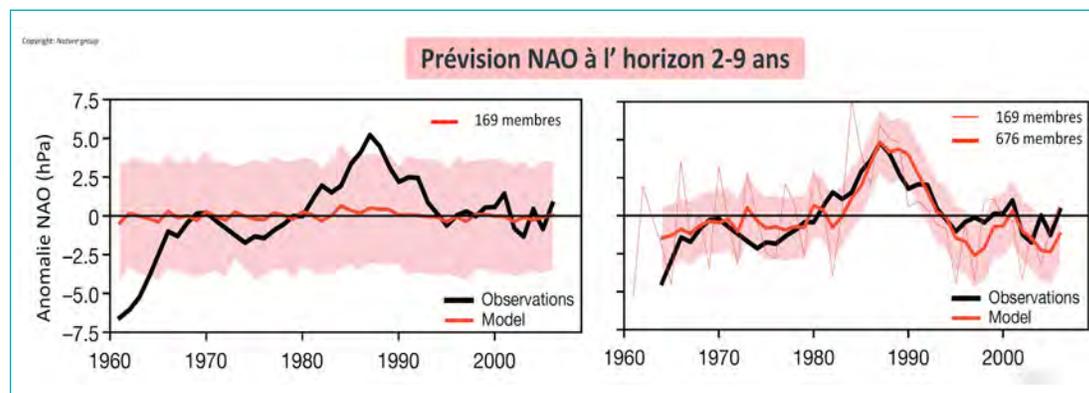
*D. Swingedouw, J. Mignot, C. Cassou, et G. Gastineau*

Le projet DCPD propose de mettre en place des expériences de prévisions rétrospectives du climat sur la période 1960-2014. Pour chaque année sur cette période, un ensemble de 10 expériences (ou membres) de prévision de 10 ans est lancé et comparé aux observations disponibles. Les membres partent de conditions initiales légèrement différentes pour prendre en compte la partie imprévisible du signal. Ainsi, la moyenne des membres isole les signaux de prévisibilité robustes, en réduisant l'effet de la variabilité interne. Ces expériences, dites de prévision, prennent en compte les variations de forçage externe observées à la fois d'origine naturelle (irradiance solaire et éruptions volcaniques) et anthropique, et également l'état observé de l'océan au moment de l'initialisation des prévisions, contrairement aux simulations historiques classiques. De nombreuses méthodologies existent pour cette étape dite d'initialisation, basées en général sur une assimilation des observations dans les modèles couplés océan-atmosphère. Pour le système de prévision décennale IPSL-EPOC, le choix a été fait d'utiliser une méthode de rappel en surface intégrant dans le temps des anomalies observées de température et de salinité de la surface de l'océan et contraindre leurs variations.

L'effort considérable de modélisation qui a permis de réaliser l'ensemble des prévisions rétrospectives (10 membres x 10 ans

x 60 dates de départ = 6 000 années de simulation) a été intégré au projet international DCPD. Un premier résultat marquant a été publié par Smith et al. (2020), qui montre qu'en utilisant l'ensemble des prévisions décennales de tous les instituts participant à l'exercice ainsi qu'au précédent (CMIP5), il semble possible de prévoir les variations décennales de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO, mode principal de la variabilité de la pression de surface en Atlantique Nord). Cependant, cette étude révèle également que le signal prévu par les modèles de climat est bien plus petit que ce qui est observé. De ce fait, il faut un grand nombre de simulations (plus de 500) pour réussir à isoler ce signal prévisible. Des étapes sont ensuite nécessaires pour produire une prévision hybride à partir de ce signal prévisible. Une fois ces étapes accomplies, il est alors possible de prévoir des décennies d'hiver extrêmes, comme les années 1990 par exemple sur l'Europe (voir la figure).

Ainsi, cette étude démontre des potentialités fortes concernant la prévision du climat hivernal aux échelles de temps décennales sur l'Europe. Elle met cependant en évidence que les modèles de climat ont encore des déficiences qui les empêchent de bien faire ressortir les signaux prévisibles. Cela pourrait concerner par exemple les interactions océan-atmosphère, qui peuvent se faire à des échelles spatiales très fines, comme les régions frontales, mal résolues par ces modèles de climat dont les mailles sont encore de l'ordre de 100 km de côté.



climat (moyenne de 169 expériences de prévision) du projet DCPD avec une avance de 2 à 9 ans. Les modèles semblent incapables de reproduire les variations décennales de la NAO (en noir), le signal moyen (en rouge gras) étant plus de 10 fois plus faible que celui des observations. Cependant, en multipliant le signal de prévision rétrospective par le ratio de l'écart type des observations par celui de la prévision, et en utilisant plus de membres (passage de 169 à 676), on arrive à isoler une prévision rétrospective de la NAO bien meilleure (**image de droite**)

### Reference

> Smith et al. (2020) North Atlantic climate far more predictable than models imply. *Nature* 583, 796-800. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2525-0>

**Image de gauche** : Observations des modulations de l'Oscillation Nord Atlantique (en noir) et prévision de ces modulations par les modèles de

## DCPP-C : Influence de la Variabilité Atlantique Multidécennale sur les canicules en Europe

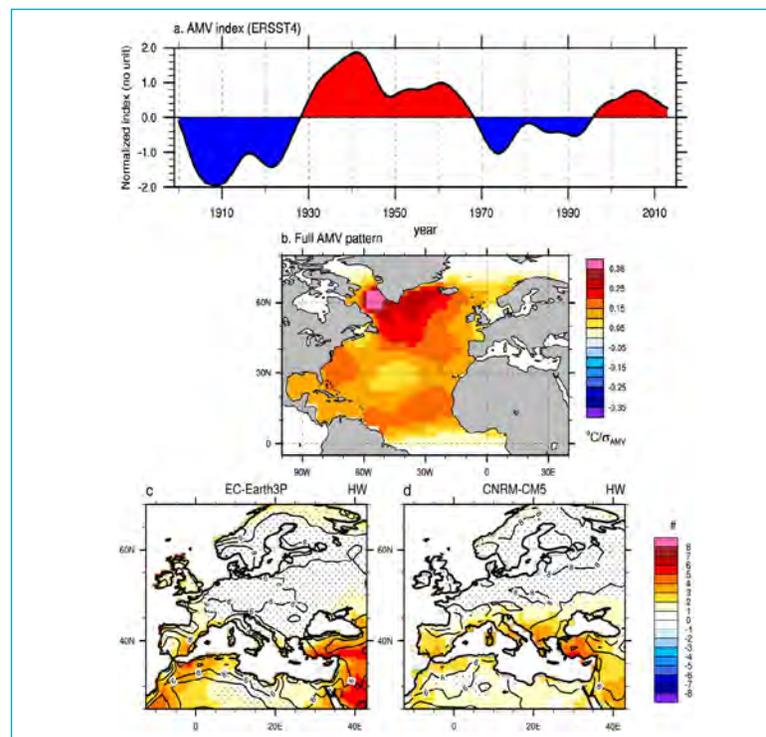
S. Qasmi

La tendance au réchauffement d'origine anthropique observée au cours du XXe siècle en Europe est ponctuée par des fluctuations expliquées en partie par la variabilité interne du climat. Plusieurs études ont confirmé des liens entre la Variabilité Atlantique Multidécennale (AMV), qui est le principal mode de variabilité décennale sur l'Atlantique Nord, et le climat européen. Des expériences de sensibilité ont été proposées dans le cadre de CMIP6/DCPP pour isoler la réponse climatique à l'AMV grâce à un protocole basé sur des simulations idéalisées. Celles-ci consistent à rappeler la température de surface de la mer (SST) de l'Atlantique Nord simulée vers des anomalies représentatives de l'AMV observée (fournies par *input4MIPs* pour la coordination), tandis que le reste du système reste entièrement couplé (Fig. a et b). Conformément aux directives du DCPP-C, de grands ensembles de simulations (ci-après 1xAMV) ont été réalisés avec le modèle CNRM-CM6, CNRM-CM5, et EC-Earth3P. Des ensembles supplémentaires ont également été produits avec les deux derniers modèles en multipliant par 2 et 3 les anomalies associées à l'AMV (ci-après 2xAMV et 3xAMV) afin

d'évaluer la sensibilité de la réponse des modèles à l'intensité de l'AMV. En accord avec les observations, pendant une phase positive de l'AMV, les modèles simulent une augmentation de la température de 0,2 °C à 0,8 °C et une diminution des précipitations sur le bassin méditerranéen de 0,1 mm.jour<sup>-1</sup> à 0,2 mm.jour<sup>-1</sup> (soit une diminution pouvant atteindre 25% par rapport à une phase négative de l'AMV). On constate également une augmentation de la durée des canicules (cf. Références pour leur définition), allant de 3 à 6 jours, soit une augmentation de 40% à 85% par rapport à une phase négative (Fig. c et d). Ces chiffres, comparées aux canicules observées indiquent que l'AMV peut considérablement moduler la tendance actuelle liée au réchauffement climatique en termes de durée des canicules. Les mécanismes de physique de la téléconnexion entre l'AMV et le climat estival méditerranéen pendant une phase positive de l'AMV impliquent des anomalies anticycloniques sur le bassin méditerranéen issues d'un couplage concomitant entre l'atmosphère et les SST de l'Atlantique tropical et extra-tropical. Ces conditions anticycloniques favorisent un assèchement des sols et une réduction de la couverture nuageuse, qui induisent simultanément une diminution (augmentation) du flux de chaleur latente (sensible) et une augmentation des flux radiatifs reçus en surface. L'amplitude de cette réponse sur le bassin méditerranéen évolue linéairement avec celle de l'AMV. Cependant, l'intensité de cette relation semble dépendre des modèles et de leurs biais respectifs.

### Référence (fournie sur demande)

- Qasmi, S., *et al.* Modulation of the occurrence of heatwaves over the Euro-Mediterranean region by the intensity of the Atlantic Multidecadal Variability, *Journal of Climate*, en révision.



**a)** Série temporelle normalisée de l'AMV après filtrage. **b)** Anomalies de SST (données ERSSTv4) associées à l'AMV, obtenues par régression de la SST annuelle résiduelle (i.e. après suppression du signal anthropique) sur la série chronologique AMV. **c)** Moyenne de la différence des ensembles 2xAMV (anomalies en couleur) entre une phase positive et négative d'AMV de la durée des canicules (HW) en été (juin-août) pour EC-Earth3P. Les contours noirs correspondent aux valeurs climatologiques en phase négative d'AMV. Les pointillés indiquent les régions qui sont en dessous du seuil de significativité à 95% selon un test de Student. **d)** Idem mais pour CNRM-CM5.

# GeoMIP :

## Projet d'intercomparaison des modèles de géo-ingénierie

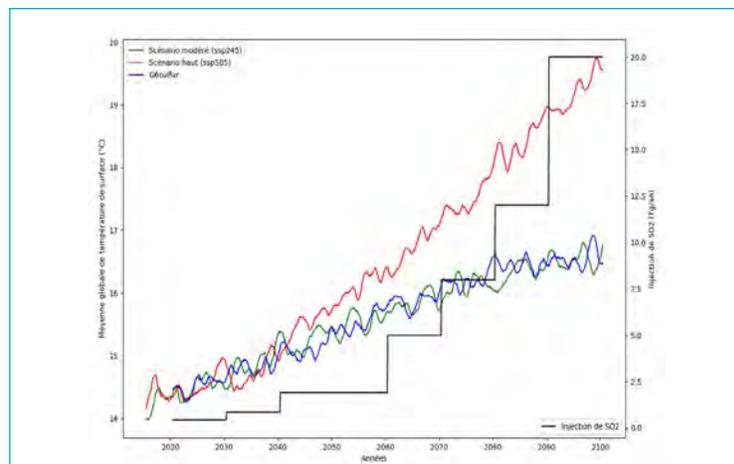
### Expériences GeoMIP

T. Lurton

Les expériences *G1*, *G6solar* et *G6sulfur* sont des simulations visant à éprouver différentes solutions de géo-ingénierie qui pourraient être mises en place au cours du XXI<sup>e</sup> siècle pour atténuer l'effet du réchauffement climatique en cas de scénario catastrophe. Leur protocole de simulation suit généralement le principe suivant : on considère deux trajectoires-scénarios déjà calculées, l'une au réchauffement global modéré pendant le XXI<sup>e</sup> siècle, et l'autre correspondant à un scénario extrêmement pessimiste. On va ensuite re-simuler cette dernière expérience en apportant des modifications au système Terre, de façon à ce que le réchauffement climatique global redevienne comparable à celui de la première trajectoire. Ces modifications simulent des solutions de géo-ingénierie, et peuvent être de différents types : dans *G6solar*, on fait l'hypothèse qu'une technologie future (de nature indéterminée) viendra filtrer le rayonnement solaire incident global ; sur *G6sulfur*, on considère que le réchauffement global est contrebalancé par l'injection d'importantes masses de dioxyde de soufre en altitude, ce qui aurait pour effet d'accroître l'épaisseur optique de l'atmosphère.

#### En savoir plus

› Site web du projet : <http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/>



Évolution de la température moyenne de surface au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, pour différents scénarios calculés par le modèle IPSL-CM6. Dans l'expérience *G6sulfur*, les masses de SO<sub>2</sub> indiquées en noir sont injectées dans un scénario haut (en rouge), de façon à ce que l'évolution finale de la température corresponde à celle d'un scénario modéré (en vert)

## GMMIP :

### Projet d'intercomparaison des modèles de moussons globales

#### Moussons globales, compréhension de leur connectivité et des facteurs d'influence

*L. Li*

GMMIP est un sous projet du CMIP6, coordonné par les professeurs Tianjun Zhou (Chinese Academy of Sciences, Chine) et Andy Turner (University of Reading, UK). L'objectif principal est de comprendre la variabilité des systèmes de mousson en Asie, en Afrique et en Amérique. Ces systèmes sont en effet connectés à l'échelle globale. Le deuxième objectif est d'étudier les facteurs d'influence venue de la variabilité interne du système climatique (IPO-Interdecadal Pacific Oscillation, AMO-Atlantic Multidecadal Oscillation), et du forçage externe d'origine anthropique. Finalement GMMIP s'intéresse aussi au rôle joué par la topographie (notamment les hautes montagnes de l'Asie) sur les systèmes de mousson globale. L'IPSL est im-

pliqué dans la réalisation partielle des simulations proposées en utilisant IPSL-CM6A-LR. La première simulation ressemble à une simulation AMIP, avec la composante atmosphérique seule forcée par SSTs observées, mais étendue sur une période plus grande (de 1870 à 2017). Actuellement 20 membres ont été accomplis. La deuxième simulation est celle avec les montagnes asiatiques rasées. Elle a été aussi achevée avec succès. La troisième simulation, qui reste encore à réaliser, consiste à utiliser la version couplée complète du modèle IPSL-CM6A-LR, mais avec les SSTs rappelées vers l'observation sur deux bassins océaniques respectifs : Pacifique tropical et Atlantique du nord.

#### En savoir plus

- › Site web du projet : <http://www.met.rdg.ac.uk/~sws05agt//MonsoonMIP/>
- › GMMIP mailing list : <https://www.lists.rdg.ac.uk/mailman/listinfo/met-gmmip>

## ISMIP6 :

### Projet d'intercomparaison des modèles de calottes glaciaires pour CMIP6

*N. Jourdain, C. Dumas, A. Quiquet et C. Agosta*

Cet exercice d'intercomparaison ISMIP6 vise à projeter la contribution des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique au niveau des mers pour 2100. Il a regroupé plus de 3 douzaines d'instituts issus de 13 pays, dont l'IGE (OSUG, Grenoble) et le LSCE (IPSL, Paris-Saclay). Les modèles de dynamique glaciaire sont au centre de ce projet, mais ce dernier a également né-

cessité une forte expertise en sciences atmosphériques (pour prédire l'accumulation et la fonte à la surface des calottes), et en océanographie (pour prédire la fonte sous les plateformes glaciaires).

Les résultats d'ISMIP6 montrent que la calotte glaciaire Antarctique pourrait contribuer de -7.8 à +30 cm à la hausse du niveau marin de 2015 à 2100. Cette incertitude, plus large que dans les estimations précédentes, est surtout liée au manque de connaissances sur la fonte à la base des plateformes glaciaires qui s'étendent sur l'océan. Or, ces terminaisons flottantes, dont

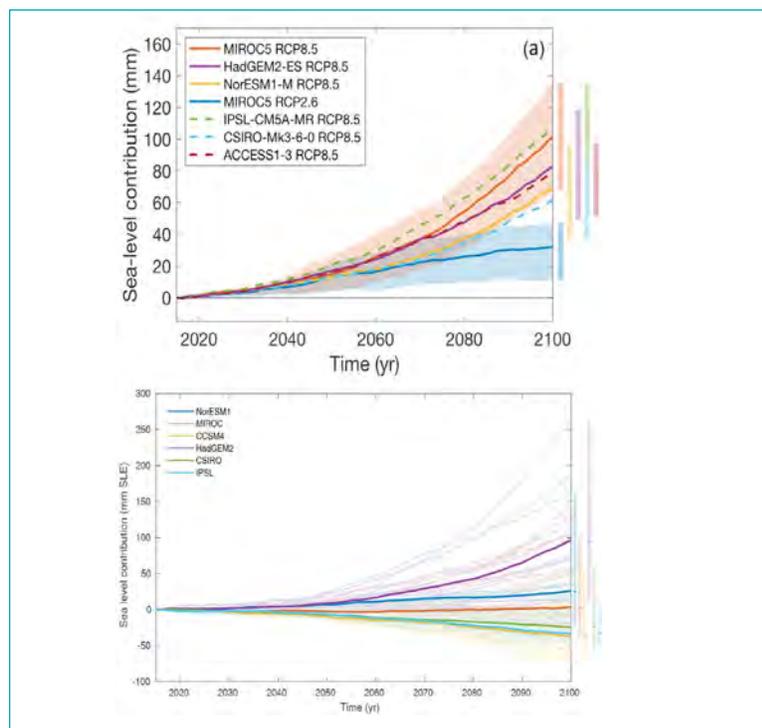
la superficie peut atteindre la moitié de celle de la France, retiennent l'écoulement du reste de la calotte. Certaines nouvelles simulations indiquent que si elles venaient à disparaître, le niveau des mers s'élèverait de 1 à 8 mètres en 200 ans. Sur la période 2015-2100, la contribution de la calotte glaciaire du Groenland serait, elle, comprise entre +1,5 et +14 cm, selon l'évolution de nos émissions de gaz à effet de serre. Pour le Groenland, cette évolution est surtout liée à l'augmentation de la fonte de surface en été.

### En savoir plus

- › Site web du projet : <http://www.climate-cryosphere.org/mips/ismip6/about>

### Références

- › Jourdain, *et al.* (2020) A protocol for calculating basal melt rates in the ISMIP6 Antarctic ice sheet projections. *The Cryosphere*, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3111-2020>
- › Seroussi *et al.* (2020) ISMIP6 Antarctica: a multi-model ensemble of the Antarctic ice sheet evolution over the 21st century. *The Cryosphere*, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3033-2020>
- › Goelzer *et al.* (2020) The future sea-level contribution of the Greenland ice sheet: a multimodel ensemble study of ISMIP6. *The Cryosphere*, <https://doi.org/10.5194/tc-14-3071-2020>
- › Sun *et al.* (2020) Antarctic ice sheet response to sudden and sustained ice shelf collapse (ABUMIP). *Journal of Glaciology*, <https://doi.org/10.1017/jog.2020.67>



Évolution du volume de glace au-dessus de la flottaison (en mm de niveau marin) entre 2015 et 2100 pour le Groenland (**en haut**) et l'Antarctique (**en bas**) obtenue avec les climats de différents modèles CMIP5. Les barres sur la droite montrent l'étalement des résultats avec les différents modèles de calotte de glace utilisés.

## LS3MIP :

# Projet d'intercomparaison des modèles de surface terrestre, de neige et d'humidité du sol

F. Chérut, J. Colin, B. Decharme, A. Ducharne, J. Ghattas, G. Krinner et N. Vuichard

L'évaluation des modèles de climat dans le cadre de CMIP se fait, jusqu'à maintenant, principalement en analysant le comportement des modèles couplés (simulations «historiques» couplées, simulations de contrôle préindustrielles) ou des composantes

atmosphériques (simulations AMIP). Or, ces modèles couplés, comme leur nom l'indique, consistent en plusieurs modules qui interagissent et qui représentent des composantes du système climatique. Les principales composantes sont l'atmosphère, l'océan, la surface continentale et, parfois, les calottes de glace. Dans CMIP6, de nouveaux exercices d'intercomparaison/évaluation portent précisément sur ces composantes qui n'étaient

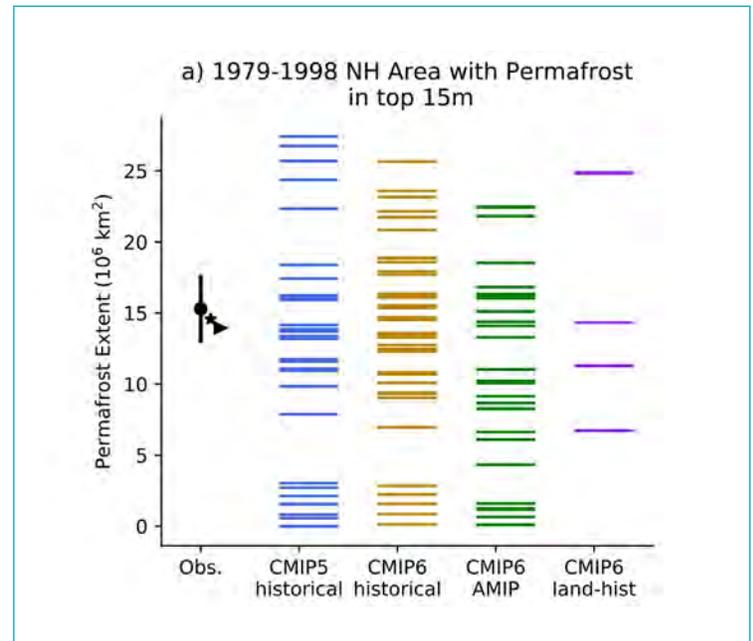
pas évaluées séparément dans les éditions précédentes de CMIP. Ainsi OMIP porte sur l'évaluation de la composante océanique, ISMIP6 sur les modèles de calottes de glace, et LS3MIP sur les modules de surface terrestre. L'idée simple est d'être en mesure d'attribuer l'origine de certains défauts des modèles couplés aux composantes individuelles qui les composent.

Dans LS3MIP (Land Surface, Soil Moisture and Snow Model Intercomparison Project), une des actions principales est donc d'effectuer le pendant des simulations d'atmosphère AMIP pour les modules de surface. Concrètement, il s'agit de piloter les modules de surface sur la période 1901-2014 avec un jeu de données météorologiques imposé. Un autre volet de l'exercice LS3MIP consiste à prescrire certaines variables de surface (eau du sol et masse de neige) dans des simulations AMIP et couplées en les rappelant vers des climatologies issues d'autres simulations. Ce protocole vise essentiellement à évaluer la rétroaction des surfaces continentales sur le signal de changement climatique.

Plusieurs articles sont actuellement en cours d'écriture pour évaluer le comportement des modules de surface des modèles couplés dans les simulations «land-hist». Le premier est un article généraliste portant sur les grands aspects des variables de surface principales simulées (humidité de sol etc.) visant à quantifier l'apport de la composante de surface et des couplages surface/atmosphère sur le réalisme des variables simulées (humidité du sol, évapotranspiration, biomasse végétale). Un deuxième porte sur une analyse plus fine au niveau des processus hydrologiques et thermiques et de leurs interactions avec le cycle de carbone, et un troisième détaille les processus « froids » (neige, gel du sol). Au-delà, ces simulations «land-hist» ont été utilisées pour une étude visant à quantifier la part des changements observés de la disponibilité de l'eau qui peut être attribuée au changement climatique d'origine humaine (Padrón *et al.*, 2020). Les simulations couplées LS3MIP seront valorisées dans un deuxième temps.

### En savoir plus

- › Site du projet : <https://wiki.c2sm.ethz.ch/LS3MIP>



Superficie simulée de la région dans laquelle du sol gelé en permanence est présent dans les premiers trois mètres ("pergélisol proche de la surface") dans différentes simulations CMIP5 et CMIP6 (à gauche, en noir: estimations basées sur des observations et réanalyses). Les simulations LS3MIP suggèrent que la forte dispersion des résultats ne se réduit pas quand les modules de surface tournent en mode "stand-alone", pilotés par des paramètres météorologiques "parfaits". Figure extraite de Mudryk *et al.*, en préparation.

### Références

- › Padrón, R., *et al.* (2020) Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change. *Nature Geoscience*, 13(7), 477–481. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0594-1>
- › van den Hurk, B., *et al.* (2016) LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: the Land Surface, Snow and Soil moisture Model Intercomparison Project – aims, setup and expected outcome. *Geoscientific Model Development*, 9(8), 2809–2832. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2809-2016>

## LUMIP :

# Projet d'intercomparaison des modèles d'utilisation des terres

*N. Vuichard, C. Delire, P. Peylin, M. Rocher, R. Séferian*

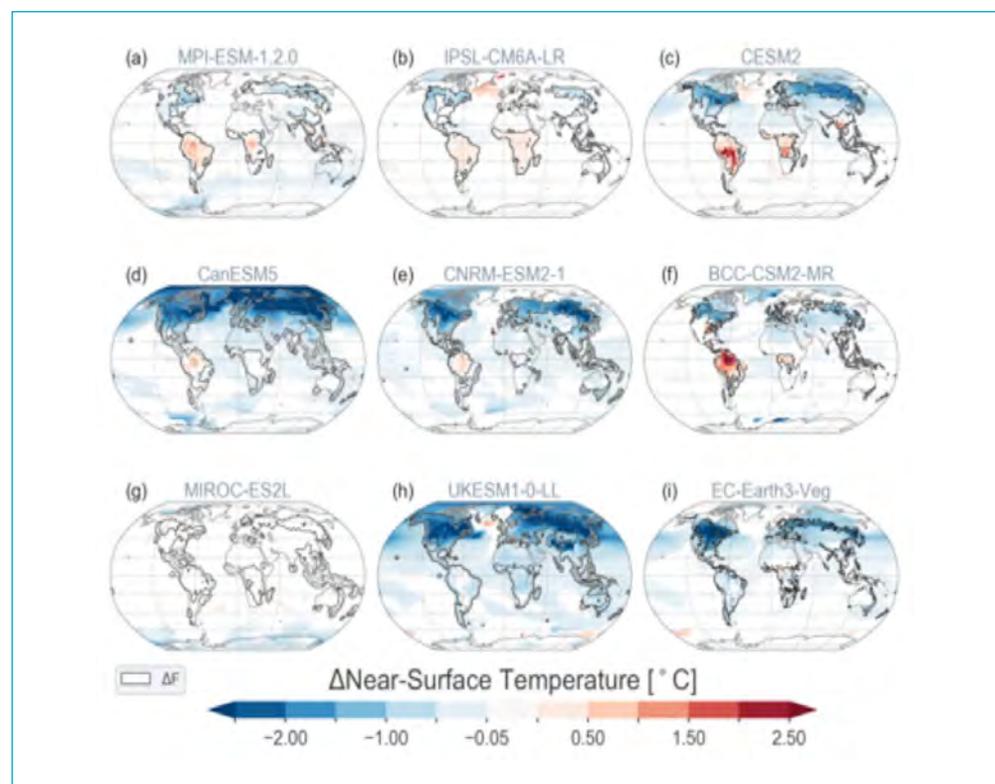
LUMIP (Land Use Model Intercomparison Project) est un projet international visant à étudier la contribution des changements d'usage des terres et des pratiques agricoles (irrigation, fertilisation, ...) à l'évolution du système climatique et de quantifier leurs impacts sur le cycle de l'eau et le cycle du carbone. Une dizaine de groupes de modélisation à travers le monde, dont le CNRM et l'IPSL pour la France, participe à cette initiative, coordonnée par David Lawrence (NCAR, Etats-Unis) et George Hurtt (University of Maryland, Etats-Unis). Les simulations réalisées dans le cadre de LUMIP sont des simulations de modèles de système Terre ou de la seule composante 'surfaces continentales' forcées par des réanalyses climatiques, simulations dont les conditions aux limites varient (avec ou sans changement d'usage des terres, avec ou sans irrigation) afin de quantifier les contributions respectives de chacun de ces facteurs (Lawrence *et al.*, 2016). Un workshop présentant les premiers résultats obtenus s'est tenu à Aspen (Colorado, Etats-Unis)

en Septembre 2019 (<https://www.agci.org/event/19s4>) et plusieurs articles ont été soumis ou sont en cours de rédaction. Parmi ceux-ci, une étude, coordonnée par Lena Boysen, s'est intéressée à l'impact d'un scénario idéalisé de déforestation dans lequel une surface de 20 Mkm<sup>2</sup> est déforestée, comparable à la surface déforestée à l'échelle du globe depuis le début de l'ère industrielle. Selon les modèles, l'effet sur la moyenne annuelle globale de la température de surface va de l'absence de changement significatif à un refroidissement de 0,55 °C, avec une moyenne multi-modèle de  $-0,22 \pm 0,21$  °C (voir figure issue de Boysen *et al.*, en discussion).

### Références :

- › Lawrence, *et al.* (2016) The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design. *Geosci. Model Dev.*, 9, 2973–2998. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016>
- › Boysen, L., *et al.* (2020) Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models, *Biogeosciences Discuss.*, in review. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-229>

Réponse de la moyenne annuelle de la température de surface suite à la déforestation. Les valeurs positives indiquent un réchauffement de la surface. Figure issue de Boysen *et al.*, en discussion dans *Biogeoscience*.



## PAMIP :

# Projet d'intercomparaison de l'amplification polaire dans les modèles

## Role du déclin de la glace de mer dans l'amplification polaire

R. Msadek

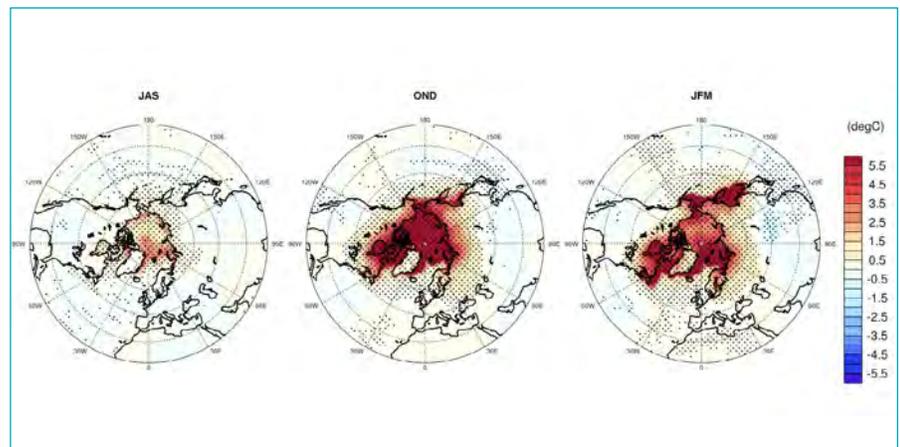
Le projet PAMIP (Polar Amplification Model Intercomparison Project) est une contribution à CMIP6 dont le but est de mieux comprendre pourquoi les régions polaires se réchauffent plus vite que la moyenne globale lorsque les forçages radiatifs augmentent, et d'identifier le rôle de la glace de mer dans les processus d'amplification polaire. En effet, la banquise arctique d'été a perdu 45% de sa superficie totale depuis le début des observations satellitaires et les projections climatiques indiquent que ce déclin devrait se poursuivre au cours des décennies à venir. De nombreuses études ont cherché à quantifier les impacts que pourrait avoir la fonte de la banquise arctique sur le climat des moyennes latitudes, mais l'absence de consensus à ce jour résulte notamment de la diversité des protocoles utilisés pour identifier une réponse de l'atmosphère au déclin de la glace de mer. PAMIP définit un ensemble d'expériences coordonnées permettant d'isoler le rôle de la glace de mer arctique d'une part, et antarctique d'autre part, dans l'amplification polaire, et de comparer à celui d'autres forçages, tels que les changements de SST à l'échelle globale (Smith *et al.*, 2019). Les changements futurs sont évalués pour un climat qui se réchaufferait de 2°C en moyenne globale par rapport aux conditions préindustrielles. Les premières analyses se sont focalisées essentiellement sur le rôle du déclin de la glace arctique. Les premiers résultats présentés en juin 2019 lors d'une conférence internationale au Royaume Uni (<http://www.cesm.ucar.edu/projects/CMIP6/PAMIP/workshop.html>), à laquelle l'IPSL et le CNRM-CERFACS ont contribué, montrent que les modèles s'accordent sur l'existence d'une forte amplification polaire dans l'hémisphère nord en réponse au déclin de la banquise arctique. La majorité des modèles suggère également que la fonte de la banquise arctique favoriserait un déplacement vers le sud du courant-jet sans montrer pour autant de lien robuste avec une modification des extrêmes climatiques. Certaines études ont par ailleurs souligné l'importance de l'état initial de la stratosphère dans l'évolution de la réponse atmosphérique aux changements de glace de mer. D'autres suggèrent un rôle important de l'océan qui tendrait à amplifier la réponse au déclin de la banquise et à l'étendre à l'échelle globale. Les analyses multi-modèles en cours devraient permettre d'identifier les processus qui sont robustes et de quantifier la contribution du déclin de la glace de mer dans les changements climatiques futurs.

### En savoir plus

- › Site web du projet : <http://www.cesm.ucar.edu/projects/CMIP6/PAMIP/>

### Référence

- › Smith, *et al.* (2019) The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification, *Geosci. Model Dev.*, 12, 1139–1164, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1139-2019>.



Température de surface (en °C) en été (JAS), automne (OND) et hiver (JFM) simulée par la composante atmosphérique du modèle CNRM-CM6 en réponse à une réduction de glace de mer en Arctique correspondant à un réchauffement global de 2°C par rapport à la période pré-industrielle. On voit que l'amplification arctique est maximale en automne et en hiver et que le réchauffement n'est pas uniforme sur l'hémisphère nord. Cette réponse est obtenue en faisant la différence entre deux expériences PAMIP : une simulation de référence avec des conditions de glace et de SST actuelles (pdSSTpdSIC) et une simulation perturbée avec des conditions de SST actuelles et des conditions de glace futures (pdSSTfutArcSIC). Les forçages externes sont fixes. Chaque expérience comprend 300 membres (seule la moyenne d'ensemble est présentée ici). Les points indiquent les régions où la réponse est statistiquement significative avec un niveau de confiance de 95%.

## PMIP :

# Projet d'intercomparaison des modèles paléoclimatiques

## Les simulations paléoclimatiques de CMIP6

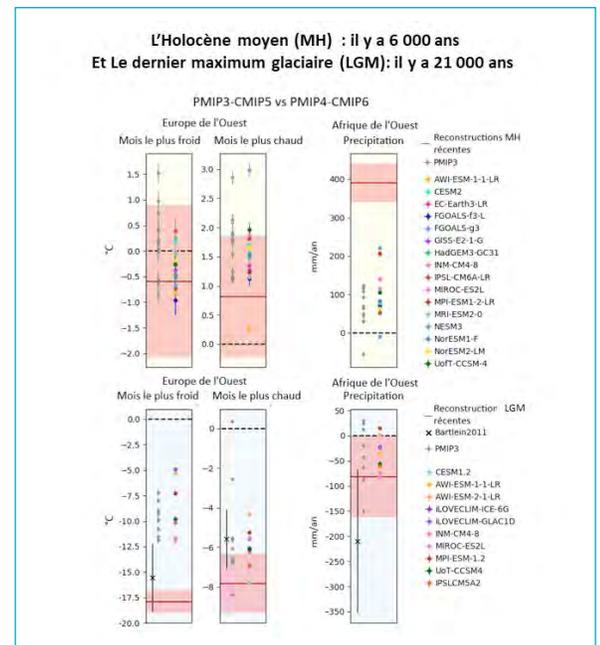
P. Braconnot, M. Kageyama et M. Khodri

Cinq périodes passées figurent au menu des simulations CMIP6. Il s'agit en remontant dans le temps du dernier millénaire, de l'Holocène moyen (il y a 6 000 ans), du dernier maximum glaciaire (il y a 21 000 ans), du dernier interglaciaire (il y a 127 000 ans), et d'une période du Pliocène (il y a 3.3 Ma). Elles ont été proposées par le Paleoclimate Modelling Intercomparison Project pour mieux comprendre la réponse du système climatique à différentes perturbations externes induites par le rayonnement solaire, les gaz à effet de serre, ou par différentes conditions de surface (calotte de glace, végétation) (Kageyama *et al.*, 2018). Ces périodes étant bien documentées, les comparaisons des résultats des simulations avec des reconstructions paléoclimatiques issues d'enregistrements physiques, chimiques ou biologiques provenant d'archives environnementales variées et complémentaires (glace, sédiments marins ou lacustres, coquilles, cernes d'arbres, etc..) apportent une vérification de l'aptitude des modèles de climat à représenter un climat différent de l'actuel. Ces simulations offrent également une perspective de long terme sur les différentes échelles de variabilité spatio-temporelles et l'impact des changements climatiques sur les caractéristiques environnementales ou la biodiversité. L'ensemble des simulations a été réalisé avec le modèle de l'IPSL IPSL-CM6A-LR, sauf pour le climat du Dernier Maximum Glaciaire pour lequel IPSL-CM5A2 a été utilisé. Les équipes du LOCEAN et du LSCE sont fortement impliquées dans la coordination de PMIP et ont activement participé à l'analyse des simulations et contribué à plusieurs études multi modèles. L'ensemble de ces résultats a été discuté lors de la [conférence PMIP du 26 au 20 octobre 2020](#). Les principaux articles communautaires ou concernant le modèle de l'IPSL sont regroupés dans un numéro spécial joint entre Geoscientific Model Development and Climate of the Past.

## L'Holocène moyen et le dernier maximum glaciaire : périodes clés pour les évaluations systématiques

Parmi les périodes sélectionnées, l'Holocène moyen et le dernier maximum glaciaire ont un statut particulier, car elles permettent de retracer l'évolution de la qualité des changements de climat simulés depuis la première phase du projet lancée en 1991. La figure 1 compare les résultats des deux dernières phases avec les reconstructions de température du mois le plus froid et du mois le plus chaud en Europe de l'Ouest et de précipitation annuelle sur l'Afrique de l'Ouest.

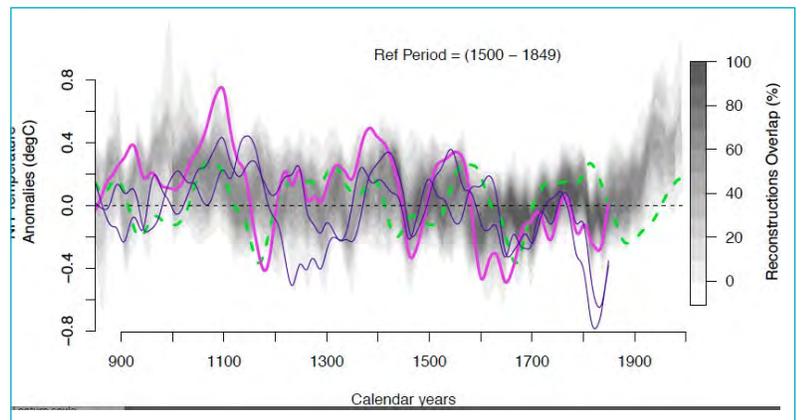
**Figure 1 :** Comparaison des résultats des simulations de l'Holocène moyen (fond jaune) et du dernier maximum glaciaire (fond bleu) avec les reconstructions paléoclimatiques sur l'Europe de l'Ouest et l'Afrique de l'Ouest. Les simulations ont été échantillonnées au point des données. Les barres d'erreur pour les reconstructions et les simulations sont obtenues avec une méthode de «bootstrap» qui tient compte de l'incertitude en chaque site pour les données et de la variabilité interannuelle pour les simulations. La ligne horizontale en rouge représente la moyenne des constructions sur la zone, et la zone rouge autour de cette barre représente les incertitudes sur cette moyenne, étant donné les incertitudes sur les reconstructions. Les barres d'erreur des simulations sont faibles car les cycles saisonniers moyens de chaque période sont obtenus à partir de moyennes sur 50 années tirées aléatoirement dans 100 ans de simulations. Pour chaque période et région, chaque point de la colonne de gauche représente les résultats d'une simulation (un modèle) PMIP3-CMIP5 et chaque point de la colonne de droite les résultats PMIP4-CMIP6 pour lesquels les différents modèles sont identifiés par une couleur différente. D'après Brierley *et al.* (2020) et Kageyama *et al.* (2020a).



La modulation du cycle saisonnier du rayonnement solaire par les variations lentes de l'orbite terrestre a conduit à un cycle saisonnier plus marqué en Europe et un renforcement de la mousson africaine à l'Holocène moyen. Le climat glaciaire est quant à lui plus froid en raison de la présence de calottes de glace sur l'hémisphère nord et une concentration plus faible en CO<sub>2</sub> de 80 ppm par rapport à 1850 (période préindustrielle). Les simulations reproduisent les grandes tendances régionales. Néanmoins, malgré les incertitudes des reconstructions certains biais systématiques sur l'amplitude des changements entre PMIP3 et PMIP4 persistent comme la sous-estimation de refroidissement du mois le plus froid en Europe de l'ouest pour le climat glaciaire ou la sous-estimation de l'augmentation des précipitations de mousson en Afrique pour le climat de l'Holocène moyen. Le nouvel ensemble de simulations présente aussi des améliorations concernant soit l'accord modèle données ou la dispersion entre les résultats des différents modèles. Des analyses en cours permettront de dissocier la part provenant des modifications des protocoles expérimentaux entre les exercices PMIP3 et PMIP4, de l'amélioration de la représentation du climat actuel et l'amélioration provenant d'une meilleure représentation des différentes rétroactions au sein ou entre les composantes du système climatique (atmosphère, océan, surface continental, glaces).

## Le dernier millénaire comme test du fonctionnement de la variabilité naturelle et de la détection du signal anthropique

Le dernier millénaire (850AD-1849) a rejoint le lot de simulations paléoclimatiques CMIP depuis le dernier exercice PMIP3-CMIP5. Cette période permet d'étudier l'influence des forçages (principalement) naturels (volcanisme, irradiance solaire) sur le climat dans des conditions assez proches de l'actuel et de mieux comprendre les mécanismes de la variabilité naturelle. Les activités humaines ont aussi commencé à agir sur le climat durant cette période via les changements d'usage des sols (déforestation, cultures, urbanisation), le rejet d'aérosols anthropiques et de gaz à effet de serre (Junglaus *et al.*, 2017). Ces forçages dit anthropiques sont néanmoins faibles et restent régionalement limités avant le début de l'ère industrielle au 19e siècle. Le dernier millénaire permet donc de caractériser la variabilité «naturelle» du climat, c'est-à-dire indépendante de l'action de l'homme sur le bilan radiatif de la Terre et pour laquelle on dispose d'enregistrements paléoclimatiques ou d'informations historiques relativement précises. Trois simulations du dernier millénaire démarrées de phases opposées de l'AMOC ont été réalisées avec le modèle IPSL-CM6A-LR pour évaluer l'influence de l'état initial de l'océan sur les tendances à long terme (Khodri *et al.* In prep.). Les premiers résultats montrent une cohérence probabiliste de la variabilité des températures de surface simulées en moyenne globale par rapport aux reconstructions issues de la [base de données PAGES2k](#). Les comparaisons modèles-données dans le cadre de projets de recherche collaboratifs en cours dans le cadre de PMIP4 permettront de discerner le rôle de la variabilité interne et celui des forçages externes à différentes échelles de temps et d'espace et de contextualiser les tendances observées sur la période récente (Fig. 2).



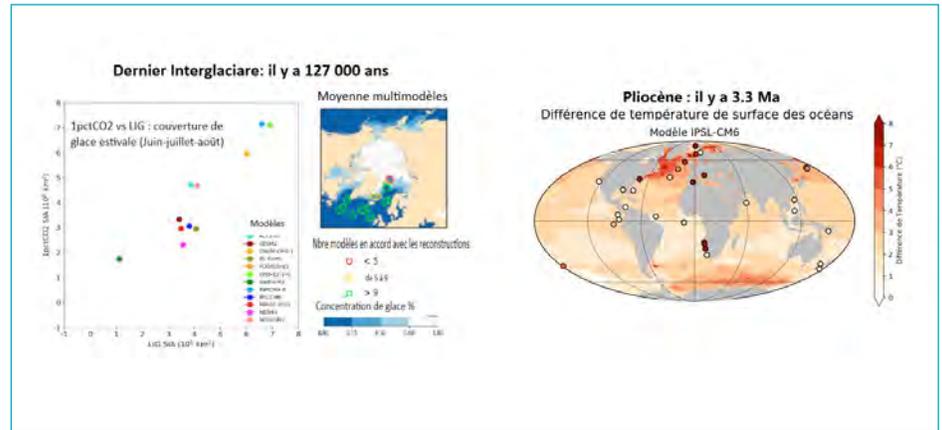
**Figure 2 :** Evolution de la moyenne des températures de l'Hémisphère Nord issue des reconstructions et simulée par le modèle IPSL-CM6A-LR par rapport à la période de référence 1500-1849 AD. La zone grisée représente l'amplitude des incertitudes des températures reconstruites pour l'Hémisphère Nord à partir des indicateurs climatiques produits par Osborn and Briffa (GIEC, Jansen *et al.*, 2007). La courbe violette correspond aux températures simulées par le modèle soumises aux variations des forçages naturels et anthropiques sur la période. Les courbes bleues correspondent à des simulations complémentaires sans changements d'utilisation des sols au cours de la simulation. La courbe verte clair en pointillés correspond à la simulation de contrôle avec le même modèle mais soumise aux forçages constants de 1850. Toutes les courbes sont lissées par une moyenne glissante à 20 ans.

## Le dernier interglaciaire et le Pliocène pour étudier l'amplification polaire

Les périodes du dernier interglaciaire il y a 12 7000 ans (LIG) et du Pliocène Moyen (PlioMIP), il y a 3.3 Ma ont été proposées comme périodes complémentaires. Elles bénéficient d'une coordination internationale propre rattachée à PMIP et ont démontré leur potentiel sur les questions liées à l'amplification polaire, la sensibilité des calottes ou la glace de mer dans des climats plus chauds. Les simulations du dernier interglaciaire complètent les simulations de l'Holocène Moyen, dans un contexte de changements de saisonnalité du rayonnement solaire plus marqués qu'à l'Holocène en raison d'une orbite terrestre plus elliptique. Cette période est aussi caractérisée par une calotte plus petite. Celle-ci qui n'est pas prise en compte dans les simulations standards, mais sera étudiée par la suite via le couplage à un modèle de calotte en liaison avec le projet IS-MIP6 (Ice Sheet Model Intercomparison Project for CMIP6) dans le cadre de CMIP6.

Le Pliocène s'est imposé car c'est la dernière période climatique pour laquelle le taux de CO<sub>2</sub> est équivalent à celui de la période actuelle et présente une calotte légèrement réduite. Les simulations PlioMIP avec le modèle de l'IPSL-CM6A-LR reproduisent un climat plus chaud que l'actuel ainsi que l'amplification du réchauffement aux hautes latitudes de l'Hémisphère Nord particulièrement marquée en Atlantique nord (Tan *et al.*, 2020) (Fig. 3). Les analyses s'attachent à identifier les différents facteurs intervenant dans l'amplification polaire et à mettre en relation ces facteurs avec ceux opérant dans l'amplification polaire en cours et à venir en réponse à l'accroissement de température lié à l'activité humaine.

Enfin les reconstructions disponibles au LIG permettent d'étudier la capacité des modèles à reproduire les changements de saisonnalité de couverture de glace de mer en période estivale. Des études précédentes ont identifié des analogies directes entre les mécanismes mis en œuvre au LIG et ceux associés à la fonte de la glace de mer estivale dans les projections futures (Kageyama *et al.*, 2020b). L'accord modèle données est relativement bon, sauf sur la marge de la banquise qui est mal représentée dans la plupart des simulations (la figure 3 illustre aussi



**Figure 3 :** Couverture de glace de mer simulée par l'ensemble des modèles pour le dernier interglaciaire (*gauche*) et changement de température de surface de la mer simulée par le modèle de l'IPSL pour la simulation PlioMIP. Pour le LIG, les données de couverture de glace estivale du LIG sont comparées pour chaque modèle avec les résultats des simulations où la concentration en gaz carbonique est augmentée de 1% par an dans l'atmosphère. La carte représente la moyenne d'ensemble des simulations et les ronds de couleur le nombre de modèle en accord avec les données des sites de prélèvement. Pour le Pliocène, les reconstructions de température sont indiquées par les ronds de couleur localisés sur les sites de prélèvement.

la relation linéaire qui émerge entre la couverture de glace de mer simulée au LIG et celle obtenue avec les mêmes modèles soumis à une teneur en CO<sub>2</sub> augmentée de 1% par an. Ces relations pourront être exploitées comme critères d'évaluation des modèles et identifier ceux qui sont les plus compatibles avec les données paléoclimatiques. L'un des enjeux est d'arriver à baser un tel critère, non pas sur une seule période climatique, mais en analysant aussi la cohérence des résultats et des mécanismes impliqués entre plusieurs climats.

### En savoir plus

- › Conférence PMIP 2020 : <http://www.pmip2020.com/1755774363/index?pagelD=1755902484>
- › Base de données Pages2K : <http://pastglobalchanges.org/science/wg/2k-network/intro>

### Références

- › Brierley, C. M., *et al.* (2020) Large-scale features and evaluation of the PMIP4-CMIP6 midHolocene simulations, *Clim. Past Discuss.*, 2020, 1-35, 2020. <https://doi.org/10.5194/cp-16-1847-2020>

- › Jansen, E., *et al.* (2007) Palaeoclimate, in: Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, edited by: Solomon, S., *et al.*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- › Jungclaus, J., *et al.* (2017) The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 simulations, *Geoscientific Model Development*, 10, 4005-4033, 2017. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017>
- › Kageyama, M., *et al.* (2018) The PMIP4 contribution to CMIP6 – Part 1: Overview and over-arching analysis plan, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1033-1057, 2018. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1033-2018>
- › Kageyama, M., *et al.* (2020a) The PMIP4-CMIP6 Last Glacial Maximum experiments: preliminary results and comparison with the PMIP3-CMIP5 simulations, *Clim. Past Discuss.*, 2020, 1-37, 2020a. <https://doi.org/10.5194/cp-2019-169>
- › Kageyama, M., *et al.* (2020b) A multi-model CMIP6 study of Arctic sea ice at 127 ka: Sea ice data compilation and model differences, *Clim. Past Discuss.*, 2020, 1-33, 2020b. <https://doi.org/10.5194/cp-2019-165>
- › Tan, N., *et al.* (2020) Modeling a modern-like pCO<sub>2</sub> warm period (Marine Isotope Stage KM5c) with two versions of an Institut Pierre Simon Laplace atmosphere–ocean coupled general circulation model, *Clim. Past*, 16, 1-16, 2020. <https://doi.org/10.5194/cp-16-1-2020>
- › Khodri M. *et al.*, Climate variability and change over the last 2000 years as simulated by the IPSL-CM5 and CM6 models. En préparation

## VolMIP : Projet d'intercomparaison des modèles de forçages volcaniques

M. Khodri

Ce projet d'intercomparaison de modèles s'appuie sur un protocole expérimental contraignant afin d'identifier les processus et les mécanismes de la réponse climatique au volcanisme stratosphérique de la période instrumentale et du dernier millénaire. Les expériences coordonnées sont conçues pour aborder systématiquement les facteurs d'incertitudes concernant la réponse climatique au volcanisme stratosphérique aux échelles de temps journalière à décennale (bilan radiatif, dynamique stratosphérique, réponse des nuages, principaux modes de variabilité, moussons, événements extrêmes, etc.) pour identifier les causes des différences inter-modèles (i.e. différents traitements des processus physiques). L'IPSL est l'un des principaux coordinateurs de ce MIP qui implique 11 groupes de modélisation.

### En savoir plus

Site web du projet : <http://www.volmip.org/>

### Références

- › Clyne, *et al.* (2020) Model physics and chemistry causing inter-model disagreement within the VolMIP-Tambora Interactive Stratospheric Aerosol ensemble, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, in review. <https://doi.org/10.5194/acp-2020-883>
- › Marshall, *et al.* (2018) Multi-model comparison of the volcanic sulfate deposition from the 1815 eruption of Mt. Tambora, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 2307–2328, <https://doi.org/10.5194/acp-18-2307-2018>.
- › Khodri, *et al.* (2017) Tropical explosive volcanic eruptions can trigger El Niño by cooling tropical Africa. *Nature communications*, 8(1), 778 <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00755-6>.
- › Zanchettin, *et al.* (2016) The Model Intercomparison Project on the climatic response to Volcanic forcing (VolMIP): Experimental design and forcing input data. *Geosci. Model Dev.*, 9, 2701-2719. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2701-2016>

# CORDEX

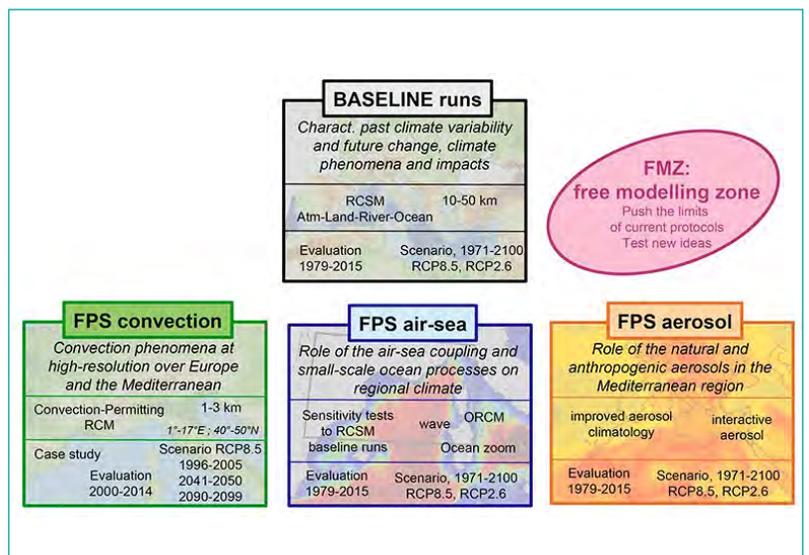
## Domaines CORDEX

### Med-CORDEX: phase 2

S. Somot

L'initiative Med-CORDEX coordonne les activités de modélisation climatique régionale en Méditerranée en s'appuyant sur la contribution volontaire d'un large réseau de 22 instituts provenant de 9 pays en Europe, Proche-Orient et Afrique du Nord. Cette initiative, née en 2009 au sein d'HyMeX, s'inscrit dans le programme international CORDEX du WCRP, est soutenue financièrement par le programme MISTRALS et contribue aux objectifs scientifiques d'HyMeX, ChArMEX et Med-CLIVAR. La phase 2 de l'initiative Med-CORDEX est largement avancée et s'appuie sur 5 piliers, coordonnant l'activité de modélisation :

1. les simulations dites « de référence » qui visent à produire un grand ensemble coordonné de simulations climatiques à haute résolution et couplées comprenant les différentes composantes du système climatique régional (atmosphère-surfaces continentales-rivière-océan),
2. le FPS-airsea (Flagship Pilot Study) qui s'intéresse à l'impact de la représentation fine de la mer Méditerranée sur le climat régional,
3. le FPS-aérosol qui étudie les liens entre les aérosols et le climat méditerranéen,
4. le FPS-convection qui investigate aux échelles climatiques les phénomènes convectifs à l'aide de modèles à très haute résolution atmosphérique (~km),
5. la FMZ (Free Modelling Zone) qui permet un espace de liberté aux groupes de modélisation pour tester le cadre actuel de modélisation de Med-CORDEX et préparer l'avenir.



#### En savoir plus

- > Site web du projet : <https://www.medcordex.eu/> qui héberge entre autres la base de données de la phase 1 et celle du dernier workshop international qui a eu lieu à Toulouse en Novembre 2019 (<http://www.meteo.fr/cic/meetings/2019/medcordex2019/>).
- > Plusieurs laboratoires français (CNRM, LMD, ENSTA, IPSL, MERCATOR, LA, Université de Bourgogne) contribuent à Med-CORDEX, le CNRM et la LA participant à son comité de pilotage.

# CORDEX – Flagship Pilot Studies (FPS)

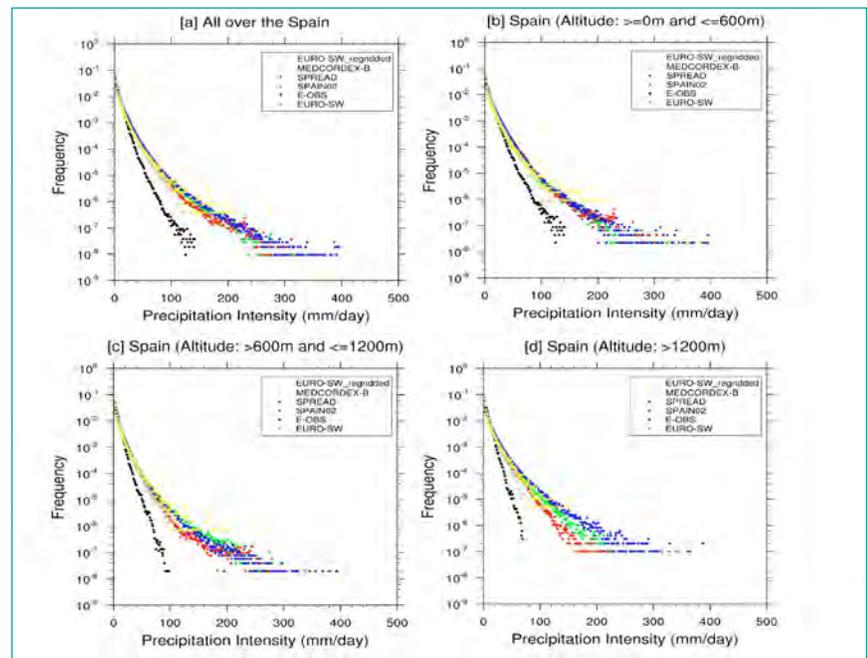
## FPS «Convection permitting simulations over Europe»

### Simulations climatiques haute résolution permettant une représentation des hétérogénéités de surface et le développement explicite de la convection profonde

S. Bastin, A. Alias, E. Brisson, C. Caillaud, L. Fita, Q. Fumiere, M. Truong Ha, N. Kumar Shahi, P. Lucas-Picher, R. Pennel, J. Polcher, S. Somot

Le Flagship Pilot Study «Convection permitting simulations over Europe», initiative commune des communautés EURO-CORDEX et Med-CORDEX, regroupant environ 25 instituts européens dont l'IPSL et le CNRM, et le projet H2020 EUCP, assurent la coordination au niveau européen de la réalisation de simulations climatiques (périodes de 10 ans) à une résolution horizontale de 3km ou plus permettant de s'affranchir de l'utilisation d'une paramétrisation de la convection profonde, grande source d'incertitude dans les modèles. L'objectif est de créer un ensemble de simulations sur un domaine commun large autour de l'arc alpin (tous les groupes) et des ensembles plus petits (2 à 4 simulations/domaine) sur les autres régions européennes. Quatre périodes de 10 ans sont couvertes: une période d'évaluation 2000-2009; une période historique 1996-2005, et 2 périodes de climat futur avec le scénario rcp8.5 (2041-2050 et 2091-2100). Au CNRM, le modèle AROME a produit des simulations sur i) le domaine alpin, ii) le domaine North-West-Europe couvrant îles britanniques et la France et iii) l'île de la Réunion. L'IPSL est impliqué sur le domaine alpin avec WRF et sur la péninsule ibérique avec le modèle RegIPSL (WRF + ORCHIDEE). Cette dernière simulation

est forcée avec un membre du modèle IPSL-CM6A-LR, les autres simulations utilisant des simulations CMIP5. Plusieurs analyses ont déjà montré une valeur ajoutée de ces simulations pour la fréquence et intensité des précipitations extrêmes, on s'attend aussi à une amélioration des distributions de vent et des flux radiatifs, enjeux importants à la fois pour le climat et l'énergie. A noter qu'une collaboration entre l'IPSL, l'IGE et le CIMA à Buenos Aires prépare la réalisation et l'analyse de simulations en convection explicite avec RegIPSL sur l'Amérique du Sud.



Diagrammes fréquence-intensité des précipitations en Espagne pour différents produits d'observations grillés (E-OBS à 25 km de résolution en noir, SPAIN02 à 10 km de résolution en rouge, et SPREAD à 5km de résolution en bleu), et pour les simulations RegIPSL (MEDCORDEX-B à 20 km de résolution en gris, EURO-SW à 3km de résolution en vert, et EURO-SW regrillé sur la grille de MEDCORDEX-B en jaune). La séparation en différentes zones topographiques est montrée sur les différents diagrammes (voir titres)

## FPS «Aérosols» du projet Med-CORDEX

M. Mallet et F. Solmon

Le Flagship Pilot Study (FPS) «Aérosols» du projet Med-CORDEX vise à étudier le rôle des aérosols, d'origine naturelle et anthropique, sur le climat présent et passé du milieu Méditerranéen. En raison de leurs propriétés microphysiques et optiques, les aérosols peuvent avoir un impact important sur le bilan radiatif (effet direct) et sur les propriétés des nuages (effet indirect et semi-direct) à l'échelle régionale. Ces particules ont également un impact sur les fluctuations climatiques régionales, de l'échelle quotidienne à l'échelle multidécennale. Ils constituent actuellement l'une des principales sources d'incertitude dans l'attribution du changement climatique passé mais également sur les projections du changement climatique futur à l'échelle mondiale et régionale. Dans la plupart des cas, les aérosols naturels et anthropiques ne sont pas bien représentés dans les

modèles de climat régionaux sur la région Méditerranéenne. Dans ce cadre, 3 grands thèmes sont abordés dans ce FPS qui sont :

1. la caractérisation de la variabilité passée et l'évolution future des aérosols à l'échelle climatique en Méditerranée,
2. comprendre le rôle des aérosols sur la variabilité du climat passé mais également futur,
3. quel est le rôle des aérosols sur certains événements extrêmes comme les vagues de chaleur ou les précipitations extrêmes ?

### En savoir plus

- › Les objectifs, les différents groupes de recherche impliqués dans ce FPS, les différents protocoles proposés ainsi que les publications issues de cette initiative sont rassemblés sur le site web du projet. <https://www.hymex.org/cordexfps-aerosol/wiki/doku.php>

## Etudes récentes

### Maître versus Esclave ? Un protocole d'étude de la régionalisation du climat

L.Li

La relaxation newtonienne appliquée aux limites du RCM (Regional Climate Model) est une technique largement utilisée pour la régionalisation du climat et les prévisions météorologiques régionales. Il permet au RCM de s'emboîter dans le GCM (Global Climate Model) et de suivre l'évolution de ce dernier. Un cadre idéalisé pour mimer cette pratique générale est construit avec la plateforme de modélisation LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Zoom) et utilisé pour évaluer les effets de la procédure de relaxation. L'évaluation porte à la fois sur la variabilité synoptique et la moyenne à long terme. LMDZ est un modèle de circulation générale atmosphérique globale qui peut être configuré comme un modèle régional lorsque le domaine extérieur est piloté par un forçage. Il joue ainsi à la fois le rôle de GCM et de RCM. Une même paramétrisation physique et une configuration dynamique identique sont utilisées pour

assurer une comparaison rigoureuse entre les deux modèles. Ce protocole expérimental que l'on peut appeler «Master (GCM) versus Slave (RCM)» considère le GCM comme la référence pour évaluer le comportement du RCM. En termes de climat moyen, il existe des différences notables, non seulement dans les zones frontalières, mais aussi au sein du domaine. En termes de variabilité synoptique, il existe une ressemblance spatiale et une concomitance temporelle entre les deux modèles. Mais il existe une dépendance aux variables, aux saisons, aux échelles spatio-temporelles et aux modes spatiaux de circulation atmosphérique. L'hiver montre une plus grande ressemblance entre RCM et GCM. Une meilleure similitude se produit lorsque la circulation atmosphérique se manifeste à grande échelle. Les cas de faible corrélation sont généralement observés lorsque la circulation dominante de la région est de petites échelles. Une autre expérience avec un cadre identique mais RCM dans une résolution plus élevée permet d'isoler l'effet de relaxation de celui du raffinement du maillage.

### Référence

- › Li, S., *et al.* (2020) An idealized protocol to assess the nesting procedure in regional climate modelling, *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.6801>

# Projets dans lesquels CLIMERI est impliqué

## Projet national GAIA-data

*S. Joussaume*

CLIMERI-France participe au projet GAIA Data qui vient d'être soumis en juin 2020 à l'axe numérique de l'appel à manifestation d'intérêt PIA3/ESR-EquipEX+. GAIA Data est un projet qui rassemble les 3 infrastructures de recherche Data Terra, PNDB et CLIMERI-France qui vise à développer une infrastructure distribuée de données et de services pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement. Cette plateforme de données et de services ouverte et interopérable permettra un accès transparent à toute la gamme de sources de données (données de satellites, de campagnes de mesures, des dispositifs *in-situ*, des inventaires, des observatoires et des expériences, des simulations

de référence), leur extraction et leur combinaison pour développer des produits pour tous les compartiments du système Terre. Il fournira également des services thématiques évolutifs répondant aux besoins des communautés scientifiques et des pratiques de recherche reposant sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement.

### Quelques informations supplémentaires

- › Le projet est porté par le CNRS
- › Il implique 21 partenaires
- › Pour un montant demandé de 19,6 M€.
- › Le porteur est Frédéric Huynh, directeur de l'UMS Data Terra.

## L'infrastructure européenne IS-ENES3

*S. Joussaume*

IS-ENES3, est la 3ème phase du projet d'infrastructure européenne de modélisation du climat de la communauté ENES (European Network for Earth System modeling). Le projet H2020 a débuté le 01/01/2019 pour 4 ans. Il est coordonné par le CNRS au titre de l'IPSL par Sylvie Joussaume. Il rassemble 22 partenaires dans 11 pays européens pour un montant total de 9,8M€. La France y participe à travers l'IPSL, le CERFACS et le CNRM.

IS-ENES3 soutient l'intégration de la communauté de modélisation globale et régionale, le partage de logiciels et d'expertise, le développement de modèles communautaires comme la nouvelle plateforme de modélisation de glace de mer, la contribution de l'Europe à la base de données ESGF et la documentation des modèles ES-DOC, la diffusion et l'utilisation des données des simulations internationales CMIP6 et CORDEX. Un des enjeux d'IS-ENES3 est de préparer une infrastructure de long-terme.

### En savoir plus

- › Site web du projet <https://is.enes.org>
- › Portal ENES d'accès aux services <https://enes.org>
- › Inscrivez-vous à la newsletter du projet <https://lists.enes.org/mailman/listinfo/is-enes3t>

## ESIWACE2

*S. Joussaume*

ESIWACE2, est la 2eme phase du projet européen H2020 de Centre d'excellence pour la simulation du climat et de la prévision du temps. Le projet est coordonné par le DKRZ. Il a débuté le 01/01/2019 pour 4 ans pour un montant total de 8 M€. La France y participe par le CNRS au titre de l'IPSL et le CERFACS. L'entreprise ATOS/Bull y est également partenaire. ESIWACE2 est complémentaire au projet IS-ENES3. Il est focalisé sur le calcul haute performance et la préparation des prochaines générations de modèles pour les futures machines européennes de calcul pré-exascale et exascale.

### En savoir plus

- › Site web du projet <https://www.esiwace.eu/>

## CRESCENDO

### CRESCENDO — ou le projet coordonnant la contribution de groupes européens de modélisation à CMIP6

*R. Séférian et L. Bopp*

Le projet H2020 CRESCENDO (2016-2021) est un projet de recherche centré autour de la modélisation intégrée du système Terre (atmosphère/aérosols, surfaces, océan, cycle du carbone et azote). Les objectifs de ce projet visent à améliorer ces composantes de modèle du système Terre (ESMs) et coordonner la préparation et la contribution européenne à CMIP6 et autres exercices d'intercomparaison de modèles internationaux.

L'IPSL et le CNRM font partie du consortium regroupant les 7 groupes de modélisation du système Terre avec UKESM (Royaume-Uni), MPI (Allemagne), EC-Earth (Suède), NorESM (Norvège), CMCC (Italie).

En donnant une impulsion importante à la communauté européenne de recherche sur le climat, CRESCENDO a permis au 7 groupes de modélisation du système Terre de faire une contribution notable à CMIP6 et d'être à l'initiative de nombreux exercices d'intercomparaison de modèle tels que C4MIP, OMIP, etc...

Un des grands progrès de CRESCENDO est d'avoir fait dialoguer des développeurs de modèles avec une communauté d'experts en évaluation de modèles. Ce dialogue a permis de mieux comprendre les causes de dégradation ou d'amélioration des modèles.

En ce qui concerne la composante océanique, nous avons pu remarquer une amélioration générale des modèles de génération CMIP6 par rapport à leur version apparentée de CMIP5 (Séférian *et al.*, 2020).

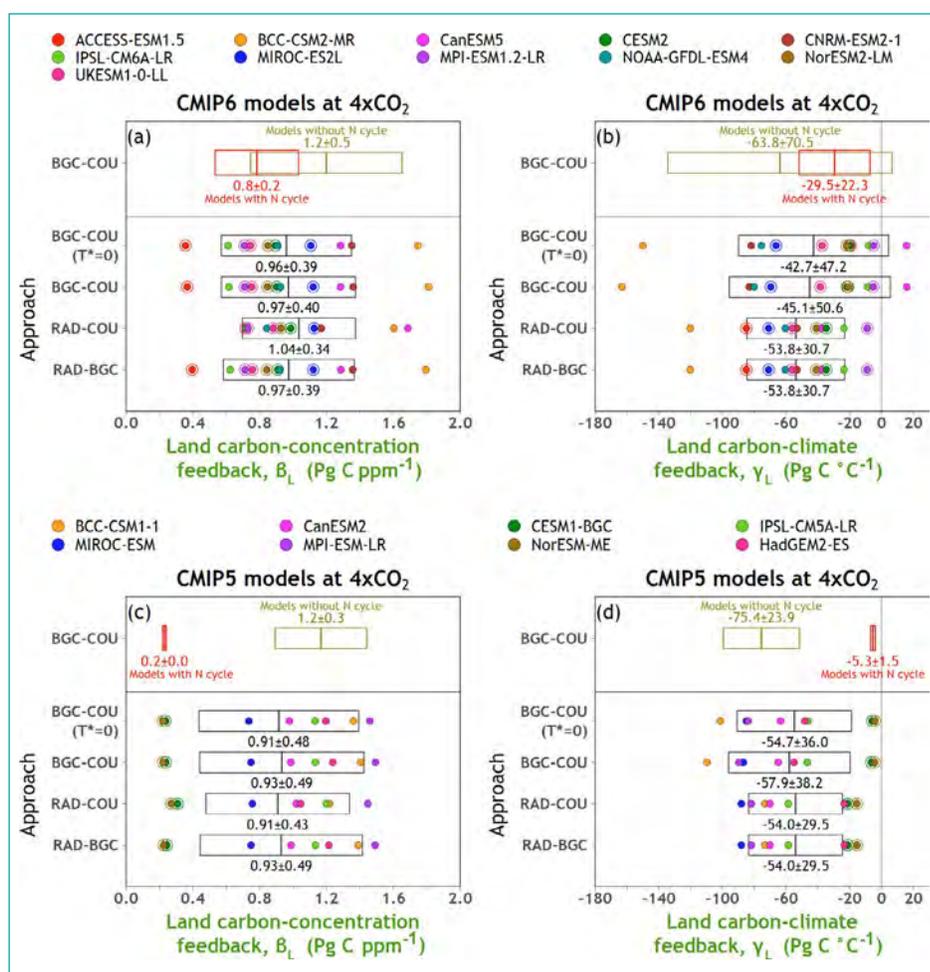
En ce qui concerne les surfaces continentales, nous avons pu montrer que l'inclusion du cycle de l'azote a permis de réduire les incertitudes relatives à la réponse du cycle du carbone continental au changement climatique et à l'accroissement du  $\text{CO}_2$  atmosphérique (Arora *et al.* 2020). C'est un exemple notable où l'augmentation en complexité des modèles tend à réduire l'incertitude multi-modèle.

### En savoir plus :

- Site web du projet : <https://www.crescendoproject.eu/>

### Références

- Arora, V. K. *et al.* (2020) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models, *Biogeosciences*, 17, 4173–4222. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4173-2020>
- Séférian, R., *et al.* (2020) Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6, *Current Climate Change Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40641-020-00160-0>



Paramètres de rétroaction du cycle du carbone continental à l'augmentation de la concentration de  $\text{CO}_2$  atmosphérique (a) et au réchauffement global (b) provenant des modèles CMIP6 participants, calculés selon 4 approches différentes. Les cases indiquent la plage d'écart type autour de la moyenne, et les points de couleur individuels représentent les modèles individuels. Les modèles qui comprennent une représentation du cycle de l'azote des terres sont identifiés par un cercle autour de leur point. La plage moyenne  $\pm 1$  d'écart type des paramètres de rétroaction du modèle est également indiquée séparément pour les modèles qui représentent ou non le cycle de l'azote des terres en utilisant l'approche BGC-COU. Les résultats des modèles CMIP5 participant à l'étude sont présentés aux points (c) et (d). Figure issue de Arora *et al.* (2020).

Les modèles qui comprennent une représentation du cycle de l'azote des terres sont identifiés par un cercle autour de leur point. La plage moyenne  $\pm 1$  d'écart type des paramètres de rétroaction du modèle est également indiquée séparément pour les modèles qui représentent ou non le cycle de l'azote des terres en utilisant l'approche BGC-COU. Les résultats des modèles CMIP5 participant à l'étude sont présentés aux points (c) et (d). Figure issue de Arora *et al.* (2020).

# PRIMAVERA

*S. Valcke, M.P. Moine et L. Terray*

PRIMAVERA est un projet financé par la Commission Européenne dans le cadre du programme Horizon 2020. Ce projet, dirigé par le UK Met Office et co-dirigé par l'U. Reading, a rassemblé 19 partenaires Européen durant la période allant de novembre 2015 à juillet 2020.

Le but de PRIMAVERA était de développer une nouvelle génération de modèles de climat globaux à haute résolution, capables de simuler et de prévoir le climat jusqu'en 2050 avec une précision jamais atteinte jusque-là, permettant d'explorer ainsi de nouvelles voies scientifiques et de fournir de nouveaux éléments pour l'aide à la décision face aux enjeux du changement climatique. Les utilisateurs finaux dans plusieurs secteurs spécifiques qui s'intéressent aux impacts du changement climatique ont été impliqués afin de s'assurer que l'information climatique produite par les modèles était adaptée à leurs besoins. Sept groupes de modélisation européens développant des modèles couplés de circulation générale avec une résolution permettant de reproduire des événements météorologiques et climatiques réalistes (~25 kms) étaient impliqués dans le projet, dont le groupe CNRM-CERFACS. Les paramétrisations de ces modèles ont également été améliorées. PRIMAVERA représente la contribution du groupe CNRM-CERFACS à la partie «High-Resolution Model Intercomparaison Project» du 6e exercice d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP6), réalisée avec le modèle CNRM-CM6-1-HR. Ces simulations, réalisées dans le cadre d'un protocole précis et contraint, ont permis d'avancer la compréhension des processus déterminant la variabilité climatique et l'évolution du climat Européen, en particulier le rôle de l'océan tropical et extra-tropical dans les changements de circulation atmosphérique, incluant les extrêmes climatiques.

## En savoir plus

- › Site web du projet : <https://www.primavera-h2020.eu/>

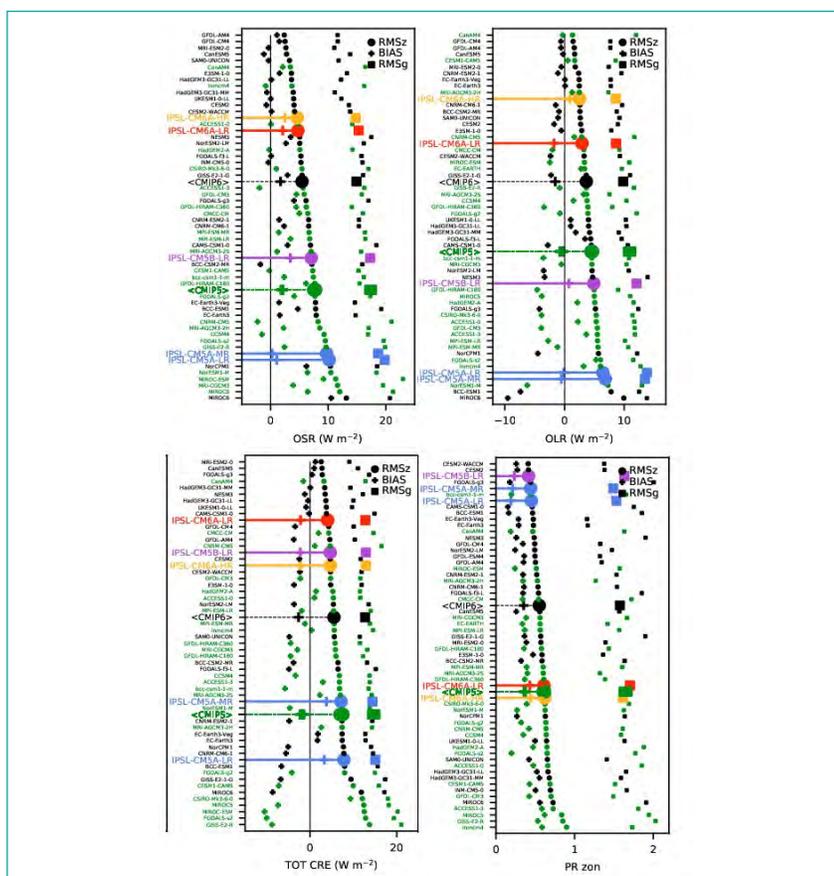
# L'écho des services de modélisation labellisés et des GDR rattachés à CLIMERI

## LMDZ

### La version CMIP6 de LMDZ, fruit de 20 ans de recherches

F. Hourdin pour l'équipe LMDZ

Les projections du changement climatique, coordonnées dans le cadre du projet international CMIP (en amont des rapport du Giec) rythment aujourd'hui la vie et le développement des modèles climatiques comme celui de l'IPSL ou du CNRM. Cette problématique particulière et les enjeux de société associés font peser un poids particulier sur le développement des modèles et donc sur les équipes qui en ont la charge et imposent des exigences supplémentaires quant au réalisme du climat simulé par le modèle atmosphérique. Celui-ci doit non seulement prédire correctement la saisonnalité des températures, des pluies et du vent, mais aussi les flux en surface (pour le couplage avec l'océan ou la végétation), ou le mélange vertical des espèces chimiques et aérosols pour ne citer que certains aspects. Pour permettre au modèle d'évoluer malgré ces nombreuses contraintes, le LMD a adopté très en amont, lors de la participation à l'exercice CMIP5, une stratégie à deux vitesses. Les simulations dites « système Terre » ou ESM pour « Earth System Model » en anglais, dans lesquelles on peut ou non activer tout ou partie du cycle du carbone, ou la chimie interactive, ont été réalisées avec une version du modèle couplé de l'IPSL, IPSL-CM5, très proche de celle utilisée pour le précédent exercice CMIP3. Les différences principales concernaient un raffinement de la grille en latitude et une extension à la stratosphère [Ref. 1, 2]. En parallèle, l'équipe a fait aboutir pour CMIP5 une version dite nouvelle physique, dans laquelle était capitalisée une dizaine d'années de recherche sur la paramétrisation



Erreur quadratique moyenne calculée sur la moyenne zonale annuelle (RMSz, cercles), biais moyen global (signes "+") et erreur quadratique moyenne globale calculée sur le cycle saisonnier moyen des champs longitude-latitude (RMSg, carrés) pour le rayonnement sortant au sommet de l'atmosphère en ondes courtes (OSR) et en ondes longues (OLR) ( $W m^{-2}$ ), pour le forçage radiatif total (ondes courtes et longues, TOT CRE) ( $W m^{-2}$ ) et pour le taux de précipitation (PR, mm/jour) pour les modèles CMIP5 et CMIP6 en mode atmosphère forcée. Les modèles sont classés en fonction de RMSz. Les mesures sont calculées par rapport aux climatologies EBAF et GPCP.

des processus convectifs et nuageux (cf. plus haut) [Ref. 3, 4]. Cette version, bien que présentant des avancées importantes sur la représentation des processus nuageux et convectifs, avec une meilleure représentation des nuages bas et du cycle diurne de la convection continentale par exemple, souffrait de défauts de jeunesse évidents.

Pour l'exercice CMIP6, un travail très important a été mené par l'équipe LMDZ afin de proposer une version beaucoup plus aboutie de cette "Nouvelle Physique" [Ref. 5], incluant des nouveaux développements côté atmosphérique : déclenchement stochastique de la convection [Ref. 6, 7], modification du modèle de transport convectif de couche limite pour représenter les stratocumulus marins [Ref. 8], travail systématique d'évaluation et ajustement du schéma nuageux [Ref. 9], de l'effet du relief [Ref. 10] ou de la représentation du climat continental [Ref. 11, 12]. La figure illustre l'amélioration de certaines "métriques" radiatives entre les versions CMIP5 et CMIP6 de LMDZ. Alors que le modèle se situait parmi les modèles les moins bons et/ou les moins bien ajustés en termes radiatifs avec les versions "ancienne" (LMDZ5A) ou "nouvelle physique" (LMDZ5B) par rapport aux autres modèles de CMIP5, la version LMDZ6A se compare plutôt de façon satisfaisante aux modèles CMIP6, qui se sont globalement légèrement améliorés par rapport à CMIP5 (les moyennes des métriques calculées sur les ensembles CMIP5 et CMIP6 sont identifiées par les gros marqueurs vert et noir). Après deux ans de travail collectif acharné du «groupe pirate» [Ref. 13] pour finaliser la configuration CMIP6 du modèle couplé sur la base de cette nouvelle configuration atmosphérique LMDZ6, puis une année environ pour réaliser les simulations CMIP6 proprement dites, des publications ont permis de mettre en lumière les progrès accomplis sur la représentation du climat couplé [Ref. 14] et de mettre en évidence en particulier l'importance de la représentation de la convection de couche limite et des nuages bas océaniques sur la réduction des biais de température océanique [Ref. 15].

## References

- › 1) Hourdin *et al.* (2013) Impact of the LMDZ atmospheric grid configuration on the climate and sensitivity of the IPSL-CM5A coupled model. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1411-3>
- › 2) Dufresne *et al.* (2013) Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- › 3) Hourdin *et al.* (2013) LMDZ5B: the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1343-y>
- › 4) Rio *et al.* (2013) Control of deep convection by sub-cloud lifting processes: the ALP closure in the LMDZ5B general circulation model. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1506-x>
- › 5) Hourdin *et al.* (2020) LMDZ6A: the atmospheric component of the IPSL climate model with improved and better tuned physics. <https://doi.org/10.1029/2019MS001892>
- › 6) Rochetin *et al.* (2014) Deep Convection Triggering by Boundary Layer Thermals. Part I: LES Analysis and Stochastic Triggering Formulation. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0336.1>
- › 7) Rochetin *et al.* (2014) Deep Convection Triggering by Boundary Layer Thermals. Part II: Stochastic Triggering Parameterization for the LMDZ GCM. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0337.1>
- › 8) Hourdin *et al.* (2019) Unified Parameterization of Convective Boundary Layer Transport and Clouds With the Thermal Plume Model. <https://doi.org/10.1029/2019MS001666>
- › 9) Madeleine *et al.* (2020) Improved representation of clouds in the atmospheric component LMDZ6A of the IPSL earth system model IPSL-CM6A. <https://doi.org/10.1029/2020MS002046>
- › 10) Gastineau *et al.* (2020) Alleviation of an arctic sea ice bias in a coupled model through modifications in the subgrid-scale orographic parameterization. <https://doi.org/10.1029/2020MS002111>
- › 11) Diallo *et al.* (2017) The surface energy budget computed at the grid-scale of a climate model challenged by station data in west africa. <https://doi.org/10.1002/2017MS001081>
- › 12) Cheruy *et al.* (2020) Improved near surface continental climate in IPSL-CM6A-LR by combined evolutions of atmospheric and land surface physics. <https://doi.org/10.1029/2019MS002005>
- › 13) Mignot *et al.* (2020) The tuning strategy of IPSL-CM6A-LR, submitted to James.
- › 14) Boucher *et al.* (2020) Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model. <https://doi.org/10.1029/2019MS002010>
- › 15) Hourdin, *et al.* (2020) Convective Boundary Layer Control of the Sea Surface Temperature in the Tropics. <https://doi.org/10.1029/2019MS001988>

## DEPHY

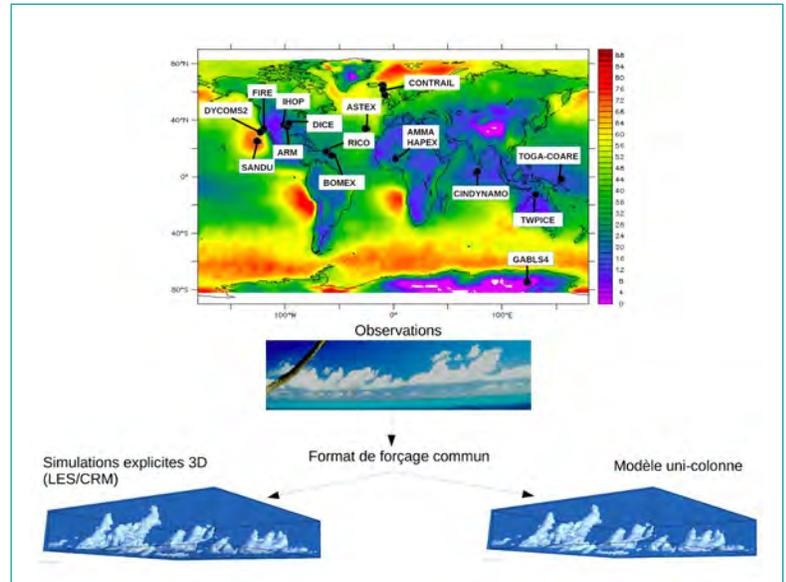
### GDR DEPHY : vers un format commun des cas d'étude 1D/LES partagé à l'international

C. Rio

Une approche privilégiée pour le développement et l'évaluation des paramétrisations physiques des modèles atmosphériques consiste à comparer des simulations réalisées avec la version uni-colonne d'un modèle de prévision ou de climat à des simulations réalisées avec un modèle à haute résolution de type LES (Large-Eddy Simulations) ou CRM (Cloud Resolving Models) sur les mêmes cas d'étude, c'est-à-dire en appliquant exactement les mêmes forçages en entrée des modèles. Cette méthode, héritée du groupe international GCSS (devenu GASS) repose sur la mise en place progressive de cas d'études à partir de situations observées ou idéalisées, afin de couvrir différents régimes atmosphériques sur continent et océan (ciel clair, cumulus de beau temps, stratocumulus, convection orageuse, etc.).

La figure illustre l'approche 1D/LES et montre l'éventail des cas d'étude utilisés dans la communauté DEPHY. Il existe diverses façons de forcer ces simulations, en imposant les variables de surface (rugosité, albédo, température, flux, etc.), les advections de grande-échelle, les champs de vitesse (horizontale, verticale), les flux radiatifs (...), si bien que chaque cas est fourni avec un fichier de forçage spécifique. Depuis plusieurs années, la communauté DEPHY œuvre pour l'uniformisation des fichiers de forçages de tous les cas d'études disponibles, afin de faciliter la mise en place des cas d'étude existant et à venir dans les modèles français (MESO-NH, LMDZ, ARPEGE, AROME). Récemment, un outil de calibration automatique des paramètres utilisés dans les paramétrisations physiques, basé sur des comparaisons systématiques 1D/LES et utilisant ce format commun, a été développé dans le cadre du projet High-Tune, ANR issue des activités de DEPHY. Un atelier international organisé par DEPHY s'est tenu en visio-conférence en juin dernier afin d'étendre cet effort à l'international et généraliser l'utilisation du format commun DEPHY pour les cas 1D/LES. Près d'une vingtaine de groupes de modélisation de diverses institutions ont répondu présent (CNRM, LMD, DOE, ECMWF, DWD, University of Köln, NOAA, MetOffice, JPL, NCAR, NASA, GFDL, Caltech...), permettant de recenser une quarantaine de cas d'étude actuellement utilisés pour le développement des modèles. Pendant l'atelier, le format commun proposé a été discuté, voire testé dans certains modèles. Un format commun international des cas 1D/LES permettra à terme à chaque groupe de modélisation de faire tourner plus facilement les cas d'étude disponibles, et ouvre également la voie au partage des fichiers de sortie des modèles 1D et des modèles haute résolution, ainsi qu'au partage des outils de tuning automatique développé dans le cadre de High-Tune. Les fichiers de forçages des cas disponibles au format commun sont mis à disposition au fur et à mesure via un dépôt [GitHub](https://github.com).

Rendez-vous est donné à la conférence High-Tune, du 12 au 16 avril 2021 à Météo-France pour le suivi des avancées autour du développement de ce format commun 1D/LES. (<http://www.meteo.fr/cic/meetings/2021/high-tune/>)



Localisation des cas d'étude utilisés par la communauté DEPHY pour le développement des paramétrisations physiques positionnés sur une carte de la couverture nuageuse associée aux nuages bas sur la période JFM observée par CLOUDSAT/CALIPSO (Chepfer et al., 2008). Les observations issues de campagnes de mesures dédiées sont utilisées pour dériver des forçages qui sont appliqués en entrée des modèles haute résolution et 1D.



# CLIMERI-France

*Infrastructure de recherche nationale de modélisation du climat*