



e-Lettre CLIMERI-France N°2

Février 2022

DANS CE NUMERO

Bilan des contributions françaises à CORDEX

. 2 .

- › CORDEX au CNRM, bilan et prospective
- › Bilan CORDEX phase 1 à l'IPSL
- › Un partenariat franco-vietnamien pour la modélisation couplée régionale océan-atmosphère en Asie du Sud-Est dans le cadre de CORDEX-SEA

Etudes scientifiques en modélisation régional du climat

. 8 .

- › Incohérences GCM-RCM pour les signaux de changement climatique en Europe
- › Effets des aérosols d'Afrique australe sur la mousson ouest-africaine
- › Emulateur statistique de modèle régional de climat : Application au modèle régional de climat MAR sur l'Antarctique

Services climatiques exploitant les simulations CORDEX

. 13 .

- › De l'usage d'EURO-CORDEX au sein du service climatique national DRIAS les futurs du climat

L'édito du Conseil Scientifique

Le 2^{ème} numéro de la e-Lettre CLIMERI-France est consacré à un bilan de l'initiative internationale CORDEX (COordinated Regional Downscaling EXperiment), lancée il y a plus de 10 ans par le WCRP (World Climate Research Programme), et à laquelle ont contribué de nombreux instituts et laboratoires de recherche en France. La vision de long-terme de CORDEX est de faire progresser et de coordonner à l'échelle internationale la science et l'application des méthodes de régionalisation du climat. Les quatre grands objectifs de CORDEX sont :

- › Mieux comprendre les phénomènes climatiques régionaux et locaux pertinents, leur variabilité et leurs changements, par la descente d'échelle.
- › Évaluer et améliorer les modèles et techniques de régionalisation du climat.
- › Produire des ensembles coordonnés de projections régionales à échelle fine dans le monde entier.
- › Favoriser la communication et l'échange de connaissances avec les utilisateurs d'informations climatiques régionales.

Une première phase de cette initiative s'achève actuellement avec la fin des premiers ensembles de simulations sur chaque domaine CORDEX, la fin de la première vague des CORDEX Flagship Pilot Studies qui vise à répondre à une question scientifique précise par des protocoles expérimentaux dédiés, la parution du 6^{ème} rapport du GIEC qui fait pour la première fois la part belle aux informations climatiques régionales et le lancement de nombreux services climatiques opérationnels s'appuyant sur des simulations climatiques régionales issues de cette initiative. Il est donc temps pour la communauté française de faire un bilan de cette première phase afin de mieux préparer celle qui débute. C'est l'objectif de cette e-Lettre CLIMERI-France.

Samuel SOMOT
pour le Comité Scientifique CLIMERI-France

Bilan des contributions françaises à CORDEX

CORDEX au CNRM : Bilan et prospective

S. Somot, A. Alias, J. Beaumet, E. Brisson, C. Caillaud, L. Corre, M. Déqué, A. Doury, T. Drugé, C. Dubois, Q. Fumière, N. Gonzalez, A. Lemonsu, P. Lucas-Picher, M. Mallet, P. Nabat, S. Planton, F. Sevault, R. Waldman

CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), Université de Toulouse, Météo-France, CNRS

Le CNRM s'est engagé dans CORDEX dès le lancement de l'initiative. En Février 2009, il a ainsi accueilli à Toulouse la réunion du WCRP visant à créer un exercice d'intercomparaison des modèles régionaux de climat en amont du 5^{ème} rapport du GIEC. Il a également co-proposé et co-anime encore aujourd'hui deux initiatives au sein de CORDEX : le domaine Med-CORDEX qui concerne les activités de modélisation régionale sur le domaine Méditerranée et le Flagship Pilot Study (FPS) qui vise à mieux comprendre les interactions aérosol-climat sur la région méditerranéenne (FPS-aerosol).

Le CNRM s'est également impliqué en réalisant de nombreuses simulations climatiques dites d'évaluation (forçage par une réanalyse globale) ou de scénario (forçage par des modèles globaux de climat issus de CMIP5). Ces simulations ont été réalisées avec différents modèles de climat régionaux sur plusieurs domaines d'intérêt de CORDEX à des résolutions spatiales de 150, 50, 12 et 2.5 km. Plus spécifiquement, le modèle global à grille basculée-étirée CNRM-ARPEGE a été utilisé sur les domaines Europe, Afrique et Antarctique (en collaboration avec l'Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) sur ce dernier), différentes versions du modèle régional de climat (RCM en anglais) à aire limitée CNRM-ALADIN ont été utilisées sur les domaines Méditerranée, Europe, Afrique et Amérique du Nord. Une contribution originale a été la mise en oeuvre d'un modèle couplé du système climatique régional (CNRM-RCSM) pour l'étude du climat et de la mer Méditerranée, utilisé aussi dans les FPS-aerosol et FPS-airsea, et représentant à haute résolution toutes les composantes physiques du climat de la région (atmosphère, surfaces et hydrologie continentales, océan, aérosols anthropiques et naturels). Plus récemment, dans le FPS-convection, le CNRM a réalisé des simulations

multi-décennales à échelle très fine (2.5km) avec un modèle qui représente explicitement la convection profonde, CNRM-AROME, sur un domaine pan-alpin. Une partie des simulations réalisées est aujourd'hui disponible sur des bases de données ouvertes telles que l'ESGF, la base de données Med-CORDEX, le portail DRIAS^{les futurs du climat}, le portail web du Copernicus Climate Change Service ou l'Atlas Interactif du GIEC permettant leur accès libre et le développement de services climatiques. À noter également que le modèle de climat global (GCM en anglais) CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 est l'un des plus utilisés comme modèle forceur au sein de l'initiative CORDEX et cela tous domaines confondus.

Outre la contribution à de nombreuses études scientifiques communautaires et multi-modèles, la contribution scientifique spécifique du CNRM s'est focalisée sur plusieurs thèmes portés par l'équipe de modélisation régionale du climat (équipe MOSCA) et souvent en lien avec les programmes scientifiques ChArMEx et HyMeX. Ces thèmes sont :

- ◇ le rôle des aérosols dans le climat de la région Euro-Méditerranéenne,
- ◇ les évènements de précipitations intenses en Méditerranée en automne,
- ◇ la formation des masses d'eau en Méditerranée Nord-Occidentale,
- ◇ l'évolution future de la mer Méditerranée, et en particulier, des canicules océaniques,
- ◇ les inondations en Amérique du Nord,
- ◇ l'évaluation de la valeur ajoutée des modèles de climat à haute résolution,
- ◇ le développement et l'évaluation des modèles couplés régionaux,
- ◇ l'application de correction en ligne des biais systématiques sur la dynamique de grande échelle pour la réalisation de projections futures,
- ◇ les incohérences GCM-RCM.

CORDEX a également été l'occasion de renforcer le lien avec plusieurs communautés travaillant sur les impacts de la variabilité et du changement climatique, tels que les spécialistes d'hydrologie continentale, des écosystèmes marins, de la production d'énergie photovoltaïque, des bilans de masse de surface des calottes polaires ou de l'enneigement en montagne.

La contribution scientifique du CNRM à CORDEX a également permis d'alimenter en littérature récente le premier volet du dernier rapport du GIEC avec 53 articles cités (dont 31 avec un premier ou un deuxième auteur du CNRM) dans 10 chapitres sur les 13 que compte ce rapport et un total de 230 citations.

Finalement, le CNRM est fier d'avoir contribué aux premières phases de l'initiative internationale CORDEX malgré l'important investissement nécessaire en temps, en calcul, en organisation et en énergie de la part des scientifiques du laboratoire. Une réunion de bilan interne a été réalisée en octobre 2021. Elle a permis de mettre en avant plusieurs aspects positifs de cet investissement : la visibilité pour le CNRM, l'intégration dans une communauté internationale active, la possibilité de réaliser des études multi-modèles, la contribution à des ensembles très utilisés, la motivation pour le développement des modèles, la dynamique interne, la contribution au rapport du GIEC et aux services climatiques ainsi que le fait de contribuer à de la science "utile". Cependant, des aspects plus négatifs ont aussi été identifiés : une débauche importante de moyens pour réaliser les simulations parfois au détriment de la production scientifique propre au CNRM, une mise en ligne compliquée sur l'ESGF, certaines simulations inutilisées, une dynamique inégale suivant les initiatives, un travail parfois en silo dans chaque domaine. Le bilan de cette première phase va permettre d'orienter au mieux la contribution du CNRM dans la nouvelle phase de CORDEX qui s'ouvre.

Pour le CNRM, cette nouvelle phase comprendra a minima la participation au FPS-URB-RCC traitant des liens entre l'environnement urbain et le changement climatique, ainsi que des simulations climatiques à haute, voire très haute résolution sur les domaines Europe et Méditerranée, forcées aux bords par la

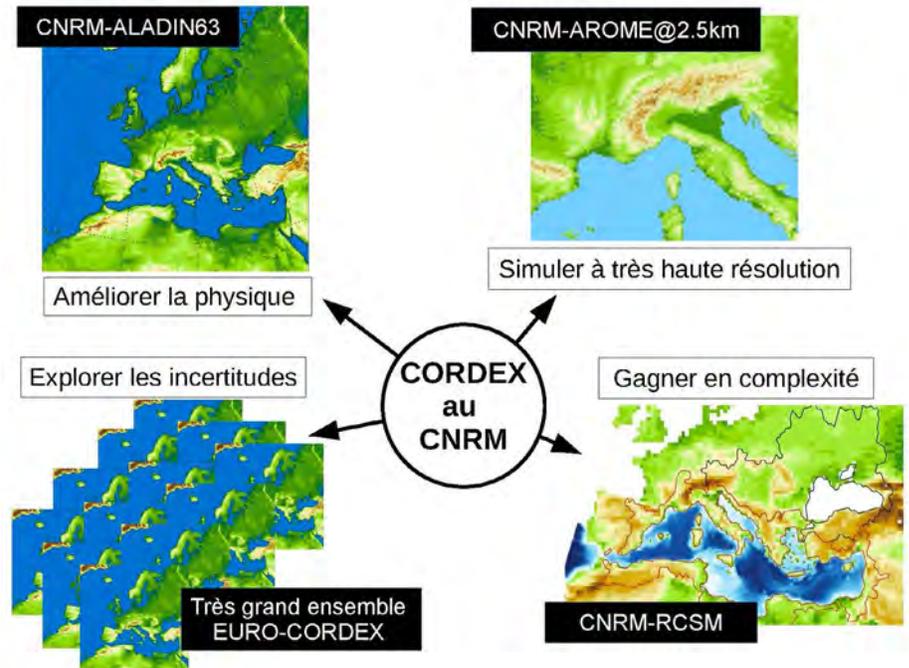


Illustration schématique des grands principes de la contribution du CNRM à CORDEX depuis 2009

nouvelle réanalyse ERA5 et par certains modèles globaux de CMIP6. Le CNRM s'impliquera dans les thèmes suivants :

- ◇ mise en place de matrices GCMxRCM mieux pensées,
- ◇ amélioration de la cohérence GCM-RCM à grande échelle,
- ◇ représentation des aérosols dans les RCMs,
- ◇ amélioration et explicitation des pratiques de calibration,
- ◇ modélisation du climat régional à local aux échelles kilométriques,
- ◇ modélisation couplée et à haute résolution du système Terre régional,
- ◇ développement de méthodes de descente d'échelle hybride mixant modèle physique et apprentissage machine,

...le tout au service des thématiques scientifiques de la communauté et du laboratoire.

En savoir plus

- Sites web des modèles régionaux de climat du CNRM utilisés dans CORDEX :

› CNRM-ALADIN : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article125>

- › CNRM-AROM : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1094>
- › CNRM-RCSM : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1098>
- › CNRM-NEMOMED8 : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article132>
- › CNRM-NEMOMED12 : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1197>
- › Equipe de recherche MOSCA du CNRM : <https://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1035>
- Lien vers les initiatives mentionnées dans le texte :
 - › Base de données Med-CORDEX : <https://www.medcordex.eu/>
 - › ChArMEx - Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment : <https://programmes.insu.cnrs.fr/mistrals/programmes/charmex/>
 - › CMIP5 - 5ème génération du Coupled Model Intercomparison Project : <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>
 - › CORDEX: COordinated Regional Downscaling Experiment : <https://cordex.org/>
 - › Portail web du Copernicus Climate Change Service : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels>
 - › DRIAS ^{les futurs du climat} : <http://www.drias-climat.fr/>
 - › ESGF- Earth System Grid Federation : <https://esgf.llnl.gov/>
 - › FPS-aerosol, CORDEX Flagship Pilot Study on the role of the natural and anthropogenic aerosols in the Mediterranean region: past climate variability and future climate sensitivity : <https://www.hymex.org/cordexfps-aerosol/>
 - › FPS-convection: CORDEX Flagship Pilot Study on convective phenomena at high resolution over Europe and the Mediterranean : <https://www.hymex.org/cordexfps-convection/>
 - › FPS-airsea: CORDEX Flagship Pilot Study on the role of the air-sea coupling and small-scale ocean processes on regional climate <https://cordex.org/experiment-guidelines/flagship-pilot-studies/endorsed-cordex-flagship-pilote-studies/mediterranean-role-of-the-air-sea-coupling-and-small-scale-ocean-processes-on-regional-climate/>
 - › FPS-URB-RCC: CORDEX Flagship Pilot Study on urban environments and regional climate change <https://cordex.org/experiment-guidelines/flagship-pilot-studies/endorsed-cordex-flagship-pilote-studies/europe-urban-environments-and-regional-climate-change-urb-rcc/>
 - › HyMeX - Hydrological cycle in the Mediterranean experiment : <https://www.hymex.org/>
 - › IPCC Interactive Atlas : <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
 - › WCRP - World Climate Research Programme : <https://www.wcrp-climate.org/>
 - › WCRP meeting report “Evaluating and Improving Regional Climate Projections”, Feb 2009, Toulouse : https://cordex.org/wp-content/uploads/2018/03/cordex2009_toulouse_report.pdf

Bilan CORDEX phase 1 à l’IPSL

S. Bastin (LATMOS - IPSL), T. Arsouze, K. Beranger, S. Berthou, M. Chakroun, M. Chiriaco, N. Da Silva, N. De Noblet, P. Drobinski, A. Guion, L. Fita, E. Flaounas, M.-T. Ha, N. Kumar-Shahi, C. Lebeaupin-Brossier, L. Li, T. Noel, H. Omrani, G. Panthou, J. Polcher, R. Pennel, M. Stefanon, P. Vaithinada-Ayar, R. Vautard, M. Vrac

La contribution de l’Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) à la phase 1 de CORDEX, c’est :

- ♦ la production de simulations climatiques de descente en échelle (12 runs «évaluation», 17 «historique», 17 «future») avec des résolutions de 50 km à 3 km sur les domaines EURO-CORDEX, MED-CORDEX, et l’arc alpin avec 3 modèles dynamiques (LMDZ-NEMO, WRF et RegIPSL) et un panel de modèles statistiques (4 méthodes).
- ♦ le développement du modèle régional système terre RegIPSL (précédemment appelé MORCE-MED) qui couple WRF avec ORCHIDEE et NEMO via le coupleur OASIS. Il intègre aussi les bibliothèques XIOS et libIGCM.
- ♦ la participation aux projets HyMex, GIS MORCE MED, GIS MEDICCBIO, ANR REMEMBER, ANR STARMIP, FP7 IMPACT2C, H2020 EUCP, C3S PRINCIPLES, ANR MOSAI, ANR HILIAISE et l’implication dans les communautés Euro-CORDEX, Med-CORDEX, FPS «Convection over Europe», FPS «Land Use & Climate Across Scales», FPS «Air-sea interaction», et plus récemment FPS «URBan -Regional Climate Change» pour développer, produire et/ou analyser les simulations de manière coordonnée.

◇ des avancées scientifiques sur :

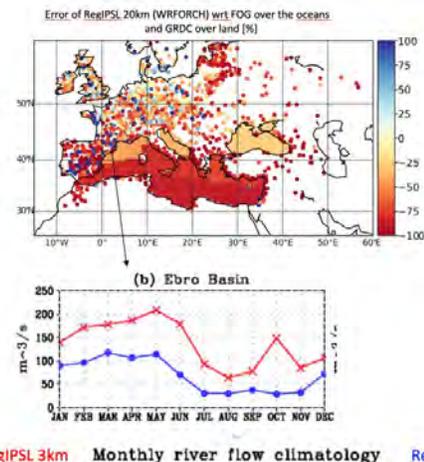
- la compréhension des interactions surface (continentale et océanique)-atmosphère et leurs rôles dans la variabilité climatique et les extrêmes (vagues de chaleur, précipitations intenses, cyclones méditerranéens,
- la représentation des extrêmes de précipitations (à la fois extrêmes intenses et sécheresses atmosphériques), des sécheresses agricoles, des débits des rivières et des processus océaniques (formation des eaux denses en Méditerranée),
- l'estimation des incertitudes (analyses multi-modèles) et la compréhension des biais des modèles grâce aux études combinées observations-modélisation et une approche en processus.

◇ un rapprochement avec les communautés des impacts et décideurs locaux au travers des différents projets et une forte implication dans les services climatiques.

Un grand merci aux nombreux non-permanents qui ont contribué à cet effort !

En savoir plus

- › ANR HILIAISE - Empreinte humaine sur les interactions entre la surface terrestre et l'atmosphère dans l'environnement semi-aride ibérique : <https://liaise.aeris-data.fr/>
- › ANR MOSAI - Modèles et Observations pour les Interactions entre la Surface et l'Atmosphère : <https://mosai.aeris-data.fr/>
- › ANR REMEMBER - Compréhension et modélisation du système climatique régional couplé pour la prévention des risques hydro-météorologiques en Méditerranée dans un contexte de changement global : <https://anr.fr/Projet-ANR-12-SENV-0001>
- › ANR STARMIP - Statistical Regionalization Models Intercomparisons and Hydrological Impacts Project : <https://anr.fr/Project-ANR-12-JS06-0005>
- › C3S PRINCIPLES - C3S production of European climate projections : <https://climate.copernicus.eu/c3s-production-european-climate-projections>
- › EURO CORDEX : <https://www.euro-cordex.net/>
- › FP7 IMPACT2C - Quantifying projected impacts under 2°C warming : <https://impact2c.hereon.de/>
- › FPS-convection: CORDEX Flagship Pilot Study on convective phenomena at high resolution over Europe and the Mediterranean : <https://www.hymex.org/cordexfps-convection/>
- › FPS-airsea interaction : CORDEX Flagship Pilot Study on the role of the air-sea coupling and small-scale ocean processes on regional climate <https://cordex.org/experiment-guidelines/flagship-pilot-studies/endorsed-cordex-flagship-pilote-studies/mediterranean-role-of-the-air-sea-coupling-and-small-scale-ocean-processes-on-regional-climate/>



En haut : Débits des fleuves simulés par RegIPSL à 20 km de résolution sur le domaine Med-CORDEX et comparés avec les stations GRDC sur le continent et FOG sur la mer, montrant des erreurs importantes sur les bassins très anthropisés (barrage et irrigation non pris en compte dans ORCHIDEE). **En bas,** comparaison du cycle saisonnier moyen (sur 10 ans) des débits entre la simulation à 20 km de résolution et celle à 3km de résolution sur le bassin de l'Ebre. Les différences résultent entre autres de l'amélioration des précipitations à 3km de résolution (meilleurs extrêmes à l'automne et plus de précipitations sur les reliefs) mais le débit reste sous estimé (débit moyen de l'Ebre autour de 420 m³/s.)

- › FPS-Land Use & Climate Across Scales : https://ms.hereon.de/cordex_fps_lucas/
- › FPS-URB-RCC - CORDEX Flagship Pilot Study on urban environments and regional climate change https://ms.hereon.de/cordex_fps_urban/index.php/en
- › GIS MORCE MED - Développement d'une plate-forme de modélisation régionale couplée pour l'étude des impacts régionaux : <http://www.gisclimat.fr/projet/morce-med.html>
- › GIS MEDICCBIO - Changement climatique, événements extrêmes et cycles biogéochimiques en Méditerranée: <http://www.gisclimat.fr/en/node/1851.html>
- › H2020 EUCP -European Climate Prediction: <https://www.eucp-project.eu/>
- › HyMex - Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment : <https://www.hymex.org/>
- › Med-CORDEX : <https://www.medcordex.eu/>
- › RegIPSL Regional Earth system model of IPSL : <https://gitlab.in2p3.fr/ipsl/lmd/intro/regipsl/regipsl/-/wikis/home>

Un partenariat franco-vietnamien pour la modélisation couplée régionale océan-atmosphère en Asie du Sud-Est dans le cadre de CORDEX-SEA

M. Herrmann^{1,3}, T. Ngo-Duc^{2,3}, Q. Desmet^{1,3}, N. Thi Thanh Hue^{1,2,3},
P. Marsaleix¹, T. Duhaut¹, F. Solmon⁴

¹ LEGOS, IRD, CNRS, CNES, Université Toulouse 3, Toulouse, France

² USTH, VAST, Hanoi, Viet Nam

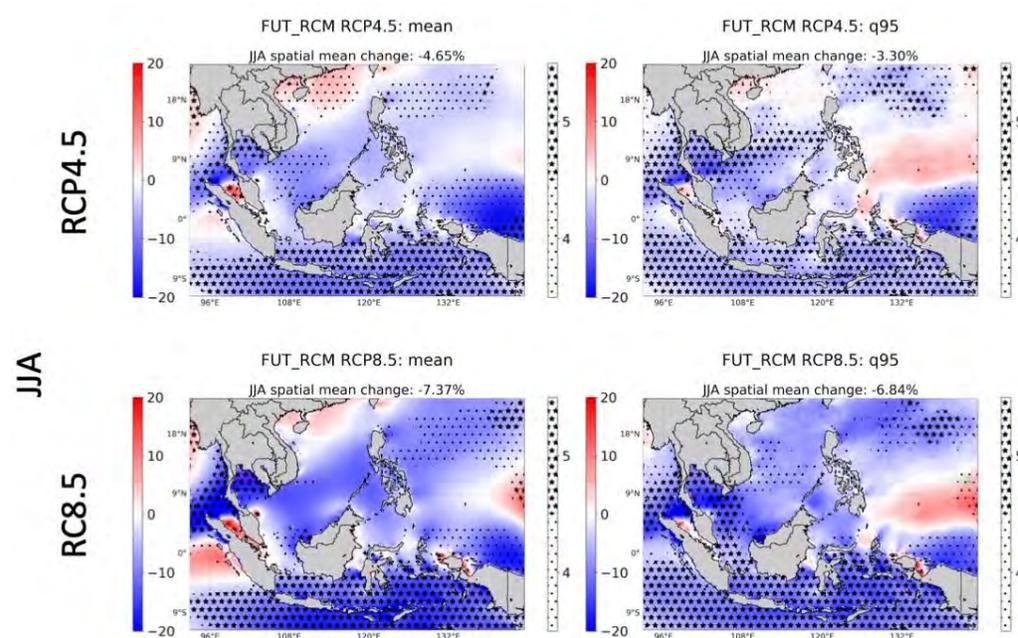
³ Laboratoire Mixte International LOTUS, IRD-USTH, Hanoi, Vietnam

⁴ LAERO, CNRS, Université Toulouse 3, Toulouse, France

L'Asie du Sud-Est (SEA) rassemble près de 9% de la population mondiale. Une bonne partie de cette population vit dans des zones côtières et deltaïques très faiblement élevées et soumises à une large gamme d'aléas climatiques : événements extrêmes (typhons), variabilité saisonnière (mousson) et interannuelle (ENSO), changement climatique. Comprendre la réponse du système régional couplé en SEA représente donc un enjeu scientifique et socio-économique majeur. Pourtant le 5^{ème} rapport du GIEC a souligné le manque considérable de connaissance concernant l'impact du changement climatique en SEA (IPCC 2013). Le groupe SEACLID/CORDEX-SEA rassemble des

groupes de modélisation régionale de plusieurs pays de la région et a été créé pour combler ce manque. Plusieurs downscaling des simulations CMIP5 ont été réalisés (Tangang *et al.* 2020) à partir des modèles régionaux de climat (RCM) RegCM (Giorgi *et al.* 2012) et RCA4 (Strandberg *et al.* 2015). Ces simulations ont été utilisées pour examiner la représentation numérique et la réponse au changement climatique de la température de surface et des précipitations (Ngo-Duc *et al.*, 2017, Trinh-Tuan *et al.* 2019, Supari *et al.* 2020), ainsi que des cyclones (Gallo *et al.* 2018, Tibay *et al.* 2021).

Plus récemment, des études ont également porté sur la représentation et l'évolution climatique du vent de surface dans la région (Herrmann *et al.* 2020, 2021). Analysant un ensemble de simulations régionales atmosphériques réalisées par le groupe CORDEX-SEA, elles ont montré la valeur ajoutée du downscaling dynamique pour la représentation des vents de surface à différentes échelles, principalement liée à une correction de leur sous-estimation dans les modèles globaux. De plus, elles



Variation relative (%) de la moyenne saisonnière (gauche) et du 95 percentile (droite) de la vitesse de vent de surface quotidienne entre 1986-2005 et 2079-2098 en SEA dans un ensemble de simulations RegCM4 forcées par 5 GCM différents, pour les scénarios RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas), dans le cadre de CORDEX-SEA. Les étoiles (points) montrent les régions où toutes les (4 sur 5) simulations produisent une tendance du même signe.

Extrait de Herrmann *et al.* (2021)

ont mis en évidence des réponses contrastées au changement climatique, en fonction du RCM ou du scénario utilisé mais aussi de la région et de la saison. Les modèles RCA4 et RegCM4 produisent des réponses différentes, mais tous deux montrent un affaiblissement des vents moyens et intenses lors de l'été boréal, dus à un affaiblissement de la mousson d'été et une diminution de la fréquence des cyclones tropicaux dans la région. Cette étude suggère enfin que les incertitudes liées au choix du RCM sont plus grandes que celles liées au choix du GCM.

Ces différentes études ont toutes été réalisées à partir de simulations uniquement atmosphériques, aucun modèle régional couplé océan-atmosphère n'ayant été pour le moment mis en place dans la région. Les interactions air-mer sont pourtant nombreuses et intenses en SEA, qui est par exemple une des zones du monde les plus soumises à l'influence des cyclones tropicaux. Afin de mieux prendre en compte ces interactions, et de comprendre et estimer leur contribution au fonctionnement et à la variabilité de la circulation atmosphérique et océanique en SEA, les groupes de modélisation régionale de l'USTH (Université des Sciences et Technologie de Hanoi, Vietnam) et du Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS) développent actuellement, dans le cadre du Laboratoire Mixte International LOTUS, un couplage entre les modèles régionaux atmosphérique RegCM et océanique SYMPHONIE (Marsaleix *et al.* 2008) fondé sur l'utilisation du coupleur OASIS (Craig *et al.* 2017). Le couplage technique est en cours de finalisation, ce qui va permettre d'aborder les questions scientifiques dans les mois à venir.

En savoir plus

- › LOTUS : <http://lotus.usth.edu.vn>
- › SEACLID/CORDEX-SEA : <http://www.ukm.my/seaclid-cordex/>
- ›

Références

- › Gallo, F., Daron, J., Macadam, I., Cinco, T., Marcelino, et al. (2018). High-resolution regional climate model projections of future tropical cyclone activity in the Philippines: High-res. projections of future TC activity in the Philippines. *International Journal of Climatology*, (March), 1–14. <https://doi.org/10.1002/joc.5870>
- › Giorgi F, Coppola E, Solmon F, Mariotti L, Sylla M, Bi X, Elguindi N, Diro G, Nair V, Giuliani G, Turuncoglu U, Cozzini S, Guttler I, O'Brien T, Tawfik A, Shalaby A, Zakey A, Steiner A, Stordal F, Sloan L, Brankovic C. (2012). RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.* 52: 7–29, <https://doi.org/10.3354/cr01018>
- › Herrmann, M., T. Nguyen-Duy, T. Ngo-Duc, F. Tangang (2021). Climate change impact on sea surface winds in Southeast Asia. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7433>
- › Herrmann, M., Ngo-Duc, T., & Trinh-Tuan, L. (2020) Impact of climate change on sea surface wind in Southeast Asia, from climatological average to extreme events: results from a dynamical downscaling. *Clim. Dyn.* 54, 2101–2134, <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05103-6>
- › IPCC Climate Change, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
- › Marsaleix P., Auclair F., Floor J. W., Herrmann M. J., Estournel C., Pairaud I., Ulses C., 2008. Energy conservation issues in sigma-coordinate free-surface ocean models. *Ocean Modelling*. 20, 61-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2007.07.005>
- › Ngo-Duc, T., F.T. Tangang, J. Santisirisomboon, F. Cruz, L. Trinh-Tuan, T. Nguyen-Xuan, T. Phan-Van, L. Juneng, G. Narisma, P. Singhruck, D. Gunawan, E. Aldrian, 2017: Performance evaluation of RegCM4 in simulating Extreme Rainfall and Temperature Indices over the CORDEX-Southeast Asia Region, *International Journal of Climatology*, 37, 1634-1647, <https://doi.org/10.1002/joc.4803>
- › Strandberg, G., Barring, L., Hansson, U., Jansson, C., Jones, C., Kjellström, E., ... Kolax, M., Kupiainen, M., Nikulin, G., Samuelsson, P., Ullerstig, A., Wang, S. (2015) CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. *Rep. Meteorol. Climatol.* 116, 84, ISSN: 0347-2116
- › Supari, S., L. Juneng, F. Cruz, J.X. Chung, S.T. Ngai, E. Salimun, M.S.F. Mohd, J. Santisirisomboon, P. Singhruck, P.V. Tan, T. Ngo-Duc, G. Narisma, E. Aldrian, D. Gunawan, & A. Sopaheluwakan (2020). Multi-model Projections of Precipitation Extremes in Southeast Asia based on CORDEX-Southeast Asia simulations. *Environmental Research*, 184, 109350, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109350>
- › Craig A., Valcke S., Coquart L., (2017): Development and performance of a new version of the OASIS coupler, OASIS3-MCT_3.0, *Geoscientific Model Development*, 10, pp. 3297-3308, doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3297-2017>
- › Cruz, F. T., G. T. Narisma, J. B. Dado, P. Singhruck, U. A. Linarka, T. Wati, F. Tangang, L. Juneng, T. Phan-Van, T. Ngo-Duc, J. Santisirisomboon, D. Gunawan, & E. Aldrian (2017) Sensitivity of Temperature to Physical Parameterization Schemes of RegCM4 over the CORDEX-Southeast Asia Region. *International Journal of Climatology*, 37, 5139-5153, <https://doi.org/10.1002/joc.5151>

- › Tangang, F., J. X. Chung, L. Juneng, Supari, E. Salimun, S. T. Ngai, A. F. Jamaluddin, M. S. Faisal, F. Cruz, G. T. Narisma, J. Santisirisomboon, T. Ngo-Duc, V. T. Phan, P. Singhruck, D. Gunawan, E. Aldrian, A. Sopaheluwakan, G. Nikulin, A. R. C. Remedio, D. V. Sein, D. Hein-Griggs, and J. L. McGregor, 2020: Projected Future Changes in Rainfall in Southeast Asia based on CORDEX – SEA Multi-model Simulations. *Climate Dyn.*, 55(5), 1247-1267 <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05322-2>
- › Tibay, J, Cruz, F, Tangang, F, et al. Climatological characterization of tropical cyclones detected in the regional climate simulations over the CORDEX-SEA domain. *Int J Climatol.* 2021; 1–17. <https://doi.org/10.1002/joc.7070>
- › Trinh-Tuan, L., J. Matsumoto, F.T. Tangang, L. Juneng, F. Cruz, G. Narisma, J. Santisirisomboon, T. Phan-Van, D. Gunawan, E. Aldrian, T. Ngo-Duc, 2019: Application of Quantile Mapping Bias Correction for Mid-future Precipitation Projections over Vietnam. *SOLA*, 15, 1-6, <https://doi.org/10.2151/sola.2019-001>

Etudes scientifiques en modélisation régional du climat

Incohérences GCM–RCM pour les signaux de changement climatique en Europe

J. Boé (CECI, Université de Toulouse, CERFACS/CNRS)

Les modèles climatiques régionaux (RCMs) permettent d'affiner les projections des modèles climatiques globaux (GCMs) sur une région d'intérêt, ce qui est souvent nécessaire pour caractériser les impacts du changement climatique. On peut s'attendre à des différences dans les changements projetés par les modèles globaux et régionaux à fine échelle, dues aux différences de résolution, en lien avec le relief par exemple. Mais des différences systématiques à plus grande échelle existent-elles également, et si c'est le cas, sont-elles dues à la plus haute résolution des RCMs, ou bien d'autres facteurs entrent-ils en compte ?

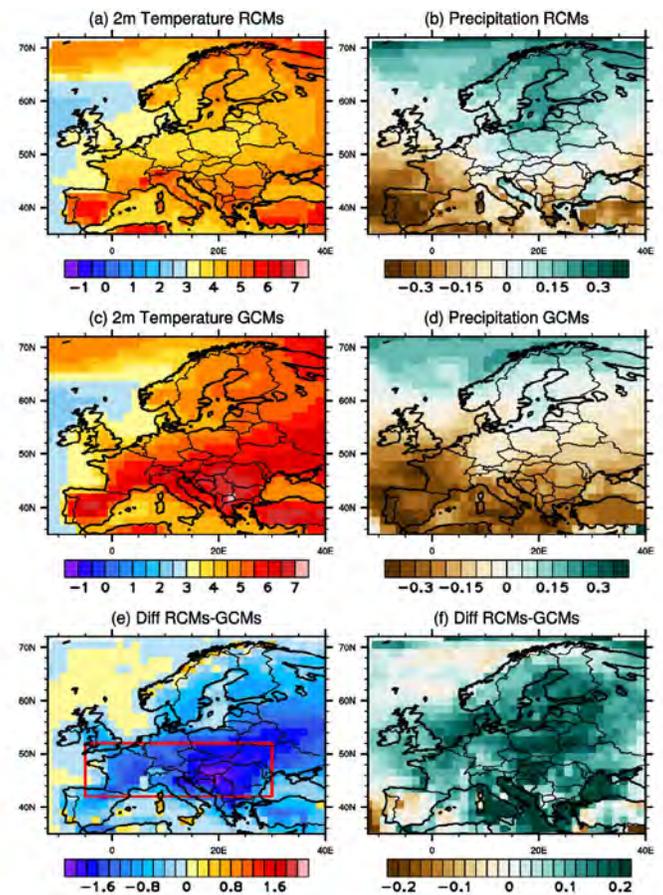
C'est à ces questions que nous avons cherché à répondre dans Boé *et al.* (2020). Nous montrons que sur une grande partie de l'Europe, notamment sur une bande intermédiaire s'étendant de la France à l'Europe de l'Est, les RCMs Euro-CORDEX se réchauffent en été en fin de 21^{ème} siècle en moyenne nettement moins que leurs CGMs forceurs CMIP5 (différences de réchauffement de l'ordre de 1.5°C). La diminution estivale des précipitations y est également moins prononcée dans les RCMs (différences de changements de l'ordre de 10%).

Ces incohérences des changements projetés à grande échelle entre RCMs et GCMs ne s'expliquent pas simplement par des différences de résolution. D'autres facteurs entrent en effet en jeu. L'absence de variations temporelles des aérosols dans de nombreux RCMs, mais qui sont prises en compte par les GCMs CMIP5 (Gutiérrez *et al.* 2020), explique une partie de ces différences, tout comme le fait qu'une majorité de modèles CMIP5 prend en compte l'effet physiologique du CO₂, ce qui n'est pas le cas de la plupart des RCMs (Schwingshackl *et al.* 2019).

Ces résultats montrent qu'il est critique de progresser dans la compréhension des différences entre les modèles de climat globaux et régionaux, en particulier en ce qui concerne les changements futurs à grande échelle. Dans ce contexte, les progrès passent par une compréhension fine des mécanismes à l'origine de ces différences. Ils passent également par la réalisation d'expériences numériques permettant d'isoler correctement l'impact de la résolution. Une première étape minimale dans ce contexte serait d'utiliser exactement les mêmes forçages externes dans les RCMs et les GCMs forceurs.

Références

- › Boé J., S. Somot, L. Corre and P. Nabat (2020). Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences. *Climate Dynamics*, 54,2981–3002. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05153-1>
- › Gutiérrez C., S. Somot, P. Nabat, M. Mallet, L. Corre, E. Van Meijgaard, O. Perpiñán, M. Gaertner (2020). Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe: investigating the role of aerosols. *Environmental Research Letters*, 15(3): 034035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6666>
- › Schwingshackl C., E.L. Davin, M. Hirschi, S.L. Sørland, R. Wartenburger, S.I. Seneviratne (2019) Regional climate model projections underestimate future warming due to missing plant physiological CO2 response. *Environmental Research Letters* 14(11):114019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4949>



Moyenne d'ensemble des changements de température (K) en été entre 2070–2099 et 1970–1999, (a) projetés par les modèles climatiques régionaux, (c) projetés par les GCMs forceurs, et (e) différence (a-c). b, d, f comme a, c, e pour les changements relatifs des précipitations (sans unité). Scénario RCP8.5.

Effets des aérosols d'Afrique australe sur la mousson ouest-africaine

F. Solmon (Laero), N. Elguindi, M. Mallet, C. Flamant, P. Formenti

La mousson ouest-africaine est un système complexe dépendant d'influences climatiques globales et de facteurs régionaux modulant les gradients méridiens d'énergie et d'humidité. D'origines anthropiques et naturelles, les aérosols émis en large quantité sur l'Afrique ont été identifiés comme des composantes pouvant impacter la mousson. Ainsi les impacts météorologiques et climatiques liés aux poussières désertiques ont par exemple fait l'objet de nombreuses études. D'autres études récentes ont également suggéré les impacts possibles d'aérosols provenant des feux de biomasse, actifs en Afrique centrale et australe, lors d'épisodes de transports inter-hémisphériques (Taylor *et al.*, 2019). Dans le cadre du programme AEROCLO-sA (Formenti *et al.*, 2019) et sur la base de simulations climatiques régionales utilisant le modèle RegCM4, prenant en compte les effets directs, semi-directs et indirects des aérosols, et utilisant une configuration « slab-ocean », nous avons montré qu'il peut également exister une connexion climatique entre l'outflow sud-Atlantique des aérosols de feux de biomasse (maximum en moyenne vers 7 S) et la mousson ouest-Africaine (Solmon *et al.*, 2021). Cette connexion met en jeu des rétroactions dynamiques inter-hémisphérique trouvant leur origine dans

- i. un réchauffement diabatique accru dû à l'absorption radiative des aérosols carbonés dans la zone d'outflow et dont le forçage est intensifié par la présence, et le feedback positif (Mallet *et al.*, 2020), du couvert permanent de stratocumulus,
- ii. un refroidissement de la température de surface de mer (SST) induit par l'effet conjoint des aérosols, et du feedback positif des nuages bas, sur le rayonnement solaire incident en surface.

Les ajustements atmosphériques (rapides) et ceux impliquant la réponse SST (plus lents) aux perturbations liées aux aérosols résultent, dans nos simulations, en une réduction moyenne des précipitations continentales ouest-Africaine de juin à septembre, avec un décalage de ces dernières vers la fin de saison, notamment en zone côtière. Dans l'avenir, ces études seront approfondies notamment par l'utilisation de modèles océan-atmosphère couplés et de résolutions spatiales et microphysiques augmentées. Une participation à la nouvelle phase de CORDEX et son focus Afrique est également envisagée à travers des actions se dessinant actuellement.

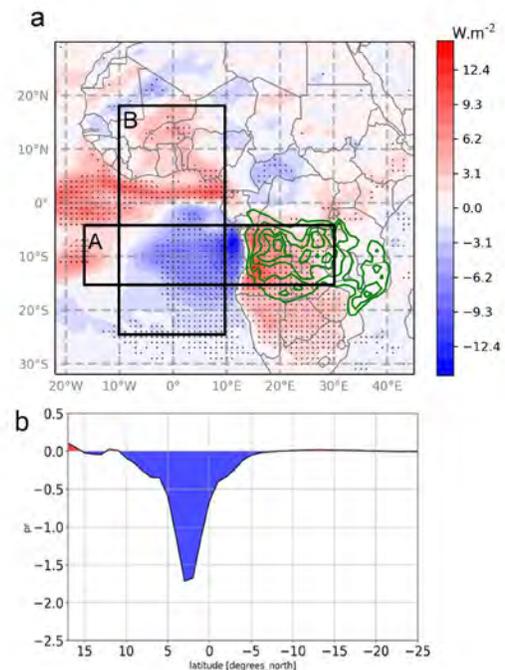


Figure a : Effet radiatif semi-direct moyenné (JJAS 2003-20015) illustrant l'ajustement radiatif des nuages à la perturbation radiative des aérosols de feux de biomasse (dont les sources sont matérialisées par les iso-contours verts). Le signal négatif dans la région maritime de la boîte A (outflow aerosols) traduit l'augmentation du couvert de nuage bas. Le signal positif dans la zone de mousson africaine de la boîte B traduit une diminution des nuages (convectifs notamment) associés à une diminution des précipitations illustrées sur la coupe méridienne de l'anomalie de précipitation (moyennée 10°E-10W, JJAS 2003-2015, mm/day) illustrée Figure b. L'anomalie de précipitation est calculée par différence d'une simulation incluant tous les aerosols y compris les sources de feux de biomasse et une simulation excluant les feux de biomasse. Le calcul de l'effet semi-direct, et les mécanismes d'ajustements climatiques sous-jacents sont détaillés dans Solmon *et al.* 2021.

En savoir plus

- › AEROCLO-SA - AERosols, RadiatiON and CLOuds in southern Africa : <https://aeroclo.aeris-data.fr/>

Références

- › Taylor, J. W., Haslett, S. L., Bower, K., Flynn, M., Crawford, I., Dorsey, J., Choularton, T., Connolly, P. J., Hahn, V., Voigt, C., Sauer, D., Dupuy, R., Brito, J., Schwarzenboeck, A., Bourriane, T., Denjean, C., Rosenberg, P., Flamant, C., Lee, J. D., Vaughan, A. R., Hill, P. G., Brooks, B., Catoire, V., Knippertz, P., and Coe, H. (2019) Aerosol influences on low-level clouds in the West African monsoon, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8503–8522. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8503-2019>
- › Formenti, P., D'Anna, B., Flamant, C., Mallet, M., Piketh, S.J., Schepanski, K., Waquet, F., Auriol, F., Brogniez, G., Burnet, F., Chaboureaud J.-P., Chauvigné, A., Chazette, P., Denjean, C., Desboeufs, K., Doussin, J.-F., Elguindi, N., Feuerstein, S., Gaetani, M., Giorio, C., Klopper, D., Daniel Mallet, M., Nabat, P., Monod, A., Solmon, F., Namwoonde, A., Chikwililwa, C., Mushi, R., Judd Welton, E., and Holben, B. (2019) The aerosols, radiation and clouds in Southern Africa Field Campaign in Namibia: overview, illustrative observations, and way forward. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 100, 1277–1298 (2019)
- › Mallet, M., Solmon, F., Nabat, P., Elguindi, N., Waquet, F., Bouniol, D., Sayer, A. M., Meyer, K., Roehrig, R., Michou, M., Zuidema, P., Flamant, C., Redemann, J., and Formenti, P. (2020) Direct and semi-direct radiative forcing of biomass-burning aerosols over the south-east Atlantic (SEA) and its sensitivity to absorbing properties: a regional climate modeling study, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 13191–13216, <https://doi.org/10.5194/acp-20-13191-2020>
- › Solmon, F., Elguindi, N., Mallet, M., Flamant, C., Formenti, P. (2021). West African monsoon precipitation impacted by the South Eastern Atlantic biomass burning aerosol outflow. *npj Clim Atmos Sci* 4, 54 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00210-w>

Emulateur statistique de modèle régional de climat : Application au modèle régional de climat MAR sur l'Antarctique

A. Doury (CNRM, CNRS, Météo-France), E. Amblard (LSCE, CNRS), C. Agosta (LSCE, CEA), C. Kittel (IGE, CNRS), P. Gallinari (Sorbonne Université, CNRS - ISIR / Criteo AI lab. Paris), S. Somot (CNRM, CNRS, Météo-France)

Les émulateurs de modèle régional de climat (RCM) sont un nouvel outil de descente d'échelle hybride mêlant les atouts des deux grandes familles de downscaling : dynamique et statistique. En effet un émulateur utilise des simulations à haute résolution obtenues avec des RCM coûteux pour apprendre la fonction de transfert entre des prédictors de grande échelle (géopotential, humidité, température, vent) à basse résolution et des variables de surface (température à 2 m, précipitation, ..) à haute résolution. L'apprentissage de cette fonction se fait grâce à des méthodes d'apprentissage statistiques qui garantissent de faibles coûts de calcul. Par construction, l'émulateur peut apprendre cette relation sous différentes conditions climatiques, pour des périodes passées et futures, pour différents niveaux de concentration de gaz à effet de serre et sur l'ensemble de la grille du RCM. L'idée à terme est d'être capable de reproduire (émuler) statistiquement la variabilité spatio-temporelle complète des variables d'intérêt telles que simulées par le modèle fin. Dans la communauté de recherche nationale, ces méthodes sont actuellement en cours de développement et de validation au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), au Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) et au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE).

Nous illustrons ci-dessous les résultats de l'application de l'émulateur développé au CNRM et testé sur l'Europe (Doury *et al.* in rev.) au modèle atmosphérique régional MAR utilisé sur l'Antarctique au LSCE. Nous cherchons à émuler les séries quotidiennes de température et de précipitations neigeuses simulées par le modèle sur un sous-domaine centré sur l'Antarctique de l'Ouest. Le modèle MAR modélise de façon fine le manteau neigeux et ses interactions avec l'atmosphère et permet de corriger les modèles de climat globaux sur la calotte polaire, afin de fournir des forçages aux modèles de dynamique glaciaire. Les résultats obtenus sur des années non utilisées pour l'apprentissage sont illustrés sur la figure ci-contre. Les cartes montrent les moyennes de températures et de cumul de précipitations neigeuses sur 3 ans en fin de siècle produites par l'émulateur et la différence avec le modèle MAR, considéré ici comme la réalité virtuelle à reproduire. Les séries temporelles montrent 1 an de température et de cumul de précipitation quotidien pour le modèle et l'émulateur, en point pris au hasard et signifié en rouge sur les cartes de moyennes. L'émulateur montre de très bonnes capacités à reproduire les séries de température et de précipitation à haute résolution, avec de très bonnes corrélations spatiale et temporelle et une quasi-parfaite reproduction de la variance. Ces résultats sont très encourageants et permettent d'imaginer un couplage des modèles de calottes au sein de modèles de climats globaux, avec un émulateur de MAR en-ligne (avec un coût calcul minimum), pour corriger les forçages du modèle de calotte. Ces résultats montrent également un bon niveau de transférabilité de l'émulateur développé au CNRM dans un contexte géographique différent, et pour une autre paire modèle global/modèle régional.

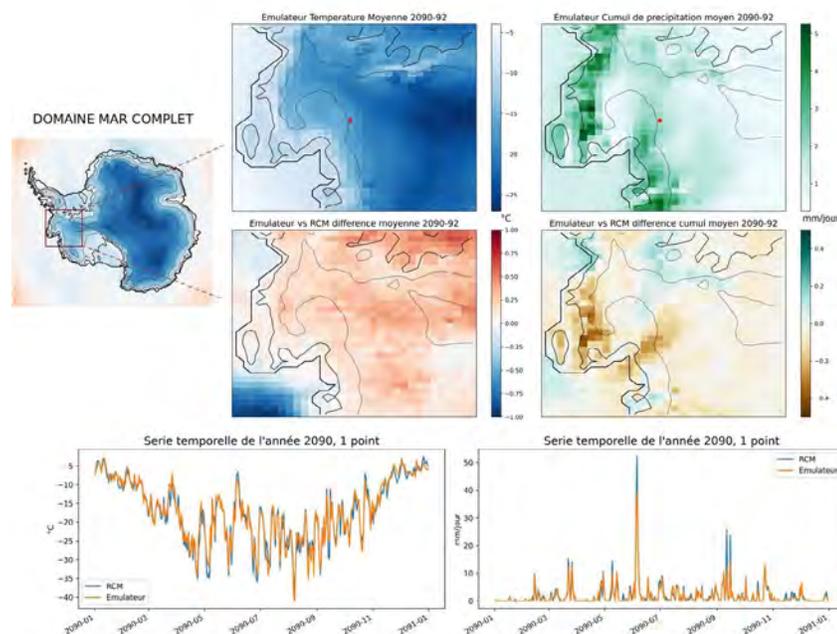


Illustration de la production de l'émulateur pour la température (colonne de gauche) et les cumuls de précipitations neigeuses (colonne de droite). La première ligne montre les cartes de moyennes sur 3 ans à la fin du siècle (2090-2092), la seconde montre le biais moyen par rapport au RCM sur ces mêmes trois ans. La dernière ligne montre les séries quotidiennes de l'année 2090 de l'émulateur et du RCM, pour un point de grille (point rouge sur les cartes de moyenne).

Référence

- › Doury A., Somot S., Gadat S., Ribes A., Corre L. (in revision). Regional Climate Model emulator based on deep learning: concept and first evaluation of a novel hybrid downscaling approach. *Climate Dyn.* PREPRINT (Version 1) available at Research Square (<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-725819/v1>)

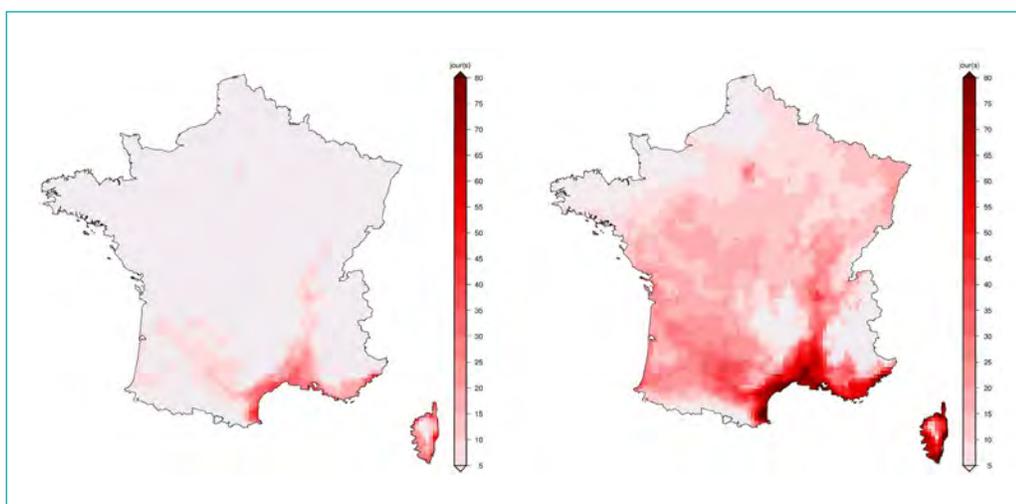
Services climatiques exploitant les simulations CORDEX

De l'usage d'EURO-CORDEX au sein du service climatique national DRIAS^{les futurs du climat}

L. Corre (Météo-France, DCSC), S. Somot (Météo-France, CNRM)

DRIAS^{les futurs du climat} a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques de référence pour caractériser les changements climatiques en France (métropole et outre-mer). Ce service s'adresse notamment aux utilisateurs impliqués dans des études d'impact et d'adaptation aux échelles nationale et infra-nationale. Les données distribuées doivent, d'une part, être à haute résolution spatiale, permettant des diagnostics fins sur les phénomènes météorologiques locaux et leur évolution future, indispensables aux acteurs socio-économiques. D'autre part, elles doivent couvrir au mieux les incertitudes inhérentes à toute projection. L'ensemble EURO-CORDEX à 12 km de résolution répond pleinement à ce double objectif en fournissant un nombre de simulations inégalé au monde à cette résolution, une base d'une richesse incomparable pour les services climatiques. Cependant, les modèles globaux et régionaux utilisés pour produire cet ensemble ne sont pas également répartis, ni ne sont d'égale qualité. A cela s'ajoute la complexité d'utilisation d'un jeu qui comporte plus d'une centaine de simulations. Autant d'arguments qui ont amené à sélectionner un sous-ensemble de simulations couvrant le mieux possible la gamme des changements futurs issue de l'ensemble total sur la France. C'est l'objet du jeu DRIAS 2020, élaboré par Météo-France. Basé sur trente simulations issues de l'ensemble EURO-CORDEX, sélectionnées de manière experte, il couvre les trois scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5. Les données sont projetées sur une grille de 8 km de résolution, et corrigées de leur biais par une méthode statistique à partir de l'analyse de données d'observation SAFRAN. Le rapport «Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole» constitue un guide scientifique et pratique pour l'utilisation de ce jeu de données. Il

DRIAS^{les futurs du climat} a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques de référence pour caractériser les changements climatiques en France (métropole et outre-mer). Ce service s'adresse notamment aux utilisateurs impliqués dans des études d'impact et d'adaptation aux échelles nationale et infra-nationale. Les données distribuées doivent, d'une part, être à haute résolution spatiale, permettant des diagnostics fins sur les phénomènes météorologiques locaux et leur évolution future, indispensables aux acteurs socio-économiques. D'autre part, elles doivent couvrir au mieux les incertitudes inhérentes à toute projection. L'ensemble EURO-CORDEX à 12 km de résolution répond pleinement à ce double objectif en fournissant un nombre de simulations inégalé au monde à cette résolution, une base d'une richesse incomparable pour les services climatiques. Cependant, les modèles globaux et régionaux utilisés pour produire cet ensemble ne sont pas également répartis, ni ne sont d'égale qualité. A cela s'ajoute la complexité d'utilisation d'un jeu qui comporte plus d'une centaine de simulations. Autant d'arguments qui ont amené à sélectionner un sous-ensemble de simulations couvrant le mieux possible la gamme des changements futurs issue de l'ensemble total sur la France. C'est l'objet du jeu DRIAS 2020, élaboré par Météo-France. Basé sur trente simulations issues de l'ensemble EURO-CORDEX, sélectionnées de manière experte, il couvre les trois scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5. Les données sont projetées sur une grille de 8 km de résolution, et corrigées de leur biais par une méthode statistique à partir de l'analyse de données d'observation SAFRAN. Le rapport «Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole» constitue un guide scientifique et pratique pour l'utilisation de ce jeu de données. Il



Cartes du nombre de nuits tropicales (température minimale quotidienne supérieure à 20°C), pour les périodes 1976-2005 (à gauche) et 2041-2070 (à droite). Les valeurs correspondent à la médiane de l'ensemble DRIAS 2020, et au scénario RCP8.5 pour la période future (source : portail DRIAS).

C'est l'objet du jeu DRIAS 2020, élaboré par Météo-France. Basé sur trente simulations issues de l'ensemble EURO-CORDEX, sélectionnées de manière experte, il couvre les trois scénarios climatiques RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5. Les données sont projetées sur une grille de 8 km de résolution, et corrigées de leur biais par une méthode statistique à partir de l'analyse de données d'observation SAFRAN. Le rapport «Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole» constitue un guide scientifique et pratique pour l'utilisation de ce jeu de données. Il

propose aussi des éléments de diagnostic climatique sur la France métropolitaine, à partir d'indicateurs calculés sur les variables climatiques température, précipitation et vent. L'ensemble de ces indicateurs est disponible en ligne sur le portail. Dans le sillage de DRIAS, le jeu de données DRIAS 2020 va servir de base à l'élaboration et la mise à jour de nombreux services climatiques à Météo-France. À titre d'exemples, les messages clés et graphiques de l'application ClimatHD seront actualisés, et une extension du portail DRIAS dédiée à la ressource en eau mettra à disposition les résultats de nouvelles simulations hydroclimatiques forcées par le jeu DRIAS 2020.

En savoir plus

- › DRIAS : <http://www.drias-climat.fr/>
- › [Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole](#)
- › Climat HD : <https://meteofrance.com/climathd>
- › EURO-CORDEX : <https://www.euro-cordex.net/>



CLIMERI-France

Infrastructure de recherche nationale de modélisation du climat