



HAL
open science

Météo-France : Rapport recherche 2021

Pontaud Marc

► **To cite this version:**

| Pontaud Marc. Météo-France : Rapport recherche 2021. Météo-France. 2022. hal-04659393

HAL Id: hal-04659393

<https://hal.science/hal-04659393v1>

Submitted on 30 Jul 2024

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

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

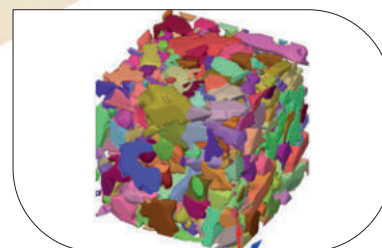
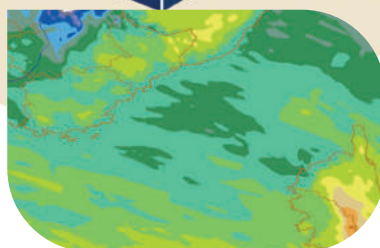
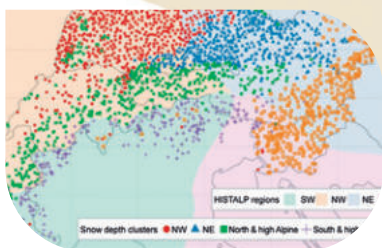
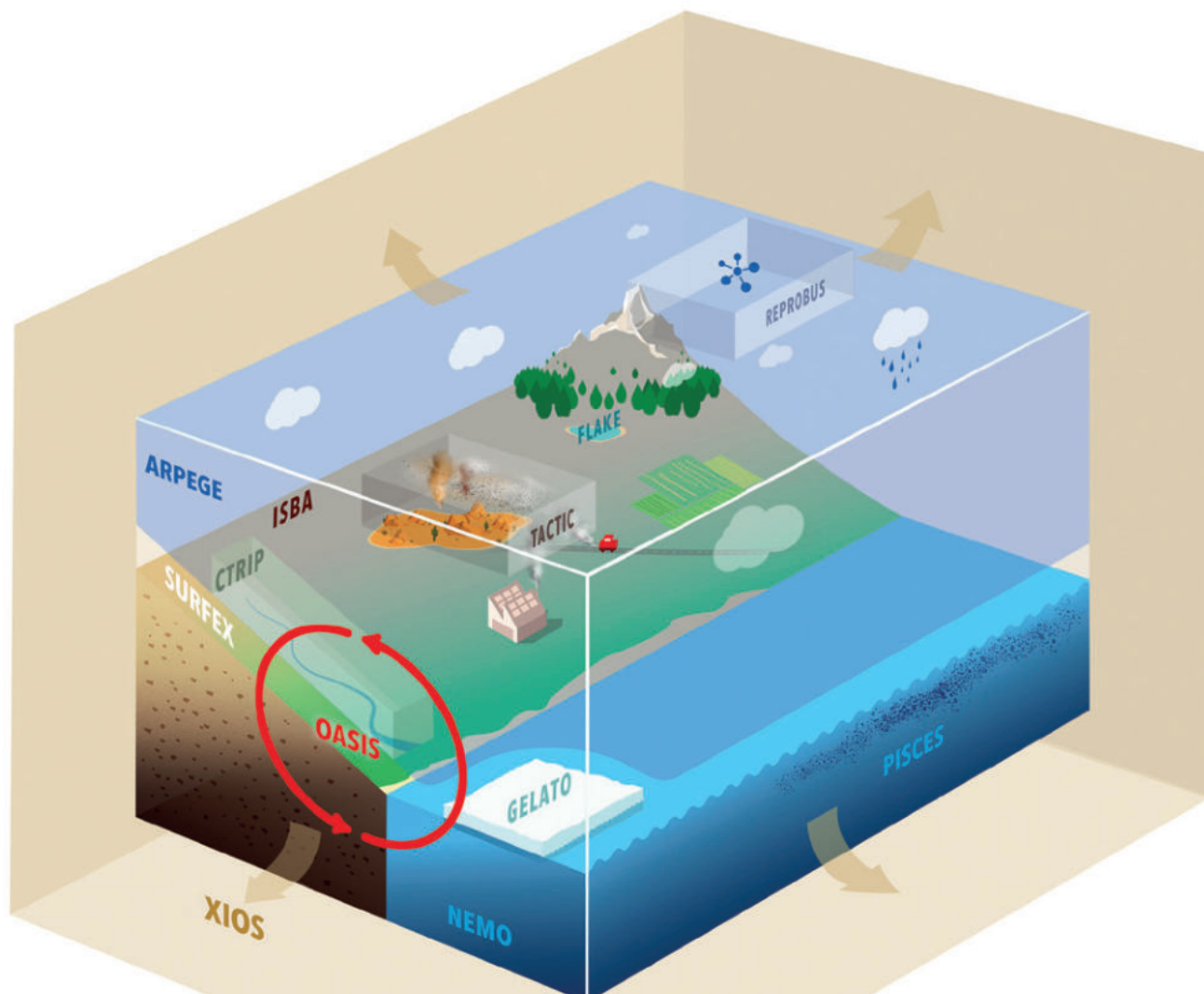


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



METEO
FRANCE



Rapport **Recherche** 2021

Rapport Recherche 2021

Sommaire

Contribution de Météo-France au 6^e rapport du Giec ● page 7

**Préparation d'une nouvelle version
des systèmes opérationnels de prévision numérique du temps** ● page 15

**Les futurs instruments satellitaires,
une nouvelle révolution pour la météorologie et le climat** ● page 21

Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2021 ● page 31

Prévision numérique du temps et assimilation de données ● page 32

Etude et modélisation des processus ● page 40

Climat et prévision saisonnière ● page 59

Modélisation du climat

Prévision saisonnière

Chimie, aérosols et qualité de l'air ● page 59

Neige ● page 66

Météorologie instrumentale et observation ● page 72

Annexes ● page 79

Météo-France a finalisé, cette année 2021, un nouveau Contrat 'd'Objectif et de Performance (COP) avec l'État pour la période 2022 à 2026. Il a été construit en cohérence avec la Stratégie Scientifique 2020-2030 (<https://meteofrance.fr/etablissement/strategie/les-axes-de-la-strategie-scientifique-2020-2030>), approuvée en 2020. La recherche y occupe une place privilégiée tant elle vient en support à l'ensemble des missions de l'établissement. Elle est la source des progrès qui sont ensuite mis en œuvre en matière d'observation, de modélisation, de prévision numérique du temps et d'étude du climat. Elle permet à l'établissement d'améliorer sans cesse la qualité de ses produits et services opérationnels et d'ouvrir de nouveaux chantiers pour répondre aux attentes de la société et des pouvoirs publics.

Fait marquant en 2021, les deux nouveaux supercalculateurs sont devenus opérationnels en février, apportant une augmentation de puissance d'un facteur 5.5. Les chaînes de prévision numérique du temps opérationnelles y ont été installées à l'identique mais surtout la première grande évolution de cette chaîne est testée depuis mi-2021. Pour la première fois, les systèmes de prévision d'ensemble AROME-France et ARPEGE auront les mêmes résolutions que les versions déterministes. ARPEGE bénéficie également d'une évolution majeure de sa physique avec notamment un nouveau schéma de convection profonde. Les systèmes AROME Outre-mer, quant à eux, verront leur résolution passer de 2,5 km à 1,3 km, ce qui bénéficie en particulier au réalisme des précipitations. Cette nouvelle chaîne sera installée en opérationnel mi-2022 et apportera des progrès significatifs tant au niveau des prévisions mondiales que régionales. Le détail de cette prochaine chaîne opérationnelle fait l'objet d'un des trois grands sujets mis en lumière dans le présent rapport.

Le rapport recherche 2021, comme convenu avec la nouvelle direction du CNRM (Samuel Morin et Nadia Fourrié), maintenant distincte de la direction de la recherche et de l'enseignement supérieur de Météo-France, met en lumière cette année, trois grands sujets d'importance. Outre une description des caractéristiques scientifiques de la future version de la chaîne opérationnelle de prévision numérique du temps, le rapport



met en exergue plusieurs contributions de Météo-France au 6^e rapport du GIEC. Le CNRM, en association avec le CERFACS, a fortement contribué au sixième Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), en produisant 35 000 années de simulation, utilisant ainsi environ 300 millions d'heures de calcul fournies par le centre de calcul intensif de Météo-France entre 2016 et 2021. Les simulations CMIP6 du CNRM ont été les premières à être distribuées dès l'été 2018, ce qui a contribué à ce qu'elles aient été massivement utilisées dans de nombreuses publications et pour le 6^e rapport du GIEC. Nombreux sont les chercheurs et ingénieurs du CNRM qui ont contribué à ce sixième exercice, et on notera l'énorme investissement d'un chercheur du CNRM qui a coordonné le chapitre sur les changements du cycle de l'eau dans le rapport d'évaluation du groupe I du GIEC.

Le troisième sujet mis en lumière concerne les futurs instruments satellitaires qui annonce « une nouvelle révolution pour la météorologie et le climat ». Les observations fournies par les satellites occupent une place de premier plan dans l'initialisation et l'évaluation des systèmes de prévision numérique du temps, de la qualité de l'air et de la composition atmosphérique mais aussi pour l'étude des processus et du climat. Les deux prochaines grandes missions d'EUMETSAT vont amener de nouvelles observations déterminantes, en particulier pour AROME-France. Il s'agit des satellites géostationnaires Météosat Troisième Génération et ses instruments « imageurs » ou « sondeurs » et des satellites défilants



en orbite basse METOP Seconde Génération avec une nouvelle génération du sondeur hyperspectral IASI.

Dans le domaine de la prévision, les efforts et progrès attendus en assimilation se concentrent sur le développement de schémas d'assimilation EnVar. Les premiers résultats encourageants obtenus avec le schéma 3DEnVar appliqué à AROME sont une première étape vers l'objectif du 4DEnVar. Ce nouveau schéma permettra à AROME-France d'assimiler plus d'observations, plus détaillées, et de meilleure manière, permettant en cela d'améliorer régulièrement les prévisions métropolitaines, sur la durée du nouveau COP de Météo-France.

Les autres travaux et résultats sont présentés par thèmes principaux en lien avec les axes de recherche prioritaires de Météo-France. Les études de processus, les campagnes de mesures, l'outre-mer, la résolution hectométrique, la ville et son îlot de chaleur, le climat, la prévision saisonnière, la composition atmosphérique, la neige et la montagne, ne sont pas en reste. Tous ces travaux participent à l'amélioration continue de la connaissance et de la prévision des phénomènes, qu'il revient à l'Etablissement de suivre et de prévoir. Ils sont tous au menu de ce Rapport Recherche 2021 ...

Afin de poursuivre ces avancées, les entités de recherche de Météo-France sont engagées dans de nombreux projets de recherche nationaux et internationaux (Européens, notamment). Notons en particulier en 2021 le succès du Programme et Equipements Prioritaires de Recherche (PEPR) Exploratoire

OneWater centré sur les enjeux de l'eau, bien commun, dont Météo-France est partenaire. D'autres PEPR, concernant notamment la modélisation du climat, les services climatiques (TRACCS), l'étude des risques (IRIMA), l'étude de l'Océan Indien (BRIDGE) ont été préparés au cours de l'année 2021 et sont en attente des résultats du processus de sélection. Météo-France avec ses nombreux partenaires du monde de la recherche, a vu trois projets retenus dans le cadre des Equipements Structurants pour la Recherche « Equipex+ ». Il s'agit de GAIA DATA qui vise à faciliter l'accès aux données du système Terre, en soutenant en particulier les Infrastructures de Recherche Data Terra, CLIMERI-France et le PNDB, et organisé autour de pôles de données (Atmosphère, Océan, Surfaces continentales, Terre Solide) et de bases de données et de simulations climatiques et de biodiversité, rassemblant au total une trentaine de Centres de Données et Services (CDS). Vient ensuite OBS4CLIM qui est un effort conjoint pour l'innovation et la synergie des trois composantes françaises des Infrastructures de Recherche européennes ACTRIS, IAGOS, ICOS du domaine atmosphérique afin de répondre aux nouveaux défis posés à l'observation de la Terre, de fournir à leurs utilisateurs des jeux de données qualifiés et pertinents. Le troisième succès est ANVOLE, projet qui vient soutenir l'acquisition d'un nouvel avion-laboratoire scientifique haute altitude opéré par l'unité SAFIRE associant Météo-France, le CNRS et le CNES, pour la compréhension des processus atmosphériques, du changement climatique et des risques naturels, l'observation spatiale de la Terre et l'aviation civile et militaire.

Au niveau toulousain, Météo-France, s'est inscrit dans la dynamique de l'ISAE, pour créer l'Institut de l'Aviation Durable de Toulouse, avec deux Universités de Toulouse, l'ENAC, le Cerfacs, la Toulouse School of Economics et la Toulouse Business School. L'objectif est de structurer la prise en charge scientifique de la question de la durabilité du transport aérien, stimuler une recherche interdisciplinaire et mieux répondre à cet enjeu majeur, régional, national et européen, à la croisée des défis sociétaux, économiques et technologiques. Météo-France soutient encore et toujours la structuration de l'enseignement supérieur et de la recherche toulousain en participant au projet TIRIS « Toulouse Initiative for Research's Impact on Society » dans le cadre de l'appel à proposition « Excellence sous toutes ses Formes ».

Il reste à mentionner le démarrage du nouveau consortium ACCORD qui regroupe les activités de PNT régionale de 26 pays européens et nord-africains autour du système AROME, sous le pilotage d'un scientifique de Météo-France. Le plan de travail est maintenant défini et vise à traiter l'ensemble des enjeux de demain, que ce soit, entre autres, les cœurs dynamiques, l'adaptation des codes aux différentes architectures hpc ou encore la physique à haute résolution avec ses effets 3D.

Bonne lecture.



Marc Pontaud
Directeur de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche

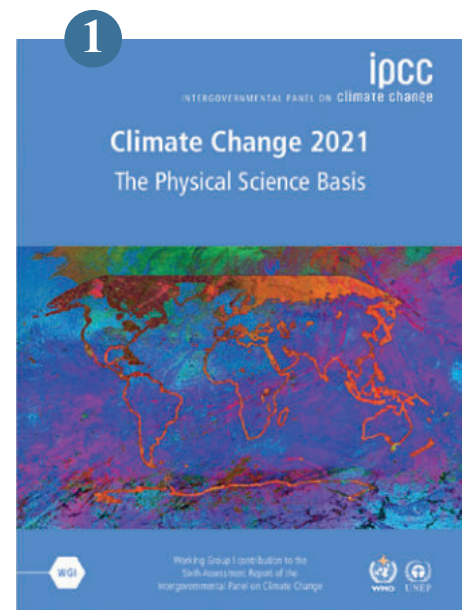
Contribution de Météo-France au 6^e rapport du GIEC

Le résumé à l'intention des décideurs du 6^e rapport d'évaluation du groupe I du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), approuvé le 6 août 2021, fournit les principales conclusions d'une évaluation complète des bases physiques du changement climatique passé, présent et futur. La contribution du groupe II (impacts, adaptation et vulnérabilité) au 6^e rapport du GIEC a été publiée fin février, celle du groupe III (atténuation du changement climatique) début avril, et le rapport de synthèse est attendu pour septembre 2022.

L'évaluation du 6^e rapport du groupe I a été préparée par 234 auteurs (dont de nombreux scientifiques français, y compris du CNRM et du CERFACS) provenant de 65 pays, et s'est déroulée sur un peu plus de trois ans en raison de la crise sanitaire. Le rapport complet est structuré en 12 chapitres (dont celui sur les changements du cycle de l'eau, coordonné par Hervé Douville, CNRM), compte près de 4 000 pages et s'appuie sur l'évaluation de 14 000 articles scientifiques, parmi lesquels de nombreux articles produits par les chercheurs du CNRM.

Le rapport s'appuie également largement sur les nouvelles données issues des simulations climatiques du projet international CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6), auquel le CNRM a fortement contribué, en association avec le CERFACS. Au total, ce groupe a produit 35 000 années de simulation, générant environ 1,3 Po de données. Pour cela, environ 300 millions d'heures de calcul fournies par le centre de calcul intensif de Météo-France ont été utilisées entre 2016 et 2021. Produites aux standards exigés par CMIP6, ces simulations sont distribuées en accès libre via le nœud ESGF (Earth System Grid Federation) du CNRM. Grâce à l'engagement des ingénieur-e-s et des chercheur-e-s du CNRM et en collaboration avec le CERFACS et l'IPSL, les simulations CMIP6 du CNRM ont été les premières à être distribuées dès l'été 2018, ce qui explique qu'elles aient été massivement reprises dans de nombreuses publications et pour le 6^e rapport du GIEC.

Le rapport est complété par un atlas interactif accessible en ligne (interactive-atlas.ipcc.ch), qui permet de visualiser l'évolution de différentes variables caractérisant le climat (température, précipitations, etc.) pour une région, un scénario socio-économique et un horizon temporel donnés. Cet atlas repose sur des simulations climatiques globales de CMIP5 et CMIP6, mais aussi sur l'exercice de simulation régionale CORDEX, dans lequel le CNRM a été également fortement impliqué.



▲ Couverture du 6^e rapport du Groupe I du GIEC : « Changing » (Alisa Singer)

D. Salas y Melia

1

Quelques points à retenir du 6^e rapport du GIEC

H. Douville

Selon le 6^e rapport du GIEC (AR6), quel que soit le scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré, la température moyenne à la surface du globe continuera d'augmenter au moins pendant deux ou trois décennies et bon nombre des changements dus aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre (GES) sont irréversibles pour des siècles, voire des millénaires, en particulier les modifications des océans (température, acidité et oxygénation), des calottes glaciaires et du niveau des mers. Du point de vue de la physique, le réchauffement climatique d'origine humaine ne pourra être limité à un niveau donné que si l'humanité parvient à des émissions nettes nulles de dioxyde de carbone (CO₂) et à de fortes réductions des autres émissions de GES. Dans la continuité du rapport spécial SR1.5 publié en 2018, c'est en partie ce que soulignent les experts du GIEC : si les dés sont jetés jusque vers 2050 du fait que les émissions ne peuvent cesser immédiatement, l'avenir de la planète à plus long terme est encore entre nos mains. Mais le délai imparti pour stabiliser le climat au

cours du XXI^e siècle est encore plus court, et la marche à gravir encore plus haute que ce qui avait été évalué jusqu'ici, en raison d'une révision à la hausse de la borne inférieure de la « sensibilité climatique » : 2,5 à 4°C pour un doublement du CO₂ atmosphérique selon l'AR6, contre 1,5 à 4,5°C selon l'AR5. Parmi les autres messages clés de l'AR6, on peut citer la contribution « sans équivoque » des activités humaines au réchauffement global mesuré (+1,09°C en 2011-2020 par rapport à 1850-1900) mais aussi, avec un niveau de confiance élevé, à bien d'autres facettes observées du changement climatique planétaire (malgré, notamment, les effets antagonistes des GES et des aérosols atmosphériques sur le cycle de l'eau). L'échelle de ces changements récents est sans précédent sur plusieurs siècles à plusieurs milliers d'années. Avec la poursuite du réchauffement global, toutes les régions seront affectées par le changement climatique, et de nombreux événements extrêmes à fort impact potentiel, tels que les vagues de chaleur, les fortes précipitations et les sécheresses,

deviendront plus fréquents et plus intenses. La température de surface de la planète continuera à augmenter au moins jusqu'au milieu du siècle dans la plupart des scénarios d'émissions envisagés. À moins de réductions immédiates, drastiques et prolongées des émissions de CO₂ et d'autres GES, les seuils de +1,5°C et +2°C envisagés dans l'accord de Paris seront dépassés au cours du XXI^e siècle (dès 2050 pour le seuil de +2°C dans le scénario intermédiaire le plus proche des trajectoires d'émissions actuelles). Si des politiques ambitieuses d'atténuation peuvent infléchir le réchauffement global d'ici environ 20 ans, leurs effets ne seront perceptibles que beaucoup plus tard à l'échelle régionale. D'où la nécessité, pour réduire l'ampleur des risques climatiques futurs, de mener en parallèle des politiques d'adaptation aux changements en cours, en évitant la mal-adaptation qui consiste notamment à limiter temporairement les conséquences du réchauffement global tout en renforçant ses causes et son accroissement à moyen et long terme.

Références :

Douville, H., K.Raghavan, J. Renwick, R.P. Allan, P.A. Arias, M. Barlow, R. Cerezo-Mota, A. Cherchi, T.Y. Gan, J. Gergis, D. Jiang, A. Khan, W. Pokam Mba, D. Rosenfeld, J. Tierney, and O. Zolina, 2021: Water Cycle Changes. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1055–1210, doi:10.1017/9781009157896.010.

Développement des modèles de climat couplés globaux du CNRM pour CMIP6

D. Salas y Melià, A. Voldoire, D. Saint-Martin, B. Decharme et R. Sférian

Dans le cadre de l'exercice d'inter-comparaison de modèles climatiques CMIP6 réalisé en amont du 6^e rapport du GIEC, le CNRM a développé et produit des simulations avec trois versions de son modèle CNRM-CM : (1) le modèle **standard** à résolution 100 km (Voldoire et al., 2019), (2) le modèle à haute résolution (50 km) et (3) le modèle **système Terre** (Sférian et al., 2019) basé sur la version standard avec ajout de la représentation du cycle du carbone complet, de l'utilisation des sols, de la chimie stratosphérique de l'ozone ainsi que l'activation du schéma d'aérosols interactifs.

Ces trois versions dérivent d'un socle commun et leur calibration est identique. Cet ensemble cohérent a permis d'étudier de façon objective l'impact de la complexification et celui de la résolution sur la représentation du climat du XX^e siècle et sur les projections futures. Au sein de ces trois modèles, la version 6 du modèle d'atmosphère ARPEGE-Climat (Roehrig et al., 2020), développée en synergie avec le modèle de prévision du temps de Météo-France ARPEGE, est couplée avec la plate-forme de surface continentale SURFEX-CTRIIP (Decharme et al., 2019) et le modèle d'océan-banquise NEMO-Gelato. La nouvelle version d'ARPEGE-Climat

capitalise sur de nombreux développements initiés depuis le milieu des années 2000, et qui ont impliqué les différentes unités du CNRM : le nouveau schéma de convection, couplé à une microphysique nuageuse détaillée, traite de manière continue la convection profonde et peu profonde ; le nouveau schéma de turbulence améliore la représentation des couches limites ; un schéma d'ondes de gravité non orographique permet la prise en compte des sources liées à la convection profonde et à la frontogénèse ; SURFEX-CTRIIP décrit les processus liés aux aquifères et aux plaines d'inondation.

Références :

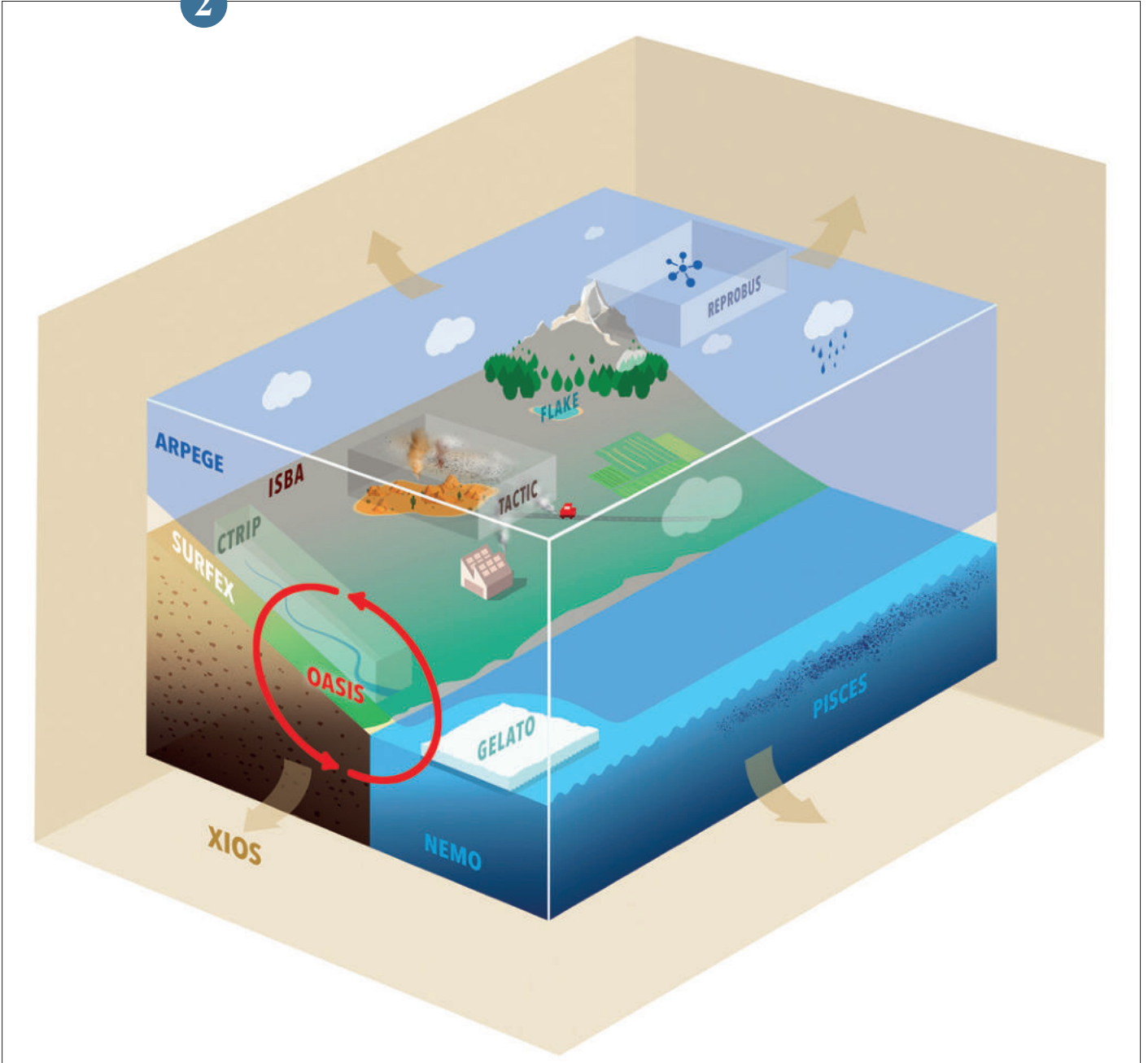
Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J.-P., et al. (2019). Recent Changes in the ISBA-CTRIIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(5), 1207-1252. <https://doi.org/10.1029/2018ms001545>

Roehrig, R., Beau, I., Saint-Martin, D., et al. (2020). The CNRM global atmosphere model ARPEGE-climat 6.3: Description and evaluation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2020MS002075. <https://doi.org/10.1029/2020MS002075>

Sférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voldoire, et al. (2019) Evaluation of CNRM earth system model, CNRM-ESM2-1: role of earth system processes in present-day and future climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(12), 4182– 4227. <http://dx.doi.org/10.1029/2019ms001791>.

Voldoire, A., D. Saint-Martin, S. Sénési, B. Decharme, et al. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.

2



▲ Architecture de la version système Terre du modèle climatique CNRM-CM6.

De nouvelles projections climatiques combinant modélisation et observations

A. Ribes

La communauté scientifique produit régulièrement des projections climatiques dans le but de quantifier les changements climatiques attendus au XXI^e siècle et au-delà. Ces projections étaient jusqu'ici basées sur des simulations de modèles climatiques. Mais, en ce début de XXI^e siècle, le réchauffement s'accroît et les observations deviennent de plus en plus informatives sur l'amplitude du changement climatique passé mais aussi futur.

En utilisant une nouvelle méthode statistique, nous avons ajusté le réchauffement climatique attendu au XXI^e siècle en combinant les dernières simulations climatiques (exercice CMIP6) et les observations réalisées depuis 1850. Nos résultats suggèrent que l'incertitude issue des simulations climatiques est sensiblement réduite en prenant en compte les observations : environ d'un facteur trois à court terme (avant 2050), et d'un facteur 2 à long terme (fin de XXI^e siècle). Le réchauffement attendu en 2100 par rapport à la période 1850-1900 est d'environ +2°C (+/-0,6°C) pour un scénario de faibles émissions de gaz à effet de serre (SSP1-2.6), +3°C (+/-0,6°C) pour un scénario d'émissions modérées (SSP2-4.5), et +5°C (+/-0,6°C) pour un scénario de fortes émissions (SSP5-8.5).

Cette méthode a été reprise par les auteurs du 6^e rapport du Groupe I du GIEC afin d'ajuster les projections de température moyenne du globe. Outre l'intérêt de ces résultats pour les stratégies d'adaptation et d'atténuation, de nombreuses autres applications de la méthode proposée sont envisagées afin de préciser les projections climatiques aux échelles régionale ou locale, et/ou pour d'autres variables que la température.

Shared Socio-economic Pathways. Cette nouvelle génération de scénarios prise en compte pour CMIP6 et le 6^e rapport du GIEC remplace les scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) utilisés jusqu'alors.

Référence :

Ribes, A., S. Qasmi, and N.P. Gillett, 2021: Making climate projections conditional on historical observations. *Science Advances*, 7(4), eabc0671, doi:10.1126/sciadv.abc0671.

3

Quantification de la baisse de l'enneigement dans les Alpes européennes depuis 1971

S. Morin

Jusqu'à présent, les études menées au sujet de l'évolution de l'enneigement se limitaient à des zones assez restreintes de la région alpine et se basaient sur les données de quelques centaines de stations de mesure au maximum. Aujourd'hui, pour la première fois, une étude coordonnée par Eurac Research et associant des chercheurs du CNRM et de la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques de Météo-France a permis de recueillir et d'analyser systématiquement des données d'enneigement provenant de plus de 2000 stations de mesure en Italie, en Autriche, en Slovénie, en Allemagne, en Suisse et en France. Les résultats ont permis de décrire de manière fiable les tendances de l'enneigement jusqu'à 2000 mètres d'altitude. Au-delà, il n'y a pas assez de stations de mesure pour pouvoir extraire des informations fiables pour l'ensemble de l'espace alpin. Cet ensemble de données cohérent s'étend sur cinq décennies et a été créé grâce à la collaboration de plus de 30 scientifiques de chacun des États alpins. Les données, qui couvrent la période 1971-2019, montrent que la neige est inégalement répartie et ne diminue pas partout dans la même mesure mais la variabilité décennale

est similaire dans toute la région alpine. Les années 1970 et 1980 ont été généralement enneigées, suivies d'une période de rareté de la neige en hiver à la fin des années 1980 et au début des années 1990. Depuis lors, bien que l'épaisseur de la neige ait à nouveau augmenté dans une certaine mesure à haute altitude, elle n'a pas atteint le niveau des années 1970. La durée d'enneigement a diminué de 22 à 34 jours au cours des 50 dernières années, en particulier à basse et moyenne altitude. Le manteau neigeux y a tendance à se constituer plus tard en hiver et, à toutes altitudes, à disparaître plus tôt au printemps, une conséquence directe du changement climatique.

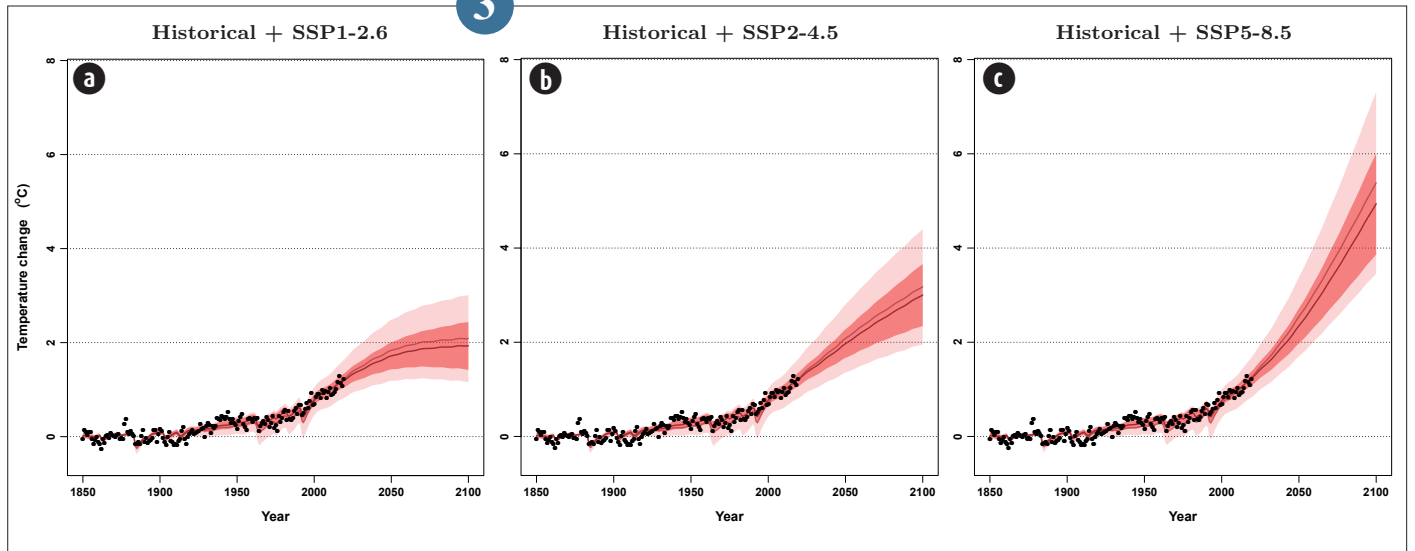
Au-delà des résultats intrinsèques de cette étude, cette collecte de données complète et unifiée est un outil particulièrement précieux, et les données ont été pour la plupart mises à disposition de la communauté scientifique. Cet article, documentant de façon très complète l'évolution passée de l'enneigement en montagne dans les Alpes européennes, a été pris en compte dans le Chapitre 9 "Océan, cryosphère et changement du niveau des mers" du rapport du 1^{er} Groupe de Travail du GIEC rendu public en Août 2021.

Référence :

Matiu et al. Observed snow depth trends in the European Alps : 1971 to 2019, *The Cryosphere*, 15, 1343–1382, 2021. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>

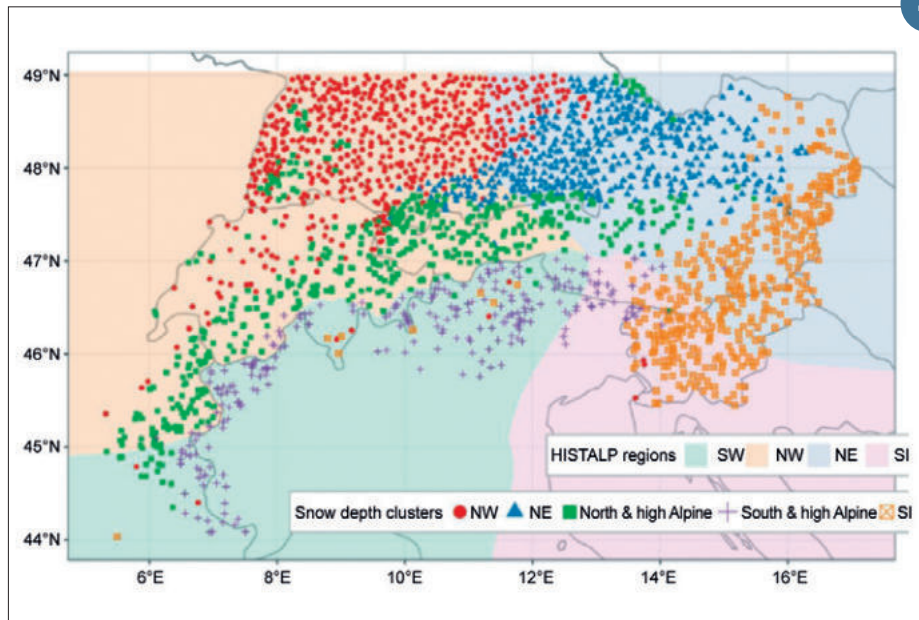
4

3



▲ Projections de réchauffement de la température moyenne globale, et incertitudes associées (intervalles de confiance 5-95%) obtenues à partir des simulations climatiques seules (intervalle rose), puis avec prise en compte des observations (intervalle rouge). Le calcul est fait à partir de 22 modèles de climat de l'exercice CMIP6, pour trois scénarios d'émissions (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5). Les valeurs annuelles observées de température moyenne globale sont indiquées par des points noirs. Toutes les températures sont des anomalies par rapport à la période 1850-1900, utilisée comme référence.

4



▲ Classification des stations de mesure de hauteur de neige utilisées pour cette étude, rassemblées en fonction de leurs points communs en matière de caractéristiques d'enneigement. Les plages de couleur correspondent aux régions climatologiques identifiées dans une étude précédente (HISTALP, Auer et al., 2007) sur la base de données de température, précipitation, pression atmosphérique, ensoleillement et couverture nuageuse.

EURO-CORDEX: un très grand ensemble de projections climatiques à haute résolution pour l'étude et l'adaptation au changement climatique en Europe

L. Corre, S. Somot

L'adaptation au changement climatique se fait essentiellement à l'échelle nationale voire infra-nationale. Elle nécessite donc de disposer de données climatiques à haute résolution, capables de représenter les phénomènes météorologiques locaux, et couvrant au mieux les incertitudes inhérentes à toutes projections.

L'initiative internationale EURO-CORDEX lancée en 2009 vise à répondre à cette demande à l'échelle de l'Europe en produisant des simulations climatiques régionales à 12 km de résolution spatiale, forcées aux bords par des modèles globaux de climat de l'exercice CMIP5. L'ensemble disponible aujourd'hui comprend 137 simulations du XXI^e siècle basées sur 13 modèles régionaux, 10 modèles globaux et

3 scénarios socio-économiques (RCP8.5 : 78 simulations, RCP4.5 : 26, RCP2.6 : 33). Il s'agit sans aucun doute du plus grand ensemble de simulations régionales jamais réalisé au monde. La contribution de Météo-France, issue d'une collaboration entre le CNRM et la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC), est constituée de 9 simulations réalisées avec le modèle de climat régional ALADIN.

Ce grand ensemble a été évalué par la communauté scientifique et est aujourd'hui disponible sur la base de données ouverte ESGF. Il accroît la fiabilité des études visant à mieux comprendre les phénomènes climatiques régionaux, leur variabilité et leur évolution. Il sert également de base à de nombreux services climatiques européens et

nationaux dont la récente version du portail « DRIAS - Les futurs du climat » qui fournit des projections climatiques de référence sur la France métropolitaine.

Les données EURO-CORDEX et études basées sur ce jeu de données ont également apporté une contribution substantielle aux derniers rapports du GIEC, notamment le rapport sur les bases physiques du changement climatique (GT1, rendu public en août 2021), dont la dimension régionale s'appuie fortement sur la modélisation climatique réalisée à cette échelle.

Actuellement, la communauté EURO-CORDEX prépare la prochaine génération de cet ensemble avec des modèles régionaux atteignant les résolutions kilométriques et l'utilisation des nouveaux forçages CMIP6.

Références :

Coppola E., et al. (2020) Assessment of the European Climate Projections as Simulated by the Large EURO-CORDEX Regional and Global Climate Model Ensemble. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, <http://doi.org/10.1029/2019JD032356>

Vautard R., et al. (2021) Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2019JD032344>

5

Diminution des émissions anthropiques suite à la COVID-19 : quels effets sur le climat ?

R. Sférian

En 2020, la pandémie de Covid-19 a contraint de nombreux pays à réduire leurs activités industrielles et économiques, et à imposer d'importantes restrictions des déplacements. Ces restrictions ont entraîné une réduction temporaire mais très importante des émissions des gaz à effet de serre (GES) dont en premier lieu le dioxyde de carbone (CO₂), ainsi que des polluants atmosphériques comme les précurseurs d'ozone et d'aérosols. Bien que les diminutions d'émissions étaient concentrées sur quelques mois de l'année, les émissions humaines de CO₂ de 2020 ont été inférieures d'environ 6 % par rapport à 2019 (soit une baisse de 2,2 milliards de tonnes).

Afin d'évaluer l'impact climatique de cette réduction des émissions humaines, un groupe international (incluant des chercheurs du CNRM et du CERFACS) a mis en place un exercice coordonné de simulations climatiques dès le printemps 2020. Cette

coopération scientifique a permis (1) la construction d'un inventaire d'émissions de GES et d'aérosols cohérent avec les réductions d'émissions observées au début de l'année 2020 et prenant en compte les projections pour les années 2021 et 2022 ; (2) la mise en place d'un protocole de simulations climatiques multi-modèle simple et quasi-opérationnel et (3) l'analyse des premiers résultats de ces simulations.

Les auteurs de l'étude présentent ainsi les premières conclusions, issues d'ensembles de simulations réalisées avec 12 modèles du système Terre, dont le modèle CNRM-ESM2-1 développé par le CNRM et le CERFACS. Cela représente un total de plus de 300 simulations couvrant la période 2020-2024, permettant de quantifier au mieux l'influence de la crise sanitaire sur le climat, tout en estimant les différentes sources d'incertitudes, liées à la fois à la modélisation et aux conditions initiales.

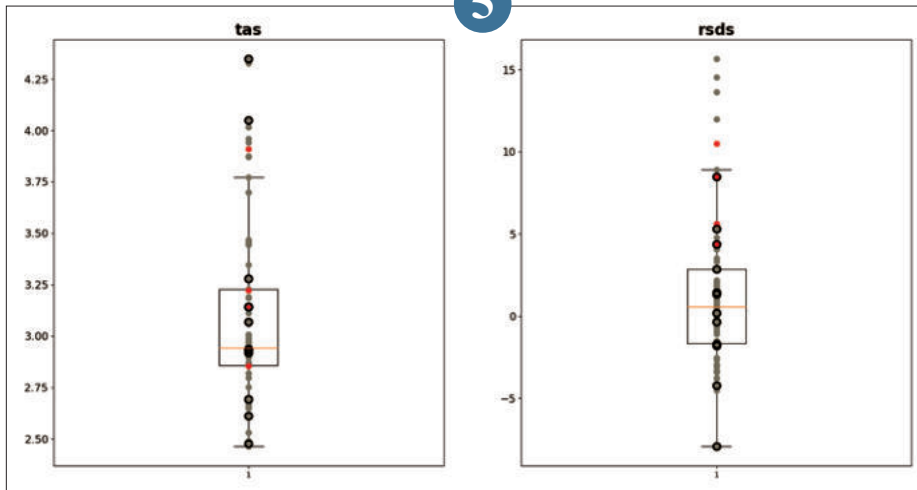
Cette première analyse, reprise dans le 6^e rapport du GIEC, a montré que la réduction des émissions anthropiques liée à la crise sanitaire a entraîné une diminution des concentrations d'aérosols troposphériques, entraînant une augmentation du rayonnement solaire incident, notamment sur le sud et l'est de l'Asie qui sont les régions les plus impactées. Cependant, la réduction des émissions de GES et d'aérosols était trop limitée dans le temps et l'espace pour avoir un impact significatif à l'échelle planétaire sur la température et les précipitations. Des analyses régionales et dynamiques à plus petite échelle, ainsi qu'une analyse des extrêmes, sont nécessaires pour aller plus loin dans l'exploitation de ces premiers résultats. Cette étude confirme que des fluctuations ponctuelles des émissions de gaz à effet de serre ont un impact très limité sur l'évolution climatique de long terme.

Référence :

Jones, C. D., Hickman, J. E., Rumbold, S. T., Walton, J., Lamboll, R. D., Skeie, R. B., et al. (2021). The Climate Response to Emissions Reductions due to COVID-19: Initial Results from CovidMIP. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091883. <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>

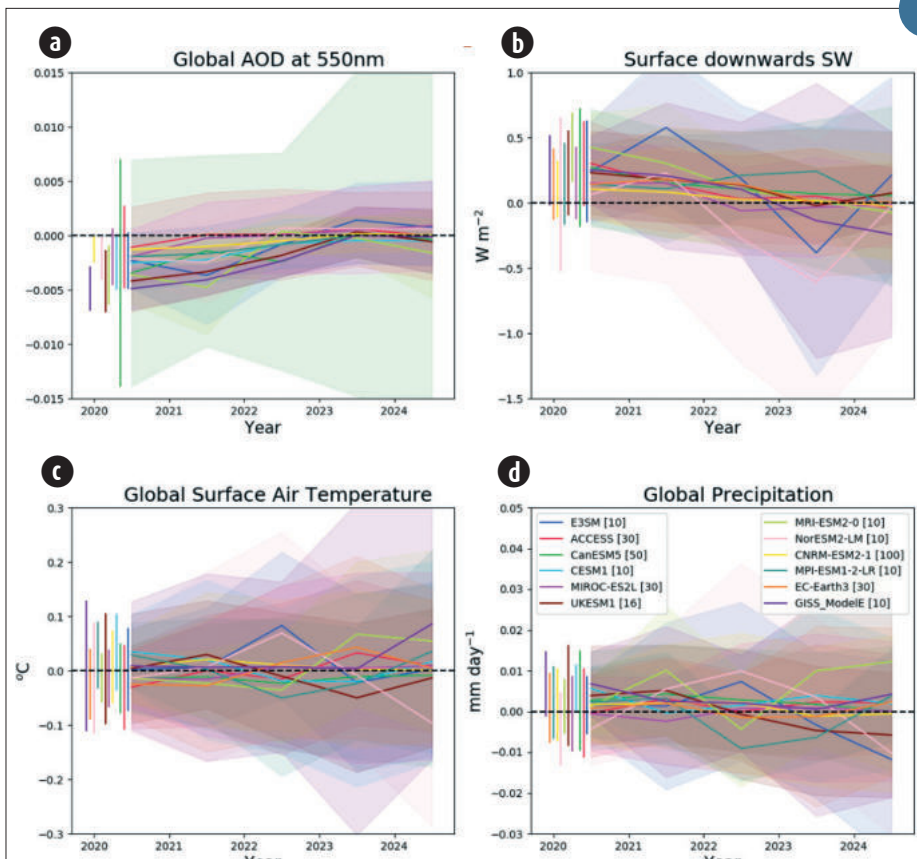
6

5



Changement de température de surface (gauche, °C) et de rayonnement solaire descendant en surface (droite, $W \cdot m^{-2}$) entre les périodes 1981-2010 et 2070-2099 en moyenne sur la France pour les différentes simulations de l'ensemble EURO-CORDEX à 12 km de résolution (points gris), incluant les simulations réalisées avec le modèle régional ALADIN par Météo-France (points rouges) et les simulations sélectionnées pour le portail national de services climatiques DRIAS mis en œuvre par Météo-France (cercles noirs). La boîte à moustache montre la médiane, l'intervalle interquartile et l'étendue de la distribution de l'ensemble EURO-CORDEX.

6



Chaque graphique montre la moyenne annuelle et mondiale de l'anomalie simulée par le multimodèle entre les simulations avec réductions d'émissions liées à COVID-19 (SSP2-4.5-Covid) et les simulations de référence SSP2-4.5 (émissions modérées de gaz à effet de serre, prolongeant les tendances récentes). (a) Épaisseur optique des aérosols à 550 nm ; (b) rayonnement solaire descendant à la surface ; (c) température de l'air à la surface ; (d) précipitations. Pour chaque modèle, les lignes colorées et les panaches montrent respectivement la moyenne de l'ensemble réalisé avec chaque modèle et la dispersion de l'ensemble (définie comme ± 1 écart-type). Les barres verticales à gauche de chaque graphique montrent le changement simulé pour la première année (2020) par chaque modèle (moyenne ± 1 écart type).

Préparation d'une nouvelle version des systèmes opérationnels de prévision numérique du temps

2021 aura marqué une nouvelle étape à Météo-France pour les modèles de prévision numérique du temps. Déclaré opérationnel en février 2021, le nouveau système de calcul haute performance ATOS Bull Sequana XH2000, offrant une puissance de calcul environ 5 fois supérieure au calculateur précédent, a permis de préparer des évolutions majeures des systèmes de prévisions régionales AROME et globales ARPEGE. La nouvelle chaîne de prévision numérique finalisée en 2021 a été installée en double à partir de l'été 2021.

Cette nouvelle chaîne marque un tournant inédit pour les systèmes de prévision d'ensemble AROME et ARPEGE, puisque, pour la première fois depuis leur mise en place, leurs résolutions verticale et horizontale seront les mêmes que celles du système de prévision déterministe qui leur est associé. Les prévisions d'ensembles deviennent ainsi pleinement représentatives de l'incertitude des prévisions AROME et ARPEGE. De plus, les incertitudes de la modélisation dans ARPEGE sont représentées par un nouvel algorithme.

Cette chaîne bénéficie aussi d'une évolution majeure de la physique ARPEGE, avec notamment une refonte de la paramétrisation de la convection, un composant-clé du modèle. Ainsi, ARPEGE voit ses scores de prévision s'améliorer de façon importante, sur le globe et sur l'Europe. AROME-France voit aussi des améliorations notables et en particulier de meilleures prévisions de précipitations en conditions de convection diurne sans forçage synoptique. Les systèmes AROME Outre-mer, quant à eux, voient leur résolution passer de 2,5 km à 1,3 km, ce qui bénéficie en particulier au réalisme des précipitations.

Le système d'assimilation d'observations voit aussi de nombreuses évolutions qui contribuent à l'amélioration des prévisions. On notera en particulier le développement de l'assimilation des données satellitaires micro-ondes en conditions nuageuses, l'assimilation d'une nouvelle filière de traitement de données radar, la révision des algorithmes d'écémage des observations ainsi que l'assimilation de nouveaux capteurs satellitaires et des données des radiosondages à la descente.

Les articles qui suivent décrivent certains aspects importants de cette nouvelle chaîne de prévision, qui doit devenir pleinement opérationnelle mi-2022.

F. Bouysse

Les modifications physiques de ARPEGE et AROME

Y. Bouteloup, Y. Seity

Des évolutions majeures des paramétrisations physiques des modèles ARPEGE et AROME ont été introduites dans la nouvelle chaîne de prévision numérique du temps de 2021, destinée à devenir opérationnelle en 2022. En ce qui concerne le système de prévision à échelle globale ARPEGE quatre éléments fondamentaux de la physique du modèle ont été changés. En premier lieu le schéma de convection profonde utilisé depuis les origines du modèle, avec certes des évolutions, a été remplacé par un schéma dérivé de celui du modèle IFS du CEPMMT. Cette paramétrisation est également utilisée dans le modèle ICON du DWD. L'amélioration de la qualité du modèle dans la zone intertropicale qui en découle est très importante (CNRM/GMAP et DIROP, 2022).

Le deuxième élément est une évolution de la paramétrisation des flux d'énergie et de masse à l'interface océanique développée au CNRM (ECUME). Une nouvelle technique d'ajustement des coefficients aux observations des campagnes de mesure en mer permet une bien meilleure prévision de ces flux. L'amélioration résultante du modèle est significative à toutes les latitudes.

Le troisième élément est le remplacement de l'ancien code de rayonnement utilisé pour la partie visible du spectre par le schéma RRTM, ce qui permet d'activer le solveur Mclca qui calcule plus précisément les effets de recouvrement des différentes couches nuageuses. Ce changement, et surtout les réglages du modèle qui en découlent, est un premier pas vers l'utilisation du code de rayonnement modulaire EcRad partagé par un grand nombre de modèles météorologiques et qui fait l'objet de travaux de recherche destinés à alimenter les futurs systèmes de prévision de Météo-France.

La dernière évolution concerne l'activation de la version 1D du modèle de glace de mer GELATO, intégrée à la plateforme de modélisation des surfaces SURFEX (Bazile et al., 2020). La température de surface de la banquise est désormais une variable du modèle qui évolue au fil des prévisions. Auparavant, elle était issue de climatologies relativement anciennes et restait constante au cours d'une prévision. La variabilité de la température de surface est désormais beaucoup plus importante, spatialement et temporellement. Ceci est illustré sur la Figure 1 où est tracée la température mesurée lors de la dérive du brise-glace de recherche Polarstern au cours de la campagne internationale MOSAIC en 2019 et 2020 (<https://mosaic-expedition.org/>) ainsi que les prévisions correspondantes de l'actuel système opérationnel Arpege et d'une version utilisant la paramétrisation GELATO.

Ces modifications ont amélioré les performances du système de prévision utilisant le modèle ARPEGE de manière significative comme cela peut être visualisé sur la Figure 2.

La modification principale d'AROME-France a été menée en réponse à des signalements par les prévisionnistes, depuis 2016, d'une sous-estimation des précipitations dans des situations de convection diurne estivale sans forçage synoptique. Des études ont été menées en 2018 montrant la sensibilité de ces situations aux réglages de la diffusion numérique appliquée sur les champs nuageux d'AROME. Malheureusement, ces travaux n'ont pas permis de trouver un nouveau réglage utilisable dans une configuration opérationnelle (l'amélioration de ces cas se faisant au prix d'une détérioration d'autres). C'est en effectuant des simulations semi-idéalisées que la

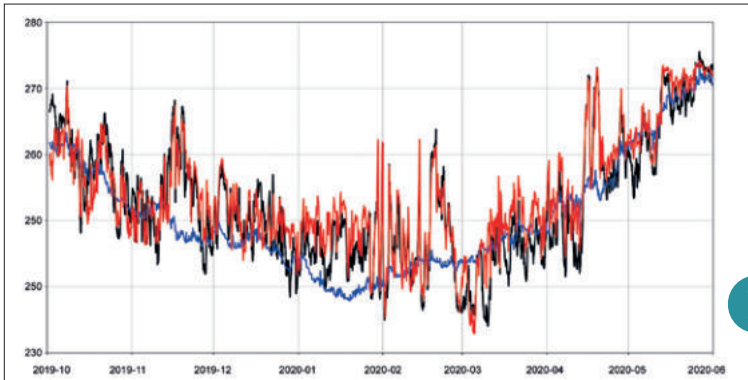
véritable source du problème a pu être identifiée. Celle-ci se situait dans le schéma d'advection d'AROME, et plus précisément dans le choix de la méthode utilisée pour interpoler les champs du modèle dans ce processus. Des expériences numériques ont en effet permis de mettre en évidence que le schéma de transport était responsable d'une création artificielle de masse sur les champs nuageux (par nature beaucoup moins 'lisses' qu'un champ de vent ou de température, voir même assez binaires dans les cas de petites cellules convectives). Ce défaut est présent depuis les origines d'AROME en 2008, mais était 'masqué' par les réglages de la diffusion numérique des champs nuageux. Ce réglage ayant été modifié suite au passage d'AROME à 1,3km de résolution horizontale en 2016, le défaut est devenu plus visible que dans la version précédente du modèle à 2,5km. La mise en œuvre d'un nouvel interpolateur ayant des propriétés différentes, et notamment conservant la masse, a permis de développer de nouveaux réglages du modèle en supprimant conjointement la diffusion numérique appliquée sur les champs nuageux. Les tests ont montré que les performances du modèle étaient grandement améliorées dans les situations problématiques reportées par les prévisionnistes (Figure 3), sans être dégradées dans le cas général (CNRM/GMAP et DIROP, 2022). En plus de ces nouveaux réglages, la nouvelle version d'AROME bénéficie tout comme ARPEGE de la nouvelle version de la paramétrisation des flux océaniques ECUME. Cette amélioration illustre le bénéfice de la prise en compte des retours d'expérience de la part des prévisionnistes utilisateurs du modèle, ainsi que la grande complexité inhérente au réglage et la mise en œuvre de tels systèmes complexes de prévision.

Références :

E.Bazile, N. Azouz, A. Napoly, C. Loo, Impact of the 1D sea-ice model GELATO in the global model ARPEGE, WMO Working Group on Numerical Experimentation (WGNE), Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (Blue Book), 6-03, 2020. http://bluebook.meteoinfo.ru/index.php?year=2020&ch_=2

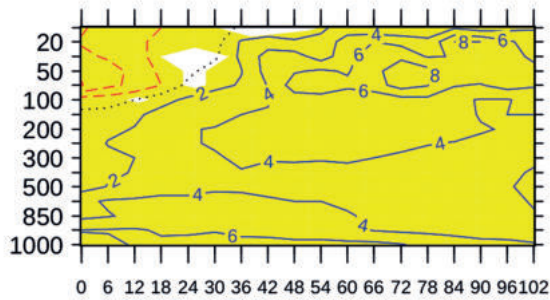
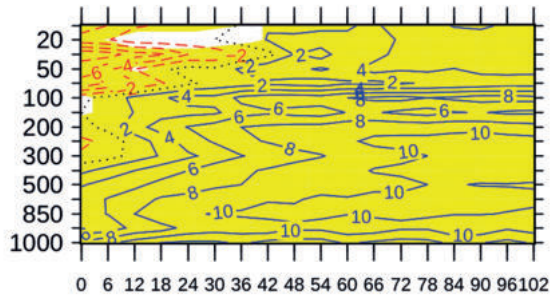
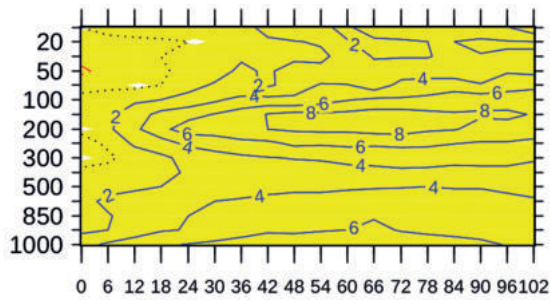
CNRM/GMAP et DIROP, The "46t1 e-suite" running at Météo-France: content and evaluation, ACCORD Newsletter n°2, pages 36-46, 2022. <http://www.accord-nwp.org/meshtml/coordoper/ACCORD-NL2.pdf>

1

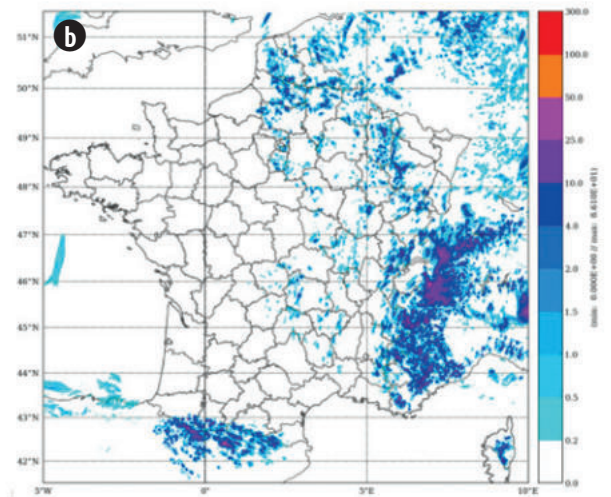
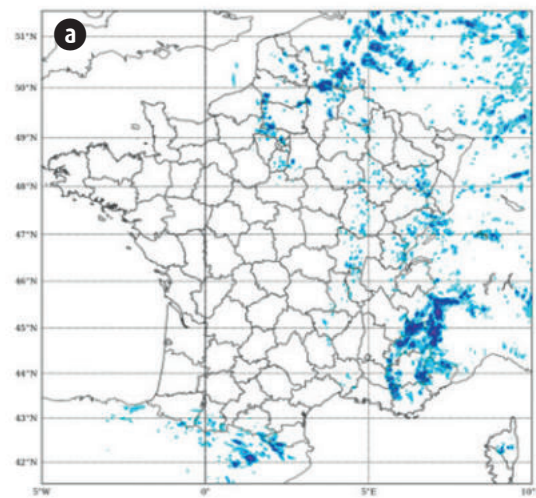
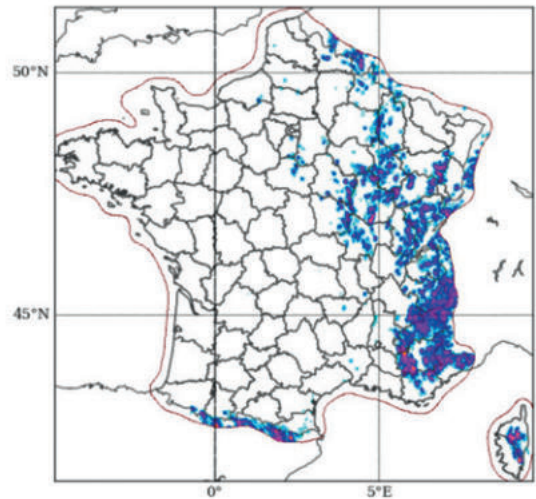


Températures observées et prévues le long de la trajectoire du brise-glace Polarstern pendant la campagne MOSAIC. En noir les observations effectuées sur le bateau, en bleu les températures prévues par la version actuellement opérationnelle d'ARPEGE et en rouge celles prévues par la nouvelle version d'ARPEGE avec le modèle GELATO pour représenter la glace de mer.

1



Scores normalisés de vent (en %) de la chaîne en double ARPEGE en cy46t1_op1 par rapport au modèle actuellement utilisé en opérationnel sur les domaines Nord20 (en haut), Tropique (au milieu) et Sud20 (en bas).



Cumuls de précipitations en 24h pour la journée du 25 juillet 2018. En haut observations, au centre AROME-oper, en bas nouvelle version d'AROME (dite double).

Le système de prévision d'ensemble global PEARP

L. Descamps, C. Labadie, P. Cébron

Dans le cadre du déploiement des nouveaux systèmes de prévision numérique du temps en 2022, la résolution horizontale de la prévision d'ensemble ARPEGE (PEARP) sera augmentée, ce qui se traduit par une résolution horizontale de 5 km sur la France métropolitaine et 24.5 km aux antipodes, et une modélisation des mouvements atmosphériques sur des niveaux verticaux couvrant la gamme d'altitude de 10 m au dessus du sol jusqu'à 65 km d'altitude. Les prévisions d'ensemble PEARP seront ainsi à la même résolution que le système déterministe ARPEGE. La prévision d'ensemble devient pleinement représentative de l'incertitude du processus de prévision et la prévision ARPEGE sera de facto intégrée dans l'ensemble PEARP.

La modélisation physique des processus du système ensembliste de prévisions bénéficie également de progrès. La moitié des membres de l'ensemble des prévisions adoptera comme ARPEGE un nouveau schéma de convection profonde, Tiedtke-Bechtold (Tiedtke, 1989), offrant une amélioration importante pour la chaîne de prévision numérique mondiale. Les autres membres de l'ensemble de prévisions seront basées sur un schéma de convection déjà utilisé dans l'actuel système opérationnel, PCMT (Piriou et al., 2007; Gueremy, 2011). En supplément,

la philosophie de la représentation de l'erreur de modélisation évolue : le jeu de dix « paquets physiques » utilisé jusqu'ici va laisser place à une approche plus exhaustive utilisant des perturbations stochastiques de plusieurs paramètres des schémas de paramétrisations utilisés pour représenter certains processus physiques dans le modèle. Chaque prévision utilisera donc aléatoirement un réglage légèrement différent, échantillonnant de façon plus robuste les valeurs possibles des paramètres physiques du modèle.

Une évaluation sur huit mois de cette nouvelle configuration de PEARP montre une amélioration nette par rapport à la version opérationnelle précédente sur la plupart des scores, pour plusieurs domaines et variables météorologiques. La figure montre l'apport relatif du nouveau système de prévision d'ensemble relativement au système opérationnel précédent en pourcentage pour six variables représentatives de l'état de l'atmosphère (le géopotential au milieu de l'atmosphère (Z500), la température et le vent dans les basses couches (T850) et (FF850), la pression réduite au niveau de la mer (PMER), le vent à 10m (FF10m) et la pluie cumulée sur 24h, (RR24). Cet apport est mesuré sur un large domaine qui englobe l'Océan Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest.

Références :

Tiedtke, M. " A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models". *Monthly Weather Review* 117.8, 1779-1800, 1989. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)

Piriou, J.-M., Redelsperger, J.-L., Geleyn, J.-F., Lafore, J.-P., and Guichard, F. An Approach for Convective Parameterization with Memory: Separating Microphysics and Transport in Grid-Scale Equations. *Journal of the Atmospheric Sciences* 64, 11, 4127-4139, 2007. <https://doi.org/10.1175/2007JAS2144.1>

Gueremy, J.-F., A continuous buoyancy based convection scheme: one-and three-dimensional validation, *Tellus A Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63 (4), pp. 687-706, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x>

2

Le système de prévision d'ensemble régional PEARO

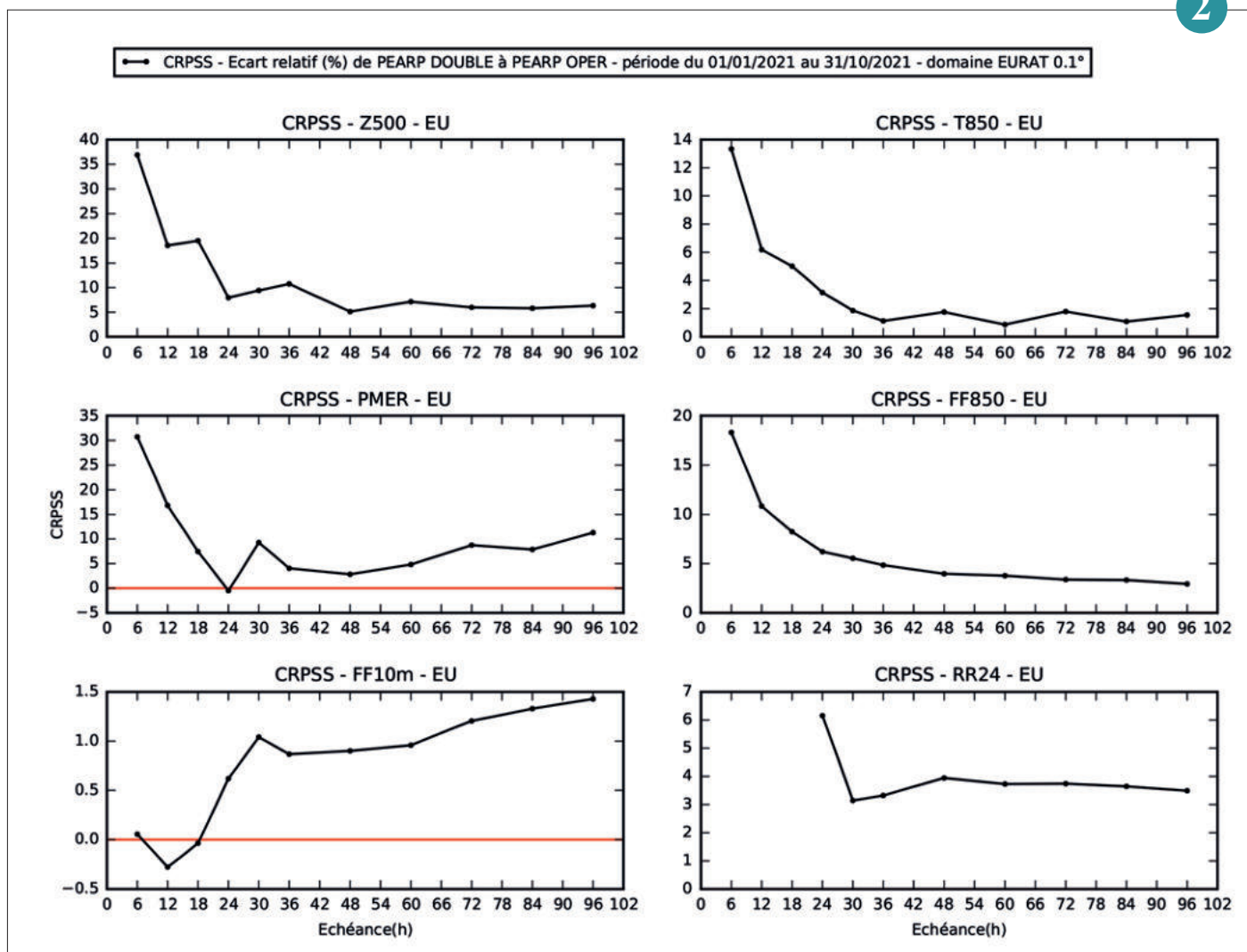
L. Raynaud

La Prévision d'Ensemble Arome (PEARO), opérationnelle à Météo-France depuis l'automne 2016, permet d'assortir la prévision déterministe d'une dimension probabiliste. Elle s'appuie pour cela sur la prise en compte de plusieurs sources d'incertitude affectant l'état initial, la surface, les conditions aux limites et le modèle.

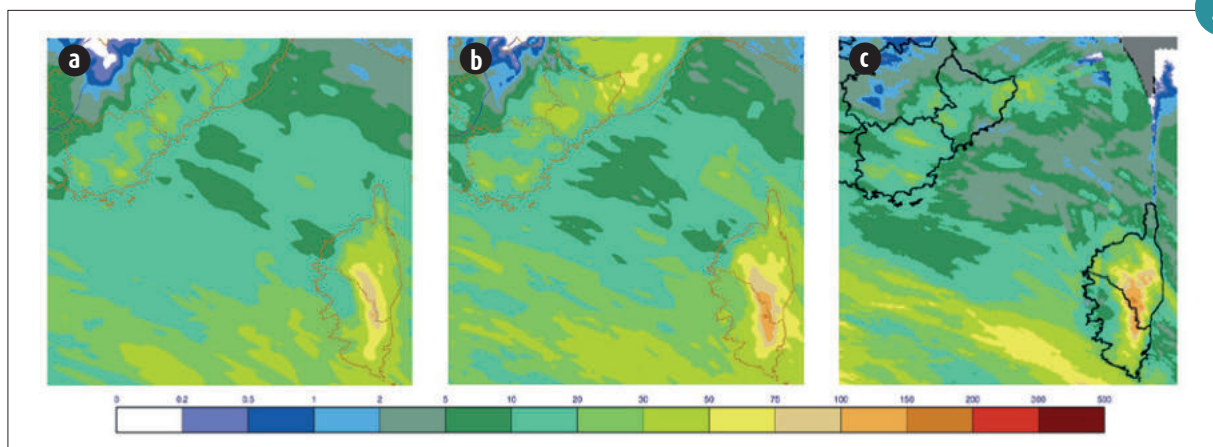
Dans le cadre de la mise en œuvre opérationnelle des nouveaux systèmes de prévision en 2022, la résolution horizontale de la PEARO est augmentée, passant de 2,5 km à 1,3 km. Cette convergence avec le système déterministe s'accompagne également d'une augmentation de la taille de l'ensemble passant de 16 à 17 membres, incluant les 16 membres perturbés et le membre de contrôle fourni par la prévision déterministe. La PEARO haute résolution hérite par ailleurs des améliorations des systèmes auxquels elle est couplée, et bénéficie ainsi de conditions initiales plus précises, de la nouvelle physique Arome et des conditions aux limites fournies par la nouvelle version de PEARP haute résolution. Les nouveaux diagnostics aéronautiques et convectifs sont également calculés pour chaque membre.

Les performances probabilistes de la PEARO haute résolution ont été évaluées sur plusieurs mois, et mettent en évidence des améliorations significatives, en particulier pour le vent à 10 m et les précipitations. L'analyse de plusieurs situations de fortes pluies indique également de meilleures prévisions des cumuls (Figure).

3



▲ Apport du nouveau système de prévision d'ensemble relativement au système opérationnel exprimé en pourcentage pour six variables (le géopotential à 500hPa (Z500), la température et la force du vent à 850hPa (T850) et (FF850), la pression réduite au niveau de la mer (PMER), la force du vent à 10m (FF10m) et la pluie cumulée sur 24h, (RR24). Cet apport est évalué sur un large domaine qui englobe une partie de l'Océan Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest.



▲ Précipitations cumulées en 24 h valides le 11/11/2021 à 00 UTC (unité : mm). Quantile 75 prévu par (a) la PEARP opérationnelle et (b) la PEARP double, réseau du 08/11/2021 à 21 UTC. (c) Observations Antilope.

Les systèmes de prévision Arome Outre-Mer

G. Faure, O. Nuissier

Les territoires ultramarins français (Antilles, Guyane, Indien, Nouvelle-Calédonie et Polynésie) bénéficient depuis 2016 de prévisions déterministes du modèle Arome à une résolution horizontale de 2,5 km. Elles ont permis des améliorations de la prévision sur ces zones tropicales dans lesquelles, outre les cyclones, la convection se conjugue souvent à des reliefs notables pour donner des épisodes pluvieux très intenses.

L'arrivée du nouveau supercalculateur à Météo-France, ainsi que d'importantes optimisations du coût de calcul du modèle Arome dont notamment la réalisation des calculs en simple précision, permettent d'améliorer ces systèmes de prévision

selon 2 axes. Le premier, qui est déployé en opérationnel courant 2022, consiste à améliorer le réalisme des simulations déterministes existantes, avec l'utilisation, toutes choses égales par ailleurs, d'une résolution horizontale de 1,3 km, comme en métropole. La figure 1 représente un exemple d'amélioration de ce réalisme lors d'un épisode pluvieux en Guadeloupe en février 2021. Le caractère persistant de cet épisode de pluie intense, très inhabituel en cette saison, a été simulé de manière beaucoup plus réaliste par le modèle à 1,3 km, à la fois en étendue et en intensité.

Le second axe d'amélioration interviendra dans un contexte opérationnel en 2023, avec

la mise en place de prévisions d'ensemble Arome pour ces 5 domaines ultramarins (Bouttier et al., 2012 et Bouttier and Raynaud, 2018). Concrètement, 2 fois par jour, 16 prévisions Arome à 2,5 km de résolution horizontale seront calculées simultanément, chacune contenant différentes perturbations qui permettront au final d'appréhender l'incertitude de la situation du jour.

Les outils de prévision numérique pour l'outre-mer vont donc connaître une évolution importante dans les prochaines années, ce qui permettra aux prévisionnistes de ces territoires d'encore mieux répondre aux besoins de leurs usagers.

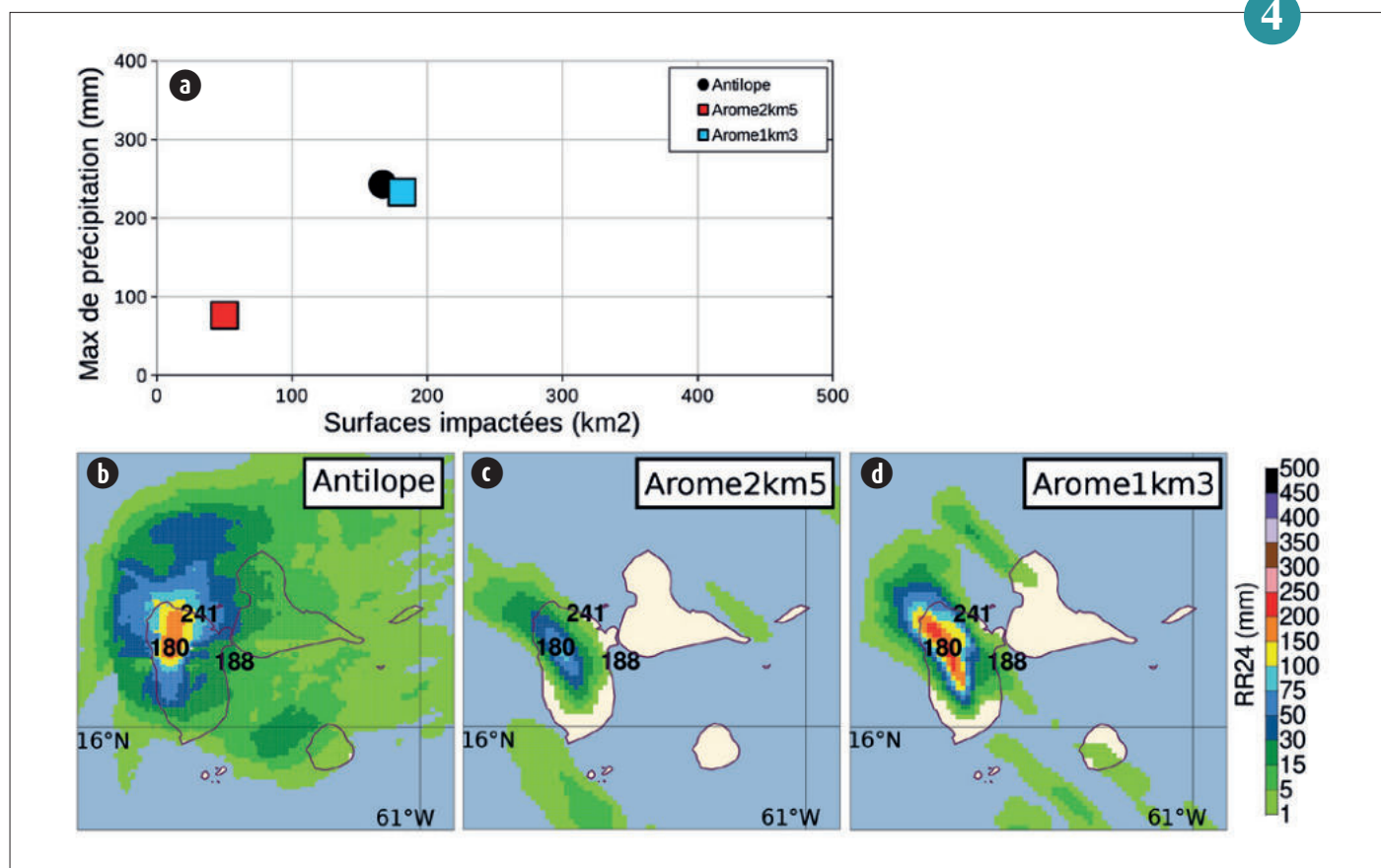
Références :

Bouttier F, Vié B, Nuissier O, Raynaud L.. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble. *Mon. Weather Rev.* 140: 3706–3721, 2012. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00031.1>

Bouttier, F., and L. Raynaud: Clustering and selection of boundary conditions for limited-area ensemble prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144 (717), 2381–2391, 2018. <https://doi.org/10.1002/qj.3304>

4

4



(a) Maxima de pluie sur 24 h sur la période allant du 03/02/2021 06 UTC au 04/02/2021 06 UTC, en fonction des surfaces impactées par les précipitations supérieures à 100 mm, observés depuis Antilope (disque noir) et prévus par Arome oper 2km5 (carré rouge) et Arome double 1km3 (carré bleu). Distribution spatiale des pluies sur la même période respectivement représentée pour (b) Antilope, (c) Arome oper 2km5 et (d) Arome double 1km3. Les nombres pointés en noir représentent des valeurs remarquables de pluviomètres pour les communes de Sainte-Rose, Petit-Bourg et Pointe-Noire.

Les futurs instruments satellitaires, une nouvelle révolution pour la météorologie et le climat

Les observations fournies par les satellites occupent une place de premier plan dans l'initialisation et l'évaluation des systèmes de prévision numérique du temps, de la qualité de l'air et de la composition atmosphérique mais aussi pour l'étude des processus et du climat.

Deux grandes missions de l'agence européenne pour les satellites météorologiques EUMETSAT vont révolutionner le paysage dans les années à venir. La mission géostationnaire Météosat Troisième Génération comportera deux types de satellites. Le premier, Météosat Troisième Génération Imageur, est dédié à l'imagerie pour la prévision du temps, les surfaces continentales, les aérosols et la détection d'éclair tandis que le second avec à son bord le sondeur hyperspectral IRS (InfraRed Sounder) constituera une révolution en termes d'informations disponibles pour le modèle de prévision à échelle kilométrique AROME. Il sera aussi utilisé pour l'étude de la qualité de l'air et la composition atmosphérique. La mission polaire European Polar Satellite Second Generation lancée en 2024 apportera aussi de nouvelles observations avec entre autres le sondeur hyperspectral IASI Nouvelle Génération mais aussi des données dans le spectre micro-onde.

Le CNRM (unité mixte de recherche Météo-France - CNRS) est engagé dans de nombreuses missions satellites en lien avec les agences spatiales. Les scientifiques peuvent être impliqués pour la conception et la définition des instruments spatiaux ou un peu plus tard pour la préparation puis l'exploitation des données dans les systèmes de prévision opérés par Météo-France. Concernant leur exploitation, l'utilisation des données des satellites repose sur le développement de modèles de transfert radiatif qui permettent de simuler de manière réaliste les observations à partir des variables du modèle atmosphérique pour en déduire une information des observations. L'amélioration des modèles de transfert radiatif, notamment à de nouveaux domaines d'observation permet d'utiliser de nouvelles observations. Ainsi par exemple, la mission FORUM sélectionnée par l'Agence Spatiale Européenne pour un lancement en 2ème moitié de la décennie complétera l'observation du spectre électromagnétique infrarouge déjà observé par les séries d'instruments IASI-NG et permettra ainsi l'évaluation et l'amélioration des modèles atmosphériques.

N. Fourrié

Vers l'arrivée de IASI-NG dans les modèles météorologiques : sélection d'information

F. Vittorioso, V. Guidard

Dans le cadre de la préparation du système polaire de deuxième génération d'EUMETSAT (EPS-SG), une nouvelle génération de l'interféromètre de sondage atmosphérique infrarouge (IASI) a été conçue. IASI-Nouvelle Génération (IASI-NG) mesurera les luminances à une résolution spectrale doublée par rapport à son prédécesseur et avec un rapport signal sur bruit amélioré d'un facteur 2. Cet instrument fournira une très grande quantité de luminances spectrales mesurées qui ne seront de ce fait pas directement exploitables dans des contextes opérationnels de prévision numérique du

temps (PNT). Pour ces raisons, une sélection de canaux IASI-NG est nécessaire.

Plusieurs méthodologies peuvent être appliquées afin de sélectionner les données les plus informatives à exploiter pour la PNT. Celle que nous avons décidé d'utiliser repose sur l'évaluation de l'impact de l'ajout d'un canal à la fois sur une métrique reflétant l'amélioration de l'erreur d'analyse par rapport à l'erreur d'ébauche.

Grâce à ce processus, un total de 500 canaux a été choisi pour servir de base aux futures sélections de canaux à fournir aux centres de PNT - 277 canaux de température, 23 ca-

naux sensibles à la surface et 200 canaux de vapeur d'eau (Vittorioso et al, 2021). Les expériences d'assimilation variationnelle unidimensionnelle (1D-Var) réalisées à partir d'une base de données de profils ARPEGE (Andrey-Andres et al, 2018) montrent que l'utilisation de cet ensemble de canaux sélectionnés conduit à une réduction de l'écart-type de l'erreur dans les profils de température (jusqu'à 30 %) et de vapeur d'eau (jusqu'à 50 %) par rapport aux informations a priori.

Références :

Vittorioso, F., Guidard, V. & Fourrié, N. (2021) An Infrared Atmospheric Sounding Interferometer – New Generation (IASI-NG) channel selection for numerical weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(739), 3297–3317. Available from: <https://doi.org/10.1002/qj.4129>

Andrey-Andrés J., Fourrié N., Guidard V., Armante R., Brunel P., Crevoisier C. and Tournier B. (2018) : « An Observing-system simulation experiment to assess the impact of IASI-NG hyperspectral infrared sounder », *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 803-818, <https://doi.org/10.5194/amt-11-803-2018>

1

Mesures infrarouges hyperspectrales en orbite géostationnaire : apports pour la composition atmosphérique

F. Vittorioso, V. Guidard

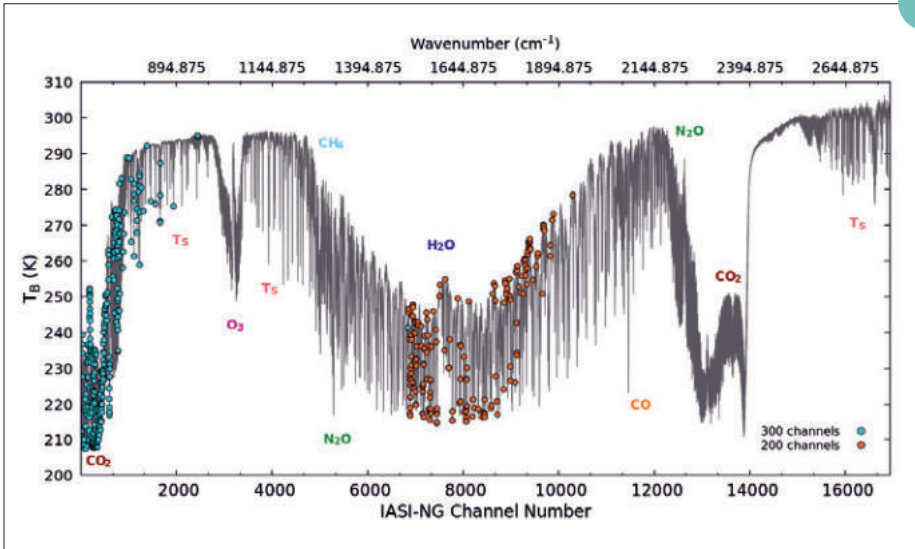
Météo-France contribue au suivi et à la prévision de la qualité de l'air par le biais du modèle de chimie-transport MOCAGE. Dans ce contexte, des recherches ont été entreprises sur l'assimilation des observations satellitaires pour fournir des informations sur la composition chimique et la teneur en aérosols. La surveillance des polluants par des satellites en orbite polaire permet de suivre le transport sur de grandes distances et d'identifier les sources de pollution, les émissions et la variabilité de la composition troposphérique. Cependant, les observations par satellite doivent avoir une répétitivité temporelle et une résolution

spatiale suffisantes pour suivre la variabilité des polluants. Une solution à ce problème est l'utilisation de sondes situés sur une plate-forme géostationnaire. Les données acquises par les satellites géostationnaires pourraient être très précieuses en raison de leur couverture géographique étendue et des fréquences d'acquisition temporelle de 30 minutes sur l'Europe. Le sondeur infrarouge (IRS) à bord de la série Meteosat Troisième Génération (MTG) acquerra des données dans deux bandes spectrales (679-1210 et 1600-2250 cm^{-1}) sensibles à de nombreuses espèces, parmi lesquelles l'ozone et le monoxyde de carbone. Ces

caractéristiques sont essentielles pour déduire des informations sur la pollution atmosphérique. Des études de sensibilité ont déjà été réalisées pour tester la réponse de l'instrument lui-même. Des expériences de simulation de systèmes d'observation (OSSE) sont en cours afin de produire des observations réalistes simulées qui seront assimilées dans MOCAGE. Cette étape sera essentielle pour déduire l'impact de ces observations dans un modèle de transport de la chimie.

2

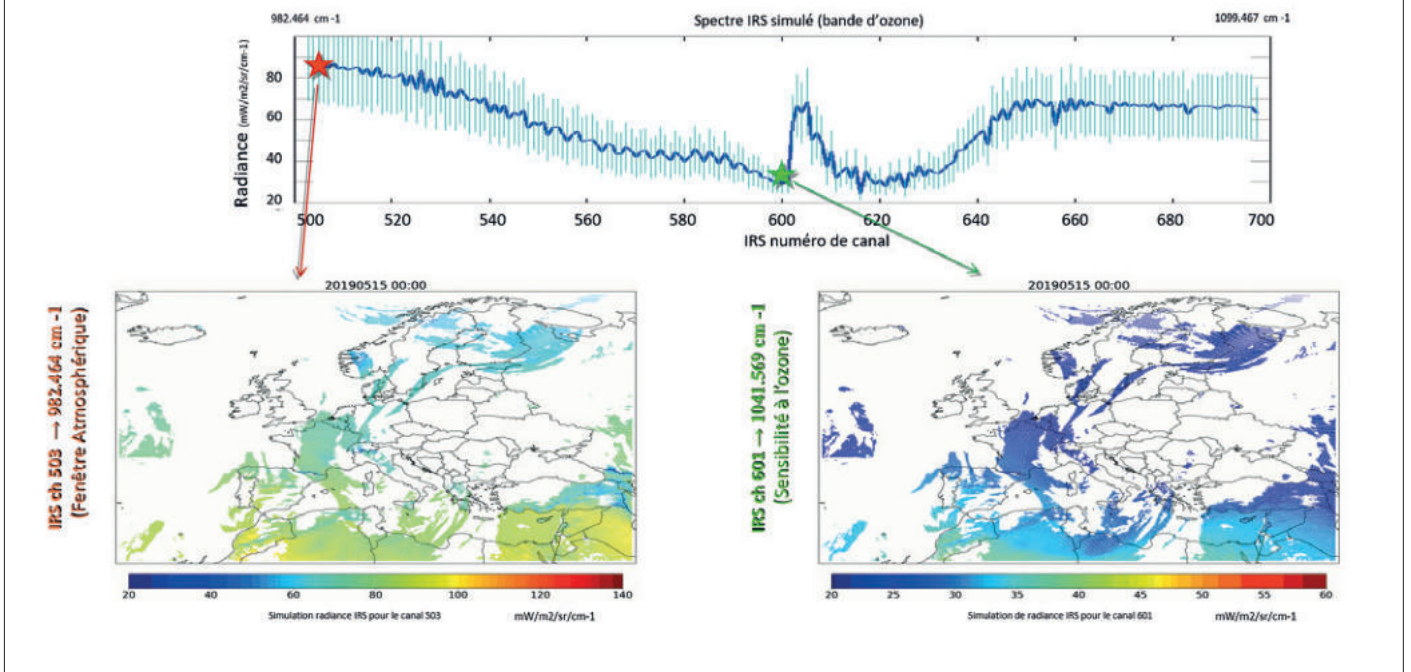
1



Localisation des 500 canaux sélectionnés sur un spectre typique de IASI-NG : 300 dans la bande du CO_2 (en cyan) et 200 dans la bande de vapeur d'eau (en orange)

2

MESURES SYNTHÉTIQUES D'IRS



Données synthétiques du capteur IRS simulées pour évaluer leur impact dans MOCAGE.

IASI-NG et FORUM, de nouveaux sondeurs infrarouges pour l'amélioration des prévisions météorologiques et de la modélisation du climat

Q. Libois, J. Vidot, L. Leonarski

La Terre émet du rayonnement infrarouge vers l'espace dans la gamme spectrale 100-2500 cm^{-1} . Si la quantité totale de rayonnement émis est fondamentale pour le système climatique, la distribution spectrale de ce rayonnement contient une information considérable sur l'état de l'atmosphère. Opérationnel depuis 2006, l'instrument satellitaire IASI mesure le spectre d'émission de la Terre à une résolution de 0.5 cm^{-1} dans la gamme 645-2760 cm^{-1} , qui correspond à l'infrarouge thermique. IASI a révolutionné la prévision météorologique par sa sensibilité sans précédent aux profils verticaux d'humidité et de température. Le successeur de IASI, IASI-NG (Crevoisier et al., 2014), sera lancé en 2025. Il couvrira la même gamme spectrale que IASI mais avec une résolution deux fois plus fine et un bruit instrumental deux fois plus faible. Depuis quelques années, du fait de la longue série temporelle disponible, les observations IASI

sont utilisées pour des études climatiques. Cependant l'infrarouge thermique ne contient que la moitié de la quantité de rayonnement infrarouge émis par la Terre, l'autre moitié provenant de l'infrarouge lointain (667-100 cm^{-1}). L'objectif de la mission FORUM (Libois et al., 2020), sélectionnée par l'Agence Spatiale Européenne pour être le 9^e Earth Explorer, est de mesurer cette partie du spectre. FORUM sera lancé en 2027 et couvrira la gamme 100-1600 cm^{-1} à une résolution de 0.5 cm^{-1} . Il volera en formation « une minute derrière » IASI-NG, et la combinaison des deux instruments fournira pour la première fois des mesures du spectre d'émission complet de la Terre (99 % du rayonnement émis sera mesuré). Ces nouvelles mesures permettront d'améliorer les prévisions météorologiques et de qualité de l'air, mais fourniront également des contraintes très fortes pour l'évaluation et l'amélioration des modèles de climat.

Références :

Crevoisier, C., Clerbaux, C., Guidard, V., Phulpin, T., Armante, R., Barret, B., ... & Stubenrauch, C. (2014). Towards IASI-New Generation (IASI-NG): impact of improved spectral resolution and radiometric noise on the retrieval of thermodynamic, chemistry and climate variables. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(12), 4367-4385, <https://doi.org/10.5194/amt-7-4367-2014>

Libois, Q., Labonnote L. C., & Camy-Peyret, C. (2020). Forum mesurera l'infrarouge lointain émis par la Terre. *La Météorologie*, (108), 4-6, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03187068>

3

Extension de RTTOV aux instruments hyperspectraux UV/VIS/PIR pour la chimie atmosphérique : l'exemple GOME-2

J. Vidot

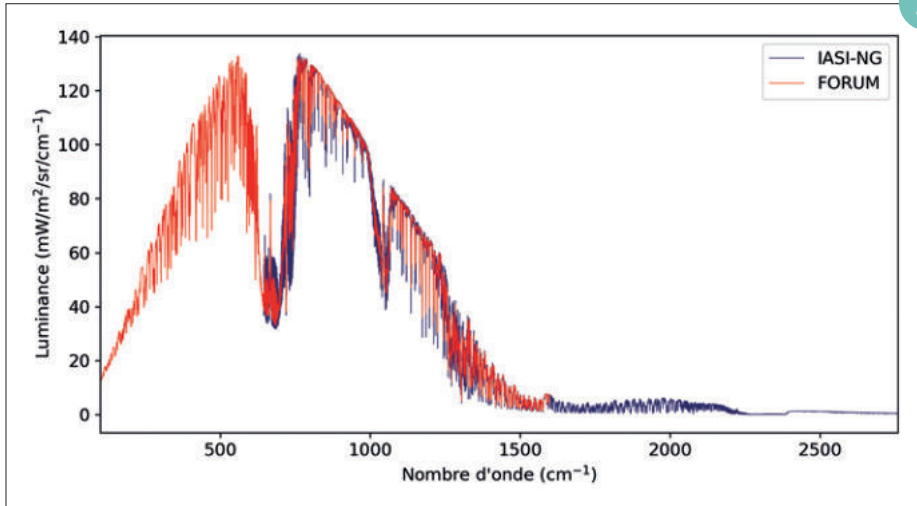
L'assimilation opérationnelle des luminances mesurées par les satellites dans les domaines spectraux de l'infrarouge et des micro-ondes dans les modèles de PNT est réalisée depuis une trentaine d'années à l'aide du modèle de transfert radiatif rapide RTTOV. Plus récemment la possibilité de simuler des luminances mesurées dans les domaines solaire, infrarouge lointain et même sub-millimétrique a été rendu possible en étendant la gamme spectrale des différents compartiments du modèle (paramétrisation de la transmittance atmosphérique, diffusion par les aérosols et/ou nuages, propriétés optiques des surfaces, etc...). Dans la même continuité et afin de couvrir tout le spectre électromagnétique lié aux applications météorologiques, le modèle RTTOV a été étendu au domaine de l'ultraviolet.

Ainsi nous avons pu pour la première fois simuler des observations en ciel clair pour l'instrument GOME-2 à bord de Metop-C qui couvre la gamme 240-790 nm à des résolutions spectrales comprises entre 0.2 et 0.5 nm. La figure représente le spectre de réflectance simulé par RTTOV-13. Ce spectre reflète fidèlement les bandes d'absorption des principales molécules absorbantes dans ces gammes : de l'ozone très absorbant sous 300 nm à l'oxygène vers 760 nm.

La prochaine étape de ce travail sera de tester la diffusion par les aérosols et d'introduire un modèle de réflectance des surfaces terrestres pour l'UV. Il est enfin prévu un exercice d'intercomparaison avec le modèle de transfert radiatif DAK du KNMI. L'objectif final sera de simuler des observations des futures générations de satellites (Sentinel 4 et 5) afin à terme d'entrevoir l'assimilation de leurs observations dans les modèles météorologiques.

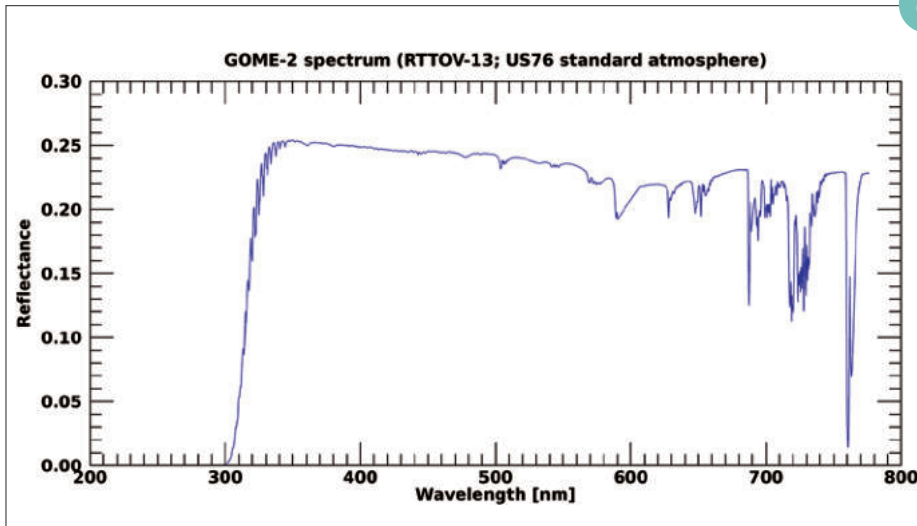
4

3



◀ Spectres de luminance nadir IASI-NG et FORUM simulés avec le *modèle de transfert radiatif* RTTOV pour une atmosphère tropicale au-dessus de l'océan.

4



◀ Spectre de réflectance simulé par RTTOV-13 pour l'instrument GOME-2 en ciel clair au-dessus des océans pour une atmosphère standard US76.

L'assimilation des futures observations IRS, une nouvelle étape dans l'amélioration des prévisions météorologiques pour le modèle régional AROME

O. Coopmann, N. Fourrié

Une prochaine grande étape dans l'amélioration des performances des systèmes de Prédiction Numérique du Temps et particulièrement les modèles à fine échelle tels que AROME, sera franchie grâce à l'arrivée des nouvelles générations de sondeurs satellitaires météorologiques. L'un d'eux sera à bord du futur satellite géostationnaire Européen, Meteosat Troisième Génération (MTG) dont le lancement est prévu en 2024. Il s'agit du sondeur infrarouge IRS qui permettra de fournir une vision 4D unique de l'atmosphère. Il mesurera le disque terrestre avec une très haute fréquence spatiale de 4 km au-dessus de l'Afrique et temporelle de 30 minutes sur l'Europe. Il sera capable d'observer cette région du système terrestre à l'aide de longueur d'onde sensibles à la température et l'humidité atmosphérique, aux nuages, aux surfaces, à la composition chimique et bien d'autres paramètres. La Figure (a) illustre ces sensibilités à partir d'une évaluation précise des observations IRS, pour la température, la vapeur d'eau, la température de surface et l'ozone sur le graphique de gauche et au CO₂, CH₄, CO, N₂O et SO₂ sur le graphique de droite (Coopmann et al, 2022).

Référence :

O. Coopmann, N. Fourrié and V. Guidard (2022) : Analysis of MTG-IRS observations and general channel selection for Numerical Weather Prediction models. In revision in Q.J.R.M.S.

5

Mission AOS : vers une amélioration des produits lidars d'aérosols depuis l'espace

F. Cornu, L. El Amraoui

Le programme AOS (Atmosphere Observing System) est un projet collaboratif entre plusieurs agences spatiales (NASA, CNES, JAXA, CSA, DLR) qui consiste à concevoir un lidar (CLIO) à bord d'une plateforme spatiale. Le projet AOS cherche à mieux comprendre les processus de transformation des particules d'aérosols et leurs conséquences sur la qualité de l'air, le climat et l'environnement. Nos connaissances sur les aérosols, leur distribution, leur spéciation, leurs interactions avec les nuages et les précipitations ainsi que de leur contribution aux phénomènes de qualité de l'air seront améliorées. La principale innovation du lidar CLIO d'AOS est la présence d'un filtre HSRL (High Spectral Resolution Lidar) sur la voie visible (532 nm) permettant de séparer le signal issu des molécules gazeuses du signal issu des particules d'aérosols.

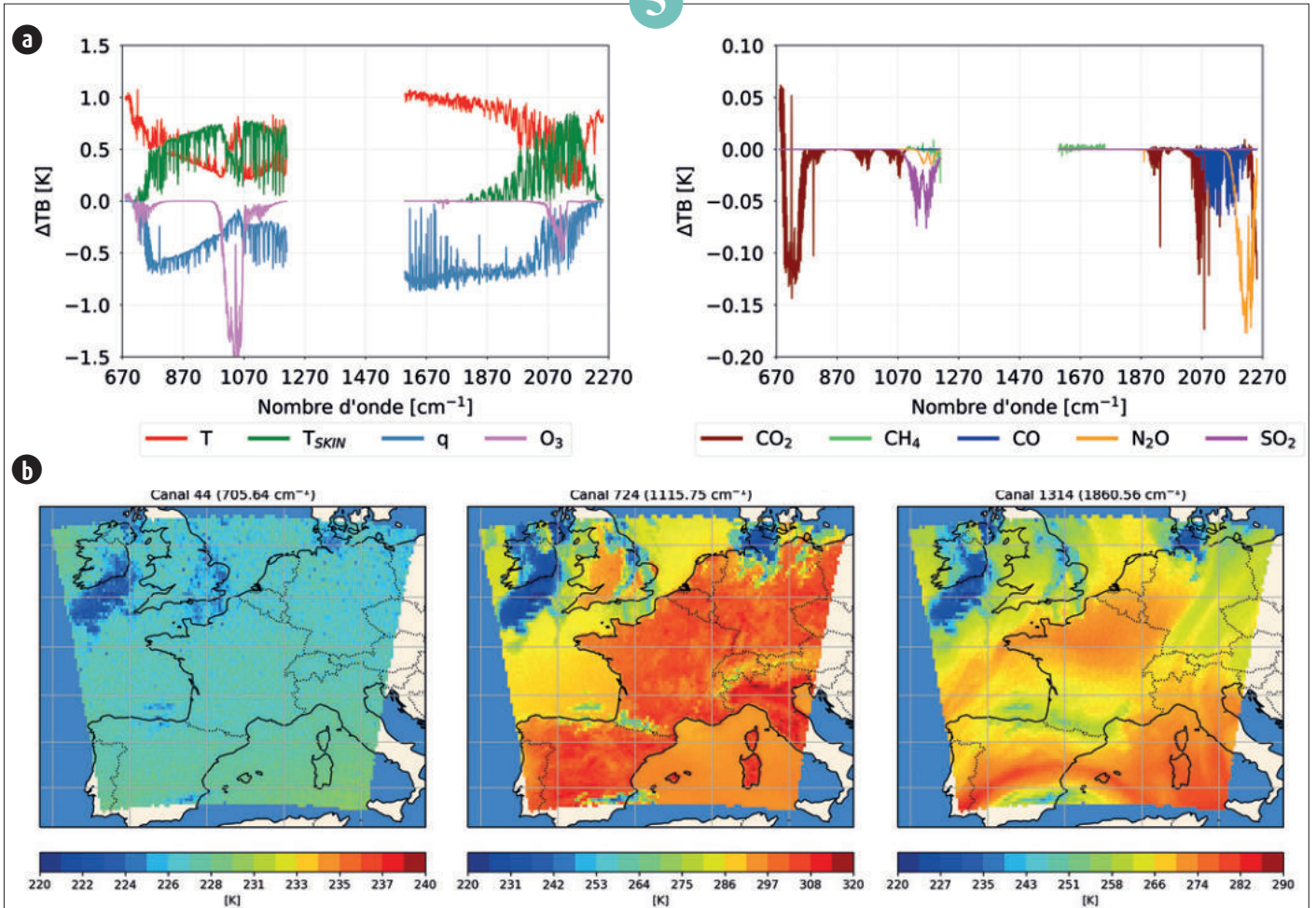
Nos travaux consistent à évaluer la capacité du lidar CLIO à détecter et caractériser les différents types d'aérosols en s'appuyant sur un éventail d'expériences de simulation du système d'observation (OSSE) avec le modèle MOCAGE.

Le principe d'OSSE consiste à définir un «nature run» (NR) considéré comme la réalité à partir duquel des observations synthétiques (OS) du lidar sont extraites. Ces OS sont ensuite assimilées dans un modèle de « control» (CR). Ceci permet de quantifier la capacité de ces OS à contraindre l'analyse du modèle. La Figure(a) illustre un NR représentant un passage de poussière désertique à travers lequel des OS sont échantillonnées. La Figure(b) présente les OS du lidar en termes de coefficient de rétrodiffusion. La Figure (c) montre le CR dans lequel les OS sont assimilées, et la figure (e) montre le run d'assimilation (AR). La figure (f) montre l'écart 'AR-NR' qui est globalement plus faible que l'écart 'CR-NR' (Figure d) montrant ainsi un impact positif des mesures lidar sur le modèle.

6

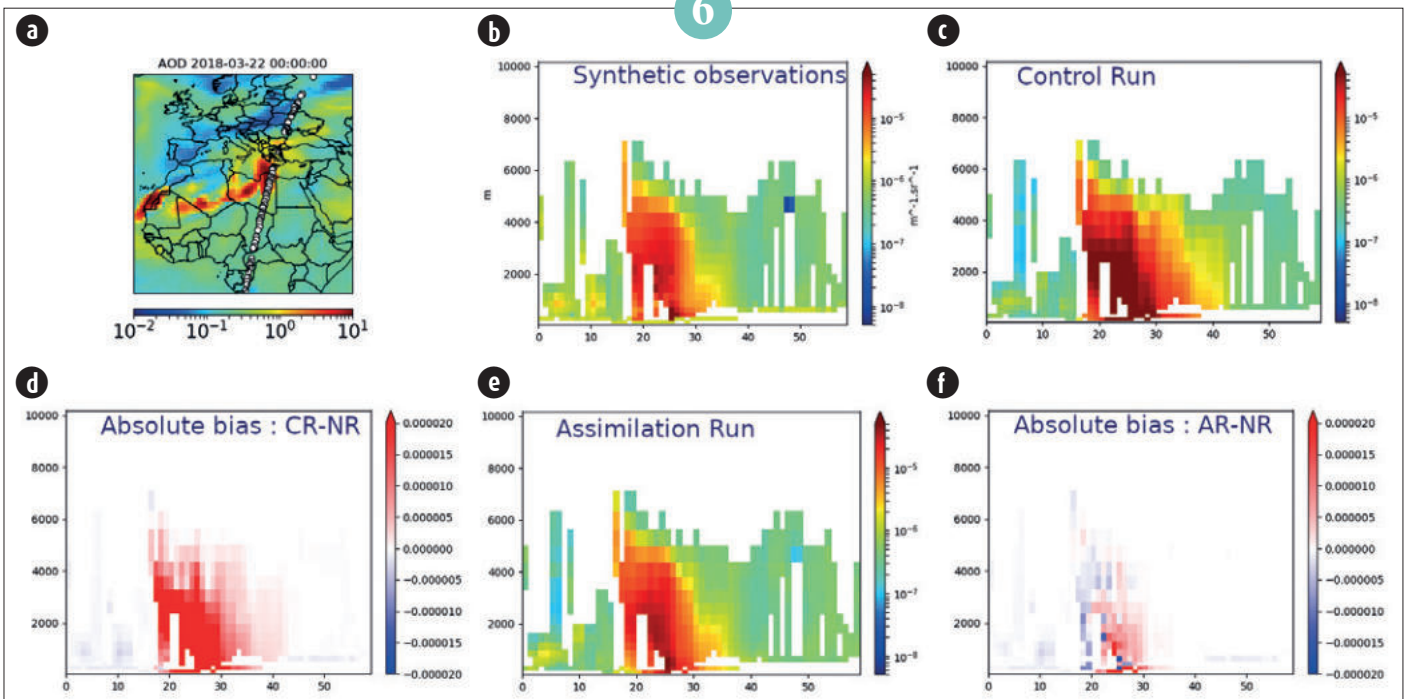
- (a) Illustration d'un nature run (NR) représentant un événement de transport de poussière désertique en termes d'épaisseur optique avec échantillonnage des observations du lidar CLIO.
(b) Présente les observations synthétiques (OS) telles qu'elles sont mesurées par le lidar CLIO tenant compte de ces caractéristiques instrumentales.
(c) Montre le control run (CR) dans lequel les OS sont assimilées.
(d) Montre la différence 'CR-NR'.
(e) Présente le champ assimilé (AR) issu de l'intégration des OS dans le CR.
(f) Montre l'écart 'AR-NR'. Ce dernier est globalement plus faible que l'écart 'CR-NR' ce qui montre un effet positif des OS sur le modèle MOCAGE à mieux le contraindre.

5



(a) Moyenne des différences spectrales des températures de brillance issues des observations IRS pour l'étude de la sensibilité en température (T), vapeur d'eau (q), température de surface (T_{skin}) et ozone (O_3) à gauche et en dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4), monoxyde de carbone (CO), protoxyde d'azote (N_2O) et dioxyde de soufre (SO_2).
 (b) Carte des observations IRS sur le domaine AROME pour le canal 44 (sensible à la température) à gauche, 724 (sensible à la surface) au milieu et 1314 (sensible à la vapeur d'eau) à droite le 20 juillet 2020 à 09 UTC.

6



Vers une caractérisation avancée des aérosols atmosphériques et des surfaces continentales avec la future caméra FCI à bord de MTG-I

X. Ceamanos, A. Georgeot

Les satellites météorologiques à orbite géostationnaire sont un outil majeur dans l'observation de la Terre. Leur principal avantage est leur position constante au-dessus du même point de la surface, qui permet l'acquisition d'un grand nombre d'images par jour et donc une observation de la planète à une échelle temporelle fine. EUMETSAT a prévu de lancer fin 2022 le premier satellite « Meteosat Troisième Génération-Imageur » (MTG-I). Cette nouvelle mission géostationnaire remplacera la mission actuelle « Meteosat Seconde Génération » (MSG), qui est en orbite depuis 2002. MTG-I sera équipé de la caméra « Flexible Combined Imager » (FCI), qui acquerra des images du disque de la Terre à 0° de longitude à une résolution maximale de 1 km (3 fois meilleure que celle de la caméra SEVIRI, pour « Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager », à bord de MSG), dans 16 canaux spectraux (5 de plus par rapport à SEVIRI, voir figure) et toutes les 10 minutes (au lieu de 15 pour SEVIRI).

FCI permettra de réaliser des observations de la Terre sans précédent. Par exemple, la télédétection des aérosols atmosphériques sera améliorée grâce à l'ajout d'un canal spectral mesurant la lumière bleue à 0,44 microns. Ces informations permettront la détection de particules au-dessus des surfaces brillantes comme les déserts pour lesquelles SEVIRI montre des limitations (Ceamanos et al 2019). Cette caractérisation des aérosols permettra d'obtenir des mesures des surfaces continentales de grande qualité suite à une meilleure « décontamination » des effets atmosphériques. Aussi, le plus grand nombre de canaux spectraux de FCI contribuera à estimer de manière plus précise les variables radiatives « large-bande » (définies sur un domaine spectral large) utilisées couramment pour représenter les surfaces continentales dans les modèles météorologiques.

Le CNRM réalisera ces travaux en collaboration avec EUMETSAT dans le cadre du projet LSA-SAF et d'autres à venir.

Référence :

Ceamanos, X.; Moparthy, S.; Carrer, D.; Seidel, F.C. Assessing the Potential of Geostationary Satellites for Aerosol Remote Sensing Based on Critical Surface Albedo. *Remote Sens.* 2019, 11, 2958. <https://doi.org/10.3390/rs11242958>

Le projet de satellite de surveillance des sources de protoxyde d'azote (MIN₂OS)

P. Ricaud

Le protoxyde d'azote (N₂O) est le troisième plus important gaz à effet de serre. Les émissions mondiales de N₂O ont augmenté de 0,25-0,30% par an entre 2007 et 2016 et la majorité des scénarios socio-économiques prévoient leur augmentation jusqu'en 2100. Sur le total mondial des émissions (environ 17 TgN par an), environ 57 % sont naturelles et 43 % sont anthropiques, dominées par l'agriculture (52 %). Mais l'estimation des émissions de N₂O souffre de grandes incertitudes.

Le projet de satellite de surveillance des sources de protoxyde d'azote (MIN₂OS, Ricaud et al 2021) (Figure) vise à surveiller les sources de protoxyde d'azote (N₂O) à l'échelle mondiale en restituant les flux de surface de N₂O à partir de l'inversion des mesures spatiales de N₂O qui sont sensibles aux couches atmosphériques les plus basses dans des conditions favorables. Une approche originale développée au CNRM est basée sur le développement : 1) d'un instrument spatial fonctionnant dans le domaine de l'infrarouge thermique fournissant, dans des conditions de ciel clair, le rapport de mélange de N₂O

dans la plus basse atmosphère (900 hPa) et 2) d'un système d'inversion atmosphérique pour estimer les flux de surface de N₂O à partir des observations atmosphériques par satellite. Pour la mettre en œuvre, un nouvel instrument infrarouge thermique doit être développé, centré sur la bande spectrale 1250-1330 cm⁻¹, avec une résolution de 0,125 cm⁻¹, une largeur totale à mi-hauteur de 0,25 cm⁻¹ et une fauchée de 300 km. Le bruit spectral peut être réduit d'au moins un facteur 5 par rapport au bruit le plus faible accessible à ce jour avec la mission IASI-NG (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer-New Generation). L'erreur totale de N₂O devrait ainsi être inférieure à 1% (environ 3 ppbv) sur la verticale.

Le projet MIN₂OS est le fruit d'une collaboration entre des laboratoires français et internationaux et des partenaires industriels. Il a été soumis à l'appel à idées Earth Explorer 11 de l'Agence Spatiale Européenne en décembre 2020 mais n'a pas été sélectionné. Des réflexions sont en cours pour identifier d'autres opportunités de mettre en œuvre ce projet.

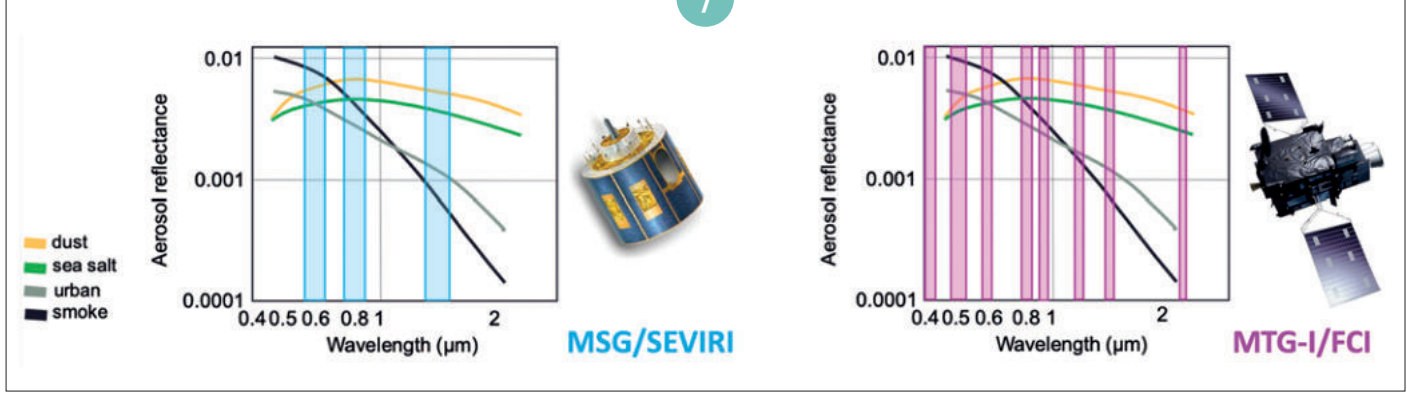
Référence :

Ricaud, P., J.-L. Attié, R. Chalinel, F. Pasternak, J. Léonard, I. Pison, E. Pattey, R. L. Thompson, Z. Zelinger, J. Lelieveld, J. Sciare, N. Saitoh, J. Warner, A. Fortems-Cheiney, H. Reynal, J. Vidot, L. Brooker, L. Berdeu, O. Saint-Pé, P. K. Patra, M. Dostál, J. Suchánek, V. Nevrlý, C. Groot Zwaafink, The Monitoring Nitrous Oxide Sources (MIN2OS) satellite project, *Remote Sensing of Environment*, Volume 266, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112688>

8

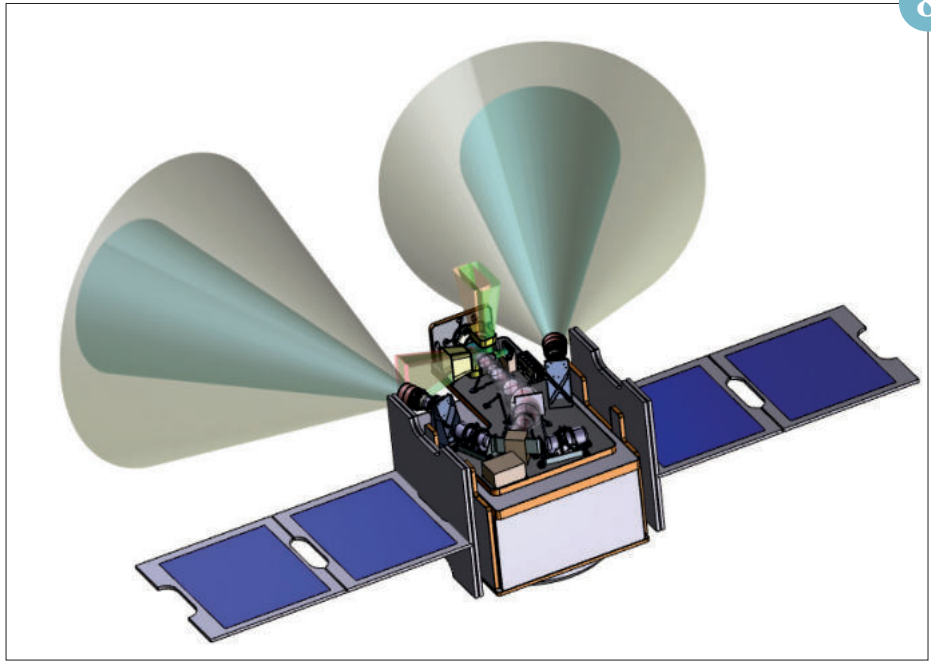
7

7



▲ Comparaison des canaux spectraux mesurant la lumière réfléchie par la Terre dans les domaines du visible et du proche infrarouge pour SEVIRI (gauche) et FCI (droite). Le plus grand nombre de canaux de FCI contribuera à une meilleure distinction des différents types d'aérosols.

8



▲ Le projet MIN₂OS : Instruments implantés sur la plateforme spatiale.

Florilège de résultats illustrant les avancées de recherche en 2021

Prévision numérique du temps et assimilation de données

Au-delà des évolutions majeures de la chaîne de prévision numérique du temps (PNT), des activités de recherche ont été menées pour préparer les évolutions à plus long terme de ces systèmes. L'assimilation dans ARPEGE des données des ballons de la campagne expérimentale Stratéole-2 illustre l'apport de ce type de données en zone tropicale. Un schéma d'assimilation, dit « 3DEnVar », combinant l'approche variationnelle et l'approche ensembliste, est développé dans AROME pour représenter de manière plus précise les covariances d'erreur de prévision en temps réel et prendre en compte la dimension temporelle dans la version « 4DEnVar ». Les résultats de différentes approches pour représenter les incertitudes de modélisation dans la prévision d'ensemble AROME sont aussi présentés. Enfin, plusieurs travaux mettent en évidence comment les résultats des modèles de prévision météorologique, et en particulier les prévisions d'ensemble, peuvent être traités de façon automatique pour optimiser leur utilité dans différents domaines : les prévisions du potentiel de production d'énergie éolienne et solaire, la prévision du risque de grêle, la modélisation des états de la mer et la prévision cyclonique à l'échelle mensuelle pour la mobilisation des secours dans l'Océan Indien.

F. Bouyssel

Stratéole-2 : ARPÈGE assimile les données de ballons longue-durée dérivant dans la basse stratosphère tropicale

A. Doerenbecher, V. Pourret

Le projet scientifique [Stratéole-2](#) vise à progresser sur la compréhension des processus physiques dans la basse stratosphère tropicale et leur influence sur le climat. Ce projet s'appuie sur deux campagnes de mesures longues impliquant des dispositifs instrumentaux placés entre 18 et 20 km d'altitude, sous des ballons stratosphériques du CNES. Ces ballons ont la capacité de dériver plusieurs mois à niveau de densité constant. Ils ont la capacité de réaliser plusieurs tours du globe.

La première campagne longue a débuté en octobre 2021. 17 ballons ont été lâchés depuis les Seychelles sur une période de deux mois. Météo-France a exceptionnellement dépêché deux prévisionnistes sur place pour aider à la planification de ces lâchers. Le CNRM/GMAP reçoit des données en temps quasi-réel via le LMD qui opère un système d'observation de haute précision (TSEN) sur

chaque ballon. Ces données à fréquence de 10 minutes sont insérées dans les bases de données de Météo-France. ARPÈGE, le système d'assimilation/prévision mondial de Météo-France est capable d'utiliser ces données. Après trois semaines de monitoring pour vérifier leur qualité, les données TSEN ont fait leur entrée dans le système ARPÈGE opérationnel ainsi que le système « en double » qui préfigure le futur système qui deviendra opérationnel en 2022.

Un mois et demi après le début de campagne, 11 ballons étaient toujours en vol et 2 ballons après 3 mois. Le dernier ballon a volé jusqu'au 25 janvier 2022. Le monitoring indique que les données sont de bonne qualité. La quantification de l'impact de ces données sur la qualité des prévisions fera l'objet d'une étude en 2022.

Des développements spécifiques sont en cours pour tirer le meilleur parti de ces

données ballon. Après validation sur cette campagne, ils pourront être utilisés durant la seconde campagne Stratéole-2 prévue en 2024.

Ce travail permet ainsi d'améliorer temporairement la qualité des analyses et prévisions ARPEGE pendant les campagnes, mais aussi et surtout de mieux comprendre le comportement du modèle dans des compartiments peu observés de l'atmosphère et d'améliorer les techniques d'assimilation de données pour mieux tirer parti d'opportunités futures d'observation par ballons ou autres vecteurs innovants.

1

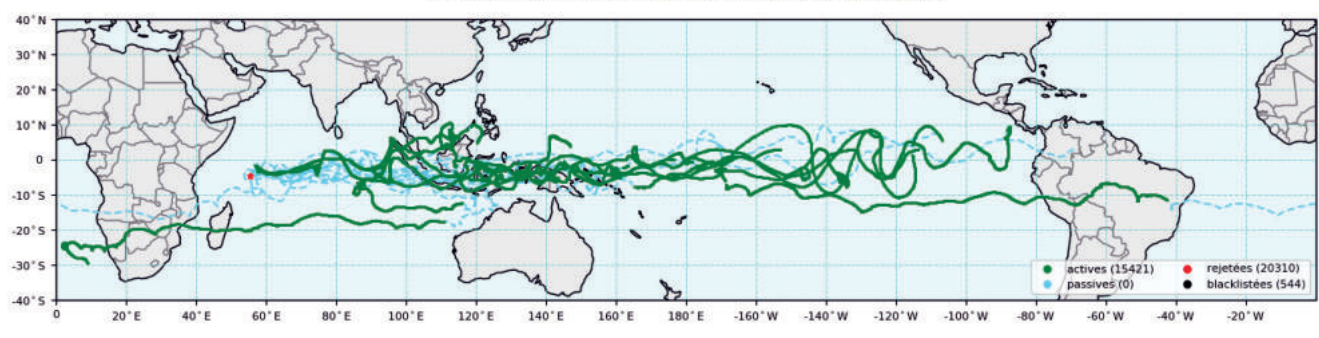
(a) Préparation d'un ballon de 13 m de diamètre avant son lâcher de nuit. Au sol, la poche de gaz se réfugie au sommet de l'enveloppe dont la partie inférieure est allongée sur une table. Une fois au plafond le gaz emplit toute l'enveloppe qui est sphérique et en surpression par rapport à l'atmosphère extérieure. Les charges utiles sont visibles à droite. Crédits : Albert Hertzog (IPSL/LMD)



1

b

Localisation des données de vent zonal (U) (active) Stratéole-2 dans ARPEGE oper.
Données assimilées sur la période: 2021/11/22 @ 00Z à 2021/12/14 @ 18Z
Tirés: trajectoires des ballons depuis le 2021/10/20.



(b) Les pointillés montrent les trajectoires des ballons Stratéole-2 lâchés depuis les Seychelles (étoile rouge). Les points verts indiquent les données assimilées.

Premiers résultats d'expérimentations longues d'un schéma 3DEnVar pour Arome-France

V. Vogt, P. Brousseau

Depuis sa mise en opérationnel en 2008, le système d'assimilation 3DVar d'AROME-France utilise des statistiques d'erreur d'ébauche, éléments clés d'un système d'assimilation, qui sont représentées par modélisation statistique, en effectuant de nombreuses hypothèses, d'homogénéité spatiale et temporelle par exemple. Une autre représentation de ces statistiques, dépendante cette fois de la situation météorologique, peut être obtenue par un schéma combinant les approches variationnelle et ensembliste, dit 3DEnVar, en utilisant les perturbations issues d'un ensemble d'assimilations. Des travaux préparatoires récents ont permis de concevoir un tel schéma et de prouver son

intérêt potentiel (Montmerle et al, 2018, Michel et Brousseau, 2021). En parallèle, des développements logiciels à Météo-France l'ont rendu disponible dans le nouveau cadre OOPS (Object Oriented Prediction System). Le 3DEnVar AROME sous OOPS est actuellement évalué dans une expérimentation longue en vue d'une mise en œuvre opérationnelle.

Une trentaine d'expériences, basées sur une configuration pré-opérationnelle, ont été lancées sur une période de 3 mois couvrant l'automne et l'hiver 2020, afin de régler un grand nombre de paramètres, comme le nombre de membres de l'ensemble, la localisation ou l'hybridation des covariances d'erreur d'ébauche qui permettent de filtrer le bruit d'échantillonnage.

Les premiers résultats montrent un avantage significatif du schéma 3DEnVar sur le schéma 3DVar. L'écart quadratique moyen des prévisions à 12 h d'échéance par rapport aux radiosondages est ainsi amélioré de 13 % pour la température, et de 10 % pour le vent et l'humidité à 850hPa. L'indicateur IP16, qui mesure les performances du modèle AROME pour la prévision des précipitations et des rafales sur 6 heures est amélioré de 3 %, à comparer à la cible d'une augmentation de 0,5 % par an. Ce travail se poursuit actuellement par une validation sur des situations météorologiques à enjeu en vue d'une évolution prochaine de nos systèmes opérationnels.

Références :

Michel, Y., and Brousseau, P. (2021). A Square-Root, Dual-Resolution 3DEnVar for the Arome Model: Formulation and Evaluation on a Summertime Convective Period. *Monthly Weather Review*, 149(9), 3135-3153.

Montmerle, T., Michel, Y., Arbogast, E., Ménétrier, B., & Brousseau, P. (2018). A 3D ensemble variational data assimilation scheme for the limited area Arome model: Formulation and preliminary results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144(716), 2196-2215.

2

Représentation de l'erreur de modélisation dans la prévision d'ensemble AROME par perturbation de paramètres

M. Wimmer, L. Raynaud, L. Descamps

Une prévision d'ensemble est construite de manière à représenter les différentes sources d'incertitudes inhérentes à la prévision numérique du temps, en particulier celles dues à l'imperfection des modèles de prévision. Une des sources d'incertitude importante réside dans les paramétrisations physiques, qui représentent l'effet de certains processus physiques (turbulence, convection peu profonde, rayonnement, etc) sur les variables d'état résolues par le modèle. La prévision d'ensemble AROME (PEARO), opérationnelle à Météo-France, représente cette source d'incertitude en perturbant aléatoirement les tendances des variables d'état du modèle issues des paramétrisations physiques. Cette méthode présentant plusieurs limites, une approche

alternative plus physique s'appuyant sur la perturbation de paramètres intervenant dans la représentation des phénomènes physiques, a été développée et testée (Wimmer et al, 2021).

Sur la base de la connaissance experte des processus physiques dont la représentation physique est la plus incertaine dans le modèle AROME, 21 paramètres ont été sélectionnés. Des analyses de sensibilité ont permis d'identifier 8 paramètres ayant le plus fort impact sur les prévisions AROME, et donc les plus susceptibles de contribuer à l'erreur de modélisation. Ces paramètres influent sur les paramétrisations de la turbulence, la microphysique, la convection peu profonde, l'état de la surface, le rayonnement et la diffusion numérique.

Différentes techniques de perturbations des paramètres ont ensuite été mises en place et évaluées. Comparées à l'approche actuellement utilisée dans la PEARO, celles-ci améliorent les prévisions pour la plupart des variables de temps sensible, en particulier le vent et les précipitations (voir Figure).

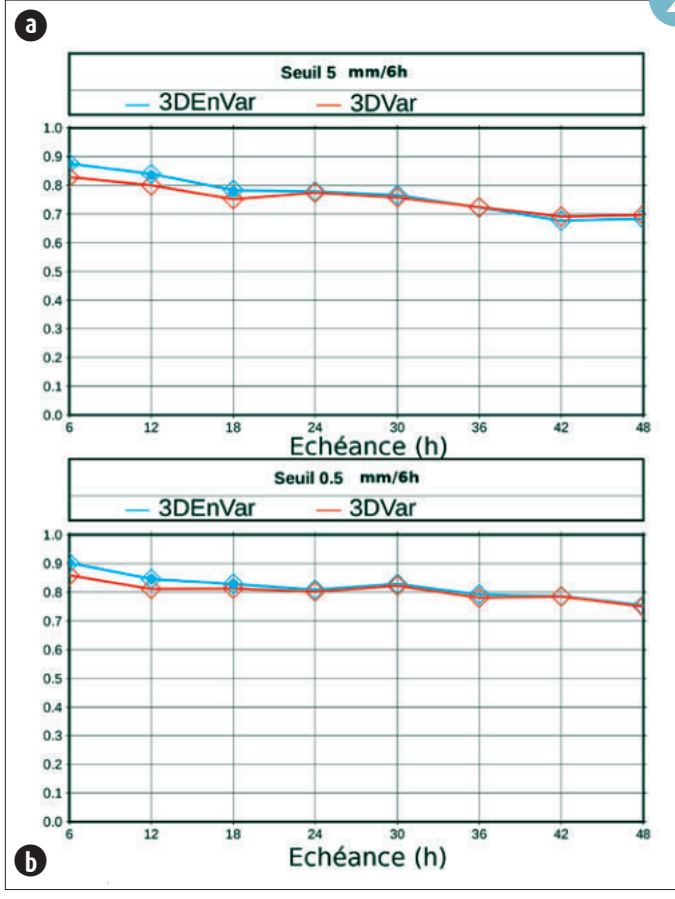
Cette méthode reste à évaluer dans la future version de PEARO à plus haute résolution horizontale (1.3km au lieu de 2.5km actuellement). Une prochaine étape consistera également à appliquer des perturbations spatio-temporelles aux paramètres.

Référence :

Wimmer, M., L. Raynaud, L. Descamps, L. Berre and Y. Seity, 2021 : Sensitivity analysis of the convective-scale AROME model to physical and dynamical parameters, *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, vol. 148, pp 920-942, doi :10.1002/qj.4239

3

2

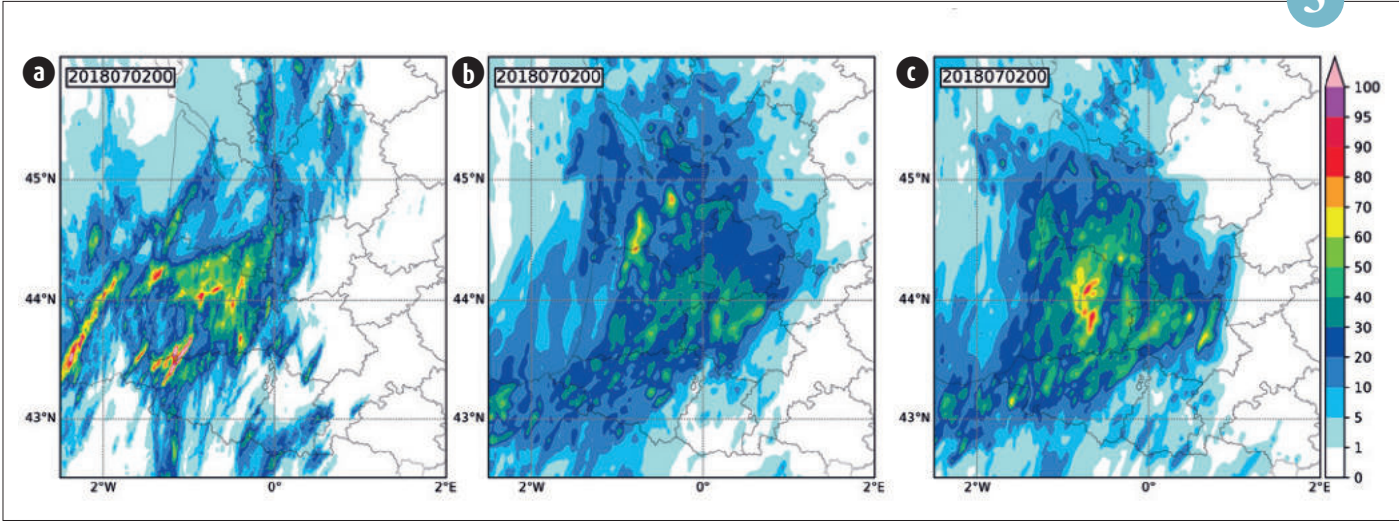


Evolution du score de Brier régional normalisé calculé sur un voisinage de 52,8 km pour les seuils de précipitation de 5 mm/6h (a) et 0,5mm/6h (b) en fonction de l'échéance de prévision du modèle (abscisse) au réseau de 0 h.

La courbe rouge (resp. bleue) représente la configuration 3DVar (resp. 3DEnVar).

Des valeurs supérieures indiquent de meilleures performances, et la significativité statistique des différences de performance entre les deux versions testées est indiquée par le point à l'intérieur des losanges représentant chaque seuil et échéance.

3



Précipitations cumulées en 24 h valides le 2 juillet 2018 à 00 h TU :

(a) lame d'eau Antilope ;

(b) Quantile maximal de la PEARO avec représentation actuelle de l'erreur de modélisation ;

(c) Quantile maximal de la PEARO avec nouvelle représentation de l'erreur de modélisation basée sur la perturbation de paramètres.

Représentation des erreurs de prévision turbulentes et convectives dans le modèle AROME

A. Fleury et F. Bouttier

Quantifier les incertitudes de prévision météorologique nécessite de représenter les erreurs des modèles numériques utilisés en prévision d'ensemble. Cette représentation est actuellement approximative parce que ces erreurs sont mal connues : les prévisions d'ensemble les caractérisent actuellement par des techniques empiriques de perturbation des équations ou de paramètres du modèle ; le réglage statistique de ces perturbations est toutefois complexe et coûteux.

Une nouvelle approche a été explorée avec le modèle atmosphérique AROME (Fleury et al, 2022). Elle consiste à introduire, dans ses équations d'évolution, des fluctuations aléatoires cohérentes avec les hypothèses physiques d'écriture du

modèle. Par exemple, un bruit numérique correspondant à l'effet des tourbillons plus petits que la maille de calcul d'AROME a été introduit dans le modèle. Il produit une dispersion significative de certains paramètres des prévisions d'ensemble lorsque l'atmosphère est turbulente. Autre exemple : la représentation de la convection dans AROME fait l'hypothèse qu'il n'existe qu'un seul type de nuage dans chaque colonne du modèle : pour modéliser la possibilité de développements nuageux variés, une perturbation du schéma de convection peu profonde a été introduite. Elle a été réglée avec une approche innovante utilisant comme référence des simulations atmosphériques à très haute résolution (LES : *large eddy simulation*). L'effet de

ces deux méthodes de perturbation sur les prévisions a été comparé à des techniques plus classiques de perturbation ensembliste dans des cas de cumulus, de brouillard, etc. La conclusion est que ces incertitudes d'origine physique ont un effet non négligeable sur les prévisions dans certaines situations météorologiques. Les représenter avec une telle approche est un progrès pour le développement de prévisions d'ensemble, car cela permet de les produire de façon plus objective et automatique à partir des équations physiques du modèle.

Des tests dans des configurations proches de l'environnement opérationnel sont en cours, et une extension de cette approche aux phénomènes de condensation, de précipitation et de rayonnement est à l'étude.

Référence :

Fleury, A., F. Bouttier, F. Couvreur, 2022: Process-oriented stochastic perturbations applied to the parametrization of turbulence and shallow convection for ensemble prediction. *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, <https://doi.org/10.1002/qj.4242>

4

Projet SMART4RES : Valorisation des prévisions d'ensemble pour la prévision d'énergie renouvelable

B. Alonzo, I. Aleksovska

Le projet Européen Smart4RES a pour objectif d'améliorer la prévision de production à court terme d'énergie renouvelable solaire et éolienne dans le but de faciliter leur intégration dans les systèmes électriques. Dans ce cadre, 4 mois de prévisions d'ensemble Arome (PEARO) et Arpège (PEARP) à très haute résolution ont été produits, constitués respectivement de 25 prévisions Arome à 1.3km de résolution et des sorties disponibles toutes les 5 minutes, et de 35 prévisions Arpège à 5 km de résolution sur la France avec des sorties toutes les 4 minutes. Ces très hautes résolutions spatiales et temporelles ont pour objectif de permettre de répondre aux besoins des partenaires énergéticiens dans ce projet.

En complément des sorties directes des ensembles, plusieurs méthodes de post-traitement innovantes ont été développées. La première consiste en une synthèse déterministe de PEARO. Plusieurs méthodes ont été évaluées pour les prévisions de vent à 100 mètres, en l'utilisation d'un quantile optimisé, d'une moyenne pondérée et l'identification d'un scénario majoritaire. Les résultats indiquent un net avantage pour le quantile optimisé, qui permet un gain de performance de l'ordre de 15 % par rapport à la prévision AROME déterministe, et de 10 % par rapport à la moyenne d'ensemble sur l'hiver 2020 (Figure a).

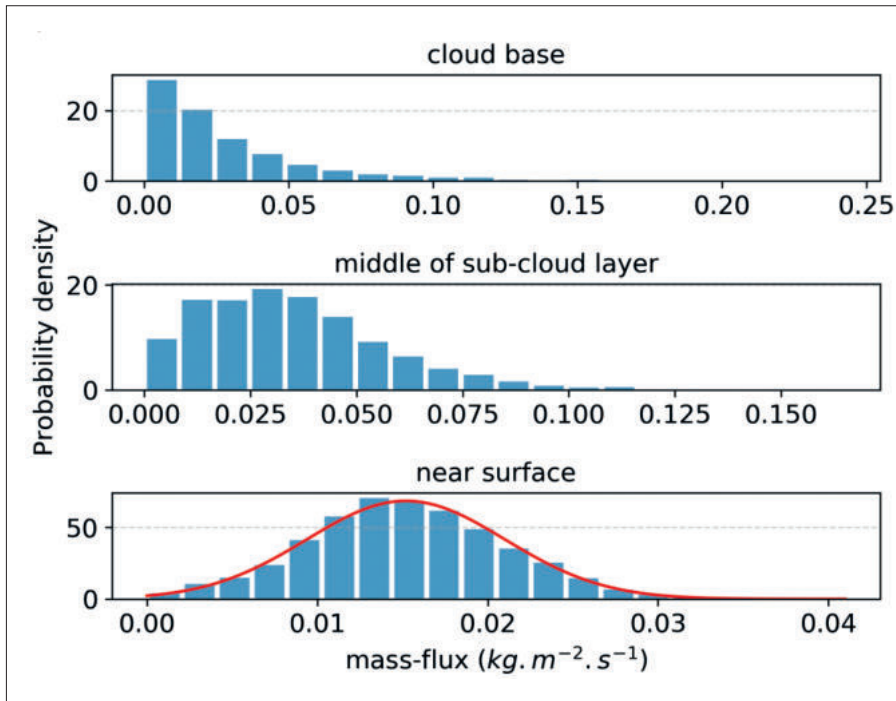
Le second post-traitement vise à construire des prévisions d'ensemble de vent « sans couture » jusqu'à 4 jours d'échéance, en

raccordant astucieusement les prévisions d'ensemble AROME et ARPEGE pour assurer la continuité temporelle (Figure b).

Les méthodes développées pour le vent seront ensuite appliquées au rayonnement solaire. L'apport des prévisions d'ensemble haute résolution et des post-traitements pour la production d'énergie sera également évalué par les partenaires du projet.

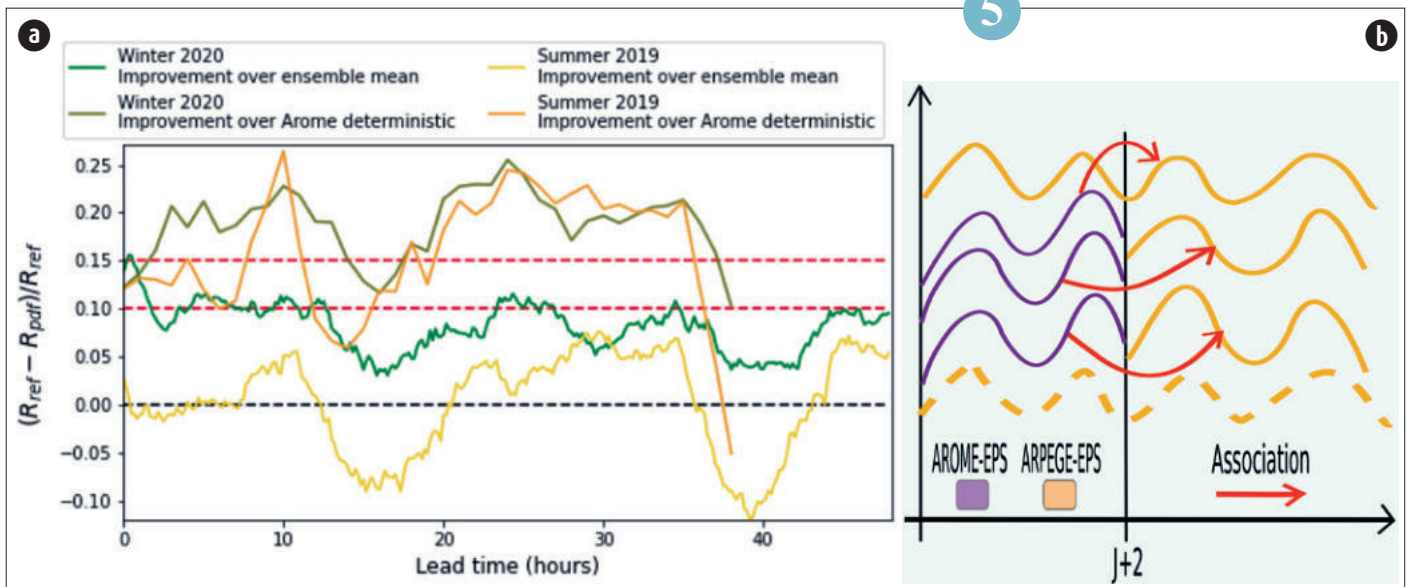
5

4



Histogrammes de l'intensité des flux ascendants dans une colonne de modèle comportant un nuage stratocumulus, dans une simulation numérique à haute résolution. De haut en bas : flux à la base du nuage, sous la base, et en surface. Ces graphiques montrent les distributions de bruit numérique à appliquer à la convection dans AROME pour représenter son incertitude.

5



(a) Amélioration de la RMSE obtenue grâce au quantile optimisé, par rapport à la prévision AROME déterministe et par rapport à la moyenne d'ensemble.

(b) Représentation schématique de la construction d'un ensemble « sans couture » entre AROME et ARPEGE. Chaque membre Arome est raccordé à 51 h d'échéance à un membre Arpège, choisi de manière à minimiser les discontinuités temporelles.

Vers une prévision automatisée de la grêle

F. Bouttier et H. Marchal
en collaboration avec le projet ALPHA

La grêle est un phénomène responsable d'importants dégâts, mais difficile à prévoir à cause de sa physique complexe et de la faible prévisibilité des orages. Au-delà de quelques heures d'échéance, la position et la chronologie des épisodes de grêle est très incertaine : les taux de succès de prévisions utilisant les sorties brutes des modèles numériques sont quasi nuls. Il est nécessaire d'adopter une approche probabiliste sélectionnant les échelles prévisibles.

Pour cela, une nouvelle technique d'estimation de la probabilité de grêle a été développée sous forme d'un algorithme d'apprentissage, alimenté par le diagnostic de « graupel » issu de la prévision d'ensemble du modèle numérique AROME. Cet algorithme a été entraîné en utilisant les données obtenues pendant les étés 2020 et 2021 afin d'optimiser ses caractéristiques de filtrage spatial et de seuillage des intensités. La comparaison des prévisions avec les observations radar (cf. figure) sur de longues périodes permet d'évaluer les performances du modèle AROME ainsi post-traité : aux échéances de prévision 12 à 36 h, ces informations ont une valeur démontrable à condition d'accepter plus de fausses alarmes de grêle que de non-détections. Limiter strictement ces dernières peut se justifier par la nature fortement dommageable du phénomène pour de nombreux utilisateurs de ces prévisions.

Cette technique de prévision est en cours d'évaluation pour une future utilisation opérationnelle dans le cadre du projet ALPHA de modernisation du système de prévision de Météo-France. La qualité des prévisions est actuellement limitée, mais elle progressera dès 2022 grâce à une augmentation de la résolution numérique des prévisions d'ensemble AROME, et à plus long terme via un programme de recherche sur l'amélioration des observations de grêle et des techniques d'apprentissage.

6

Apport du forçage Arome-IFS pour les prévisions de vagues côtières en Méditerranée

A. Dalphinet

Jusqu'à 2021, sur la Méditerranée, les prévisionnistes pour la météorologie marine disposaient uniquement des prévisions de vagues à haute résolution forcées par les prévisions de vent issues des systèmes de prévision Arpège ou Arome. Lors de situations avec une divergence marquée entre Arpège et le système IFS du CEPMMT, il n'existait pas de simulation de vagues dans le domaine côtier du scénario forcé par IFS ou de sa déclinaison régionale de fine échelle, Arome-IFS. Un modèle côtier WW3 forcé par Arome-IFS, aujourd'hui opéré en temps réel, comble ce manque.

Les rejeux de situations marquantes ont montré le fort intérêt de disposer de ce nouveau modèle. Arome et Arome-IFS sont en effet susceptibles de fortement différer. Le cas de la tempête méditerranéenne Adrian en octobre 2018 est l'exemple récent le plus frappant avec un écart entre les deux simulations de vagues de plus de 3 mètres

(voir carte). Cet écart important s'explique par une chronologie de la tempête très différente entre les forçages Arome et Arome-IFS. La comparaison aux observations montre la nette meilleure qualité du scénario de vagues forcé par Arome-IFS sur ce cas.

En moyenne sur les épisodes rejoués, les écarts restent cependant limités, de moins de 30 cm sur la hauteur des vagues, et concernent surtout les dernières échéances. Des scores moyens ont été calculés sur l'automne 2020 par rapport aux bouées disponibles et aux altimètres. Ils montrent que le modèle WW3 forcé par Arome-IFS s'avère d'aussi bonne qualité que WW3 Arome.

Cette validation a permis d'aboutir à la mise en place de cette nouvelle configuration en opérationnel.

7

PISSARO : Prévoir l'activité cyclonique dans le sud-ouest de l'océan Indien à l'échelle mensuelle

H. Vèrèmes, S. Malardel

Le projet INTERREG V PISSARO, coordonné par le LACy, porte sur la prévision à l'échelle intra-saisonnière (de 2 semaines à 2 mois) pour des applications sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOOI). Son objectif est d'évaluer, d'améliorer et de valoriser la prévision à l'échelle mensuelle. Cette valorisation passe notamment par le développement de produits de prévision adaptés à différents types d'utilisateurs pour l'anticipation du risque cyclonique à l'échelle mensuelle dans le SOOI.

La première étape a été d'établir une compréhension mutuelle entre les chercheurs et les acteurs opérationnels partenaires du projet (notamment la Direction InterRégionale pour l'Océan Indien de Météo-France et la Plateforme d'Intervention Régionale dans l'Océan Indien de la Croix-Rouge). Plusieurs actions l'ont favorisé : l'animation d'un briefing expérimental mensuel de prévision de l'activité cyclonique et des régimes de temps dans le SOOI et la participation à des conférences dans le domaine humanitaire.

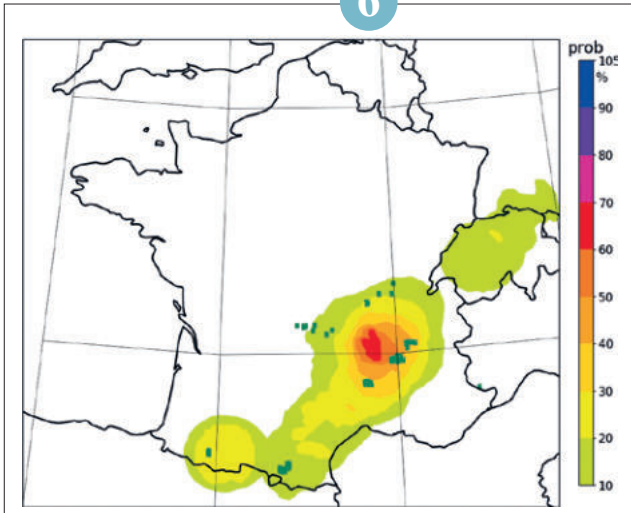
Pour répondre à l'urgence du besoin de réduction du risque de catastrophe, un produit de probabilité d'occurrence des cyclones tropicaux a été adapté pour être interprétable par des utilisateurs non météorologues et restreint aux zones habitées. En parallèle, une

étude de classification des trajectoires des cyclones tropicaux cible le développement de futurs produits de prévision dérivés du projet S2S (Subseasonal-to-Seasonal prediction) pour fournir des probabilités de scénarios de trajectoires potentielles utiles aux prévisionnistes (voir figure).

En 2022, le travail sur la prévision cyclonique sera étendu à d'autres phénomènes météorologiques (zone de convergence intertropicale, pluies extrêmes) en collaboration avec d'autres utilisateurs (en particulier le Service Météorologie des Seychelles (SMA), partenaire de PISSARO). L'actualité du projet est disponible sur le site <http://pissaro.re>. On y trouve les travaux en cours, les nouveaux produits ainsi que les références des interventions orales et publications.

8

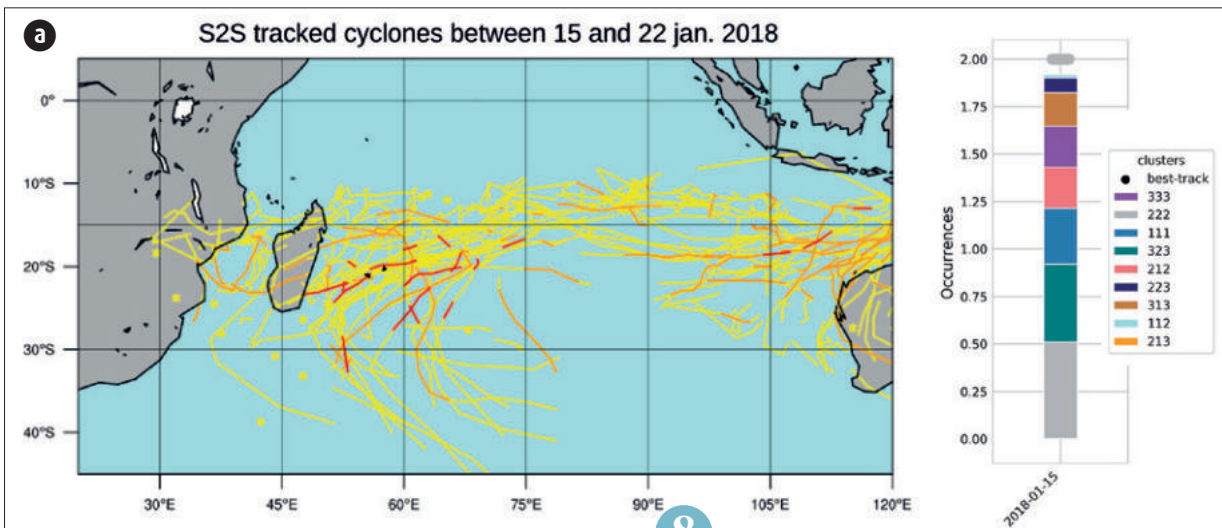
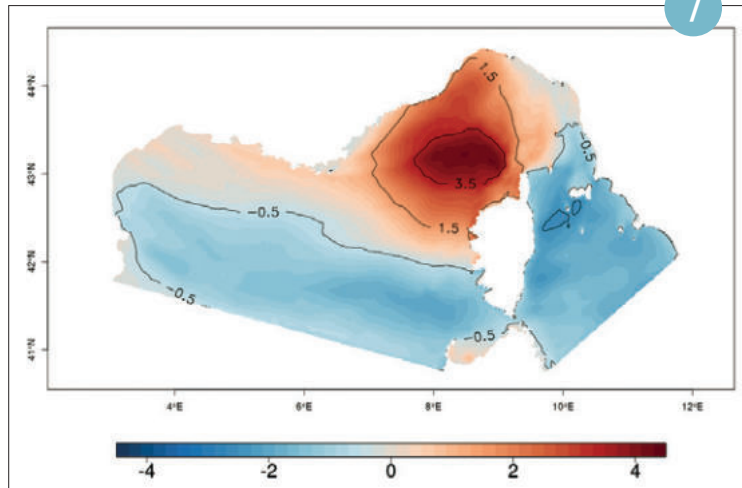
6



Exemple de prévision de grêle sur le cas du 22 juillet 2020 à 17 h : les symboles vert foncé montrent les observations de grêle déduite des données radar. Les plages de couleur indiquent le niveau de probabilité de grêle prévu à partir de la prévision d'ensemble AROME de la veille au soir. Une prévision optimale est obtenue à partir d'environ 10 % de probabilité.

Carte de la différence de hauteur des vagues (m) entre WW3 Arome IFS et WW3 Arome (WW3 Arome IFS – WW3 Arome), à l'échéance 33 h du réseau de 12h du 28/10/2018. Date de validité : 29/10/2018 à 21 h, tempête Adrian.

7

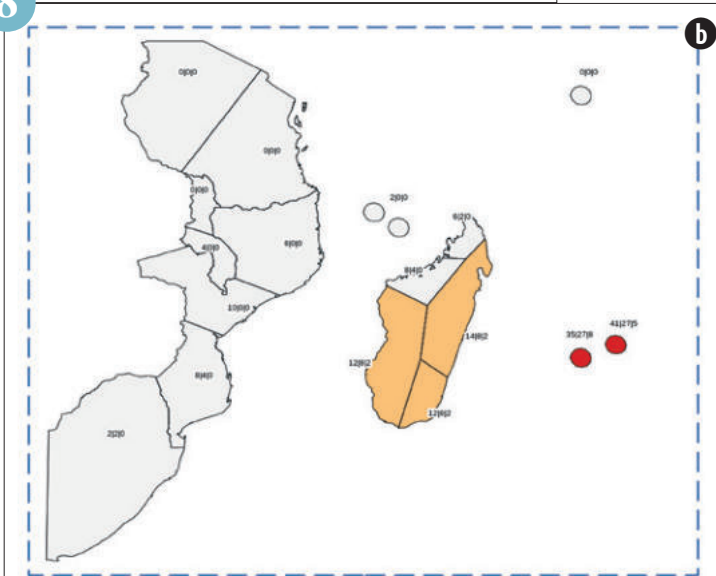


8

(a) À gauche : ensemble de trajectoires potentielles pour la semaine du 15 janvier 2018 prévues 2 semaines plus tôt. En jaune, le système est au stade de dépression, en orange de tempête et en rouge de cyclone. À droite : occurrences moyennes de ces trajectoires par classe telle que définie dans la classification développée à la DIROI. L'un des challenges du projet PISSARO est d'extraire une information des données de prévision intra-saisonnière S2S qui se rapproche des observations et soit directement exploitable dans un cadre d'anticipation du risque cyclonique. La classification des trajectoires prévues montre une probabilité plus forte d'occurrence de trajectoire de type 222 (couleur grise, trajectoire localisée entre 50°E et 70°E) ce qui correspond effectivement à la classe de la trajectoire observée du cyclone Berguita.

(b) Produit expérimental de niveau de probabilité du passage d'un cyclone tropical sur les territoires du bassin SOOI, développé dans le cadre du projet PISSARO. Plus la couleur est rouge et plus le niveau est important. Ce produit sera calibré et évalué en 2022. Exemple avec la prévision du 1^{er} janvier 2018 pour la semaine du 15 janvier. Les zones pour lesquelles la prévision prévoyait le niveau de probabilité le plus important (à savoir La Réunion et Maurice) ont effectivement été exposées au cyclone Berguita.

b



Etude et modélisation des processus

Les études de processus conduites dans le cadre d'activités de recherche visent à améliorer la compréhension des phénomènes pour in fine mieux représenter ces processus dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat, jusqu'à concevoir des services météorologiques pertinents.

Les études de processus s'appuient généralement sur une approche complémentaire entre observation et modélisation : les simulations numériques à échelle fine, évaluées à l'aide d'observations, apportent une description détaillée permettant de mieux caractériser les processus, pour mieux les représenter dans les modèles de plus grande échelle. Les travaux de recherche s'appuient pour cela sur le développement et l'utilisation des paramétrisations physiques, de l'assimilation de données à méso-échelle, des méthodes de prévision d'ensemble ou encore des modèles d'impacts.

Dans la troposphère, les nuages exercent un impact radiatif qui module le bilan radiatif terrestre, dont la représentation est essentielle pour les modèles de climat et de prévision numérique du temps. Celle-ci se base sur des paramétrisations des propriétés radiatives des nuages à partir d'hypothèses simplificatrices de la microphysique des hydrométéores. L'incertitude relative à ces hypothèses a pu être évaluée et apparaît significative.

Dans le domaine de l'étude des tempêtes, la campagne de mesures NAWDEX menée en 2016 a cherché à mieux comprendre le rôle joué par les processus associés aux nuages sur les perturbations atmosphériques des moyennes latitudes et sur la formation d'erreur dans les modèles de prévision et de biais dans les modèles de climat. Grâce à la combinaison entre observation et modélisation, différents processus nuageux ont été identifiés comme ayant une influence sur la dynamique de la haute troposphère, qui conditionne ensuite l'intensité de ces tempêtes au sol. Plus bas dans la troposphère, les interactions avec les processus de surface pilotent également les phénomènes atmosphériques, et une approche de modélisation couplée entre l'atmosphère et la surface est donc essentielle. Sur les surfaces océaniques, le couplage océan-atmosphère représente un enjeu central pour la représentation des cyclones tropicaux ou des épisodes méditerranéens fortement précipitants. A l'échelle kilométrique, le système couplé AROME-NEMO en constitue la référence, et a pu être évalué à l'aide de mesures inédites de bouées sur les trajectoires des cyclones. Sur les surfaces continentales végétalisées, la modélisation suppose une représentation réaliste du système sol-plante. Des travaux récents s'appuient maintenant sur des techniques d'apprentissage automatique afin de mieux valoriser l'assimilation de données satellitaires dans la représentation de la végétation et de l'humidité des sols. Les villes, qui regroupent l'essentiel de la population mondiale, des activités et infrastructures, présentent également des enjeux importants de prévision hectométrique et d'adaptation au changement climatique. La modélisation couplée ville-atmosphère a atteint un degré de réalisme avancé permettant de représenter des villes morphologiquement hétérogènes, telles que Hong-Kong, et d'évaluer l'impact de stratégies d'adaptation urbaine. Des travaux de recherche multidisciplinaire ont abouti à la prise en compte des processus liés à la végétation et à l'hydrologie dans le modèle de surface urbaine, ouvrant la voie à des études autour du rafraîchissement urbain et de la gestion de l'eau en ville, et de solutions d'aménagement du territoire fondées sur la nature.

C. Lac

Amélioration de la représentation des propriétés optiques des nuages dans les modèles

E. Jahangir, Q. Libois

Le forçage radiatif des nuages caractérise en quoi la présence de nuages module le bilan radiatif de la Terre. C'est une grandeur fondamentale, tant pour la modélisation du climat que pour les prévisions météorologiques. Les propriétés radiatives des nuages dépendent de leurs propriétés physiques à l'échelle microscopique, et en particulier de la dimension des hydrométéores. Dans les modèles atmosphériques, une dimension caractéristique est le plus souvent diagnostiquée à partir du contenu en eau. Pour les nuages liquides, ce diagnostic repose sur des relations empiriques extraites d'observations très spécifiques, et suppose une forme constante de la distribution en

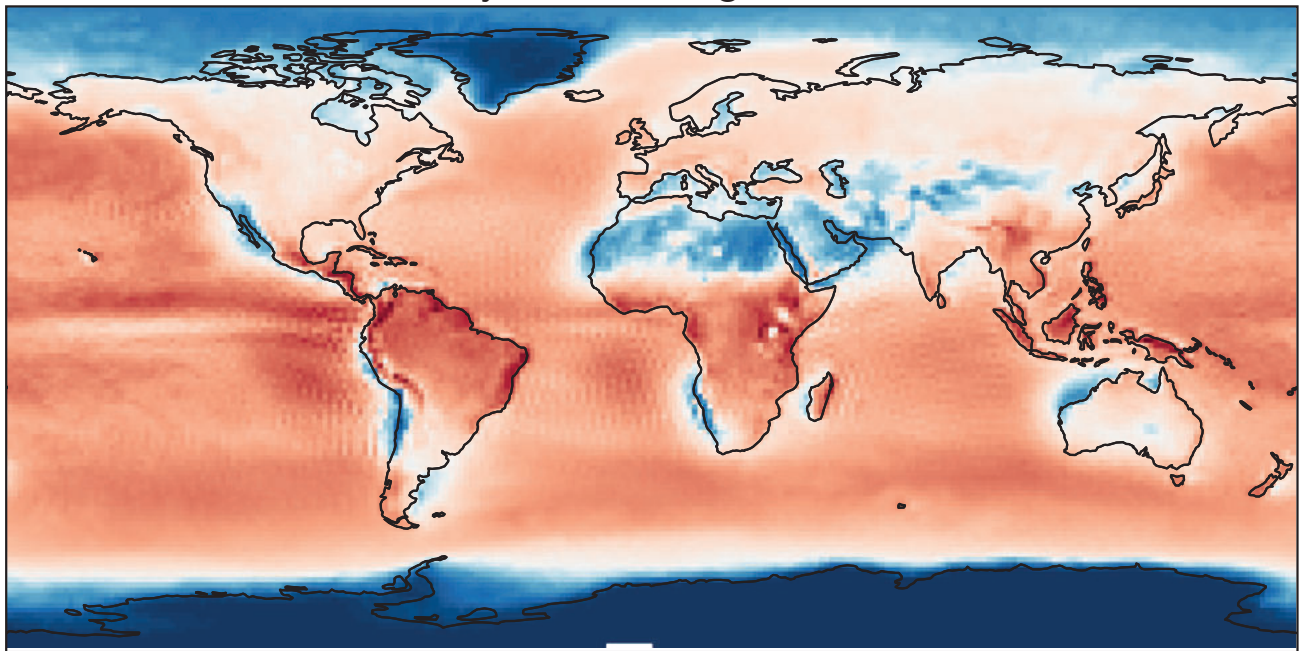
taille des gouttelettes. De même, l'estimation des propriétés optiques du nuage à partir de la taille caractéristique des gouttelettes nécessite une hypothèse sur la forme de la distribution. En pratique une seule forme de distribution est utilisée pour tous les nuages, alors qu'une grande variété de distributions est observée dans la nature. Il est donc important de quantifier l'incertitude sur le forçage radiatif des nuages qui découle de cette approximation. Pour répondre à cette question nous avons développé des diagnostics de taille de caractéristique et des estimations des propriétés optiques pour différentes formes de distribution. Pour un nuage donné caractérisé par son contenu

en eau liquide, nous avons ainsi calculé différents forçages radiatifs, en fonction de la distribution choisie. En appliquant ces outils à cinq années de simulations réalisées avec le modèle de climat CNRM-CM6, nous avons montré que le forçage radiatif global des nuages (dans le domaine radiatif visible et proche infrarouge du spectre solaire) simulé par le modèle pouvait varier de plus de 6 W m^{-2} , ce qui correspond à 13 % de la meilleure estimation observationnelle (Jahangir et al., 2021). Ceci souligne l'importance de raffiner la représentation de la microphysique des nuages dans les modèles atmosphériques afin de mieux représenter leur impact radiatif.

Référence :

Jahangir, E., Libois, Q., Couvreur, F., Vié, B., & Saint Martin, D. (2021). Uncertainty of SW cloud radiative effect in atmospheric models due to the parameterization of liquid cloud optical properties. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(12), e2021MS002742. <https://doi.org/10.1029/2021MS002742>

Différence moyennée sur le globe = 6.2 W m^{-2}



0.0 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15.0

Différence de forçage radiatif des nuages dans le SW (W m^{-2})

▲ Différences de forçage radiatif des nuages dans le spectre solaire calculées à partir de cinq années de simulations réalisées avec le modèle de climat CNRM-CM6, en utilisant deux distributions dimensionnelles de gouttelettes différentes. Les distributions correspondent à des fonctions lognormales de paramètres 0.2 et 0.65.

Impact de la paramétrisation microphysique sur la représentation de la bande transporteuse chaude et de la dynamique de la haute troposphère

M. Mazoyer

L'intensité et la sinuosité du courant-jet évoluant au-dessus de l'océan Atlantique Nord à une dizaine de kilomètres d'altitude sont déterminantes pour la formation d'événements météorologiques pouvant affecter l'Europe de l'Ouest. Les bandes transporteuses chaudes (nommées Warm Conveyor Belts en anglais, WCB) associées aux tempêtes ont un impact sur la dynamique d'altitude. Les processus impliquant un échange de chaleur au sein des nuages se formant dans les WCBs renforcent la circulation anticyclonique en haute troposphère.

En simulant avec le modèle de recherche Méso-NH plusieurs tempêtes observées pendant la campagne aéroportée NAWDEX (North Atlantic Waveguide and Downstream

Impact Experiment) qui s'est tenue en 2016 sur l'Atlantique Nord, certains processus microphysiques se sont révélés particulièrement influents sur le creusement de la dorsale d'altitude :

- le dépôt de vapeur d'eau sur la glace et les gouttelettes d'eau,
- le taux d'auto-conversion de la glace primaire vers la neige.

La représentation de ces processus étant entachée d'incertitudes, les comparaisons avec les mesures réalisées durant les vols de l'avion français par dropsondes et par télédétection de la plateforme RALI (composée d'un radar nuage, d'un lidar et d'un radiomètre) a permis d'évaluer les schémas microphysiques. En particulier deux options différentes pour déposer la vapeur

d'eau sur les hydrométéores ont été testées : la première (S) répartit la vapeur d'eau en excès sur la glace et les gouttelettes en fonction de leur proportion, pour la seconde (T40) cette répartition dépend seulement de la température. La figure montre les différentes phases (liquide, glacée ou mixte) des hydrométéores : la première option ne produit une phase mixte que dans la zone de fonte alors que la seconde option parvient comme dans les observations à produire de l'eau surfondue au sommet des nuages glacés.

Ce travail de recherche souligne le fort impact des processus radiatifs et microphysiques associés aux nuages en phase glace ou mixte sur l'intensification de la dorsale d'altitude (Mazoyer et al., 2021).

Référence :

Mazoyer, M., D. Ricard, G. Rivière, J. Delanoë, P. Arbogast, B. Vié, C. Lac, Q. Cazenave, and J. Pelon, Microphysics impacts on the warm conveyor belt and ridge building of the NAWDEX IOP6 cyclone, *Mon. Weather Rev.*, 149, 3961-3980, 2021. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0061.1>

2

Apport de l'apprentissage automatique à l'assimilation de données satellitaires dans un modèle du système sol-plante

T. Corchia, B. Bonan, G. Colas, J.-C. Calvet

Le CNRM a développé un système d'assimilation de données satellitaires pour les surfaces terrestres nommé LDAS-Monde (LDAS, Land Data Assimilation System). Il intègre conjointement des observations satellitaires de l'humidité superficielle du sol et de l'indice de surface foliaire (LAI, Leaf Area Index) dans le modèle ISBA du système sol-plante. Cela améliore la représentation de la végétation et l'humidité du sol dans la zone racinaire. Ces quantités peuvent être utilisées pour initialiser des modèles de prévision du temps, de prévision saisonnière, ou de suivi de l'état des ressources en eau. L'humidité superficielle du sol est produite par EUMETSAT à partir du radar ASCAT, qui est l'un des instruments présents sur les satellites Metop. Le LAI est un produit du Copernicus Global Land Service (CGLS). Les coefficients de réflexion radar (σ^0) observés par

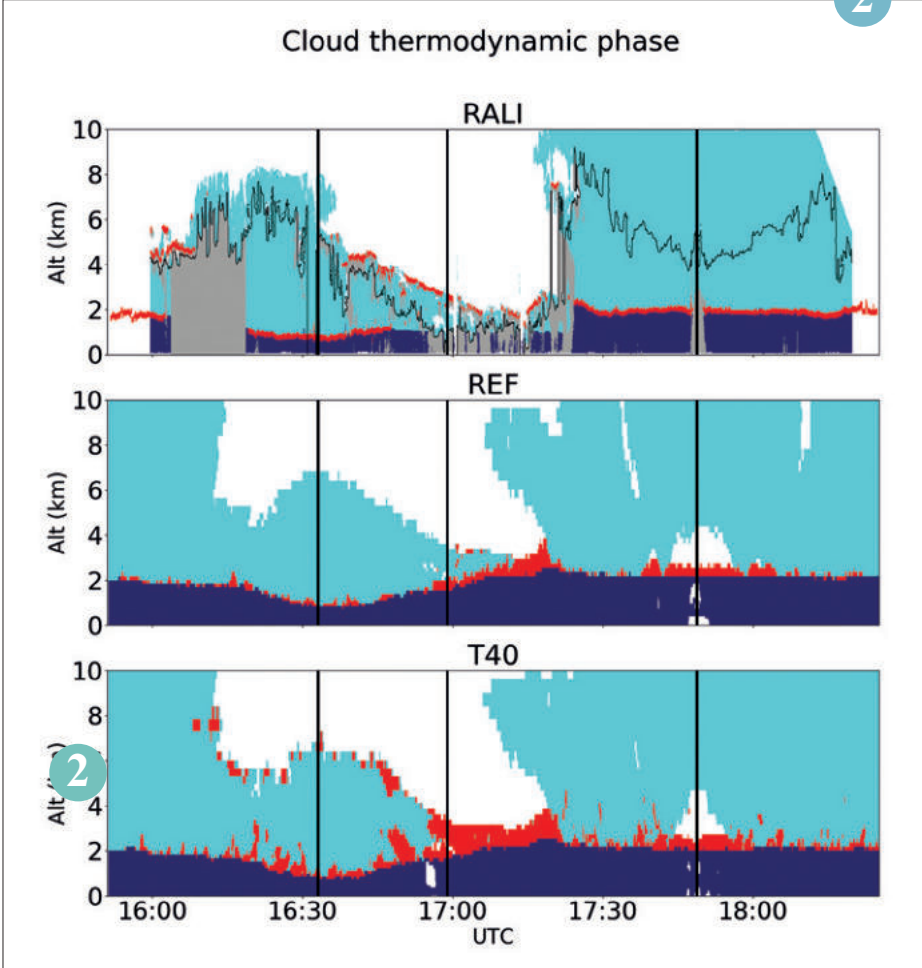
ASCAT contiennent de l'information à la fois sur l'humidité superficielle du sol et sur la végétation. Sachant cela, la question qui se pose est : comment exploiter l'information complète (notamment celle de la végétation) contenue dans les σ^0 ASCAT en combinaison avec le modèle ISBA ? Dans ce but, deux opérateurs d'observations ont été développés : un réseau de neurones et un modèle semi-empirique (Water Cloud Model) permettant à ISBA de simuler les valeurs de σ^0 . Leurs performances ont été évaluées dans le Sud-Ouest de la France à l'aplomb de 12 stations météorologiques disposant de capteurs d'humidité du sol (réseau SMOSMANIA). Après une phase d'apprentissage sur la période 2007-2012 fondée sur les variables simulées par ISBA et sur le LAI satellitaire CGLS, l'assimilation des σ^0 ASCAT a été évaluée sur la période

2013-2017. Contrairement au Water Cloud Model, le réseau de neurones permet à l'assimilation des σ^0 ASCAT de corriger très efficacement le LAI modélisé. Les mesures in situ de l'humidité du sol montrent que l'humidité du sol modélisée est améliorée également.

Ce travail ouvre la voie à l'assimilation de données plus proches de l'observation physique faite par les capteurs satellitaires.

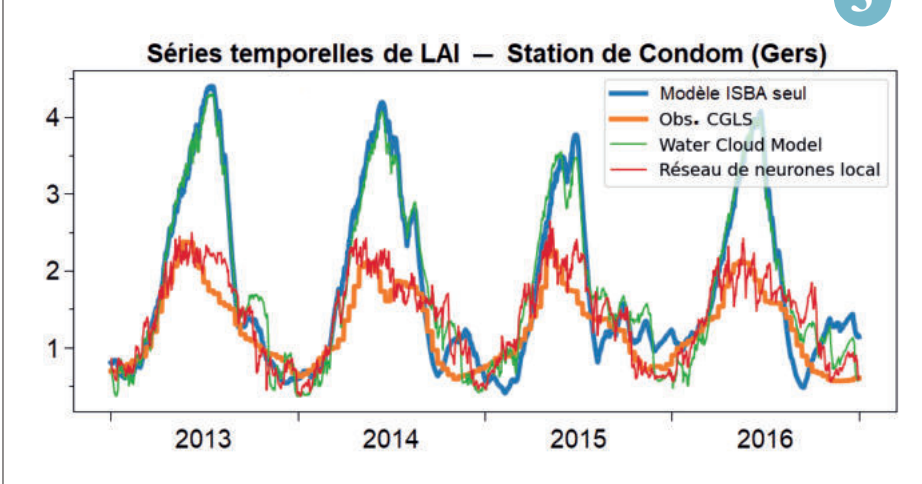
3

2



◀ Comparaison des phases thermodynamiques (liquide en bleu marine, glace en cyan, mixte en rouge) dans un cas de Warm Conveyor Belt le 12 octobre 2016 détectées par le produit RALI (RADAR + LIDAR embarqué dans le Falcon) (en haut) et simulées par Méso-NH utilisant le schéma microphysique ICE3 avec l'option référence S (au centre) ou l'option T40 (en bas). Les zones incertaines sont en gris et les zones non nuageuses sont en blanc. La ligne noire sur les observations indique la limite de détection vers le bas du LIDAR.

3



◀ Indice de surface foliaire (LAI) à l'aplomb de la station météorologique de Condom dans le Gers. Le modèle ISBA seul (ligne bleue) surestime fortement le LAI en été, par rapport aux observations satellitaires CGLS (ligne orange) car ISBA ne représente pas les pratiques agricoles. L'intégration des σ^0 ASCAT dans ISBA en utilisant le Water Cloud model comme opérateur d'observation a peu d'impact sur la simulation du LAI. En revanche, l'utilisation d'un réseau de neurones permet de corriger très efficacement le LAI.

Premiers résultats du modèle couplé océan-atmosphère AROME-NEMO sur la métropole

C. Lebeau-pin-Brossier, J. Pianezze

Pour améliorer la prévision numérique de l'environnement à haute résolution, il est essentiel de bien représenter les interactions océan-atmosphère (OA), ce qui n'est généralement pas le cas dans les systèmes de prévision régionaux opérationnels actuels. Un nouveau système couplé OA orienté prévision couvrant l'Europe de l'Ouest a été récemment construit en collaboration entre le CNRM et Mercator Ocean International. Ce système utilise le modèle de prévision numérique du temps (PNT) AROME et le modèle océanique 3D NEMO avec une résolution horizontale de 2,5 km pour les deux milieux.

Une étude de sensibilité a été réalisée à l'aide de simulations sur 7 jours, du 12 au 19 octobre 2018, marqués par des événements

météorologiques extrêmes dans la zone (tempête hivernale Callum, cyclone tropical Leslie et épisode méditerranéen dans l'Aude) (Pianezze et al., 2021). Des comparaisons avec des observations in-situ et satellites montrent que la simulation couplée reproduit quantitativement bien l'évolution spatiale et temporelle de la température de surface de la mer (TSM) et du vent à 10 mètres. L'analyse de sensibilité au couplage OA montre que l'utilisation d'une TSM interactive modifie la circulation atmosphérique et la localisation des fortes précipitations, par rapport à l'utilisation d'une TSM constante telle que dans la PNT actuelle. Comparés aux prévisions océaniques de type opérationnel, les champs océaniques simulés montrent une grande sensibilité

au couplage. Les simulations océaniques forcées mettent en évidence que cette sensibilité est principalement contrôlée par le changement du modèle atmosphérique utilisé pour forcer NEMO (AROME ou les prévisions opérationnelles IFS du CEPMMT). La profondeur de la couche limite océanique peut varier de plus de 40% localement, entre les deux expériences de sensibilité en mode océan forcé. Cet impact est amplifié par le couplage interactif du fait d'une boucle de rétroaction positive entre le refroidissement de surface et l'évaporation.

Les travaux de recherche utilisant le système couplé AROME-NEMO visent désormais à mieux appréhender les interactions OA à l'échelle kilométrique pour des applications élargies.

Référence :

Pianezze, J., Beuvier, J., Lebeau-pin Brossier, C., Samson, G., Faure, G., and Garric, G.: Development of a forecast-oriented km-resolution ocean-atmosphere coupled system for Western Europe and sensitivity study for a severe weather situation, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, sous presse.

4

Evaluation de la composante océanique du système couplé AROME-NEMO par des mesures de bouées ALAMO : Cas du cyclone FLORENCE

G. Hoarau, S. Malardel

Le système couplé atmosphère-océan AROME Outremer-NEMO est en développement au LACy depuis 2020. La configuration initiale sur le domaine opérationnel Océan Indien a été adaptée en 2021 à un large domaine Atlantique afin de pouvoir valider la réponse océanique du système couplé au passage des cyclones grâce à un jeu de mesures de bouées de type ALAMO (Air-Launched Autonomous Micro Observer) (Sanabia and Jayne, 2020). Ces bouées sont lâchées par des avions de reconnaissance des Etats-Unis d'Amérique à proximité de la trajectoire de cyclones du bassin Atlantique et peuvent alors dériver pendant plusieurs semaines. Elles échantillonnent la température et la salinité de l'océan sur une profondeur pouvant aller jusqu'à 1000 m suivant les configurations. Les mesures sont

transmises par satellite à chaque remontée à la surface. Les données sont ensuite traitées et mises à disposition par le « Naval Research Laboratory » qui dépend du service météorologique et océanographique des Etats-Unis (NOAA). Ce travail fait partie d'un exercice d'intercomparaison qui a débuté en 2021 pour évaluer les systèmes couplés de PNT au CEPMMT, au Met. Office et au LACy. La Figure (a) montre l'évolution des profils de température pour les 300 premiers mètres de l'océan mesurés par une des bouées ALAMO lâchées le 11/09/2018 juste avant le passage du cyclone tropical Florence qui était alors à son maximum d'intensité. On retrouve dans AROME-NEMO la signature des ondes quasi-inertielles générées par le passage du cyclone au dessus de l'océan avec une amplitude et une

longueur d'onde très similaires à celles des observations (Figure (b)). Dans IFS-NEMO, les oscillations sont moins intenses (Figure (c)), probablement du fait de la résolution plus basse des modèles dans cette configuration (IFS-NEMO : 9km-1/4°, AROME-NEMO : 2.5 km-1/12°) . Ces résultats ont été confirmés par une comparaison entre les analyses en fréquence des données ALAMO et des données modèle.

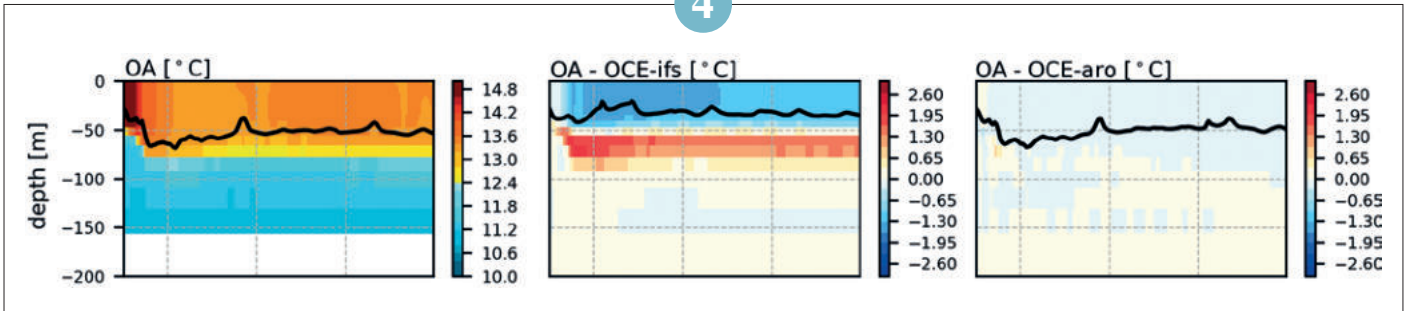
Le bon comportement du modèle AROME-NEMO devra être confirmé sur d'autres cas d'étude pour lesquels des mesures ALAMO sont disponibles (cyclones IRMA en 2017, TEDDY en 2020 ...). En parallèle, l'évaluation du système couplé AROME-NEMO se poursuit sur le bassin de l'Océan Indien, malheureusement plus pauvre en observations.

Référence :

Sanabia, E., R., and Jayne, S., R. (2020). Ocean observation under two major hurricanes : Evolution of the response across the storm wakes. *AGU Advances*, 1, e2019AV000161. <https://doi.org/10.1029/2019AV000161>

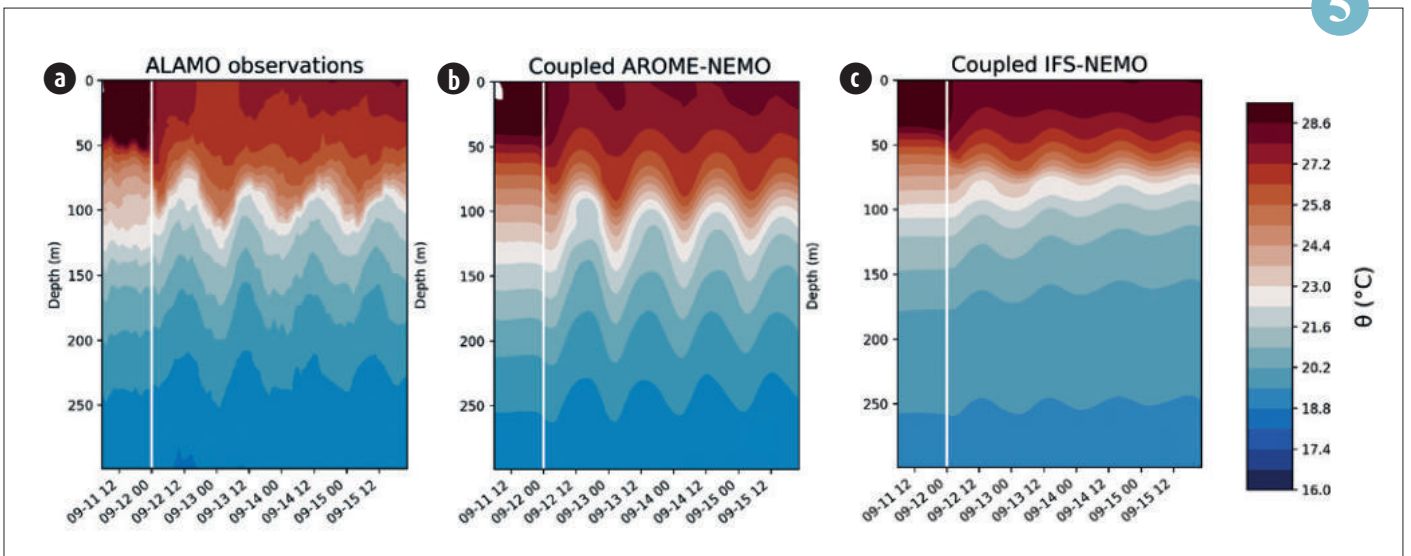
5

4



Evolution du profil vertical océanique de température ($^{\circ}\text{C}$) en mer Celtique dans la simulation couplée (OA) et différences avec les simulations océaniques forcées (OCE-ifs pour l'expérience forcée par la prévision IFS et OCE-aro pour celle forcée par des champs AROME). La ligne noire délimite la profondeur de la couche de mélange dans OA (à gauche), OCE-ifs (au centre) et OCE-aro (à droite).

5



Evolution temporelle (a) des profils de température mesurée par la bouée ALAMO entre la surface de l'océan et 300m de profondeur ; (b)-(c) profils de température simulée par AROME-NEMO (b) et par le système opérationnel déterministe du CEPMMT, IFS-NEMO (c).

Climat urbain et adaptation d'une ville côtière avec de nombreux gratte-ciel : Modélisation du cas extrême de Hong Kong

R. Schoetter, C. de Munck

Les enjeux d'adaptation urbaine et de prévision hectométrique soulèvent la question de la capacité des modèles à simuler avec réalisme des villes morphologiquement hétérogènes. Modéliser des villes composées de bâtiments de grande hauteur nécessite un changement de paradigme dans la façon de coupler modèles météorologique et de surface. Les couplages utilisés jusqu'à présent considéraient la ville comme une surface sous-jacente à l'atmosphère, sans représenter l'effet des bâtiments sur l'écoulement, la température et l'humidité

de l'air aux niveaux atmosphériques qui intersectent les bâtiments (Figure a). La ville de Hong Kong, caractérisée par une forte hétérogénéité paysagère (côte, relief fort, nombreux gratte-ciel, forêts) et un réseau d'observations pertinent pour ces enjeux ont permis de tester les performances d'un nouveau couplage à plusieurs niveaux entre le modèle atmosphérique Mésos-NH et le modèle de surface SURFEX (Surface Externalisée) contenant le modèle de climat urbain TEB (Town Energy Balance). Ce couplage est évalué en contexte de

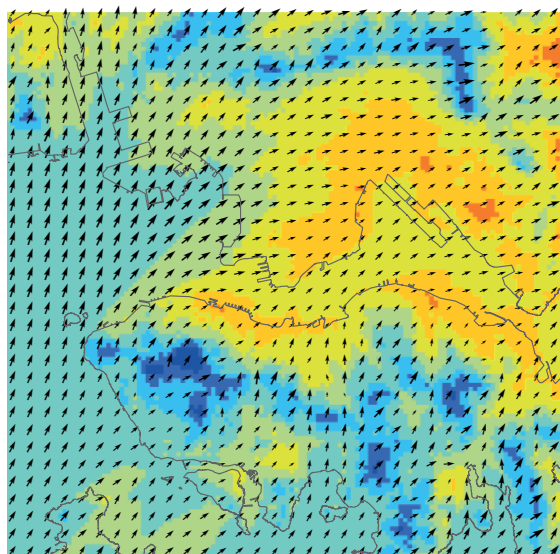
canicule et montre une forte amélioration en journée de la simulation de la température et de l'humidité dans la canopée urbaine vis-à-vis de l'approche traditionnelle. La vitesse du vent est aussi légèrement mieux simulée. Ces avancées permettent à présent de simuler de façon plus réaliste le climat urbain en lien avec le développement et le design urbain. La simulation de couloirs de ventilation à l'échelle urbaine a mis en exergue l'importance de la porosité urbaine au-delà de ces couloirs pour la régulation du confort thermique nocturne (Figure b).

Références :

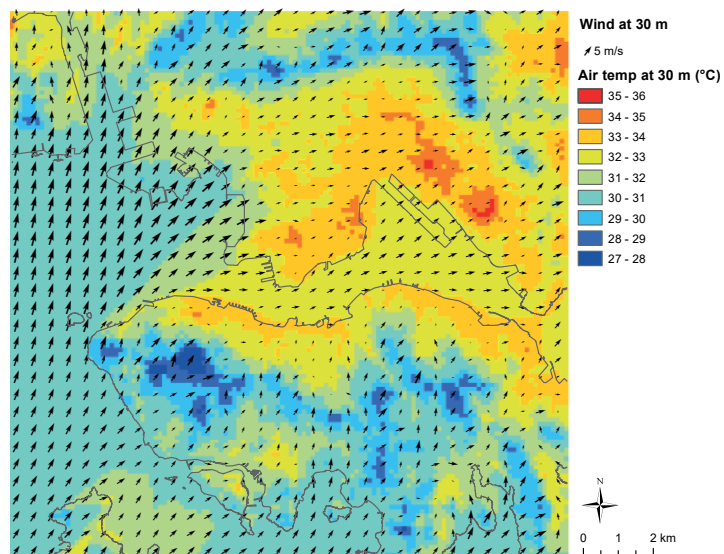
Schoetter R, Kwok YT, de Munck C, Lau K, Wong WK, Masson V. 2020. Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-V9.0 and Meso-NH-v5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities. *Geoscientific Model Development* 13(11): 5609–5643. URL : <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5609-2020>

Kwok, YT, de Munck C, Lau K, Ng E. 2021. To what extent can urban ventilation features cool a compact built-up environment during a prolonged heatwave? A mesoscale numerical modelling study for Hong Kong. *Sustainable cities and society, Special issue: the Creation of Cool Cities and Communities. Volume 77. February 2022.* URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103541>

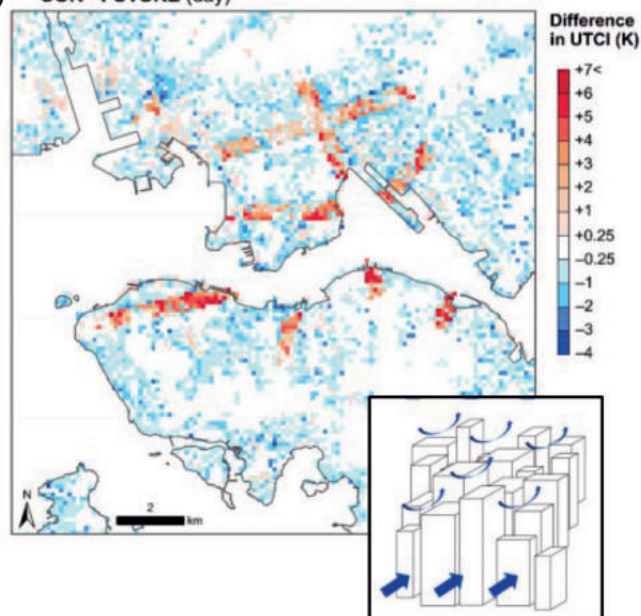
a Couplage à un niveau



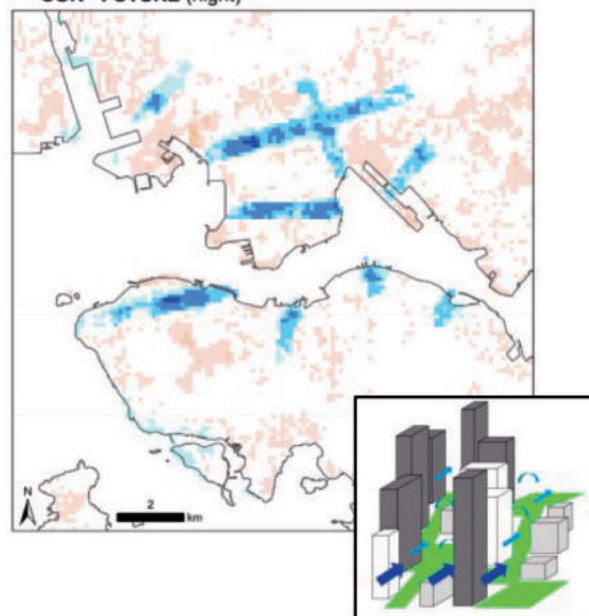
Couplage à plusieurs niveaux



b COR - FUTURE (day)



COR - FUTURE (night)



(a) Écoulement à 30 m au-dessus du sol sur les quartiers très denses de Hong Kong Island et de Kowloon.

L'écoulement est davantage influencé par les bâtiments avec le couplage à plusieurs niveaux.

(b) Différence moyenne de confort thermique (UTCI, Universal Thermal Climate Index) simulée à Hong Kong pendant un épisode de canicule, avec et sans couloirs de ventilation végétalisés, en journée (gauche) et de nuit (droite).

Amélioration de la prise en compte des processus liés à la végétation et l'hydrologie dans le modèle de surfaces urbaines TEB

É. Bernard, C. de Munck

Les enjeux d'adaptation urbaine nécessitent d'adopter une approche de recherche multidisciplinaire afin de mieux comprendre les processus en interaction au sein des milieux urbains. Ceci permet, par exemple, de s'attaquer aux enjeux liés aux questions de rafraîchissement urbain et de gestion de l'eau en ville.

Un travail conséquent a donc été réalisé sur le modèle de surface TEB décrivant les territoires urbains, pour combiner d'une part la présence de végétation arborée et d'autre part celle d'un

sous-sol et d'un réseau d'assainissement urbains (Figure a). La région de Paris et sa petite couronne a été choisie pour cette étude pionnière, du fait de ses enjeux et de l'existence unique de données pour l'étude couplée des processus hydro-climatiques. Grâce à des bases de données récentes et une collaboration étroite avec le Laboratoire Eau et Environnement de l'Université Gustave Eiffel, les surfaces artificielles et végétalisées de la région et le réseau d'assainissement ont été cartographiés de façon détaillée. Le nouveau

modèle a permis de simuler la réponse du territoire aux conditions météorologiques 2001-2017, traduite sur la Figure b en termes de vulnérabilités hydrologiques (déversements), micro-climatiques (îlot de chaleur urbain, stress thermique) et couplées (stress hydrique).

Ces avancées vont maintenant permettre d'étudier des solutions d'aménagement du territoire fondées sur la nature (SFN) et d'étendre ce type d'étude en climat futur ainsi qu'à d'autres villes.

Références :

Bernard Émilie. 2021. Réponse hydroclimatique de Paris et sa petite couronne. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France. <http://www.theses.fr/s294526>

Bernard E, de Munck C, Chancibault K, Mosset A et Lemonsu A. 2021. Hydro-climatic response of Paris metropolitan area through TEB-Hydro model simulation: multi-catchment calibration and model evaluation. Présenté à : *15e conférence internationale sur le drainage urbain [ICUD]*, Melbourne (en ligne), Australie, 25-28 octobre 2021.

7

Caractérisation des particules de glace se formant dans les carburants aéronautiques

F. Flin, I. Haffar, P. Latil

La présence de glace dans les carburants aéronautiques constitue une menace pour la sécurité des déplacements aériens. La thèse CIFRE d'Iheb Haffar a récemment été menée au CEN (entité du CNRM basée à Grenoble), en collaboration avec l'Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives (IFTS) et le laboratoire 3SR, afin de caractériser, dans une boucle de givrage développée par l'IFTS, les particules de glace se formant dans le kérosène à basse température.

La mise au point de protocoles de prélèvements appropriés a tout d'abord permis de développer une nouvelle méthode de caractérisation basée sur la tomographie à

rayons X, la stabilité thermique des échantillons pendant les scans étant assurée par une cellule froide. Cette approche a permis d'accéder aux propriétés géométriques des particules de glace en 3D et d'évaluer ainsi l'impact d'une large gamme de paramètres du procédé tels que la concentration en eau injectée, la tension interfaciale, le temps de recirculation et la température, sur les distributions de taille et de forme des particules produites.

Une technique d'imagerie rapide a ensuite été mise en œuvre afin de caractériser, en ligne et en temps réel, les particules de glace qui se déplacent à grande vitesse dans la boucle d'injection de l'IFTS. Des algorithmes

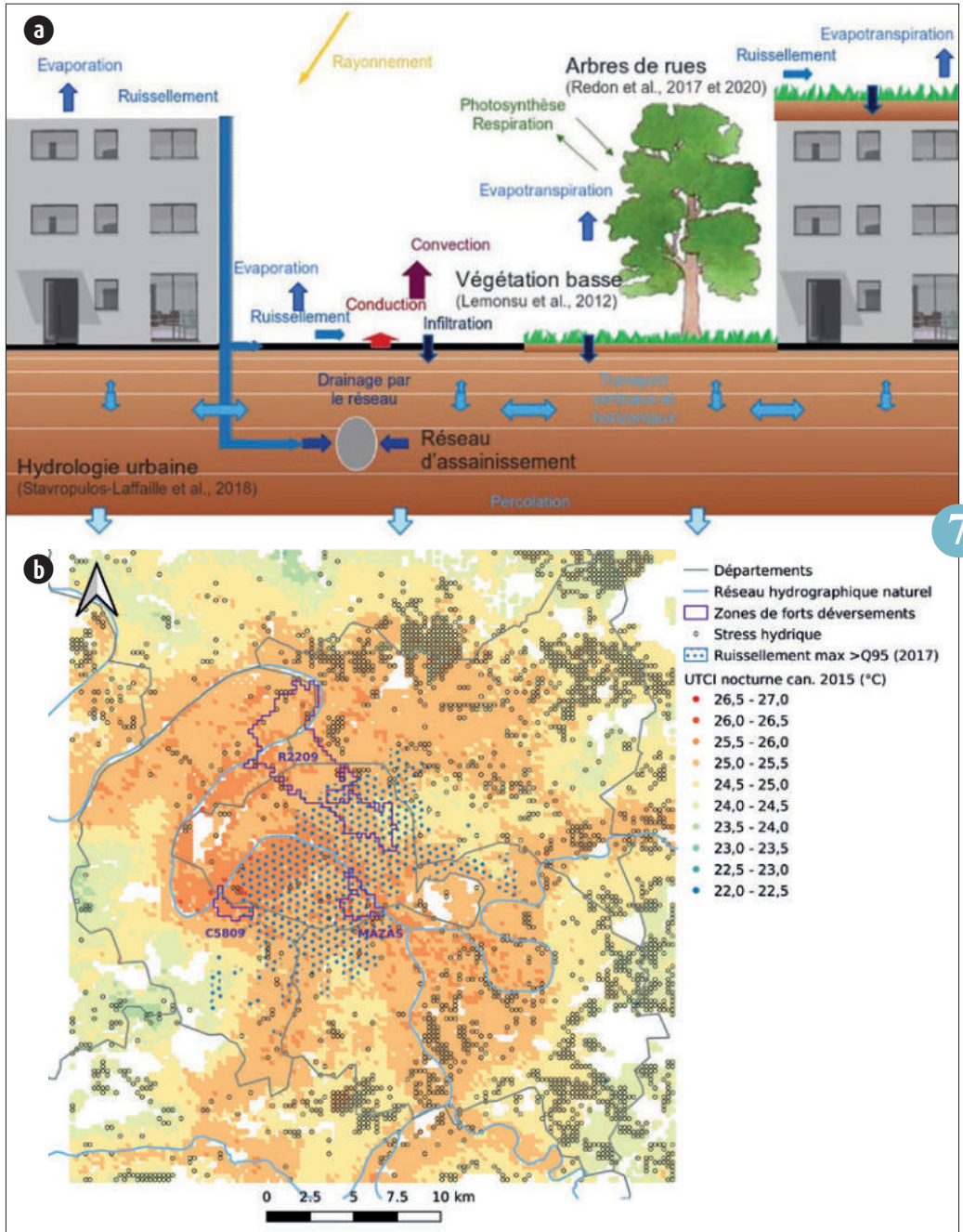
de traitement et d'analyse d'images ont ensuite été développés pour identifier et caractériser les particules de glace en mouvement. Enfin, une comparaison des résultats 3D et 2D a été réalisée dans une large gamme de paramètres du procédé.

La cohérence des résultats obtenus a montré la pertinence de la méthode 2D proposée pour caractériser les particules de glace pour de faibles concentrations. Les outils développés seront particulièrement précieux pour le dimensionnement des filtres aéronautiques et offrent de nouvelles perspectives à l'étude du givrage des carburants.

Référence :

Haffar, I., P. Latil, F. Flin, C. Geindreau, F. Bonnel, N. Petillon, P.-C. Gervais, V. Edery, Characterization of ice particles in jet fuel at low temperature: 3D X-ray tomography vs. 2D high-speed imaging, *Powder Technology*, 397, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.039>

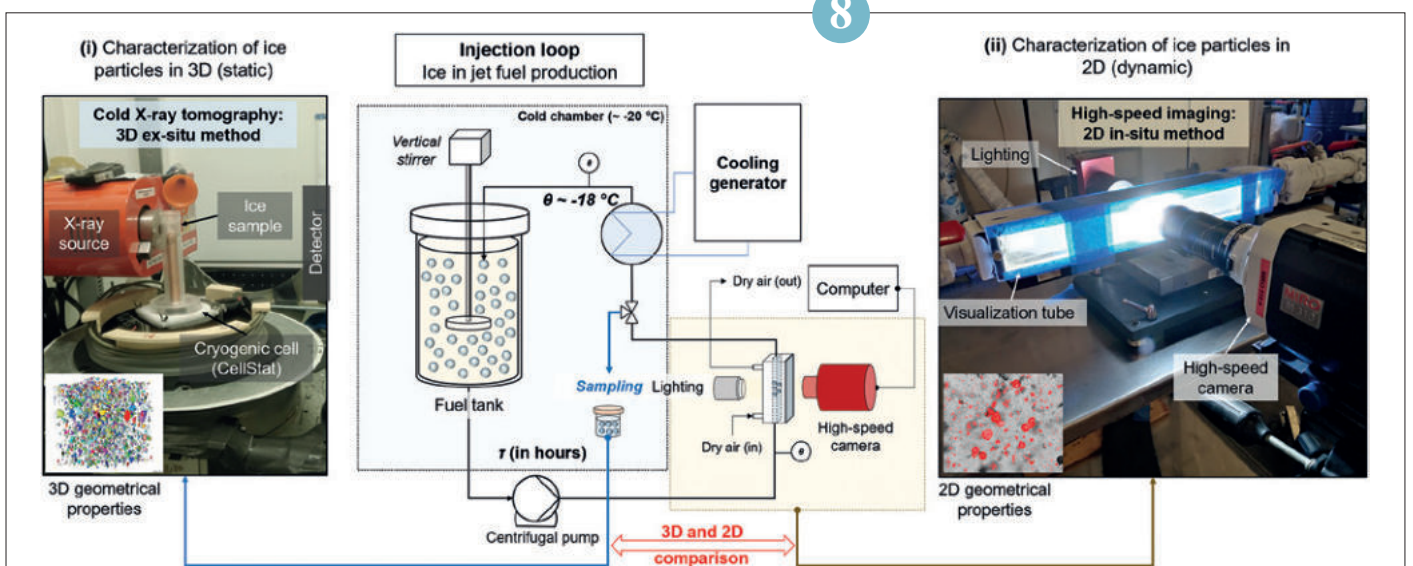
8



(a) Le modèle TEB permet maintenant de décrire de façon couplée et détaillée les interactions bâti-végétation et les transferts hydrologiques en ville. (b) Combinaison des zones les plus vulnérables entre 2001 et 2017, au stress thermique nocturne (UTCI, fond de carte), au stress hydrique (cercles noirs), au ruissellement de surface (pointillés bleus) et aux volumes et fréquences de déversement (violet).

7

Les méthodes de caractérisation des particules de glace mises au point dans le cadre de la thèse CIFRE d'Iheb Haffar: la méthode 3D ex-situ (i), et la méthode 2D in-situ (ii).



8

Climat et prévision saisonnière

L'année 2021 a été notamment marquée par une canicule exceptionnelle et des feux de forêt dévastateurs dans le nord-ouest de l'Amérique fin juin, et sur le pourtour méditerranéen en août, et par des inondations exceptionnelles en Allemagne et en Belgique en juillet. Si l'influence humaine sur le climat contribue à la multiplication de tels événements, le réchauffement mondial n'interdit pas pour autant la survenue de quelques épisodes de froid ou de neige remarquables, comme ce fut notamment le cas en Espagne ou sur l'est des États-Unis en début d'année, ou encore sur l'Europe du Nord, la Sibérie et l'Alaska fin novembre et début décembre. Les événements extrêmes impactent déjà durement les systèmes humains ou naturels, et les deux prochaines décennies seront cruciales pour limiter l'escalade des risques climatiques, ainsi que l'ont rappelé les récents rapports du GIEC.

Parmi la gamme d'outils contribuant à définir des solutions face à la question climatique, qu'il s'agisse de limiter le réchauffement (atténuation) ou ses impacts (adaptation), les services climatiques occupent une place centrale, et peuvent concerner diverses échelles de temps. Les risques d'inondation en lien avec les pluies extrêmes, notamment sur l'arc Méditerranéen Français, mais aussi les risques de sécheresse sur une grande partie de la France font partie des sujets d'inquiétude pour les décennies à venir, et ont fait l'objet de travaux en 2021 à partir des nouvelles données DRIAS-2020. Le potentiel des prévisions saisonnières pour alimenter des services climatiques a par ailleurs été mis en évidence, notamment pour les bassins versants dotés d'un important stock nival. Le nouveau Système 8 de prévision saisonnière, qui repose à la fois sur de récents progrès sur l'initialisation et sur un modèle climatique global au plus près de celui mis en œuvre pour produire des simulations en amont du 6e rapport du GIEC offre déjà des perspectives de prévisions améliorées, et in fine toujours plus utiles pour différents secteurs socio-économiques.

Quelle que soit l'échelle de temps concernée, les modèles numériques de climat constituent des outils incontournables pour la compréhension et l'anticipation des impacts et risques climatiques. Il est donc indispensable de continuer à les faire progresser sur les plans scientifique et technique. En 2021, outre la poursuite d'activités de long terme sur l'amélioration de la partie physique de nos modèles de climat, de nouveaux travaux ont notamment permis de mieux caractériser l'absorption du rayonnement solaire par aérosols issus des feux de biomasse. Cela devrait permettre à terme de mieux prendre en compte cette propriété dans les modèles de climat globaux et régionaux, avec la perspective de mieux représenter les nuages bas et les précipitations lors de grands feux de biomasse.

D. Salas y Melia

1

Modélisation du climat

Transport des aérosols de feux de biomasse sur l'Atlantique Sud-Est : des effets radiatifs difficiles à modéliser

M. Mallet

Récemment, la région de l'Atlantique Sud-Est a été le centre de plusieurs campagnes de mesure dont l'objectif était de comprendre le rôle des aérosols issus de la combustion de la biomasse en Afrique centrale entre juin et septembre sur l'équilibre radiatif et le climat en région tropicale. Contrairement aux sulfates qui diffusent majoritairement le rayonnement solaire, ces panaches d'aérosols de feux de biomasse présentent la particularité d'en absorber une part importante. Or, ces différentes campagnes, en accord avec de récentes observations spatiales, ont clairement mis en évidence que

ces aérosols sont beaucoup plus absorbants que l'on pensait auparavant. Ces propriétés optiques sont cruciales pour comprendre les interactions aérosols-rayonnement-nuages et donc quantifier l'impact de ces panaches sur le climat de cette région.

L'étude menée au CNRM montre que la plupart des modèles globaux de climat de dernière génération, ayant participé à l'exercice d'inter-comparaison CMIP6, sous-estiment en moyenne l'absorption du rayonnement par les aérosols de feux de biomasse transportés au-dessus de l'océan. Ce biais, associé aux difficultés

récurrentes des modèles à représenter les stratocumulus marins sur cette région, conduit de nombreux modèles à simuler un forçage radiatif négatif (refroidissement) au sommet de l'atmosphère, de signe contraire aux estimations récentes. L'ampleur du réchauffement solaire induit par ces aérosols est ainsi sous-estimée par ces modèles, ce qui pourrait conduire à une représentation erronée de la réponse des nuages bas et des précipitations au forçage radiatif de ces aérosols en région tropicale.

Référence :

Mallet, M., P. Nabat, B. Johnson, M. Michou, J. M. Haywood, C. Chen and O. Dubovik, Climate models generally underrepresent the warming by Central Africa biomass-burning aerosols over the Southeast Atlantic., *Sci. Adv.*, 7, 2021, doi.org/10.1126/sciadv.abg9998.

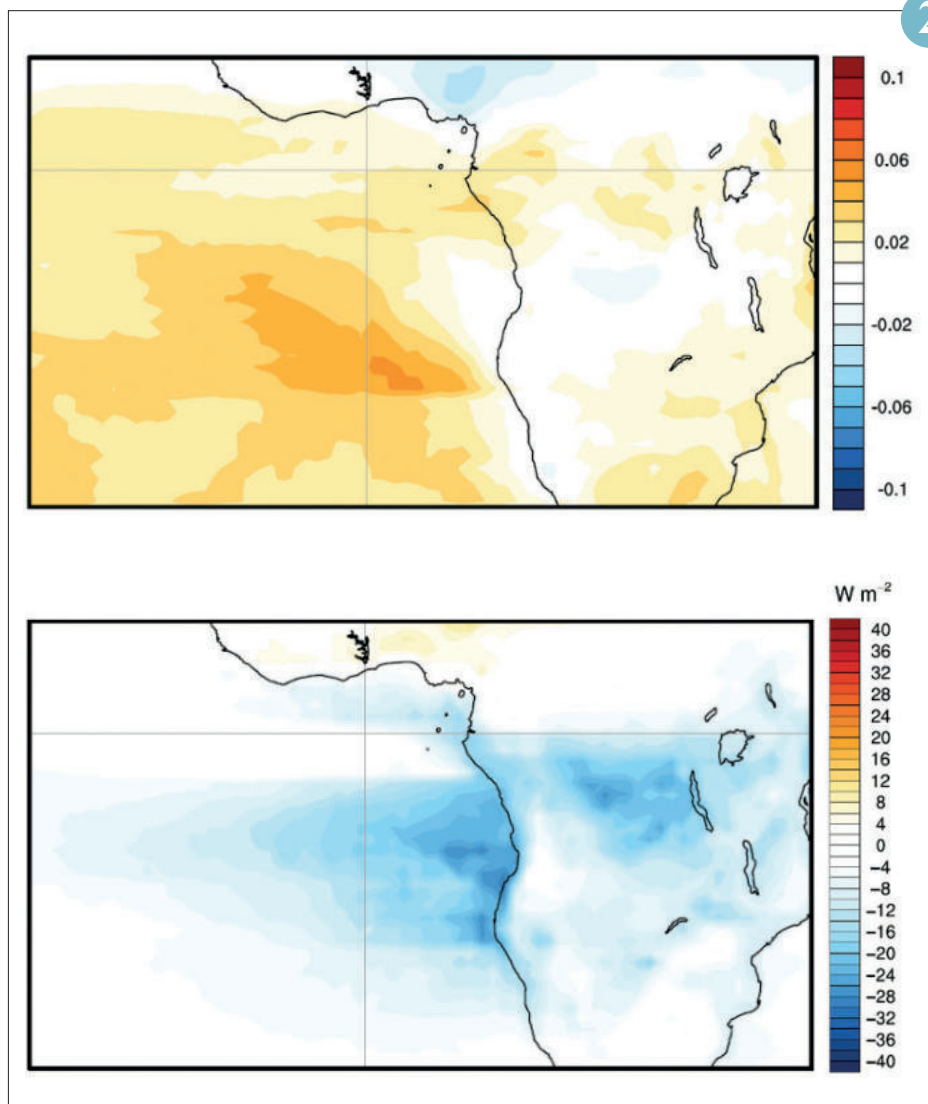
2

1



Feu de forêt près du village de Limni (Grèce), 6 août 2021. © REUTERS/Nicolas Economou

2



Biais moyen des modèles CMIP6 sur l'albédo de simple diffusion des aérosols (haut, les valeurs positives indiquent des aérosols trop diffusants, biais calculé par rapport à la climatologie MACv2), et l'absorption du rayonnement solaire (bas, biais calculé par rapport au produit satellite CERES).

Un premier bilan des sources et des puits de protoxyde d'azote (N₂O) à l'échelle globale

S. Berthet, R. Sférian

Le protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) est un puissant gaz à effet de serre (environ 300 fois plus efficace que le dioxyde de carbone), qui contribue à la fois à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique et au réchauffement climatique. Sa concentration dans l'atmosphère a augmenté de 2 % par décennie au cours des 150 dernières années.

Un groupe international de chercheurs du « Global Carbon Project » et de l'« International Nitrogen Initiative » (<https://www.globalcarbonproject.org/nitrousoxidebudget/>) a réalisé un premier inventaire complet des sources et puits de N₂O, tant naturels qu'anthropiques. Ce bilan prend en compte l'ensemble des compartiments du système Terre (atmosphère, continents et océans) et tient compte des interactions potentielles entre les dépôts d'azote (N) et les processus biochimiques qui contrôlent les émissions de N₂O. Ce bilan a permis d'établir que le taux des émissions de N₂O à l'échelle globale

avait augmenté de 10 % depuis 1980 pour atteindre 17,0 TgN/an (térogrammes d'azote par an) en 2016.

Des chercheurs du CNRM ont participé à l'estimation des flux de N₂O émis par l'océan. Le flux océanique de N₂O a été évalué à 3,4 TgN/an (estimé dans une fourchette allant de 2,5 à 4,34) pour la décennie 2007-2016. La zone tropicale (30°S-30°N) est la principale région émettrice (53 % de ce flux), devant l'hémisphère sud (31 %) et l'hémisphère nord (17 %). Toutefois, la principale cause de l'augmentation du N₂O atmosphérique reste l'emploi d'engrais azotés sur les terres agricoles, dont l'usage participe à hauteur de 70 % des émissions anthropiques sur la décennie 2007-2016. Plus généralement, l'ensemble des émissions anthropiques de N₂O a augmenté de 30 % à l'échelle globale sur les 4 dernières décennies (1980-2016) pour atteindre 7,3 TgN/an (fourchette allant de 4,2 à 11,4). Cette étude souligne qu'il est urgent de réduire les émissions de N₂O.

Référence :

Tian, H., Xu, R., Canadell, J.G., R. L. Thompson, W. Winiwarter, P. Suntharalingam, E. A. Davidson, P. Ciais, R. B. Jackson, G. Janssens-Maenhout, M. J. Prather, P. Regnier, N. Pan, S. Pan, G. Peters, H. Shi, F. N. Tubiello, S. Zaehle, F. Zhou, A. Arneeth, G. Battaglia, S. Berthet, et al. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature* 586, 248–256. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>.

3

Contribution de la variabilité chaotique océanique aux flux air-mer de CO₂

S. Berthet, R. Sférian

Les flux de dioxyde de carbone (CO₂) échangés à l'interface entre l'océan et l'atmosphère sont sujets à d'importantes fluctuations régionales et interannuelles. Si ces fluctuations sont principalement forcées par des changements atmosphériques de grande échelle, elles sont également affectées par la dynamique interne de l'océan.

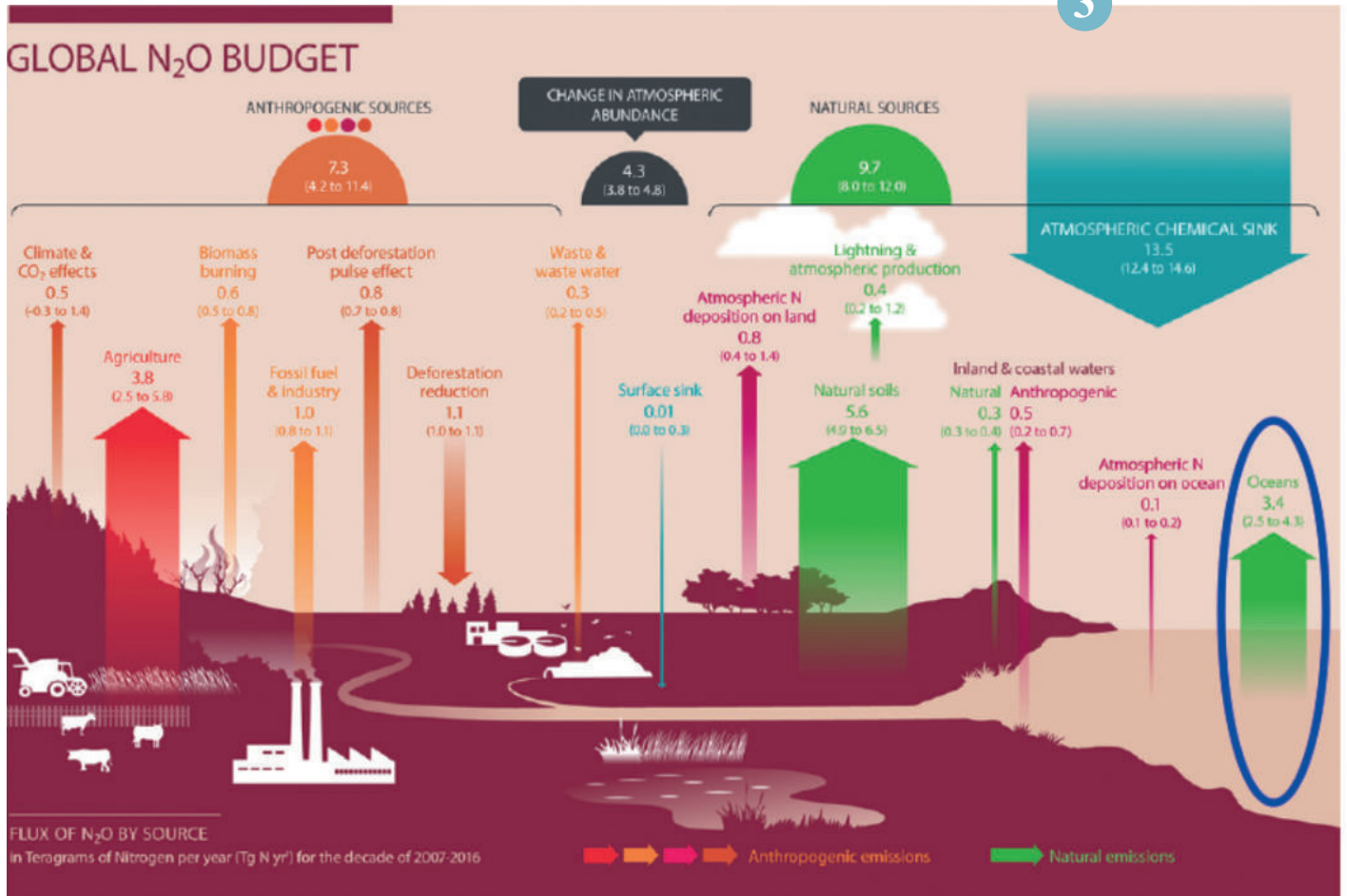
Des chercheurs français du LSCE, du CNRM, de l'IPSL et de l'IGE ont quantifié ces deux sources de variabilité (forcées par l'atmosphère ou émises spontanément par l'océan) et leurs contributions respectives aux fluctuations des flux air-mer de CO₂ sur de grandes régions océaniques. Cette étude s'appuie sur l'analyse de trois simulations numériques de l'océan mondial, représentant les interactions entre la dynamique océanique (par exemple les courants ou le mélange vertical) et la biogéochimie marine (représentation simplifiée de l'écosystème marin). Ces simulations ont été réalisées avec une résolution horizontale relativement fine (1/4 de degré, soit environ 25 km), afin de permettre la représentation d'une partie de l'effet des tourbillons océaniques de méso-échelle sur les quantités physiques et biogéochimiques. Les trois simulations ont été conduites avec un forçage atmosphérique identique (conditions aux limites en vent à 10 mètres, bilan radiatif, précipitations, humidité et température à 2 mètres), mais à partir de toutes petites variations dans leurs états initiaux.

À travers cette étude les auteurs montrent que des processus océaniques non linéaires et aléatoires (c'est-à-dire chaotiques) contrôlent une partie des flux air-mer de CO₂ sur des échelles de temps de plusieurs années. L'intensité de ces fluctuations chaotiques s'avère d'autant plus importante dans les régions de forte énergie cinétique, où elles contribuent localement à 76 % de la variance interannuelle des flux air-mer de CO₂.

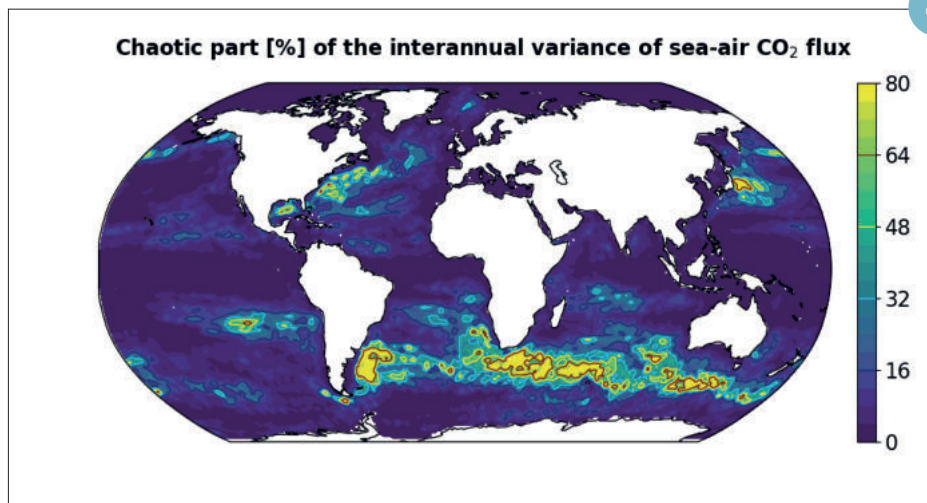
Référence :

Gehlen, M., S. Berthet, R. Sférian, Ch. Ethé, and T. Penduff (2020). Quantification of Chaotic Intrinsic Variability of sea-air CO₂ Fluxes at Interannual Timescales. *Geophysical Research Letter*. <https://doi.org/10.1029/2020GL088304>

4



▲ Bilan global de N₂O pour la période 2007-2016 montrant les flux directs et indirects associés aux sources anthropiques (flèches aux tons chauds ; rouge : agriculture) et les sources et puits naturels (flèches vertes). Le bilan total n'est pas exactement égal à l'accumulation atmosphérique observée, car les différents termes ont été évalués de manière indépendante. Ce déséquilibre apparent correspond à la marge d'incertitude évaluée sur le bilan. Les sources et puits sont donnés en TgN/an.



▲ Part de la variabilité chaotique des flux air-mer de CO₂ pour des échelles de temps interannuelles. Les tons (du vert au jaune) indiquent les endroits où cette variabilité contribue de façon significative aux fluctuations des flux air-mer de CO₂, comme dans les courants de bord ouest ou dans l'océan Austral.

Evolution des précipitations extrêmes en Méditerranée

Les résultats du projet FLAude

J.-M. Soubeyroux

Le projet FLAude (<https://www.spaceclimateobservatory.org/fr/flaude-aude>), soutenu en tant que cas d'usage de Copernicus Climate Change Service (C3S) et labellisé par le Space Climate Observatory (SCO), vise à renforcer l'adaptation des territoires aux risques d'inondations par l'usage des données spatiales (fournies par le CNES) et des données climatiques (Météo-France et C3S). Le territoire d'expérimentation est le département de l'Aude avec un souci de répliquabilité ultérieure sur la région Occitanie, le reste de la France et l'Europe. Le travail mené par Météo-France de juin 2020 à juin 2021 a visé à qualifier les jeux de données mis à disposition par C3S pour

l'analyse des événements extrêmes de précipitation sur le département de l'Aude, à définir avec les utilisateurs impliqués des indicateurs opérationnels de caractérisation des épisodes et à analyser les tendances passé et évolutions futures des pluies extrêmes sur ce territoire.

Sur le climat passé, l'utilisation du jeu de données de pluie quotidienne PRESCILIA de Météo-France à 1km de résolution disponible de 1960 à 2018 a permis d'obtenir des diagnostics conformes à ceux de Ribes et al. (2019) sur le pourtour méditerranéen à partir d'observations de référence. Les diagnostics produits ont mis en évidence une augmentation du maximum annuel

de précipitation quotidienne de +15 % (intervalle de confiance de +2 % à +30%) sur les régions méditerranéennes, +6 % (-10% ; +24%) sur le Languedoc Roussillon et +8 % (-18% ; +43%) sur l'Aude. La surface et les volumes précipités des événements extrêmes sur un jour présentent également des hausses significatives (voir figure).

En climat futur, le diagnostic à partir du jeu DRIAS-2020 a également mis en évidence une hausse attendue de +10 % à +20 % des précipitations extrêmes sur cette zone.

Ce travail doit être étendu à d'autres régions françaises en 2022.

Référence :

Ribes, A., Thao, S., Vautard, V., Dubuisson, B., Somot, S., et al., 2019. Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, Springer Verlag, 52 (1-2), pp.1095-1114. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4179-2>

5

Impact du réchauffement climatique sur l'évapotranspiration potentielle (ETP)

S. Bernus

L'impact du réchauffement climatique sur le secteur agricole est, aujourd'hui, un sujet de préoccupation majeur. Parmi les indicateurs existants dans ce domaine, l'évapotranspiration potentielle (ETP), est retenue ici pour quantifier les impacts attendus et mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

En 2020, un nouveau jeu d'indicateurs climatiques basé sur des projections climatiques régionales corrigées sur la France a été produit et publié sur le portail national de données climatiques DRIAS. Les projections climatiques sont basées sur l'ensemble EURO-CORDEX et corrigées avec la méthode ADAMONT selon

le jeu de données de référence SAFRAN. L'ETP a été calculée à partir de ce nouveau jeu de données. Plusieurs méthodes de calcul ont été utilisées et comparées. Premièrement, l'ETP a été calculée à partir des données brutes ainsi qu'après ajustement à l'aide de la méthode ADAMONT. Ensuite, différentes procédures de calculs ont été testées pour la formule recommandée par la FAO dite de Penman-Montheith. L'une d'entre elles utilise l'humidité spécifique moyenne au lieu du minimum et du maximum de l'humidité relative quotidienne qui ne sont pas disponibles dans tous les modèles sélectionnés. L'ETP a également été calculée en utilisant l'approximation de Hargreaves

qui consiste à remplacer le rayonnement visible par une fonction de la température et d'un coefficient ajustable.

Ces différentes estimations des valeurs de l'ETP ont été analysées en vue de quantifier l'influence de la méthode de calcul sur les tendances estimées qui en résultent. Globalement, l'ETP tend à augmenter entre 1976-2005 et 2071-2100, quel que soit le type de calcul et le modèle utilisé, les estimations étant comprises entre + 6 à + 29 % en moyenne sur le pays.

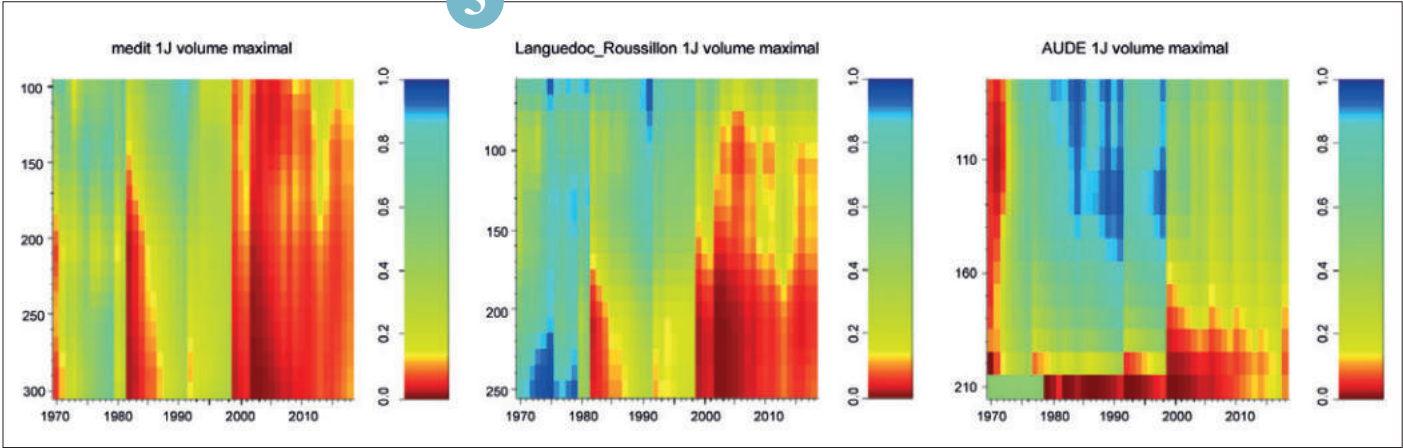
Référence :

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, Patrick Josse, Maryvonne Kerdoncuff, Raphaëlle Samacoits et Flore Tocquer. Avec l'appui scientifique de Christian Pagé (Cerfacs), Samuel Somot et Aurélien Ribes (CNRM) et Robert Vautard (IPSL). Le rapport DRIAS pour les données : LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE - METEO-FRANCE

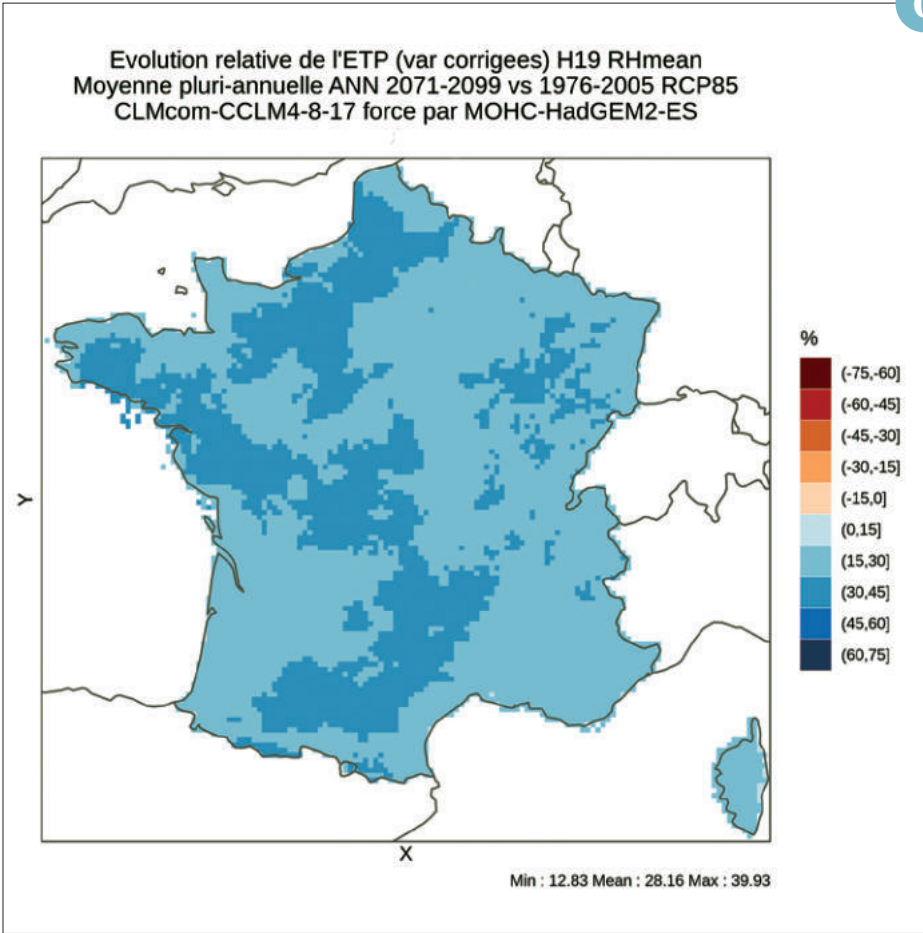
6

5



Estimation de l'évolution du volume maximal précipité lors d'événements de pluies extrêmes. Des tests statistiques sont appliqués pour différents seuils (axe des ordonnées) et pour différentes périodes de temps 1961-yyyy (yyyy correspondant à l'axe des abscisses). Les couleurs bleue et rouge mettent en évidence les tendances significatives à la baisse et à la hausse.

6



Carte montrant l'évolution relative en % de l'ETP FAO avec l'approximation d'Hargreaves utilisée avec le coefficient unique de 0,17 des moyennes pluri-annuelles de 2071-2100 par rapport à celles de 1976-2005 sur la France et pour le modèle climatique régional CLMcom-CCLM4-8-17 forcé par le modèle climatique global MOHC-HadGEM2-ES et pour le scénario RCP8.5

Prévision saisonnière

Fenêtres de prévisibilité infra-saisonnière en Europe liées à l'oscillation Nord-Atlantique

C. Ardilouze

Fournir des prévisions performantes au-delà de l'horizon typique de la prévisibilité météorologique reste un défi que la communauté scientifique s'efforce de relever. Sous certaines conditions appelées "fenêtres d'opportunité", les prévisions infra-saisonnières peuvent se révéler plus performantes. Afin de mieux identifier et anticiper ces opportunités, les prévisions infra-saisonnières d'hiver produites par les systèmes dynamiques du CNRM et du CEPMMT ont été évaluées conjointement. On a pu constater que le degré de succès des prévisions de température à 3 semaines d'échéance en Europe varie de manière assez concomitante dans les deux systèmes, dont le mode de fonctionnement et d'initialisation

est très différent. En particulier, les prévisions initialisées pendant les phases positives de l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO) ont tendance à être meilleures sur l'Europe à 3 semaines d'échéance dans les deux systèmes. Des analyses composites réalisées à partir d'une réanalyse atmosphérique (ERA5), une simulation climatique préindustrielle (piControl) et les deux systèmes de prévision révèlent des structures très similaires de température (voir figure) et de pression réduite au niveau de la mer trois semaines après des conditions initiales en régime NAO. En outre, la régression de ces champs sur l'indice NAO antérieur de 3 semaines dans une réanalyse montre des structures semblables sur l'Europe mais aussi sur

d'autres régions de l'hémisphère nord extratropical, ce qui suggère une téléconnexion retardée, liée à la persistance ou à la récurrence des phases positives et négatives de la NAO. Cette téléconnexion, conditionnée par l'intensité de la phase initiale de la NAO, est donc bien prise en compte par les systèmes de prévision. Elle constitue donc un mécanisme clé pour déterminer un niveau de confiance a priori dans les prévisions infra-saisonnières d'hiver sur l'Europe ainsi que sur d'autres régions de l'hémisphère nord. Cette étude démontre aussi le bénéfice d'utiliser de façon cohérente des outils pour la prévision météorologique, la prévision saisonnière et les projections climatiques, ce qui est le cas au CNRM.

Référence :

Ardilouze, C., D. Specq, L. Batté, C. Cassou, 2021: Flow dependence of wintertime subseasonal prediction skill over Europe. *Weather and Climate Dynamics*, doi:10.5194/wcd-2-1033-2021

7

Le nouveau système 8 de prévision saisonnière à Météo-France

J.-F. Guérémy, L. Batté, C. Viel

Le Système 8 (S8) de prévision saisonnière de Météo-France a remplacé depuis juillet 2021 le Système 7 (S7) dans le multi-système du programme Copernicus Climate Change Service (C3S). Il repose sur une version à haute résolution (55 km pour l'atmosphère et 28 km pour l'océan) du modèle couplé de climat CNRM-CM.

Par rapport au S7, deux axes d'amélioration ont été mis en œuvre. Un nombre de niveaux verticaux d'ARPEGE-Climat accru (de 91 à 137) permet une meilleure discrétisation verticale, induisant une activité convective amplifiée et diminuant les biais positifs du géopotential à 500 hPa dans les tropiques. Dans la stratosphère, la simulation de l'oscillation quasi-biennale a été améliorée.

Le deuxième axe a consisté à modifier la stratégie d'initialisation du modèle couplé. L'objectif est d'augmenter la cohérence entre les états initiaux et les états résultant de l'intégration du modèle couplé, mais également entre les prévisions en temps réel et les re-prévisions qui permettent de calibrer les prévisions et évaluer la performance prédictive du système. Pour ce faire, le S8 est initialisé à partir d'états du modèle CNRM-CM relaxé vers des réanalyses et analyses atmosphériques (ERA5) et océaniques (Mercator Ocean International).

Le score d'aire sous la courbe ROC évalue la capacité de discrimination d'un système pour un événement probabiliste. La figure issue du site <http://seasonal.meteo.fr>

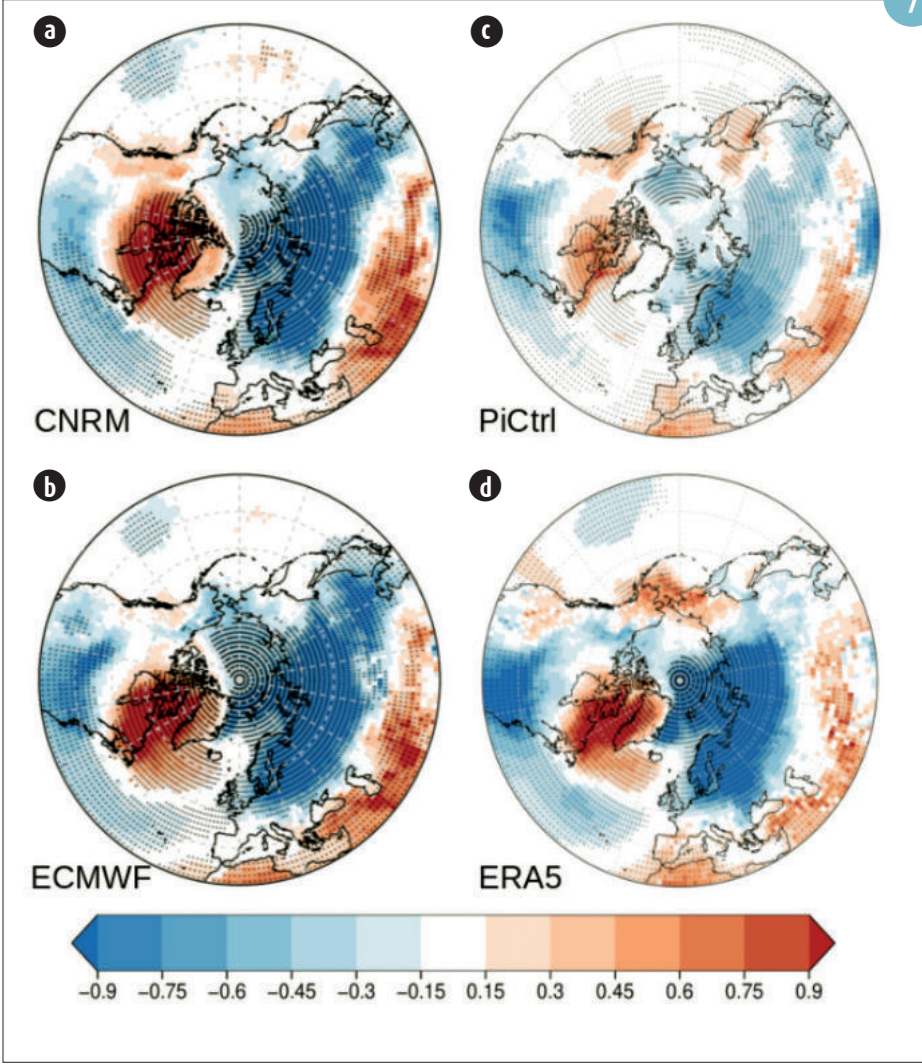
présente ce score pour la température à 2m en été sur le globe pour les re-prévisions des S7 et S8, avec ERA5 comme référence. Plus généralement, on note une légère amélioration des scores de T2m sur la plupart des régions de l'hémisphère Nord à toutes les saisons principales et des précipitations tropicales aux saisons d'équinoxe (due à la résolution verticale d'ARPEGE), ainsi que du géopotential à 500 hPa (due à l'initialisation couplée). Ce site présente également les scores du Système 5 du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT), illustrant le positionnement de S8 vis à vis d'autres systèmes à l'état de l'art. Il est prévu que le S8 soit opérationnel jusqu'en 2024.

Référence :

Batté, L., Dorel, L., Ardilouze, C. and Guérémy, J.-F., 2021. Documentation of the METEO-FRANCE seasonal forecasting system 8. Ref. C3S_D330_3.3.1, <http://seasonal.meteo.fr/content/doc-modele>

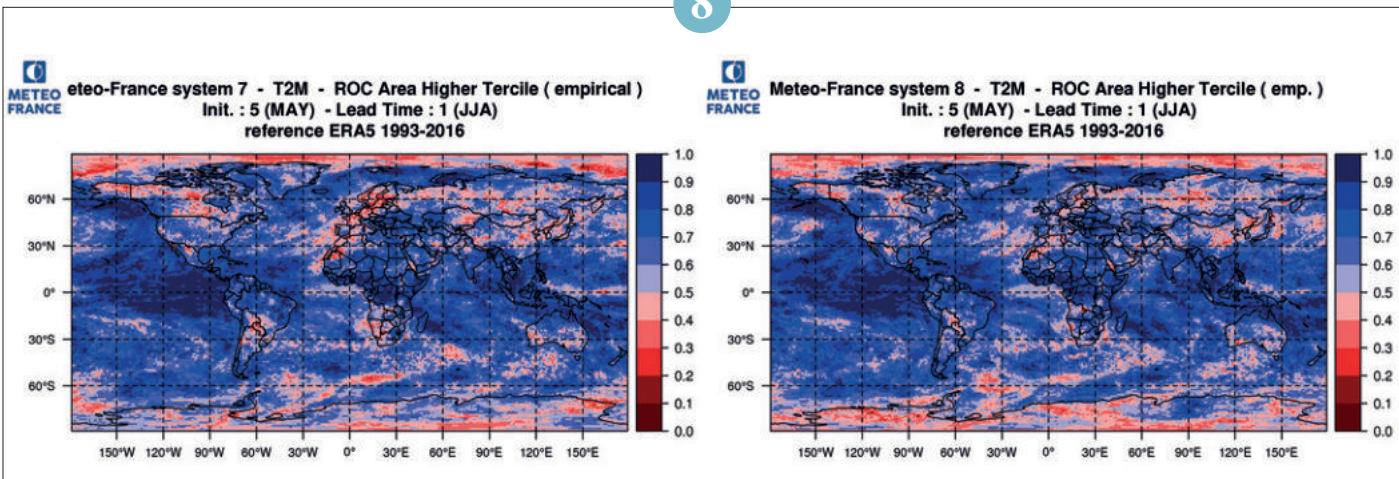
8

7



◀ Anomalies composites de température à 2 mètres (en K) à 3 semaines d'échéance suivant des conditions initiales en régime NAO- dans (a) les prévisions infra-saisonnnières du CNRM (b) les prévisions infra-saisonnnières du CEPMMT (noté ECMWF) (c) la simulation CNRM piControl et (d) la réanalyse ERA5. Les pointillés indiquent les anomalies statistiquement significatives au seuil de 95%.

8



▲ Aire sous la courbe ROC pour le dépassement du tercile supérieur des températures à 2m en été (moyenne Juin-Juillet-Août) pour les re-prévisions démarrées fin avril - 1^{er} mai 1993-2016 des systèmes S7 (à gauche) et S8 de prévision saisonnière de Météo-France. Les terciles sont calculés sur la période de re-prévisions, et la référence est la réanalyse ERA5.

Résultats du projet MEDSCOPE pour les services climatiques à échéance saisonnière en zone Méditerranéenne

P. Etchevers, J.-M. Soubeyroux, C. Viel

Le projet européen MEDSCOPE, auquel Météo-France a participé, vise à promouvoir le développement des services climatiques sur la base de prévisions climatiques saisonnières à décennales. L'un des axes de travail était de démontrer la faisabilité de la mise au point de services climatiques appliqués à l'hydrologie en zone méditerranéenne. Pour ce faire, Météo-France a mis en place une chaîne de modélisation hydro-météorologique couvrant le sud de l'Europe et basée sur le modèle Surfex-Ctrip et la réanalyse à haute résolution UERRA. Ce modèle est alimenté par des prévisions

atmosphériques saisonnières descendues en échelle avec la méthode ADAMONT. Un ensemble d'indicateurs a ensuite été élaboré à partir des résultats de la modélisation pour l'humidité des sols, l'équivalent en eau du manteau neigeux et les débits sur les bassins de l'Ebre, du Rhône et du Pô. Ces indicateurs ont été construits en étroite collaboration avec des agences de bassin afin de répondre au mieux à leurs besoins et de les associer à la validation des résultats.

Ces derniers, ainsi que les scores associés, sont très encourageants (voir la

figure). En particulier, la prévisibilité est bonne au printemps dans les bassins versants dotés d'un important stock nival.

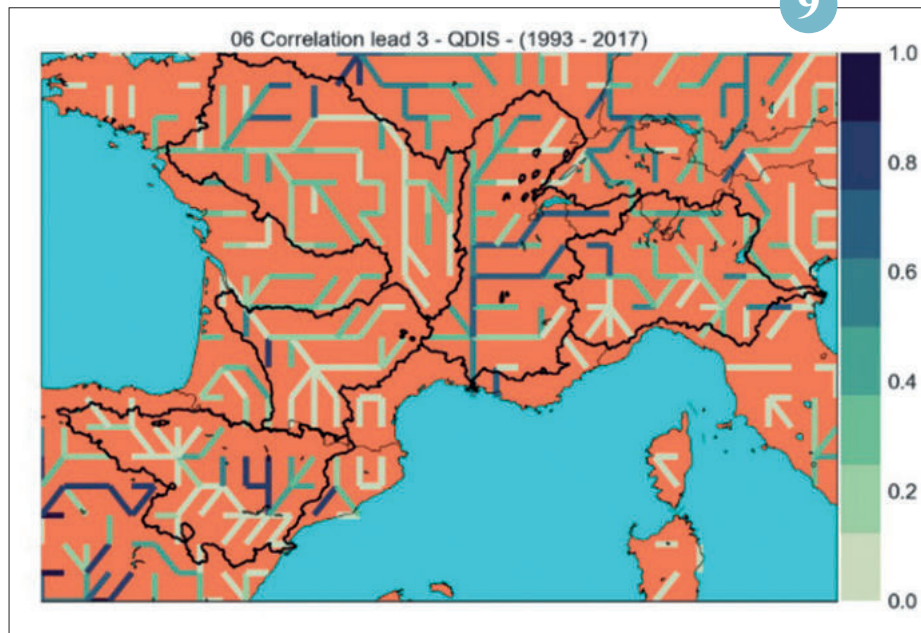
Ces travaux sont entièrement basés sur des outils et données en libre accès provenant du programme du C3S. Comme le montrent l'ensemble des préconisations émises à la fin du projet (Batté et al., 2021), ils ouvrent la voie pour construire des outils opérationnels de prévisions des ressources en eau à l'échelle saisonnière sur l'Europe du Sud.

Référence :

Batté, L., Rodríguez-Guisado, E., Rodríguez-Camino, E., Pérez-Zanón, N., Alvarez-Castro, C., Materia, S., Terzago, S. 2021. Recommendations for further improvements of operational seasonal forecasting systems (D.3.3, MEDSCOPE ERA4CS project). https://www.medscope-project.eu/wp-content/uploads/2021/06/D3.3_Recommendations_improvements.pdf

9

9



Corrélation pour les débits mensuels entre la réanalyse UERRA et la prévision saisonnière initialisée au mois de mars pour le mois de juin (calculs réalisés pour la période de rejeu de la prévision pour la période 1993-2017). On remarque que les bassins versants de montagne présentent en général une bonne prévisibilité en raison de la présence d'un stock nival important.

Chimie, aérosols et qualité de l'air

L'année 2021 a été marquée par plusieurs épisodes remarquables de dépôts de poussières désertiques sur la France. Ces particules peuvent perturber les communications et le transport aérien, réduire la production d'énergie solaire, ou encore affecter la santé humaine en dégradant la qualité de l'air. Elles peuvent cependant avoir un impact positif puisqu'elles constituent un apport important de nutriments pour les écosystèmes marins ou pour des forêts comme l'Amazonie. Par ailleurs, elles peuvent limiter la hausse des températures en interceptant une partie du rayonnement solaire. Ou encore, une fois déposées sur une couche de neige, celle-ci prend un aspect orange, absorbe davantage le rayonnement solaire et fond plus rapidement que de la neige « propre ». Lors de l'épisode de début février 2021, le CNRM a contribué à l'organisation d'une campagne participative de récolte d'échantillons de « neige orange » afin de déterminer leur concentration en poussières de sables. De telles observations permettront d'améliorer nos connaissances de ce type d'événement pour à terme mieux les représenter dans les modèles de qualité de l'air, de prévision du temps et de climat.

Comme les sables désertiques, les panaches émises lors des éruptions volcaniques peuvent perturber le trafic aérien mais aussi affecter la santé humaine, d'où l'importance de prévoir au mieux ces événements. Météo-France est en charge du centre de surveillance des cendres volcaniques (VAAC) de Toulouse couvrant une vaste zone incluant le sud et l'est de l'Europe, la partie ouest de l'Asie et l'Afrique. Ce VAAC a émis plus de 700 messages d'avertissement en 2021, ce qui constitue un record, en raison de plusieurs éruptions volcaniques (Cumbre Vieja aux Canaries, Nyiragongo en République démocratique du Congo, et Etna en Sicile). Lors de chaque éruption, les équipes opérationnelles et de recherche se mobilisent afin de prévoir au mieux la dispersion des panaches volcaniques, composés notamment de cendres et de dioxyde de soufre (SO_2).

Afin de mieux prévoir les panaches de SO_2 , de nouveaux travaux de recherche ont été menés sur le cas d'étude de l'éruption de la Soufrière de Saint Vincent de 2021 en assimilant des colonnes totales issues de l'instrument TROPOMI embarqué sur satellite. D'autres activités ont permis de mieux comprendre l'impact sur l'ozone (pour la qualité de l'air) des composés halogénés présents dans les panaches volcaniques en étudiant l'éruption de l'Etna de Noël 2018. Enfin, les activités de fond sur la chimie en ligne (MOCAGE au sein d'IFS-Chimie) se sont poursuivies, ainsi que l'implantation du schéma complexe d'aérosols secondaires (se formant à partir de précurseurs suite à des réactions chimiques) SSH, pour des études de cas mais aussi pour la calibration et la validation d'autres schémas plus simples activables au sein du modèle.

D. Salas y Melia

1



← Dépôt de sable saharien sur la neige à la station de ski pyrénéenne d'Ax 3 Domaines (Ariège) le 06/02/2021.
© Ludovic Bernède - Météo-France.

1

Bénéfices d'un mini-ensemble pour la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle globale

S. Pelletier-Belamari

Dans le cadre du service européen de surveillance de la qualité de l'air Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS) et du contrat de sous-traitance CAMS42 portant sur la modélisation de la qualité de l'air à l'échelle globale, une première étude visant à évaluer l'apport d'un mini-ensemble pour la prévision à l'échelle globale des concentrations en surface de divers polluants atmosphériques (ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre) a été menée conjointement par le CNRM, l'Institut royal météorologique des Pays-Bas (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, KNMI), l'Institut Max-Planck de météorologie (Max-Planck-Institut für Meteorologie, MPI-M) et l'Institut royal d'aéronomie spatiale de Belgique (BIRA-IASB). Trois simulations ont ainsi été réalisées pour l'ensemble de la période 2019-2020, en temps quasi-réel et sans assimilation d'observations en rapport avec la composition chimique

de l'atmosphère, à l'aide des trois configurations de chimie atmosphérique du modèle IFS du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme, à savoir les modèles IFS(CB05), IFS(MOZART) et IFS(MOCAGE) mis en œuvre par le KNMI, le MPI-M et le CNRM, respectivement.

Les performances des trois membres de l'ensemble ainsi que du modèle médian construit à partir de ceux-ci ont été évaluées par comparaison à des observations de surface issues de réseaux de mesure pour l'Europe, les USA et la Chine. Les résultats obtenus indiquent que les concentrations de surface simulées par les différents modèles sont globalement réalistes. En particulier, la dispersion simulée par le mini-ensemble est comparable à celle des observations. Les performances du modèle médian indiquent un bénéfice de l'utilisation de schémas chimiques différents pour la prévision de l'ozone (polluant secondaire formé à partir

de précurseurs chimiques), mais pas pour le dioxyde d'azote et le dioxyde de soufre qui sont directement émis à la surface.

Il conviendra donc à l'avenir d'étendre cette approche en augmentant la taille de l'ensemble, en utilisant par exemple différentes paramétrisations pour les processus de dépôts sec et humide et des jeux d'émissions différents, afin d'améliorer la prévision des polluants atmosphériques et de quantifier plus précisément l'incertitude affectant leur représentation.

2

Vers une modélisation détaillée des aérosols secondaires dans le modèle de chimie transport MOCAGE

J. Guth

Le modèle de chimie-transport MOCAGE est utilisé pour réaliser quotidiennement des prévisions de qualité de l'air sur l'Europe, qui est un enjeu important de notre société. Parmi les polluants impactant la qualité de l'air, on compte les aérosols, dont les aérosols organiques secondaires (AOS, formés dans l'atmosphère à partir de précurseurs).

La multiplicité des molécules et des schémas réactionnels fait qu'il est très difficile de représenter la complexité des phénomènes physico-chimiques entrant en compte dans la formation des AOS. Dans le modèle MOCAGE, nous avons déjà développé deux schémas simplifiés de modélisation des AOS. Pour aller plus loin, nous travaillons

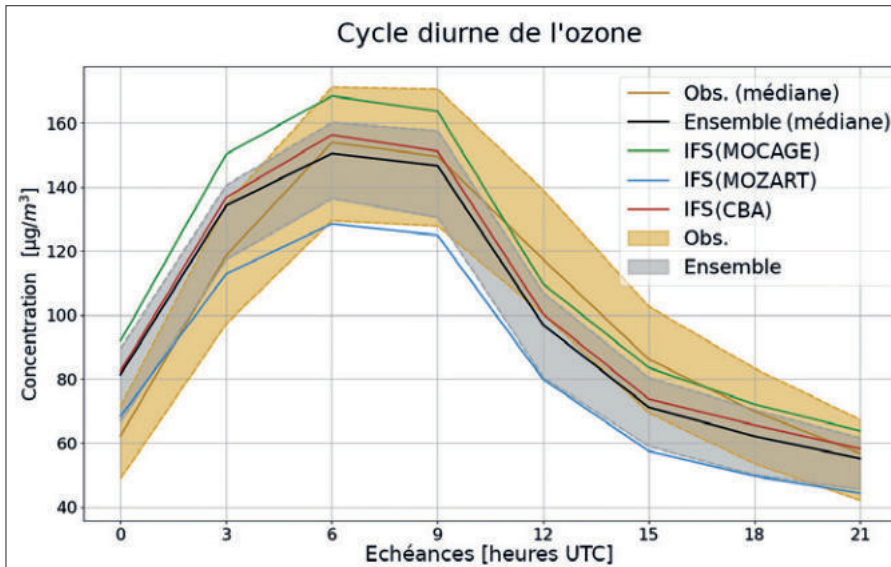
à l'intégration d'un module nommé SSH-Aerosols, développé conjointement par le CEREa et l'INERIS, et capable de représenter l'ensemble des processus affectant les AOS. La figure présente l'évolution sur une journée de deux types d'AOS, issus de la même voie d'oxydation de l'isoprène, mais ayant des caractéristiques physiques différentes. L'espèce BIDER, moins volatile que BIPER, présente des concentrations gazeuses moins élevées. BIPER peut être dégradé par le rayonnement solaire induisant une disparition au cours de la journée.

Le module SSH-Aerosols est trop coûteux en temps de calcul pour une utilisation dans un contexte opérationnel. L'utilisation du module SSH-Aerosols permettra

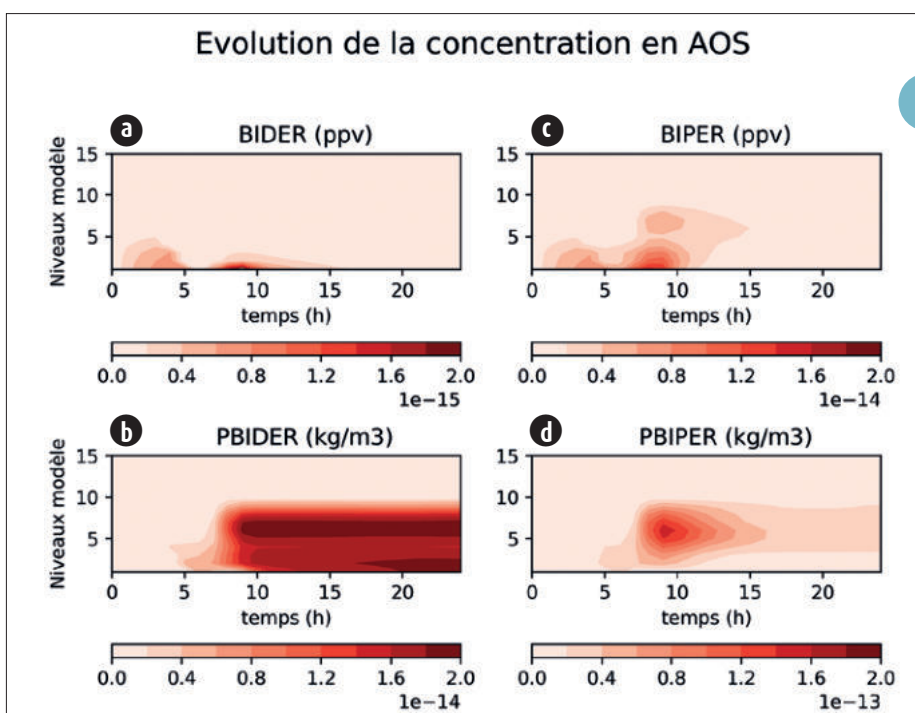
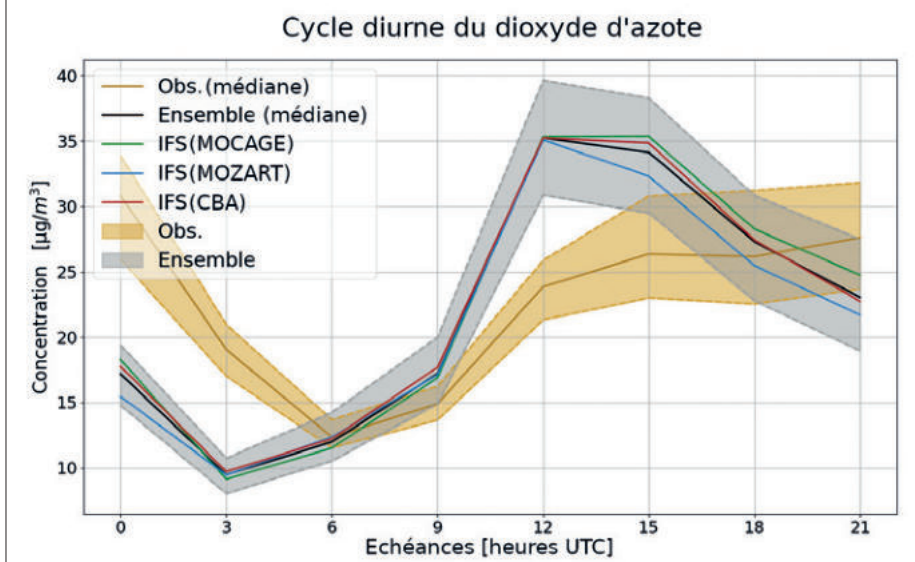
cependant de réaliser des études de cas, afin d'améliorer la compréhension générale des AOS. Il permettra aussi de calibrer et valider les autres représentations des AOS. L'incertitude affectant leur représentation.

3

2



◀ Cycle diurne moyen de l'ozone (en haut) et du dioxyde d'azote (en bas) pour la période Juin-Août 2019 et pour le nord-est de la Chine simulé par les différents membres de l'ensemble IFS(MOCAGE), IFS(MOZART) et IFS(CBA) et par le modèle médian. La médiane des observations est représentée par le trait bistre. La zone grisée (bistre) représente la dispersion (écart interquartile) de l'ensemble (des observations).



3

◀ Évolution sur une journée de la concentration sur la verticale en BIDER gazeux (a) et aérosols (c) et en BIPER gazeux (b) et aérosols (d). Ces résultats proviennent d'une version unidimensionnelle de MOCAGE. BIDER et BIPER correspond à un regroupement de molécules issues de l'oxydation de l'isoprène dans le formalisme de SSH-Aerosols

Utilisation du modèle MOCAGE pour simuler les halogènes volcaniques : cas de l'éruption de l'Etna (Silice, Italie) de Noël 2018

H. Narivelo, V. Marécal

Les halogènes émis par les volcans sont sous forme gazeuse, et très solubles dans l'eau. On a longtemps pensé que leur impact sur la composition de l'air était très limité parce que très rapidement lessivés par les précipitations. C'est assez récemment que l'on a détecté du monoxyde de brome (BrO) sous forme non soluble dans les panaches volcaniques et qu'ensuite on a pu identifier les principaux processus chimiques à son origine. La présence de soufre émis par les volcans dans les panaches permet la production très rapide et importante de BrO et une diminution forte de la concentration en ozone.

Le modèle de chimie-transport MOCAGE est utilisé pour étudier l'impact des émissions volcaniques d'halogènes sur la chimie troposphérique à l'échelle régionale. Le cas

d'étude sélectionné est l'éruption de l'Etna de Noël 2018. Les simulations numériques couvrent la Méditerranée à une résolution horizontale d'environ 20 km et sont réalisées sur la période du 24/12/2018 au 31/12/2018. L'analyse de ces simulations montre que le SO_2 émis le 24/12/2018 est transporté par le panache volcanique traversant la Méditerranée comme montré dans la figure (a). De fortes augmentations de concentration en BrO sont modélisées tout le long du panache (figure (b)) et sont associées à une destruction de l'ozone montrée dans la figure (c). Ces résultats sont cohérents avec les estimations de BrO et SO_2 issues de l'instrument satellite TROPOMI.

4

Assimilation de TROPOMI pour décrire les panaches de dioxyde de soufre volcanique

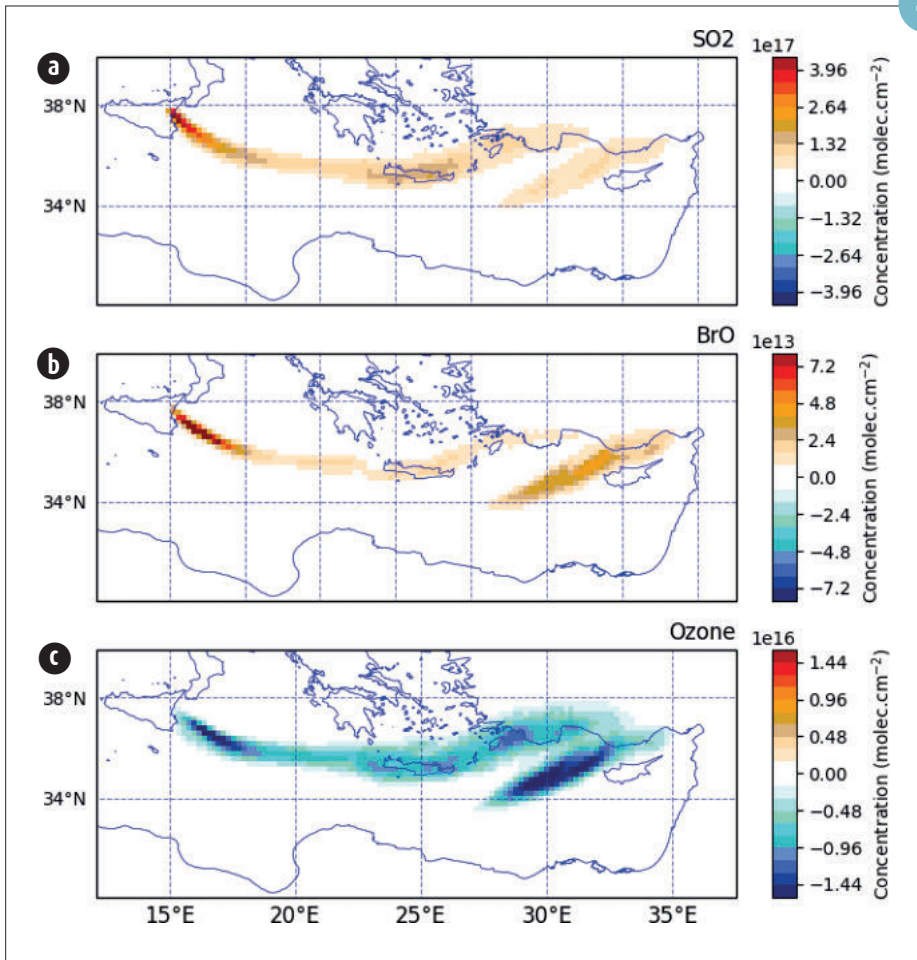
M. Bacles, V. Guidard

Lors d'éruptions volcaniques, du dioxyde de soufre (SO_2) est émis en quantité importante et en altitude dans l'atmosphère, ce qui peut endommager les avions lorsqu'ils traversent ces panaches. Dans le cadre de ses responsabilités, le centre d'avertissement des cendres volcaniques (VAAC) de Toulouse doit prévoir l'évolution des panaches de SO_2 . Ne disposant d'aucune information précise en temps réel sur la quantité de SO_2 émis par le volcan, nous assimilons des colonnes totales de SO_2 provenant de l'instrument TROPOMI, à bord de Sentinel 5 Precursor, dans le modèle MOCAGE.

L'assimilation de ces observations a été testée pour plusieurs éruptions et a montré une qualité accrue de la prévision des colonnes totales de SO_2 . Pour l'éruption du volcan La Soufrière de Saint Vincent entre le 8 et le 22 avril 2021, l'assimilation des colonnes totales de SO_2 de TROPOMI a permis de modéliser un panache de SO_2 (c) qui n'était pas présent sans assimilation (a). Les observations indépendantes de colonnes totales de SO_2 de IASI (b), à bord des satellites Metop B et C, permettent de valider l'apport de l'assimilation avec un panache de la même forme que celui simulé (d). Toutefois, l'assimilation de TROPOMI seul dans MOCAGE entraîne des structures qui ne sont pas observées par IASI. Cette différence s'explique par le fait qu'il y a des observations seulement une fois par jour. Un moyen d'améliorer l'assimilation du SO_2 volcanique serait d'assimiler d'autres instruments afin de couvrir l'évolution temporelle. Prendre en compte l'altitude du panache est également une piste d'amélioration de l'assimilation du SO_2 volcanique.

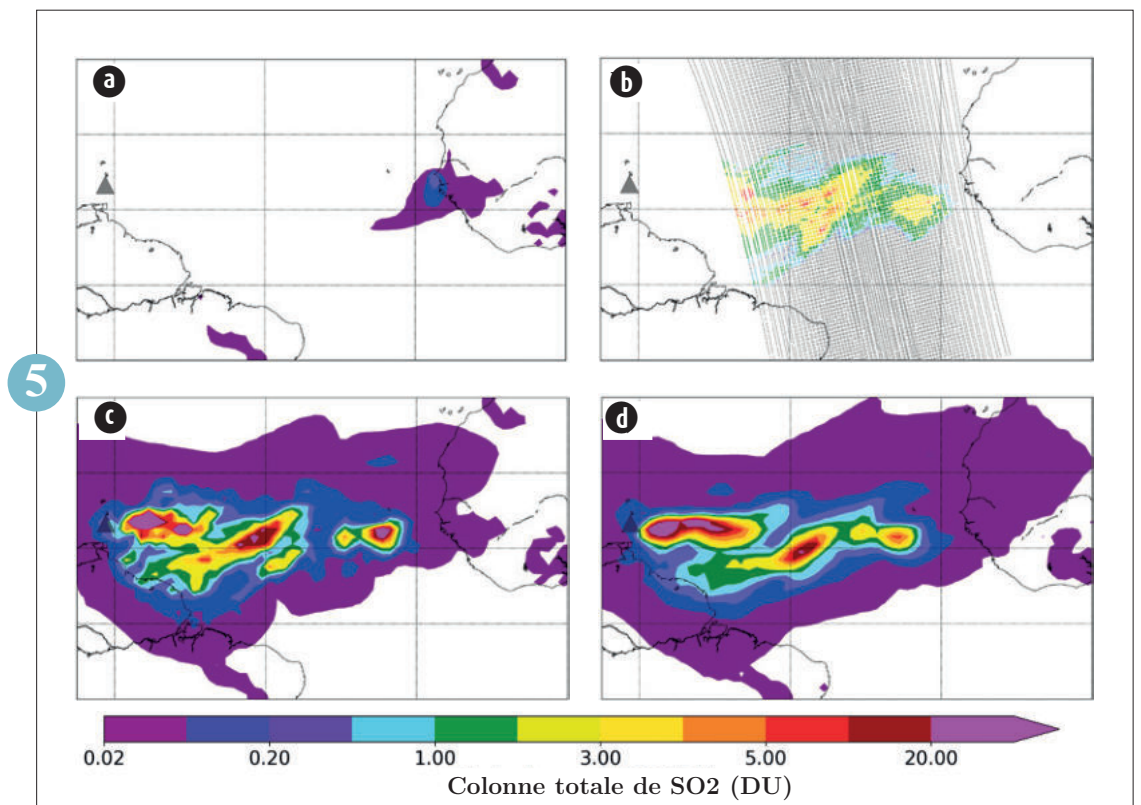
5

4



- (a) Différence de colonne troposphérique de SO_2 entre la simulation avec et celle sans émissions volcaniques en molec/cm^2 à 12h UTC le 25/12/2018.
 (b) Différence de colonne troposphérique de BrO entre la simulation avec et celle sans émissions volcaniques en molec/cm^2 à 12h UTC le 25/12/2018.
 (c) Différence de la colonne troposphérique de l'ozone (O_3) entre la simulation avec et celle sans émissions volcaniques en molec/cm^2 à 12h UTC le 25/12/2018.

Colonnes totales de SO_2 , simulées par MOCAGE avec (c) et sans (a) assimilation le 11 avril 2021 à 17 h. Colonnes totales de SO_2 observées par IASI le 12 avril 2021 entre 0 h et 1 h (b) et simulées par MOCAGE assimilant les données de TROPOMI le 12 avril 2021 à 1 h (d).



5

Du Sahara aux montagnes françaises

M. Dumont, B. Josse, M. Réveillet et F. Tuzet

Début février 2021, un vaste panache de poussières d'origine saharienne s'est déposé sur l'Europe donnant une teinte orange spectaculaire au manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées. Cet événement a été suivi d'autres dépôts courant février, mars et avril. Dans l'urgence, une campagne de science participative a été lancée par le CNRM, le CESBIO, l'IGE et d'autres laboratoires sur les réseaux sociaux. Cette campagne visait à récolter des échantillons de « neige orange » afin de mesurer la masse de poussières de sable déposée au sol (figure a). Cette campagne a permis de récolter 150 échantillons dans les Alpes françaises et suisses, les Pyrénées françaises et espagnoles et le Jura, couvrant une gamme d'altitude de 1000 à 3000 m (figure b), qui ont été analysés par une équipe interdisciplinaire.

L'analyse des échantillons a montré que les masses déposées variaient entre 0,2 et 60 g m⁻². Les valeurs médianes des dépôts se situent autour de 21,2 g m⁻² pour les Pyrénées, 7,2 g m⁻² pour les Alpes françaises et 4,5 g m⁻² pour les Alpes suisses, soit plusieurs milliers de tonnes déposées sur la surface des Alpes françaises (figure b). La masse déposée décroît donc en fonction de la distance à la source, le Sahara. Ces données sont précieuses car elles permettent de mieux contraindre les modèles de chimie atmosphérique mais aussi de connaître avec précision l'impact de ces dépôts sur le couvert neigeux. En effet, en modifiant la couleur de la neige, ces dépôts accélèrent la fonte du manteau neigeux. En combinant les données issues des modèles atmosphériques MOCAGE, ALADIN et de l'analyse atmosphérique

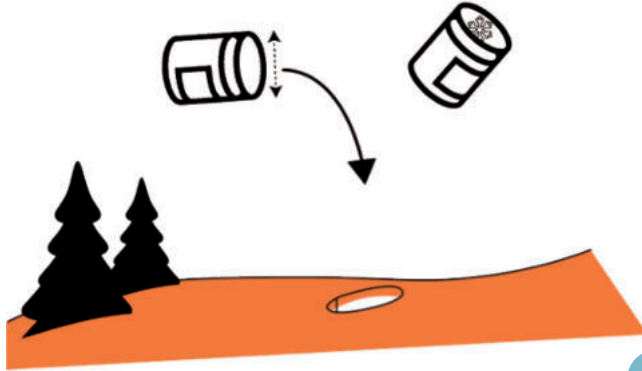
SAFRAN avec le modèle détaillé de manteau neigeux, SURFEX-Crocus, les équipes ont pu estimer l'impact de l'événement. Cet impact varie fortement en fonction de la localisation, et ce, à cause des conditions de neige et des dépôts variables. Un raccourcissement de la saison d'enneigement de plusieurs dizaines de jours peut être attribué à l'événement pour les zones les plus touchées. Les échantillons sont encore en cours d'analyse dans plusieurs laboratoires afin d'en étudier, entre autres, la granulométrie, la minéralogie et les propriétés optiques.

L'analyse de ce jeu de donnée unique va permettre d'évaluer les modèles de chimie-transport, de mieux comprendre les mécanismes de dépôts de poussières en zone de relief et de connaître avec précision l'impact de ces dépôts sur l'enneigement.

Référence :

Marion Réveillet, François Tuzet, Marie Dumont, Simon Gascoin, Laurent Arnaud, et al.. Dépôts massifs de poussières sahariennes sur le manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées du 5 au 7 février 2021 : Contexte, enjeux et résultats préliminaires Version du 3 mai 2021. [Rapport Technique] CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS. 2021 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03216273>

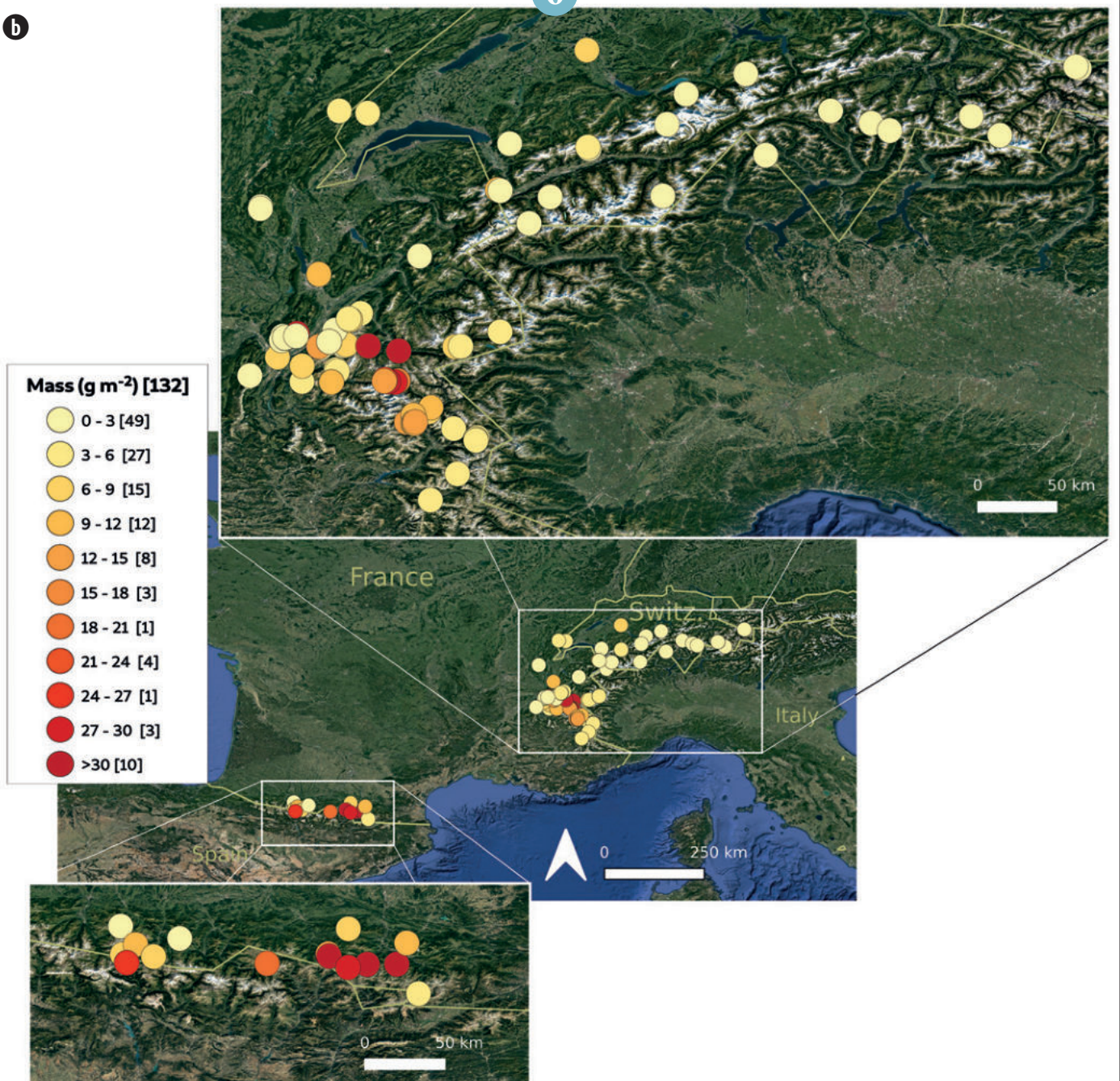
- a 1) Prélevez l'intégralité de la couche de neige orange
- 2) Prendre une photo avec un smartphone (géolocalisé)
- 3) Stockez chez vous (pas besoin de garder au frais)
- 4) Notez le diamètre de votre récipient de prélèvement



(a) Protocole de mesure de prélèvement de neige orange lancé sur twitter par Simon Gascoïn (CESBIO).

6

b



(b) Cartes des échantillons de neige orange prélevés, la couleur indique la masse de poussière de sable mesurée pour chaque échantillon.

Neige et montagne

La neige est un pilier du fonctionnement du système climatique terrestre. Elle joue un rôle essentiel de régulation climatique, de ressource en eau. Elle interagit avec toutes les composantes de la cryosphère, glaciers, calottes, pergélisol, contrôlant ainsi en partie l'évolution de ces différents systèmes. C'est également un élément clé pour les sociétés humaines et les milieux naturels. Enfin la neige est à l'origine de risques naturels comme les avalanches.

Météo-France, notamment le Centre d'Etudes de la Neige (CEN, Météo-France – CNRS, CNRM), conduit des recherches pour mieux comprendre l'évolution de la neige dans le passé et prévoir son évolution future à court et plus long terme.

Blanche, orange, ventée, transportée, à l'échelle du micron ou de toutes les Alpes, la neige en 2021 nous en a fait voir de toutes les couleurs. Le développement d'une nouvelle chaîne de modélisation du manteau neigeux en montagne à 250 m de résolution et avec assimilation s'est poursuivi efficacement, avec entre autres la mise en place d'un modèle de transport de neige par le vent de résolution spatiale hectométrique. Suite à l'évènement majeur de dépôts de poussières de sable sahariennes en février, une campagne de science participative sur la neige orange a été conduite. Le projet ERC IVORI a également été lancé en février avec entre autres, les premières images de tomographie rayon X in situ sur le site du Col de Porte. Des méthodes d'intelligence artificielles ont été appliquées pour la descente d'échelle du vent en montagne et la stabilité du manteau neigeux. Les activités dans le domaine de l'étude du climat de montagne ont poursuivi leur développement et leur valorisation avec la mise en ligne d'une nouvelle version de la réanalyse SAFRAN-Crocus (S2M) des conditions nivo-météorologiques en montagne depuis 1958.

M. Dumont

Les observatoires de haute altitude au service de la compréhension des biais d'AROME en montagne

I. Gouttevin

La connaissance des conditions météorologiques en montagne revêt différents enjeux économiques, sociétaux, et pour la gestion des risques et ressources naturelles.

Cependant les modèles de prévision numérique du temps à haute résolution, comme AROME, montrent des biais systématiques dans ces zones de terrain complexe difficiles à appréhender par la modélisation. En particulier, AROME-France présente en haute altitude un biais froid hivernal pour la température à 2 m, pénalisant notamment pour la modélisation du manteau neigeux et de l'évolution de sa structure.

Afin de caractériser l'origine de ce biais, des chercheurs du CNRM (GMAP et CEN),

en collaboration avec ECCO, se sont appuyés sur des outils de modélisation (plateforme SURFEX), et sur des données météorologiques acquises à deux sites d'observation de haute altitude (> 2 000 m), le Col du Lac Blanc et le Col du Lautaret. Y sont déployés des instrumentations uniques à ces altitudes, permettant l'observation de la plupart des composantes du bilan d'énergie de surface, notamment les composantes du flux de rayonnement.

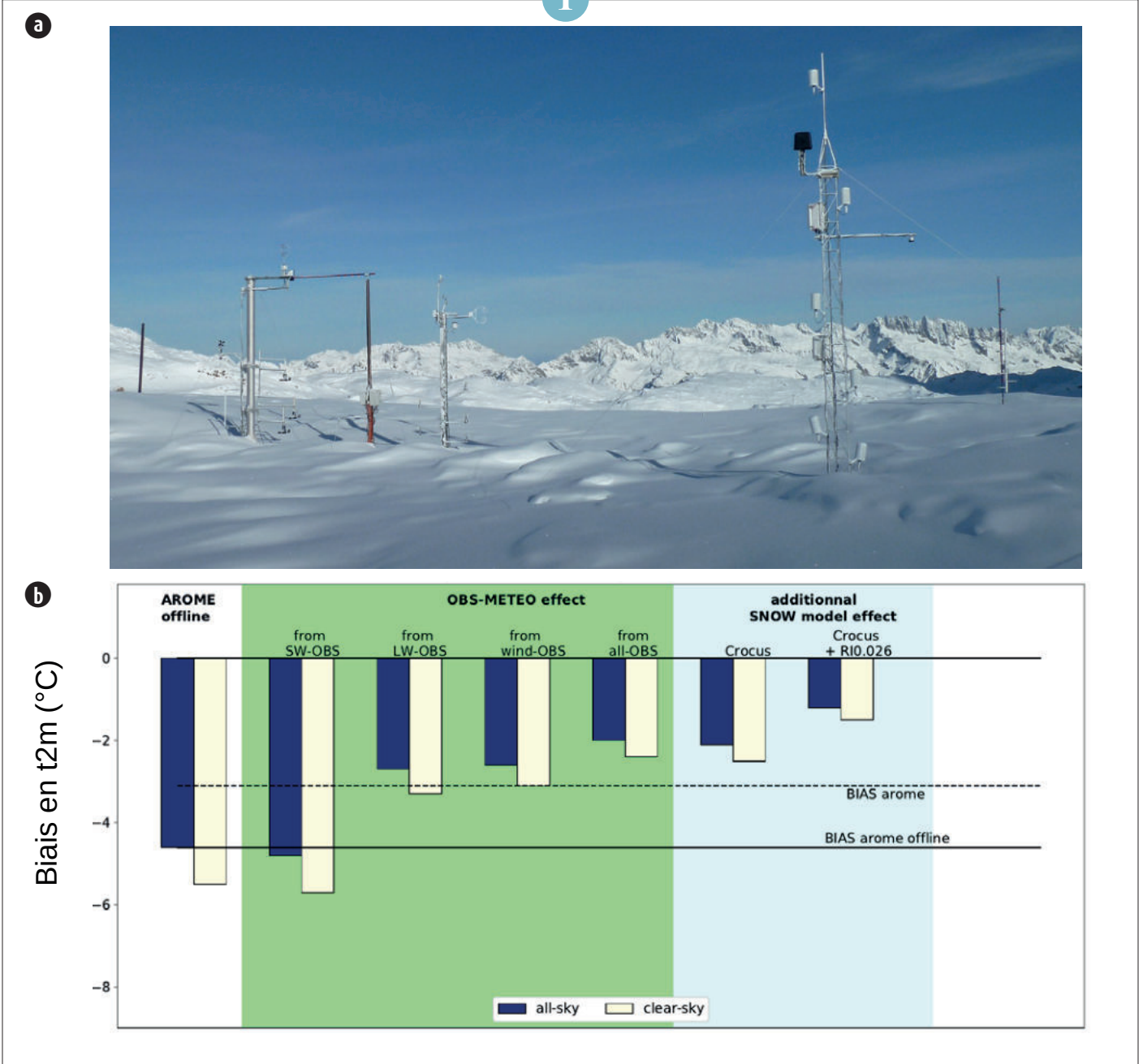
Cette étude révèle que le biais froid en température à 2 m d'AROME, correspond à environ 67 % d'erreurs dans des composantes clefs du bilan d'énergie de surface, en particulier de sous-estimations du rayonnement grandes longueur d'ondes

de l'atmosphère et de la vitesse du vent à ces sites particulièrement exposés. La complexité du schéma de neige joue en revanche un très faible rôle dans ce biais, qui s'avère sensible à la paramétrisation choisie pour les flux turbulents en conditions stables. Ces conclusions sont cohérentes avec les études antérieures et en partie généralisables à l'échelle des Alpes. Le manque d'observations du rayonnement infra-rouge incident limite cependant la portée de cette évaluation, et des actions sont en cours à la Direction des Systèmes d'Observation (DSO, Météo-France), avec le soutien du CNRM, pour la mise en place d'un tel réseau d'observation incluant les zones d'altitude.

Référence :

Arnould, Gabriel ; Dombrowski-Etchevers, Ingrid ; Gouttevin, Isabelle ; Seity, Yann. Améliorer la prévision de température en montagne par des descentes d'échelle. *La Météorologie*, 115, 37-44, 2021. [10.37053/lameteorologie-2021-0091](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0091)

1



▲ (a) Site instrumenté du Col du Lac Blanc (2720 m a.s.l.), opéré par Météo-France et INRAE et (b) évolution du biais en température à 2 m dans différentes simulations offline destinées à mettre en évidence la contribution à ce biais des variables météorologiques (fond vert), et la contribution supplémentaire des paramétrisations du modèle de neige et du couplage avec la surface (fond bleu).

Investigation des biais de température du modèle de prévision Arome en montagne

D. Préaux

En montagne, le modèle de prévision météorologique Arome présente des biais de températures qui pénalisent la prévision des phénomènes à enjeux : un biais froid en altitude, un biais chaud en vallée sous anticyclone et un biais chaud lors d'épisodes neigeux induisant des erreurs de prévision de la limite pluie-neige.

Des tests de sensibilité (simulations avec modification des paramétrisations de la physique, de la dynamique, de la surface...) ont été menés sur la journée du 12 janvier 2021, situation neigeuse problématique dans la vallée de l'Arve (Haute-Savoie).

La version opérationnelle d'Arome totalise une erreur moyenne absolue (MAE) de 2.3°C en vallée sur cette période. L'utilisation d'un nouveau schéma de surface associé à un schéma de neige plus complexe permet de mieux prévoir la température à 2 m à l'arrivée du front chaud en vallée et réduit l'erreur (1.8°C) quelle que soit l'altitude. Le schéma de surface actuel semble donc trop simpliste pour correctement modéliser les interactions sol-atmosphère en montagne sur cette situation. Contraindre Arome avec de l'assimilation de données la journée diminue également le biais en vallée (2.0°C). Cependant, cette expérience dégrade les scores en moyenne et haute montagne. À l'inverse, si l'augmentation de la résolution verticale ne semble pas améliorer les performances du modèle en vallée, la MAE est néanmoins diminuée en passant de 1.4 à 1.1°C en moyenne montagne et de 1.5 à 1.2°C au-dessus de 2 000 m.

Les résultats montrent que le biais chaud lors de cet épisode neigeux présente des origines multiples. Il conviendra donc d'étudier d'autres situations pour les confirmer et les corriger. Pour ce faire, une thèse intitulée *Vers un Arome hectométrique pour la prévision météorologique en montagne et la modélisation des risques* débutera en mai 2022.

Référence :

Arnould, Gabriel ; Dombrowski-Etchevers, Ingrid ; Gouttevin, Isabelle ; Seity, Yann. Améliorer la prévision de température en montagne par des descentes d'échelle. *La Météorologie*, 115, 37-44, 2021. [10.37053/lameteorologie-2021-0091](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0091)

2

Variabilité et tendances du climat et de l'enneigement sur les massifs français sur les 60 dernières années

M. Vernay, D. Monteiro, M. Reveillet

La connaissance des conditions météorologiques et d'enneigement dans les zones de montagne est nécessaire pour de nombreux enjeux environnementaux et socio-économiques, mais elle se heurte à des difficultés liées notamment à leur forte variabilité spatiale et l'absence d'observations en particulier à haute altitude. La réanalyse SAFRAN – SURFEX/ISBA-Crocus – MEPRA (S2M) contribue à répondre à ce problème pour les montagnes françaises (domaines Alpes, Pyrénées et Corse) sur la période 1958-2020 (Figure a). Ce jeu de données combine les données de modélisation atmosphérique avec des observations météorologiques pour produire une estimation des conditions météorologiques dans ces massifs montagneux, et alimente des simulations de manteau neigeux utilisant le modèle Crocus (voir Vernay et al., 2022, pour plus d'informations). Ce jeu de données est désormais en libre accès pour les applications de recherche, doté d'une description de ses principales caractéristiques et limitations, en particulier la difficulté de reproduire les tendances climatologiques passées sur une période au cours de laquelle le nombre d'observations disponibles a augmenté de façon spectaculaire (Figure b). Une amélioration de la qualité de la simulation au cours du temps a été mise en évidence. Ce jeu de données climatologiques robuste et complet des variables de surfaces passées

peut, parmi d'autres usages, être utilisé comme une référence pour évaluer d'autres simulations climatiques en montagne.

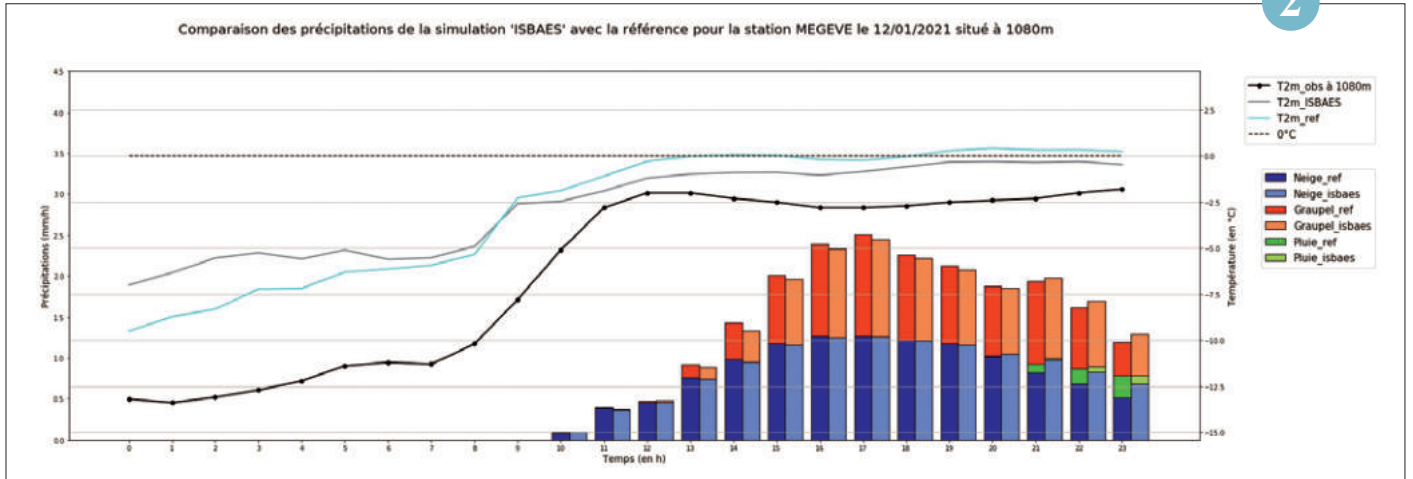
Ainsi la réanalyse S2M a été utilisée pour évaluer le potentiel et les limitations de l'utilisation du modèle à haute résolution AROME pour des simulations climatiques en montagne. Bien qu'AROME présente un biais froid plus faible que celui du modèle régional à résolution plus grossière ALADIN, son biais froid reste significatif, en particulier au-dessus de 2 000 m, et associé à une accumulation de neige peu réaliste en certains points. Des travaux en cours essayent de résoudre ce problème majeur, une condition nécessaire pour que les études d'impact du changement climatique puissent bénéficier de la valeur ajoutée de la haute résolution d'AROME et de sa capacité prometteuse à simuler la variabilité spatiale des précipitations (Monteiro et al., 2022).

Références :

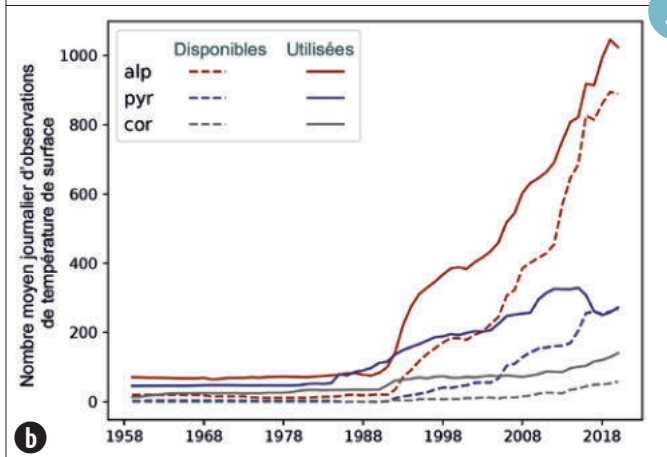
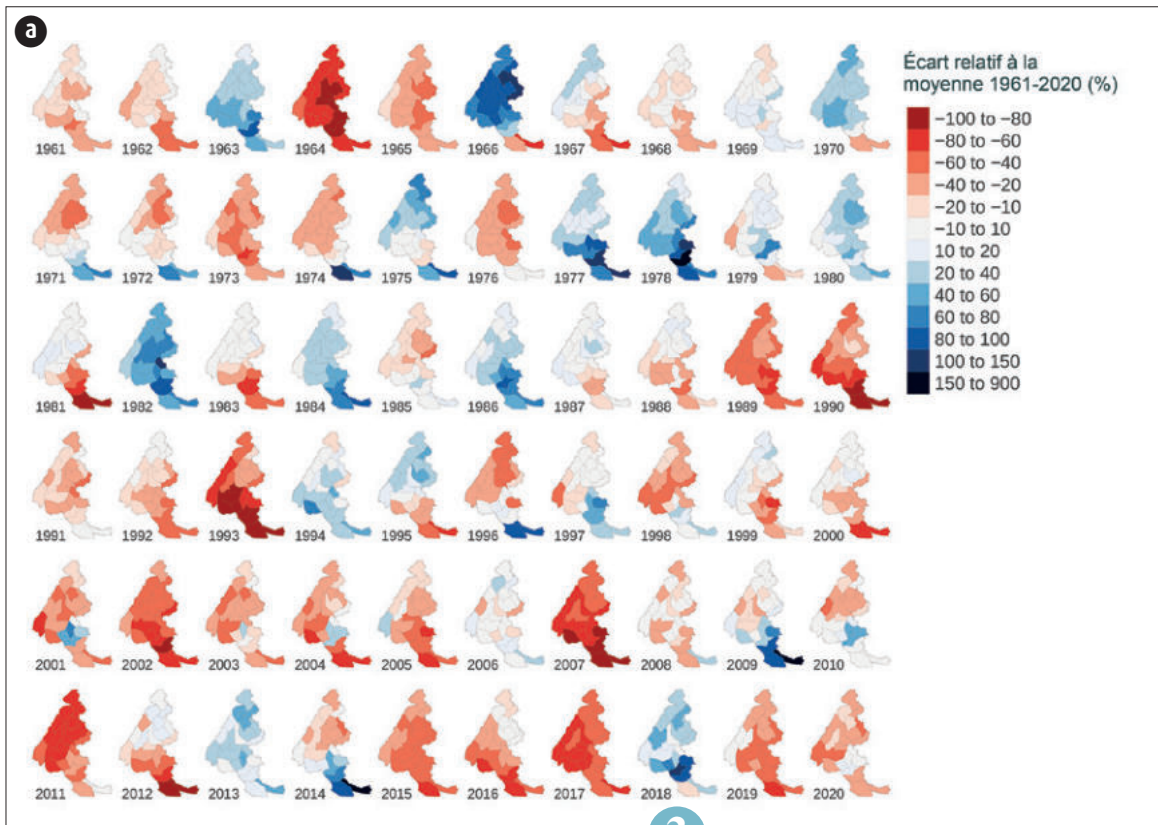
Vernay, M., Lafaysse, M., Monteiro, D., Hagenmuller, P., Nheili, R., Samacoïts, R., Verfaillie, D., and Morin, S. : The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas : description and evaluation (1958–2021), *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 1707–1733, <https://doi.org/10.5194/essd-14-1707-2022>

Monteiro, D., Caillaud, C., Samacoïts, R., Lafaysse, M., & Morin, S., Potential and limitations of convection-permitting CNRM-AROME climate modelling in the French Alps, *Int. J. Climatol.*, <https://doi.org/10.1002/joc.7637>, 2022

3



▲ Précipitations et température à 2 m simulées et observées à Megève. La neige est représentée par une barre bleue, le graupel (correspondant ici à la neige mouillée) en corail et la pluie en vert. Les couleurs les plus foncées correspondent aux résultats du système opérationnel et les plus claires à une version du système de prévision utilisant au nouveau schéma de neige (ISBA_ES). La température est illustrée par des lignes noires pour les observations, cyan pour l'opérationnel et grises pour le système avec le nouveau schéma de neige.



▲ (a) Écart moyen de hauteur de neige (en mètres) par rapport à la hauteur de neige moyenne de la période 1961-1990 en hiver (de Novembre à Avril) à 1800 m d'altitude.

▲ (b) Evolution temporelle du nombre moyen d'observations de température de surface disponibles à l'intérieur des massifs (en tirets) et effectivement assimilées par le modèle (en traits pleins) pour chaque région montagneuse au cours de la période couverte par la réanalyse S2M.

L'observatoire nivo-météorologique du Col de Porte, témoin historique du changement climatique en montagne

Y. Lejeune et al.

L'observatoire du Col de Porte (alt. 1 325 m), situé près de Grenoble au cœur du massif de la Chartreuse, est avec le site du Lac Blanc (2 720 m, massif des Grandes Rousses) un des deux sites d'altitude d'expérimentation et d'observation du Centre d'Etudes de la Neige (entité du CNRM localisée à Grenoble). Ses 61 années de mesures hivernales livrent une chronique fiable et précieuse de l'évolution du climat en montagne. Par sa longueur temporelle et sa qualité instrumentale, cette chronique fait désormais référence pour l'étude du suivi de l'enneigement dans les Alpes du Nord et plus largement en moyenne montagne. Elle révèle entre les moyennes annuelles (du 1^{er} décembre au 30 avril) des deux normales 1960-1990 et 1990-2020, une réduction de 37.7 cm de la hauteur de neige accompagnée d'une hausse de température de 1.01 °C

et aucune tendance significative sur les précipitations. Ces observations constituent un des indicateurs de suivi de l'impact du changement climatique en France, rassemblés par l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (ONERC). Site emblématique pour l'étude de la neige à Météo-France, l'observatoire est une composante de nombreuses structures d'observation pour l'expérimentation et la recherche en environnement aux échelles locale (Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble), nationale (Service National d'Observation GlacioClim, Infrastructure de Recherche OZCAR), européenne et mondiale (Infrastructure de Recherche européenne eLTER, Réseau de sites de la Veille Cryosphérique Mondiale GCW de l'OMM). De plus, l'observatoire est aujourd'hui une référence environnementale

parfaitement reconnue des gestionnaires locaux de la montagne (Parc Naturel Régional de Chartreuse, Grenoble-Alpes Métropole). Outre celle d'ordre climatique, les activités sur l'observatoire se rapportent :

- aux études in-situ des interactions entre conditions météorologiques et processus physiques d'évolution du manteau neigeux (tant en zone ouverte qu'en zone de forêt),
- aux tests d'instrumentation et de méthodes pour l'observation de la neige et des conditions météorologiques à sa surface,
- à la conduite de campagnes expérimentales spécifiques.

L'observatoire est aussi un lieu prisé pour la transmission vers tous les publics de l'état de nos connaissances sur le matériau neige et le climat.

Référence :

Lejeune, Y., Dumont, M., Panel, J.-M., Lafaysse, M., Lapalus, P., Le Gac, E., Lesaffre, B., and Morin, S. : 57 years (1960–2017) of snow and meteorological observations from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m of altitude), *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 71-88,, 2019. <https://doi.org/10.17178/CRYOBSCLIM.CDP.2018>

4

Suivi des orientations cristallines de la neige lors d'une métamorphose de gradient de température

F. Flin, R. Granger

La neige est un matériau poreux constitué d'air, de vapeur, de glace et parfois d'eau liquide. Elle ne cesse de se transformer au cours du temps sous l'effet des conditions imposées dans le manteau neigeux. En particulier, un fort gradient de température entraîne la formation de structures facettées fragiles, souvent à l'origine de départs d'avalanches. Le Centre d'Etudes de la Neige (entité du CNRM à Grenoble) s'est intéressé au rôle de l'orientation cristalline des grains de glace constituant la neige dans le processus de métamorphose. Chaque grain de glace possède en effet une orientation cristalline propre, issue de l'arrangement interne des molécules d'eau et qui peut se

révéler à l'échelle des grains par des formes facettées caractéristiques, en prismes à base hexagonale. Nous avons ainsi eu recours à la « Diffraction Contrast Tomography » (DCT), une méthode permettant d'obtenir des images tridimensionnelles de la structure de la neige ainsi que l'orientation cristalline de chacun des grains la constituant. Cette expérience a été réalisée au Synchrotron de Grenoble (European Synchrotron Radiation Facility ESRF), en obtenant des DCT successives d'un échantillon de neige de quelques mm de côté, soumis à un gradient de température de 52 °C/m (voir figure). Elle a permis de mettre en évidence un rôle marqué de l'orientation cristalline dans la

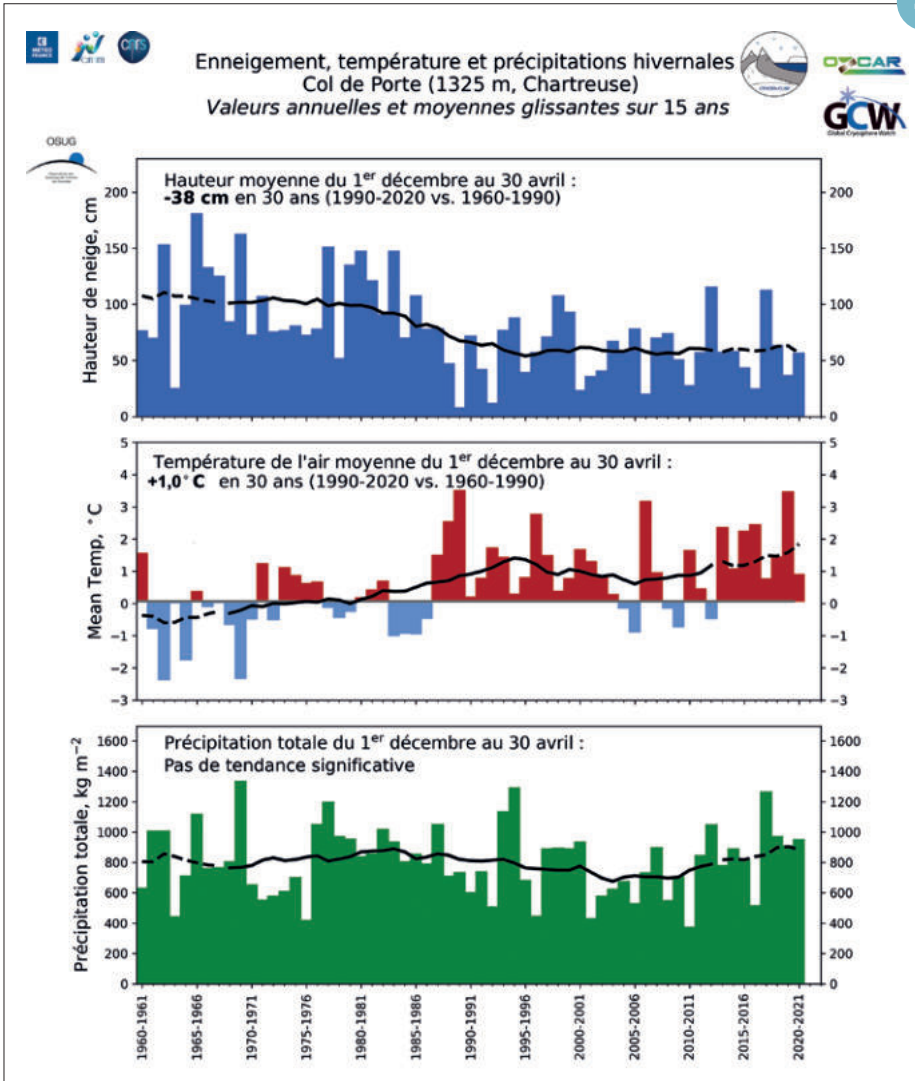
croissance et la sublimation des grains, les surfaces prismatiques évoluant plus vite que les surfaces basales, dans la gamme de températures étudiées (-4 à -2 °C). Les surfaces en croissance ont cependant montré une diminution de ce phénomène au cours du temps, probablement liée à la proximité immédiate des grains de glace voisins. Ces observations traduisent l'importance de l'orientation cristalline dans les processus de métamorphose et la possible sélection d'orientations préférentielles par les métamorphoses, ce qui a de nombreuses implications sur la mécanique de la neige et du névé.

Référence :

Granger, R., Flin, F., Ludwig, W., Hammad, I., and Geindreau, C.: Orientation selective grain sublimation–deposition in snow under temperature gradient metamorphism observed with diffraction contrast tomography, *The Cryosphere*, 15, 4381–4398, 2021. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4381-2021>

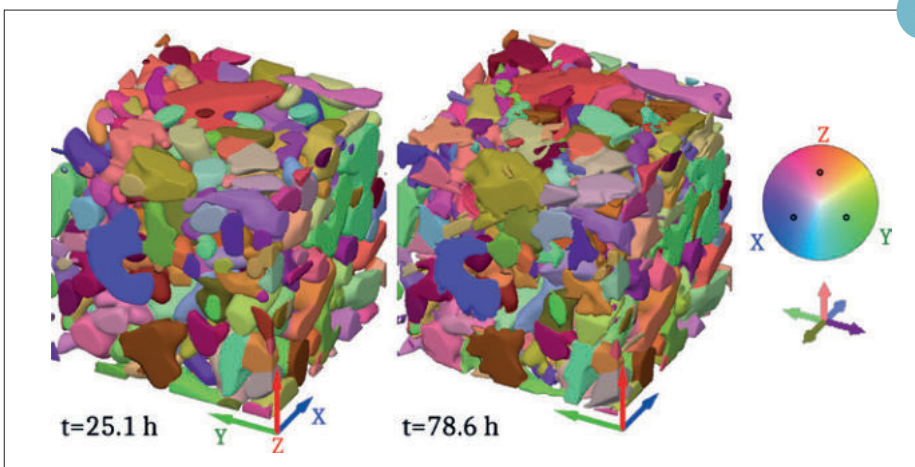
5

4



Indicateur ONERC des hivers au Col de Porte, qui compte parmi les 5 indicateurs « Montagne et Glacier » des impacts du changement climatique en France.

5



Évolution de l'orientation cristalline des grains de glace dans un échantillon de neige soumis à un gradient de 52 °C/m. Chaque couleur représente une seule orientation cristalline. La signification des couleurs est donnée par la roue chromatique, qui représente les orientations dans une figure polaire centrée sur le vecteur X+Y+Z. Les cinq axes sous la roue chromatique montrent la couleur correspondant aux directions principales associées à X, Y et Z.

Météorologie instrumentale et observations

Dans le domaine de la météorologie expérimentale, l'année 2021 a été marquée par la réalisation de la campagne internationale LIAISE en Espagne. Réunissant de nombreux moyens au sol, de télédétection et aéroportés, elle s'inscrit dans un effort de recherche sur l'impact de l'activité humaine – ici les pratiques agricoles – sur le cycle de l'eau. L'exploitation des données sur le brouillard récoltées pendant l'hiver 2019 – 2020 dans le cadre du programme SOFOG3D piloté par le CNRM, bat son plein. Grâce à un dispositif instrumental impliquant des moyens originaux et complémentaires, de premiers résultats ont été obtenus sur la physique du phénomène et les différences qui conduisent à des évolutions contrastées. Le programme a également permis d'exploiter pour la première fois la synergie entre le radar en bande W détectant les gouttes d'eau et le radiomètre micro-onde mesurant des profils de température et des contenus en eau. Elle permet d'améliorer la description initiale des conditions de basse couche, et de ce fait la prévision du phénomène. Les travaux conduits sur le vol collaboratif de flottes de petits drones a franchi une étape importante au début de l'année 2020 pendant la campagne EUREC4A avec l'observation interne de cumulus d'alizée au-dessus de l'océan. Il s'agissait du premier déploiement opérationnel de ce système. Il a tenu ses promesses. Les observations réalisées sur le temps long à partir de réseaux de capteurs permettent de valider les modèles numériques. L'utilisation de mesures de flux UV en est un nouveau cas cette année, avec le programme de recherche MOUV.RE à La Réunion ayant pour objectif la prévision à fine échelle spatiale de ces flux.

A. Dabas

Les projets observation/modélisation des UVs sur le bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien

T. Portafaix

Le Projet MOUV.RE (MOdeling Ultraviolet Radiation at REunion island) a démarré en Septembre 2021 (recrutement d'un ingénieur de recherche sur 24 mois).

L'objectif général de MOUV.RE est de réaliser des modélisations du rayonnement UV à haute résolution spatiale, à différentes échelles temporelles, à la Réunion et dans l'Océan Indien. Ces modélisations seront

confrontées au réseau de mesures opéré par le LACy.

Cet objectif se détaille de la manière suivante :

1 - Modélisation Haute Résolution spatiale du Rayonnement Ultraviolet pour tout type de conditions d'enneuagement et d'aérosols, à la Réunion, prévisions à court terme.

2 - Projection climatique à haute résolution spatiale dans les Tropiques, du rayonnement UV pour tout type de ciel.

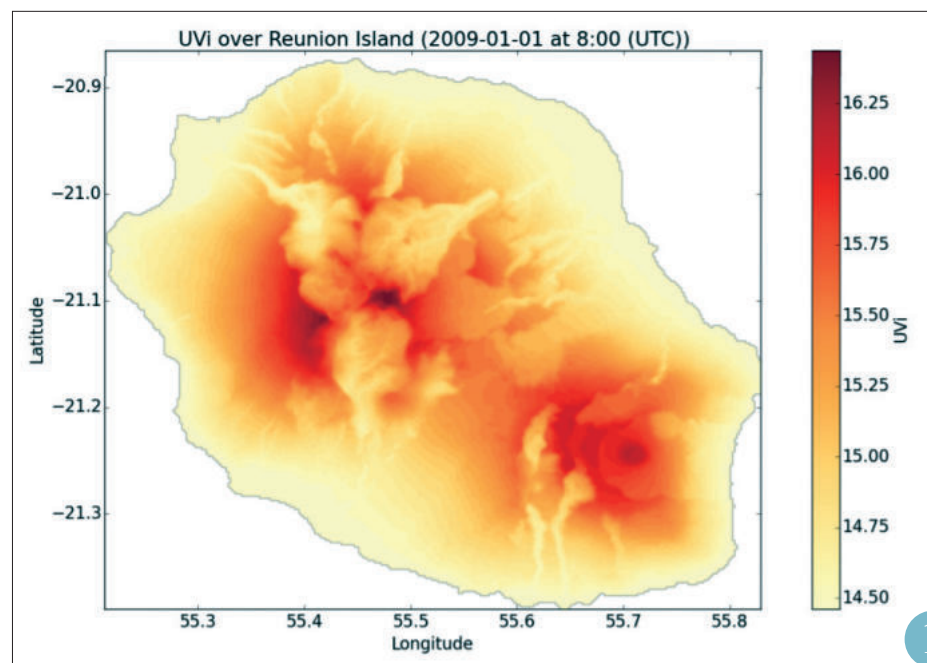
La première phase du projet a démarré et porte sur les éléments suivants:

• Modélisation Haute Résolution à la Réunion (Objectif 1):

-Intégration du modèle de prévision météorologique Arome-Océan Indien utilisé en opérationnel par Météo France, pour étudier l'impact de l'enneuagement sur le rayonnement UV. Couplage en entrée du modèle de transfert radiatif Libradtran.

- Cas d'étude sur l'impact des aérosols issus des feux de biomasse sur le rayonnement.

• Inventaire, collecte et traitement des données de projections climatiques issues des scénarios CMIP6 (6eme exercice de comparaison de modèles couplés de climat) utilisés par le GIEC pour la quantification du changement climatique (Objectif 2).

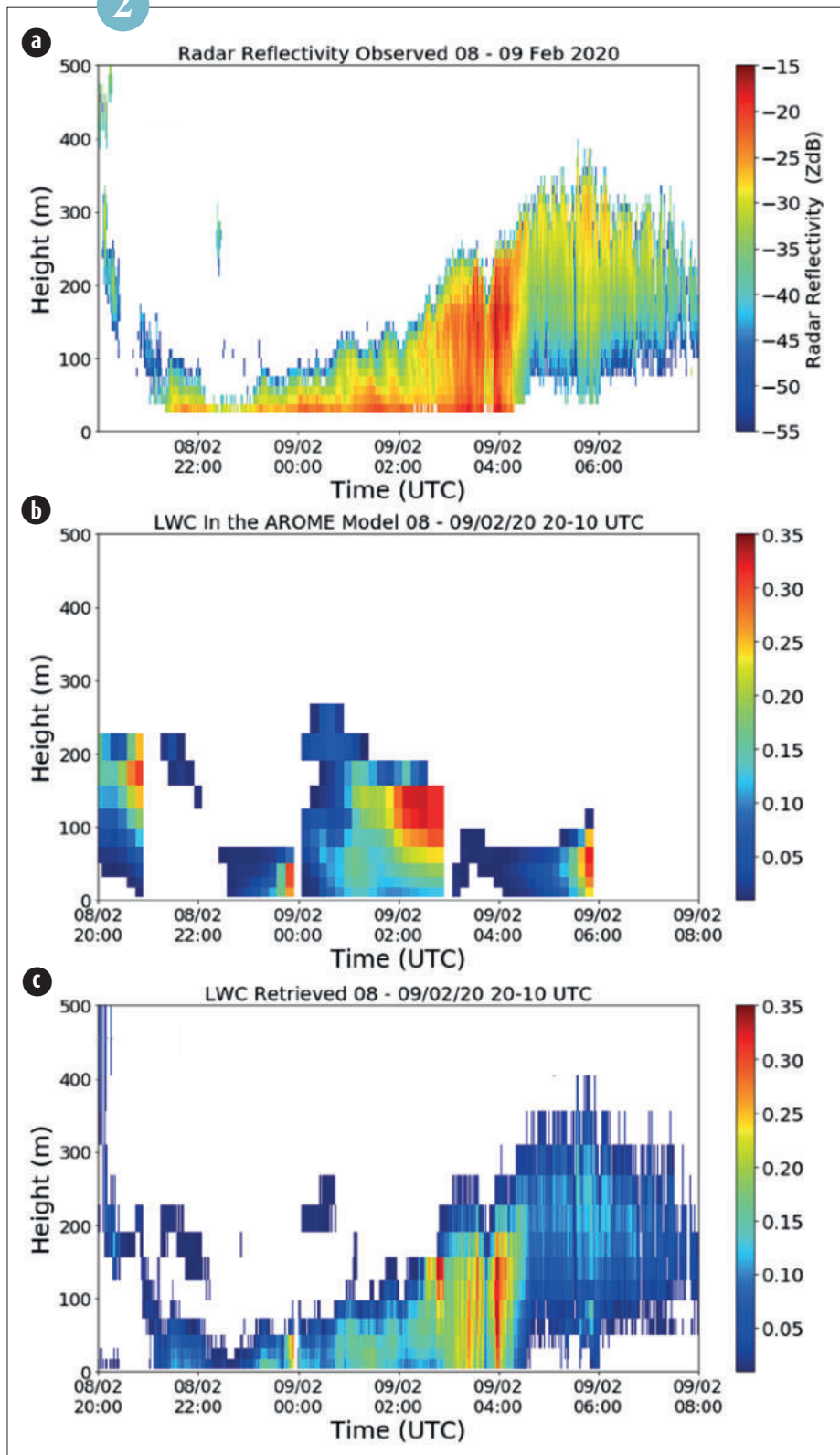


Exemple de carte de prévision d'indice UV à haute résolution sur la Réunion (ici en ciel clair).

Estimation optimale de profils thermodynamiques et microphysiques dans les brouillards à partir de la synergie radar / radiomètre

P. Martinet, A. Bell, O. Caumont

2



Les épisodes de brouillard sont encore mal prévus par les modèles météorologiques en dépit de leur fort impact sociétal. Une piste d'amélioration des prévisions repose sur l'exploitation de nouvelles mesures afin de mieux comprendre les sources d'erreurs de prévision et d'améliorer l'état initial du modèle. Dans ce but, lors de la campagne de mesures SOFOG3D, radiomètre micro-onde et radar nuage à 95 GHz ont été co-localisés afin de tirer profit de la synergie instrumentale pour restituer des profils de température, d'humidité et d'eau liquide en conditions de brouillards ou nuages bas.

Un schéma simplifié d'assimilation 1D a été développé afin de combiner des prévisions courtes échéances du modèle AROME aux observations du radiomètre et du radar. Pour la première fois, des restitutions des profils d'eau liquide dans le brouillard ont pu être menées et validées par comparaison avec des mesures in-situ sous ballon captif. La capacité de l'algorithme à restituer à la fois des contenus en eau liquide avec une erreur de l'ordre de 0.05 g.m^{-3} mais aussi de température et d'humidité avec une erreur inférieure à 1 K et 1 g.kg^{-1} a pu être démontrée. L'assimilation 1D des observations du radar et du radiomètre permet d'autre part de fortement améliorer les profils initiaux du modèle AROME présentant de fortes erreurs par rapport aux mesures in-situ. Ce résultat ouvre des perspectives pour une assimilation future des profils restitués en utilisant un schéma d'assimilation d'ensemble du modèle AROME afin d'améliorer les prévisions de brouillard.

Enfin, ces travaux permettront une description fine des propriétés thermodynamiques et microphysiques des événements de brouillard de la campagne SOFOG3D afin de mieux comprendre les processus physiques mis en jeu dans le cycle de vie du brouillard.

2

◀ Série temporelle (a) des observations de réflectivité radar (dBZ), (b) des profils de contenus en eau liquide (g.m^{-3}) issus des prévisions du modèle AROME, (c) des profils de contenus en eau liquide (g.m^{-3}) obtenus après assimilation 1D des observations de radiomètre micro-onde et radar nuage.

Mesures in-situ du profil vertical des propriétés microphysiques du brouillard

F. Burnet, T. Costabloy

L'objectif principal du projet SOFOG3D (SOuthwest FOGs 3D experiment for processes study), financé par Météo-France et l'ANR, est d'approfondir notre compréhension des processus mis en jeu, afin d'améliorer la prévision du brouillard. Durant la campagne de mesures réalisée lors de l'hiver 2019-2020 dans le sud-ouest de la France, 15 Périodes d'Observation Intensive (POI) ont permis de documenter l'évolution des propriétés microphysiques dans toute la couche de brouillard.

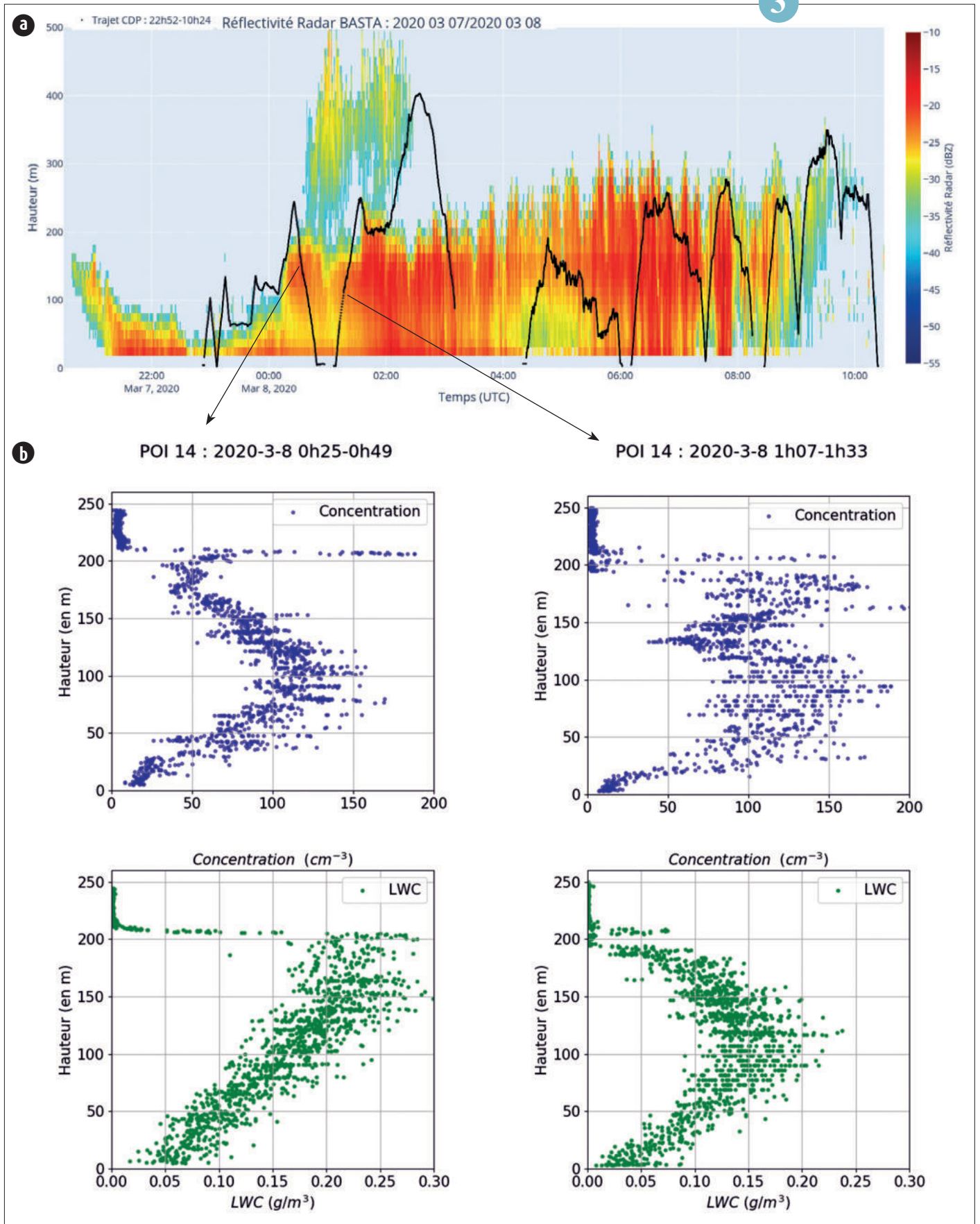
La stratégie d'observation a consisté à combiner les profils verticaux fournis par des mesures in-situ sous un ballon captif qui embarquait une sonde de turbulence et un capteur mesurant les gouttelettes d'eau, avec les instruments de télédétection tel que le radar nuage à 95 GHz et le radiomètre micro-ondes.

Les premières analyses pour deux épisodes avec une couche de brouillard dépassant les 200 m d'épaisseur, montrent une forte variabilité temporelle du profil vertical des propriétés microphysiques (contenu en eau liquide, concentration et diamètres des gouttelettes) entre les différentes phases du cycle de vie du brouillard. En effet on observe un changement important de la structure verticale lorsque le brouillard se développe et devient optiquement épais, puis lorsque il se dissipe en stratus. D'autre part on remarque aussi des différences marquées lors de la phase mature.

La figure b) illustre cette variabilité avec les profils de concentration et de contenu en eau liquide mesurés au cours de deux traversées consécutives entre 0025 et 0133 UTC. La trajectoire du ballon captif est superposée en a) sur la réflectivité radar qui permet de

caractériser le développement du brouillard. Ces observations uniques vont nous permettre de mener une étude originale pour mieux comprendre les différents processus mis en jeu. En particulier nous allons contraster les propriétés des épisodes de brouillard fin et épais, pour documenter la transition entre la formation en conditions stables et la phase développée plus adiabatique.

3



(a) Réflectivité du radar nuage 95 GHz BASTA pour l'épisode de brouillard échantillonné dans la nuit du 7 au 8 mars 2020 (POI 14). La trajectoire du ballon captif embarquant le capteur mesurant les gouttelettes d'eau est représentée par la ligne noire.
 (b) Profils verticaux de la concentration de gouttelettes d'eau (bleu) et du contenu en eau liquide ou LWC Liquid Water Content (vert), pour la descente de 0029UTC à 0049UTC (à gauche) et la montée de 0107UTC à 0133UTC (à droite).

LE PROJET HILIAISE : mieux comprendre et modéliser l’empreinte humaine sur le cycle de l’eau dans une région semi-aride

G. Canut, A. Boone

L’un des plus grands défis auxquels sont confrontées les sciences de l’environnement et la société consiste à comprendre et prédire les changements futurs du cycle de l’eau terrestre et leurs impacts sur les ressources en eau. Des organisations internationales telles que le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (WCRP) ont également reconnu que les activités humaines jouent un rôle clé dans la modification du cycle de l’eau continentale et doivent donc être prises en compte dans les projections climatiques. Cette question est particulièrement critique dans les régions de production agricole intensive où les ressources en eau sont déjà limitées, comme le bassin méditerranéen. Les projections climatiques de la phase 5 du projet d’intercomparaison de modèles couplés (CMIP5) prévoient que la région méditerranéenne sera ce que l’on appelle un «point chaud» du changement climatique au XXI^e siècle. Comprendre les processus qui régissent le cycle hydrologique dans cette région est un objectif clé du projet international HYdrological cycle in the Mediterranean Experiment (HyMeX). Pour répondre à ces questions, le projet international Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment (LIAISE) a récemment été lancé. La composante française s’inscrit dans HyMeX et se nomme HILIAISE - Human Imprint on LIAISE. HILIAISE financé par l’ANR vise à mieux comprendre et modéliser l’empreinte humaine sur l’énergie et le

cycle de l’eau dans une région semi-aride avec des ressources en eau limitées et une production agricole importante. Ce projet repose sur une approche multidisciplinaire avec des modèles hydrologiques, terrestres et météorologiques ainsi que de nombreuses observations simultanées de la surface, de la végétation et de l’atmosphère.

La combinaison d’observations in situ par avion, sur mâts de mesure ou sous ballon et par télédétection par radar profleur de vent et par lidar vapeur d’eau sur des surfaces très contrastées irriguées et non irriguées doit permettre d’aborder les questions suivantes: **1. Quels sont les principaux processus naturels et anthropiques des surfaces semi-arides qui modulent ou contrôlent l’infiltration et le ruissellement et régissent les flux turbulents et leurs hétérogénéités spatiales ?**

2. Comment la surface hautement contrastée influe-t-elle sur le développement de la couche limite, les circulations à méso-échelle et potentiellement le recyclage des précipitations dans cette région via les rétroactions avec l’atmosphère ?

Pour atteindre les objectifs du projet une période spéciale d’observation de 15 jours a eu lieu en juillet 2021 pour compléter une période d’observation longue couvrant le cycle de la végétation d’avril à octobre 2021 sur le bassin de l’Ebre. Au cours de cette campagne de nombreux moyens de mesures ont été déployés afin d’observer les processus contrôlant les interactions

surface-atmosphère quand le contraste entre les zones anthropisées (irriguées) et naturelles (non irriguées) est très marqué et que le besoin en eau est maximal.

Afin d’illustrer le fort contraste entre les deux surfaces étudiées la figure (1a) présente la discontinuité que l’on observe dans cette zone de part et d’autre le canal servant à irriguer par gravitation. La figure (1b) montre le bilan d’énergie de surface sur 1 journée représentative de la période spéciale de mesure sur une zone irriguée et une zone naturelle non irriguée. Cette journée est caractérisée par un partitionnement des flux de transport de chaleur et d’évapotranspiration très différent entre les deux sites. La surface irriguée est caractérisée par des flux d’évaporation largement supérieurs aux flux de transport de chaleur sensible. Ce fort flux va jouer un rôle crucial dans la redistribution de l’eau dans l’atmosphère.

Une base de données complète, regroupant observations, modèles et données satellitaires sera intégrée dans la base de données MISTRALS/Hymex.

Ce projet d’envergure internationale repose sur de fortes collaborations et l’investissement de nombreux laboratoires en particulier le CNRM, LMD, CESBIO, LAERO, IRTA, METOFFICE, Université des Baléares, Université de Barcelone, Université de Wageningen, Université de Delft, Université de Jülich, NASA et l’observatoire de l’Ebre.

4

Flotte de drones pour l’observation des nuages alizés pendant EUREC4A

G. Roberts

Depuis 2018, le projet *NEPHELAE* porté par le CNRM a mis en place un consortium avec les laboratoires du LAAS, et ENAC afin de développer une flotte de drones légers pouvant suivre des cumulus d’alizé de manière adaptative. Les observations sont augmentées en utilisant des techniques de cartographie avancées. Après des vols virtuels dans des simulations numériques de cumulus (Maury et al., 2022), les drones

ont été déployés à La Barbade durant la campagne de mesures *EUREC4A en février 2020* (<https://eurec4a.eu/>).

Plus de 40 vols drones ont pu être ainsi réalisés, avec une vingtaine de nuages alizés suivi dans le temps d’une manière adaptative. Lors de la campagne de mesure, deux drones ont mesuré les propriétés à l’intérieur des cumulus sur deux niveaux verticaux pendant une dizaine de minutes, permettant d’avoir

des informations sur l’évolution du nuage en quatre dimensions. Ces observations inédites ont pu être ainsi comparées aux sorties de simulations numériques et ainsi quantifier les incertitudes qui résident encore dans les modèles des nuages.

Ces travaux ouvrent de grandes perspectives sur des nouvelles formes d’observations.

Références :

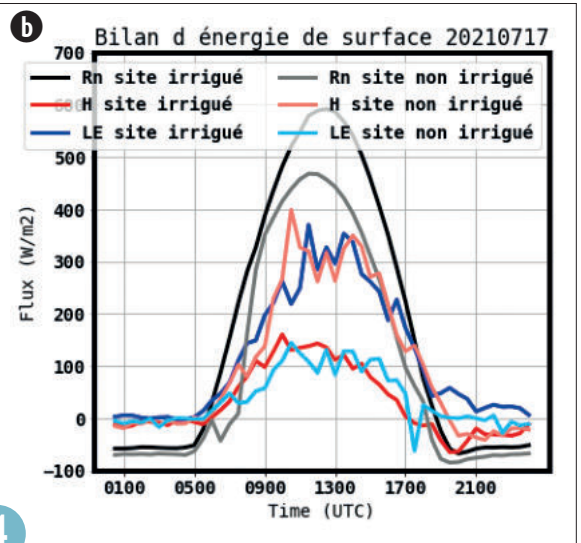
Maury, N., Roberts, G. C., Couvreur, F., Verdu, T., Narvor, P., Villefranche, N., Lacroix, S., and Hattenberger, G.: Use of Large-Eddy simulations to design an adaptive sampling strategy to assess cumulus cloud heterogeneities by Remotely Piloted Aircraft, *Atmos. Meas. Tech.*, 2022. <https://doi.org/10.5194/amt-2021-20>

Hattenberger, G., T. Verdu, N. Maury, P. Narvor, F. Couvreur, M. Bronz, S. Lacroix, G. Cayez, G.C. Roberts, Field report: deployment of a fleet of drones for cloud exploration, 12th International Micro Air Vehicle Conference and Competition, Nov 2021, Puebla, Mexico.

5



(a) Photo aérienne à bord de l'avion de recherche français l'ATR42 au cours de la campagne de mesure en juillet 2021.



4

(b) Evolution journalière du bilan d'énergie de surface sur un site irrigué et non irrigué. Les paramètres représentés sont le rayonnement net (Rn), le flux de chaleur sensible (H) et le flux d'évapotranspiration (LE) pour la journée du 17 juillet 2021.



5

(a) Image de la caméra embarquée sur le drone en volant vers la mer, avec la cote de la Barbade et les cumulus alizés.
 (b) Trajectoires de deux drones volant simultanément en suivant un nuage d'une manière adaptative. La zone E1 est la zone de décollage ; la zone E2 représente la phase de montée ; la zone E3 correspond aux hippodromes dans l'attente d'intercepter un cumulus ; et la zone E4 correspond au suivi adaptatif du cumulus. Tiré de Hattenberger et al. [2021].

Annexes

Liste des publications scientifiques 2021 de la DESR

- Aabaribaoune, M. E., Emili, E. and Guidard, V. Estimation of the error covariance matrix for IASI radiances and its impact on the assimilation of ozone in a chemistry transport model, *Atmospheric Measurement Techniques* (14:4), 2021, pp. 2841–2856. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-179>
- Abalos, M., N. Calvo, S. Benito-Barca, H. Garny, S. C. Hardiman, P. Lin, M. B. Andrews, N. Butchart, R. Garcia, C. Orbe, D. Saint-Martin, S. Watanabe and K. Yoshida (2021), The Brewer-Dobson circulation in CMIP6, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 13571-13591, <https://doi.org/10.5194/acp-21-13571-2021>
- Abdalla S., Kolahchi A., Ablain M., Adusumilli S., Bhowmick S. A.,... Aouf L., ... et al.. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress. *Advances in Space Research*, 2021, 68 (2), pp.319-363. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>
- Aleksovska I., Laure Raynaud, Robert Faivre, François Brun, Marc Raynal. Design and evaluation of calibrated and seamless ensemble weather forecasts for crop protection applications. *Weather and Forecasting*, 2021, 36 (4), pp.1329-1342. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0128.1>
- Amory C, Christoph K, Louis LT, Cécile A, Alison D, Vincent F and Xavier F (2021), "Performance of MAR (v3.11) in simulating the drifting-snow climate and surface mass balance of Adélie Land, East Antarctica", *Geoscientific Model Development*. Vol. 14(6), pp. 3487-3510. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3487-2021>
- Aouf, L., Hauser, D., Chapron, B., Toffoli, A., Tourain, C., & Peureux, C. (2021). New directional wave satellite observations: Towards improved wave forecasts and climate description in Southern Ocean. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091187. <https://doi.org/10.1029/2020GL091187>
- Ardilouze, C., Specq, D., Batte, L. and Cassou, C. Flow dependence of wintertime subseasonal prediction skill over Europe, *Weather and Climate Dynamics* (2:4), 2021, pp. 1033–1049. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-1033-2021>
- Arnould G., Dombrowski-Etchevers I., Gouttevin I. et Seity Y. (2021), "Améliorer la prévision de température en montagne par des descentes d'échelle", *La Météorologie*. Vol. 115, pp. 35-44. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0091>
- Audouin, O., R. Roehrig, F. Couvreur and D. Williamson, 2021: Modeling the GABLS4 strongly-stable boundary layer with a GCM turbulence parameterization: parametric sensitivity or intrinsic limits? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2020MS002269>
- Baars, H., M. Radenz, A. A. Floutsi, R. Engelmann, D. Althausen, B. Hesse, A. Ansmann, T. Flament, A. Dabas, D. Trajon, O. Reitebuch, S. Bley, U. Wandiger: Californian wildfire smoke over Europe: A first example of the aerosol observing capabilities of Aeolus compared to ground-based lidar. *Geophysical Research Letters*, 48, avril 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL092194>
- Balogh, B., Saint-Martin, D. and Ribes, A. A toy model to investigate stability of AI-based dynamical systems, *Geophysical Research Letters* (0), 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL092133>
- Ban, B., Szepszy, G., Allaga-Zsebehazi, G. and Somot, S. ALADIN-Climate at the Hungarian Meteorological Service: from the beginnings to the present day's results, *Idojaras* (125:4), 2021, pp. 647–673. <http://dx.doi.org/10.28974/idojaras.2021.4.6>
- Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., Pichelli, E., Sobolowski, S., Adinoli, M., Ahrens, B., Alias, A., Anders, I., Bastin, S., Belusic, D., Berthou, S., Brisson, E., et al. (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, Part I: Evaluation of precipitation. *Clim Dyn*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- Barre, J., Petetin, H., Colette, A., Guevara, M., Peuch, V.-H., Rouil, L., Engelen, R., Inness, A., Flemming, J., Garcia-Pando, C. P., Bowdalo, D., Meleux, F., Geels, C., Christensen, J. H., Gauss, M., Benedictow, A., Tsyro, S., Friese, E., Struzewska, J., Kaminski, J. W., Douros, J., Timmermans, R., Robertson, L., Adani, M., Jorba, O., Joly, M. and Kouznetsov, R. Estimating lockdown-induced European NO2 changes using satellite and surface observations and air quality models, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:9), 2021, pp. 7373–7394. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7373-2021>
- Barrou Dumont Z, Gascoin S, Hagolle O, Ablain M, Jugier R, Salgues G, Marti F, Dupuis A, Dumont M and Morin S (2021), "Brief communication : Evaluation of the snow cover detection in the Copernicus High Resolution Snow & Ice Monitoring Service", *The Cryospher*. Vol. 15(10), pp. 4975-4980. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4975-2021>
- Barthe, C.; Bousquet, O.; Bielli, S.; Tulet, P.; Pianezze, J.; 3 Claeys, M.; Tsai, C.-L.; Thompson, C.; 4 Bonnardot, F.; Chauvin, F.; et al. Impact of Tropical Cyclones on Inhabited Areas of the SWIO Basin at 5 Present and Future Horizons. Part 2: Modeling Component of the Research Program RENOVRISK-CYCLONE. *Atmosphere* 2021,12, 689. <https://doi.org/10.3390/atmos12060689> hal-03242979
- Baró R., Christian Maurer, Jérôme Brioude, Delia Arnold, Marcus Hirtl. The Environmental Effects of the April 2020 Wildfires and the Cs-137 Re-Suspension in the Chernobyl Exclusion Zone: A Multi-Hazard Threat. *Atmosphere*, 2021, 12 (4), pp.467. <https://doi.org/10.3390/atmos12040467> hal-03277766
- Beaumet, J., Déqué, M., Krinner, G., Agosta, C., Alias, A., and Favier, V.: Significant additional Antarctic warming in atmospheric bias-corrected ARPEGE projections with respect to control run, *The Cryosphere*, 15, 3615–3635, 2021. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3615-2021>
- Beaumet, J., Ménégos M., Morin S., Gallée H., Fettweis X., Six D., Vincent C., Wilhelm B., Anquetin S., Twentieth century temperature and snow cover changes in the French Alps, *Reg. Environ. Change* 21, 114, 2021 <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01830-x>
- Bell, A., Martinet P., Caumont O. Vie. B., Delanoe J., Dupont J.-C. and Borderies, M. W-band radar observations for fog forecast improvement: an analysis of model and forward operator errors, *Atmos. Meas. Tech.* (0). <https://doi.org/10.5194/amt-14-4929-2021>
- Belmadani A, Auger PA, Maximenko N, Gomez K, Cravatte S (2021) Similarities and Contrasts in Time-Mean Striated Surface Tracers in Pacific Eastern Boundary Upwelling Systems: The Role of Ocean Currents in Their Generation. *Fluids* 6:455. <https://doi.org/10.3390/fluids6120455>
- Belmadani A, Dalphiné A, Chauvin F, Pilon R, Palany P (2021) Projected future changes in tropical cyclone-related wave climate in the North Atlantic. *Climate Dynamics* 56:3687–3708. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05664-5>
- Benassi, M., G. Conti, S. Gualdi, P. Ruggieri, S. Matera, J. Garcia-Serrano, F.M. Palmeiro, L. Batté, C. Ardilouze : ENSO teleconnection to the Euro-Mediterranean late-winter : the role of extratropical Pacific modulation. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05768-y>
- Besombes, C., Pannekoucke, O., Lapeyre, C., Sanderson, B. and Thual, O. Producing realistic climate data with generative adversarial networks, *Nonlinear Processes in Geophysics* (28:3), 2021, pp. 347–370. <https://doi.org/10.5194/npg-28-347-2021>
- Bielli S., Christelle Barthe, Olivier Bousquet, Pierre Tulet, Joris Pianezze. The Effect of Atmosphere–Ocean Coupling on the Structure and Intensity of Tropical Cyclone Bejisa in the Southwest Indian Ocean. *Atmosphere*, 2021, 12 (6). [10.3390/atmos12060688](https://doi.org/10.3390/atmos12060688) hal-03243025

- Binder H., Rivière G., Arbogast P., Maynard K., Bossier P., et al.. Dynamics of forecast-error growth along cut-off Sanchez and its consequence for the prediction of a high-impact weather event over southern France. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147 (739), pp.3263-3285.
<https://doi.org/10.1002/qj.4127>
- Bock, J., Michou, M., Nabat, P., Abe, M., Mulcahy, J. P., Olivie, D. J. L., Schwinger, J., Suntharalingam, P., Tjiputra, J., van Hulten, M., Watanabe, M., Yool, A. and Seferian, R. Evaluation of ocean dimethylsulfide concentration and emission in CMIP6 models, *Biogeosciences* (), 2021.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-3823-2021>
- Bogning, S., F. Frappart, A. Paris, F. Blarel, F. Niño, S. Saux Picart, P. Lanet, F. Seyler, G. Mahé, R. Onguene, J.-P. Bricquet, J. Etame, M.-C. Paiz, J.-J. Braun, Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry, *Advances in Space Research*, Volume 68, Issue 2, Pages 672-690, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.045>
- Bouniol, D., F. Guichard, J. Barbier, F. Couvreur, R. Roehrig. Sahelian Heat Wave Characterization From Observational Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, 126 (11),
<https://doi.org/10.1029/2020JD034465>
hal-03357223
- Bouniol, D., Roca, R., Fiolleau, T., Raberanto, P. Life cycle resolved observation of radiative properties of mesoscale convective systems. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2021.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0244.1>
hal-03357262
- Bousquet O., Guilhem Barruol, Emmanuel Cordier, Christelle Barthe, Soline Bielli, et al.. Impact of Tropical Cyclones on Inhabited Areas of the SWIO Basin at Present and Future Horizons. Part 1: Overview and Observing Component of the Research Project RENOVRISK-CYCLONE. *Atmosphere*, 2021, 12 (5), pp.544.
<https://doi.org/10.3390/atmos12050544>
hal-03214000
- Bouyssel, F., Berre, L., Benichou, H., Chambon, P., Girardot, N., Guidard, V., Loo, C., Mahfouf, J.-F., Moll, P., Payan, C. and Raspaud, D. The 2020 Global Operational NWP Data Assimilation System at Meteo-France, *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications* (Vol. IV), 2021, pp. 645–664.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-77722-7_25
- Bouyssel, F., Janiskova, M., Bazile, E., Bouteloup, Y. and Piriou, J.-M. L'évolution opérationnelle du modèle Arpège et de ses paramétrisations physiques, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 47-54.
<http://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0019>
- Boysen L.R., Brovkin V., Wärlind D., Peano D., Lansø A.S., Delire C., Burke E., Poeplau C., Don A., Evaluation of soil carbon dynamics after land use change in CMIP6 land models using chronosequences, *Environ. Res. Lett.* 16 074030, July 2021.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0be1>
- Brenot, H., Theys, N., Clarisse, L., van Gent, J., Hurtmans, D. R., Vandenbussche, S., Papagiannopoulos, N., Mona, L., Virtanen, T., Uppstu, A., Sofiev, M., Bugliaro, L., Vázquez-Navarro, M., Hedelt, P., Parks, M. M., Barsotti, S., Cotelli, M., Moreland, W., Scollo, S., Salerno, G., Arnold-Arias, D., Hirtl, M., Peltonen, T., Lahtinen, J., Sievers, K., Lipok, F., Rüfenacht, R., Haefele, A., Hervo, M., Wagenaar, S., Som de Cerff, W., de Laat, J., Apituley, A., Stammes, P., Laffineur, Q., Delcloo, A., Lennart, R., Rokitsky, C.-H., Vargas, A., Kerschbaum, M., Resch, C., Zopp, R., Plu, M., Peuch, V.-H., Van Roozendaal, M., and Wotawa, G. : EUNADICS-AV early warning system dedicated to supporting aviation in the case of a crisis from natural airborne hazards and radionuclide clouds, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 3367–3405, 2021.
<https://doi.org/10.5194/nhess-21-3367-2021>
- Brilouet, P.-E., Lothon, M., Etienne, J.-C., Richard, P., Bony, S., Lernoult, J., Bellec, H., Vergez, G., Perrin, T., Delanoë, J., Jiang, T., Pouvèsle, F., Lainard, C., Cluzeau, M., Guiraud, L., Medina, P., and Charoy, T.: The EUREC4A turbulence dataset derived from the SAFIRE ATR 42 aircraft, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 3379–3398, 2021.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-3379-2021>
- Brilouet, P.-E., Redelsperger, J.-L., Bouin, M.-N., Couvreur, F., Lebeauin Brossier, C. A case-study of the coupled ocean-atmosphere response to an oceanic diurnal warm layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147 (736), pp.2008-2032.
<https://doi.org/10.1002/qj.4007>
meteo-03429159
- Burgot, T., Auger, L. and Benard, P. Krylov solvers in a vertical-slice version of the semi-implicit semi-Lagrangian AROME model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (), 2021.
<https://doi.org/10.1002/qj.3976>
- Bègue N., Hassan Bencherif, Fabrice Jegou, Hélène Vèrèmes, Sergey Khaykin, et al.. Transport and Variability of Tropospheric Ozone over Oceania and Southern Pacific during the 2019–20 Australian Bushfires. *Remote Sensing*, 2021, 13 (16), pp.3092.
<https://doi.org/10.3390/rs13163092>
insu-03315817
- Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumiere, Q., Laurantin, O., Seity, Y. and Ducrocq, V. Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model, *Climate Dynamics* (56:5-6), 2021, pp. 1717–1752.
<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05558-y>
- Cantet P., Belmadani A., Chauvin F., Palany P. Projections of tropical cyclone rainfall over land with an Eulerian approach: Case study of three islands in the West Indies. *International Journal of Climatology*, 2021, 41 (S1),
<https://doi.org/10.1002/joc.6760>
meteo-03129229
- Carrer, D.; Pinault, F.; Lellouch, G.; Trigo, I.F.; Benhadj, I.; Camacho, F.; Ceamanos, X.; Moparthy, S.; Munoz-Sabater, J.; Schüller, L.; Sánchez-Zapero, J. Surface Albedo Retrieval from 40-Years of Earth Observations through the EUMETSAT/LSA SAF and EU/C3S Programmes : The Versatile Algorithm of PYALUS. *Remote Sens.* 2021, 13, 372.
<https://doi.org/10.3390/rs13030372>
- Carrer, D., Meurey, C., Hagolle, O., Bigeard, G., Paci, A., Donier, J.-M., Bergametti, G., Bergot, T., Calvet, J.-C., Goloub, P., Victori, S. and (2021), W. Z. Casual Rerouting of AERONET Sun/Sky Photometers : Toward a New Network of Ground Measurements Dedicated to the Monitoring of Surface Properties ? *Remote Sensing* 2021, ().
<https://doi.org/10.3390/rs13163072>
- Caumont, O., Mandement, M., Bouttier, F., Eeckman, J., Brossier, C. L., Lovat, A., Nuissier, O. and Laurantin, O. The heavy precipitation event of 1415 October 2018 in the Aude catchment: a meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations, *Natural Hazards and Earth System Sciences* (21:3), 2021, pp. 1135–1157.
<https://doi.org/10.5194/nhess-21-1135-2021>
- Ceamanos, X., Six, B., & Riedi, J. (2021). Quasi-global maps of daily aerosol optical depth from a ring of five geostationary meteorological satellites using AERUS-GEO. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD034906.
<https://doi.org/10.1029/2021JD034906>
- Chauvigné, A., Waquet, F., Auriol, F., Blarel, L., Delegove, C., Dubovik, O., Flamant, C., Gaetani, M., Goloub, P., Loisil, R., Mallet, M., Nicolas, J.-M., Parol, F., Peers, F., Torres, B., and Formenti, P.: Aerosol above-cloud direct radiative effect and properties in the Namibian region during the AEROSOL, RADIATION, and CLOUDS in southern Africa (AEROCLO-SA) field campaign – Multi-Viewing, Multi-Channel, Multi-Polarization (3MI) airborne simulator and sun photometer measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 8233–8253, 2021.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-8233-2021>
- Chauvin F, Pilon R, Palany P, Belmadani A (2021) Correction to: Future changes in Atlantic hurricanes with the rotated-stretched ARPEGE-Climat at very high resolution. *Clim Dyn* 56:683-685.
<https://doi.org/10.1007/s00382-019-05040-4>
- Checa-Garcia, R., Balkanski, Y., Albani, S., Bergman, T., Carslaw, K., Cozic, A., Dearden, C., Marticorena, B., Michou, M., van Noije, T., Nabat, P., O'Connor, F. M., Olivie, D., Prospero, J. M., Sager, P. L., Schulz, M. and Scott, C. Evaluation of natural aerosols in CRESCENDO Earth system models (ESMs): mineral dust, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:13), 2021, pp. 10295–10335.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-10295-2021>
- Cluzet B, Lafaysse M, Cosme E, Albergel C and Meunier L.-F. and Dumont M (2021), "CroCo_v1.0: a particle filter to assimilate snowpack observations in a spatialised framework", *Geoscientific Model Development*. Vol. 14(3), pp. 1595-1914.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-1595-2021>
- Cohen, Y., Marécal, V., Josse, B. and Thouret, V. Interpol-IAGOS: a new method for assessing long-term chemistry-climate simulations in the UTLS based on IAGOS data, and its application to the MOCAGE CCM1 REF-C1SD simulation, *Geoscientific Model Development* (14:5), 2021, pp. 2659–2689.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-2659-2021>
- Colliander, A., R. H. Reichle, W. T. Crow, M. H. Cosh, F. Chen, S. Chan, N. N. Das, R. Bindlish, J. Chaubell, S. Kim, Q. Liu, P. E. O'Neill, R. S. Dunbar, L. B. Dang, J. S. Kimball, T. J. Jackson, H. K. Al-Jassar, J. Asanuma, B. K. Bhattacharya, A. A. Berg, D. D. Bosch, L. Bourgeau-Chavez, T. Caldwell, J.-C. Calvet, et al. Validation of soil moisture data products from the NASA SMAP mission, *IEEE JSTARS*, 15, 364-392, 2022.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124743>
- Costes, A., M. Rochoux, C. Lac, and V. Masson: Subgrid-scale fire front reconstruction for

- ensemble coupled atmosphere-fire simulations of the FireFlux I experiment. *Fire Safety Journal*, 2021, 103475, ISSN 0379-7112. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103475>
- Couvreur, F., F. Hourdin, D. Williamson, R. Roehrig, V. Volodina, N. Villefranque, C. Rio, O. Audouin, J. Salter, E. Bazile, F. Brient, B. Diallo, F. Favot, R. Honnert, M.-P. Lefebvre, J.-B. Madeleine, Q. Rodier and W. Xu, 2021 : Process-based climate model development harnessing machine learning : I. a calibration tool for parameterization improvement. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2020MS002217>
- Cruz-García, R., Ortega, P., Guemas, V., Acosta Navarro, J., Massonnet, F., et al.. An anatomy of Arctic sea ice forecast biases in the seasonal prediction system with EC-Earth. *Climate Dynamics*, 2021, 56 (5-6), pp.1799 - 1813. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05560-4> hal-03413052
- Cécé R, Bernard D, Krien Y, Leone F, Candela T, Péroche M, Biabianny E, Arnaud G, Belmadani A, Palany P, Zahibo N (2021) A 30-m scale modeling of extreme gusts during Hurricane Irma (2017) landfall on very small mountainous islands in the Lesser Antilles. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 21, 129-145. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-2020-241>
- Daniel P. and R. Virasami: Oil spill management and salvage in the Indian Ocean, *WMO Bulletin*, Volume 70 (1) - 2021, pp 109-110. https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/Products_and_services/Oil_spill_Indian_Ocean
- Dayal, K., Bellon, G., Cater, J., Kingan, M., Sharma, R. High-resolution mesoscale wind-resource assessment of Fiji using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Energy*, 2021, 232, pp.121047. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121047> hal-03365460
- Dayal, K., Cater, J., Kingan, M., Bellon, G., Sharma, R. Wind resource assessment and energy potential of selected locations in Fiji. *Renewable Energy*, 2021, 172, pp.219-237. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.034> hal-03365426
- DeLang, M. N., Becker, J. S., Chang, K.-L., Serre, M. L., Cooper, O. R., Schultz, M. G., Schröder, S., Lu, X., Zhang, L., Deushi, M., Josse, B., Keller, C. A., Lamarque, J.-F., Lin, M., Liu, J., Maréchal, V., Strode, S. A., Sudo, K., Tilmes, S., Zhang, L., Cleland, S. E., Collins, E. L., Brauer, M. and West, J. J. Mapping Yearly Fine Resolution Global Surface Ozone through the Bayesian Maximum Entropy Data Fusion of Observations and Model Output for 1990-2017, *Environmental Science & Technology* (55:8), 2021, pp. 4389–4398. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07742>
- Dion, I., Dallet, C., Ricaud, P., Carminati, F., Dauhut, T. et al.. Ice injected into the tropopause by deep convection ? Part 2: Over the Maritime Continent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21 (3), pp.2191-2210. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2191-2021> hal-03169729
- Dorigo, W., Himmelbauer, I., Aberer, D., Schremmer, L., Petrakovic, I., Zappa, L., Preimesberger, W., Xaver, A., Annor, F., Ardö, J., Baldocchi, D., Bitelli, M., Blöschl, G., Bogena, H., Brocca, L., Calvet, J.-C., et al.: The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 5749–5804, 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
- Druckenmiller, M. L., Moon, T. A., Thoman, R. L., Ballinger, T. J., Berner, L. T., Bernhard, G. H., Bhatt, U. S., Bjerke, J. W., Box, J. E., Brown, R., Cappelen, J., Christiansen, H. H., Decharme, et al. (2021). The Arctic. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102, 8, S263-S316. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0086.1>
- Druge, T., Nabat, P., Mallet, M. and Somot, S. Future evolution of aerosols and implications for climate change in the Euro-Mediterranean region using the CNRM-ALADIN63 regional climate model, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:10), 2021, pp. 7639–7669. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7639-2021>
- Du Preez J., Hassan Bencherif, Thierry Portafaix, Kevin Lamy, Caradee Yael Wright. Solar Ultraviolet Radiation in Pretoria and Its Relations to Aerosols and Tropospheric Ozone during the Biomass Burning Season. *Atmosphere*, 2021, 12 (2), pp.132. <https://doi.org/10.3390/atmos12020132> hal-03129666
- Dumas G., J. Hidalgo, V. Masson, G. Louit, V. Edouard, A. Hanna, G. Poujol, J. Barrié (2021): Co-construction of climate services based on a weather stations network: Application in Toulouse agglomeration local authority, *Climate Services*, 24, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100274>
- Dumont M, Flin F, Malinka A, Brissaud O, Hagenmuller P, Palupal P, Lesaffre B, Dufour A, Calonne N, Rolland du Roscoat S and Ando E (2021), "Experimental and model-based investigation of the links between snow bidirectional reflectance and snow microstructure", *The Cryosphere*. Vol. 15(8), pp. 3921-3948. <https://doi.org/10.5194/tc-15-3921-2021>
- Duong, Q.-P., Langlade, S., Payan, C., Husson, R., Mouche, A. and Malardel, S. C-Band SAR Winds for Tropical Cyclone Monitoring and Forecast in the South-West Indian Ocean, *Atmosphere* (12:5), 2021, pp. 576. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12050576>
- Dupuy, F., Mestre, O., Serrurier, M., Burdà, V. K., Zamo, M., Cabrera-Gutiérrez, N. C., ... & Oller, G. (2021). ARPEGE Cloud Cover Forecast Postprocessing with Convolutional Neural Network. *Weather and Forecasting*, 36(2), 567-586. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0093.1>
- Duran, I. B. and Marquet, P. Les travaux sur la turbulence : les origines, Toucans, Cost-ES0905 et influence de l'entropie, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 79-86. <http://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0023>
- Durand J., Edouard Lees, Olivier Bousquet, Julien Delanoë, François Bonnardot. Cloud Radar Observations of Diurnal and Seasonal Cloudiness over Reunion Island. *Atmosphere*, 2021, 12 (7), pp.868. <https://doi.org/10.3390/atmos12070868> hal-03282349
- Düsing, S., Ansmann, A., Baars, H., Corbin, J. C., Denjean, C., Gysel-Beer, M., Müller, T., Poulain, L., Siebert, H., Spindler, G., Tuch, T., Wehner, B., and Wiedensohler, A.: Measurement report: Comparison of airborne, in situ measured, lidar-based, and modeled aerosol optical properties in the central European background – identifying sources of deviations, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 16745–16773, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16745-2021>
- Eeckman, J., Roux, H., Douinot, A., Bonan, B., and Albergel, C. : A multi-sourced assessment of the spatiotemporal dynamics of soil moisture in the MARINE flash flood model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 1425–1446, 2021. <https://doi.org/10.5194/hess-25-1425-2021>
- El-Hafi M., Blanco S., Dauchet J., Fournier R., Galtier M., Ibarrat L., Tregan J.-M., Najda Villefranque. Three viewpoints on null-collision Monte Carlo algorithms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 260, pp.1-12/107402. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107402>
- Evan S., Sharmine Akter Simu, Yuzo Miyazaki, Eri Tachibana, Henning Finkenzeller, et al.. Origin of water-soluble organic aerosols at the Maïdo high-altitude observatory, Réunion Island, in the tropical Indian Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21 (22), pp.17017-17029. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17017-2021> hal-03448069
- Evin G, Lafaysse M, Taillardat M and Zamo M (2021), "Calibrated ensemble forecasts of the height of new snow using quantile regression forests and ensemble model output statistics", *Nonlinear Processes in Geophysics*. Vol. 28(3), pp. 497-480. <https://doi.org/10.5194/npg-28-467-2021>
- Evin G, Pascal Dkengne Sielenou NE and Philippe Naveau PHeSM (2021), "Extreme avalanche cycles : Return levels and probability distributions depending on snow and meteorological conditions", *Weather and Climate Extremes*. Vol. 33, pp. 100344. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100344>
- Evin, G., Somot, S. and Hingray, B. Balanced estimate and uncertainty assessment of European climate change using the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble, *Earth System Dynamics* (12:4), 2021, pp. 1543–1569. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1543-2021>
- Fablet, R., Chapron, B., Drumetz, L., Mmin, E., Pannekoucke, O. and Rousseau, F. Learning Variational Data Assimilation Models and Solvers, *American Meteorological Society* (), 2021. <https://doi.org/10.1029/2021MS002572>
- Filippi J.-B., Jonathan Durand, Pierre Tulet, Soline Bielli. Multiscale Modeling of Convection and Pollutant Transport Associated with Volcanic Eruption and Lava Flow: Application to the April 2007 Eruption of the Piton de la Fournaise (Reunion Island). *Atmosphere*, 2021, 12 (4), pp.507. <https://doi.org/10.3390/atmos12040507> hal-03205799
- Flack David L. A., Rivière G., Musat I., Roehrig R., Bony S., et al.. Representation by two climate models of the dynamical and diabatic processes involved in the development of an explosively deepening cyclone during NAWDEX. *Weather and Climate Dynamics*, 2021, 2, pp.233-253. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-233-2021>
- Flamant, C., Chazette, P., Caumont, O., Girolamo, P. D., Behrendt, A., Sicard, M., Totems, J., Lange, D.,

- Fourrié, N., Brousseau, P., Augros, C., Baron, A., Cacciani, M., Comeryn, A., Rosa, B. D., Ducrocq, V., Genau, P., Labatut, L., Mucoz-Porcar, C., Rodriguez-Gymez, A., Summa, D., Thundathil, R. and Wulfmeyer, V. A network of water vapor Raman lidars for improving heavy precipitation forecasting in southern France: introducing the WaLiNeAs initiative, *Bulletin of Atmospheric Science and Technology* (2:1-4), 2021. <https://doi.org/10.1007/s42865-021-00037-6>
- Flament, T., Trapon, D., Lacour, A., Dabas, A., Ehlers, F., and Huber, D.: Aeolus L2A aerosol optical properties product: standard correct algorithm and Mie correct algorithm, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 7851–7871, 2021. <https://doi.org/10.5194/amt-14-7851-2021>
- Fourrié, N., Nuret, M., Brousseau, P., and Caumont, O.: Data assimilation impact studies with the AROME-WMED reanalysis of the first special observation period of the Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 463–480, 2021. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-463-2021>
- Fourteau, K., Domine, F., and Hagenmuller, P.: Impact of water vapor diffusion and latent heat on the effective thermal conductivity of snow, *The Cryosphere*, 15, 2739–2755, 2021. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2739-2021>
- Fourteau, K., Domine, F., and Hagenmuller, P.: Macroscopic water vapor diffusion is not enhanced in snow, *The Cryosphere*, 15, 389–406, 2021. <https://doi.org/10.5194/tc-15-389-2021>
- Francon, L., Corona, C., Till-Bottraud, I., Choler, P., Roussel, E., Carlson, B. Z., Morin, S., Girard, B. and Stoffel, M. Shrub growth in the Alps diverges from air temperature since the 1990s, *Environmental Research Letters* (16:7), 2021, pp. 074026. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0b67>
- Garrigues, S., Verhoef, A., E. Robinson, E. Blyth, A. Ostovar, S. Dadson, A. Boone, S. Boussetta, G. Balsamo, 2021: Capability of the variogram to quantify the spatial patterns of surface fluxes and soil moisture simulated by land surface models. *Progress in Physical Geography*, 45 (2), 279-293. <https://doi.org/10.1177/2F0309133320986147>
- Geer, A. J., Bauer, P., Lonitz, K., Barlakas, V., Eriksson, P., Mendrok, J., Doherty, A., Hocking, J. and Chambon, P. Bulk hydrometeor optical properties for microwave and sub-millimetre radiative transfer in RTTOV-SCATT v13.0, *Geoscientific Model Development* (14:12), 2021, pp. 7497–7526. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7497-2021>
- Giacona, F., Eckert N., Corona C., Mainieri R., Morin S., Stoffel M., Martin B., Naaim M., Upslope migration of snow avalanches in a warming climate, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 118 (44), e2107306118, 2021. <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.2107306118>
- Gillett, N. P., Kirchmeier-Young, M., Ribes, A., Shiogama, H., Hegerl, G. C., Knutti, R., Gastineau, G., John, J. G., Li, L., Nazarenko, L., Rosenbloom, N., Seland, Ø., Wu, T., Yukimoto, S. and Ziehn, T. Constraining human contributions to observed warming since the pre-industrial period, *Nature Climate Change* (0), 2021. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00965-9>
- Godinho dos Reis M. A., Lucas Vaz Peres, Gabriela Dornelles Bittencourt, Damaris Kirsch Pinheiro, Luiz Angelo Steffanel, et al.. Eventos de Influência do Buraco de Ozônio Antártico Ocorridos em 2016 Sobre o Sul do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021, 44, pp.36142. http://dx.doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_36142
- González, S., Bech, J., Benadí, A., Udina, M., Codina, B., Trapero, L., Paci, A. and (2021), J. F. G. Vertical structure and microphysical observations of winter precipitation in an inner valley during the Cerdanya-2017 field campaign, *Atmospheric Research* (0). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105826>
- Good, P., Chadwick, R., Holloway, C.E., Kennedy, J., Lowe J. A., Roehrig, R., Rushley, S. S. High sensitivity of tropical precipitation to local sea surface temperature. *Nature* 589, 408–414 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2887-3>
- Gorab, A. ; Ameline, M. ; Albergel, C. ; Baup, F. Use of Sentinel-1 Multi-Configuration and Multi-Temporal Series for Monitoring Parameters of Winter Wheat. *Remote Sens.*, 13, 553, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13040553>
- Grange, S. K., Lee, J. D., Drysdale, W. S., Lewis, A. C., Hueglin, C., Emmenegger, L. and Carslaw, D. C. COVID-19 lockdowns highlight a risk of increasing ozone pollution in European urban areas, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:5), 2021, pp. 4169–4185. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4169-2021>
- Granger R, Flin F, Ludwig W, Hammad I and Geindreau C (2021), "Orientation selective grain sublimation–deposition in snow under temperature gradient metamorphism observed with diffraction contrast tomography", *The Cryosphere*. Vol. 15(9), pp. 4381-4398. <https://doi.org/10.5194/tc-15-4381-2021>
- Guinaldo, T., Munier, S., Le Moigne, P., Boone, A., Decharme, B., Choulga, M., and Leroux, D. J.: Parametrization of a lake water dynamics model MLake in the ISBA-CTRIP land surface system (SURFEX v8.1), *Geosci. Model Dev.*, 14, 1309–1344, 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1309-2021>
- Haffar I, Flin F, Geindreau C, Petillon N, P-C Gervais and Ederly V (2021), "Influence of interfacial tension, temperature and recirculating time on the 3D properties of ice particles in jet A-1 fuel", *Chemical Engineering Science*. Vol. 243, pp. 116737. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116737>
- Haffar I, Flin F, Geindreau C, Petillon N, P-C Gervais and Ederly V (2021), "X-ray tomography for 3D analysis of ice particles in jet A-1 fuel", *Powder Technology*. Vol. 384, pp. 200-210. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.069>
- Hamer, P. D., Maréchal, V., Hossaini, R., Pirre, M., Krysztofiak, G., Ziska, F., Engel, A., Sala, S., Keber, T., Bönisch, H., Atlas, E., Krüger, K., Chipperfield, M., Catoire, V., Samah, A. A., Dorf, M., Moi, P. S., Schlager, H. and Pfeilsticker, K. Cloud-scale modelling of the impact of deep convection on the fate of oceanic bromoform in the troposphere: a case study over the west coast of Borneo., *Atmospheric Chemistry and Physics* (0), 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-16955-2021>
- Haouès-Jouve S, Lemonsu A, Gauvrau B, Amossé A, Can A, Carrissimo B, Gaudio N, Hidalgo J, Lopez-Rieu C, Chouillou D, Richard I, Adolphe L, Berry-Chikhaoui I, Bouyer J, Challéat S, De Munck C, Dorier E, Guillaume G, Hooneart S, Le Bras J, Legain D, Levy J-P, Masson V, Marry S, Nguyen-Luong D, Rojas-Arias J-C, Zhenlan G (2021) Cross-analysis for the assessment of urban environmental quality: An interdisciplinary and participative approach, *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, on line. <https://doi.org/10.1177/23998083211037350>
- Hauser D., Tourain C., Hermozo L., Alraddawi D., Aouf L., Chapron B., Dalphiné A. et al.. New observations from the SWIM radar on board CFOSAT: instrument validation and ocean wave measurement assessment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59 (1), pp.5-26. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2994372>
- Helbig N, Bühler Y, Eberhard L, Deschamps-Berger C, Gascoin S, Dumont M, Revuelto J, Deems JS and Jonas T (2021), "Fractional snow-covered area: scale-independent peak of winter parameterization", *The Cryosphere*. Vol. 15, pp. 615-632. <https://doi.org/10.5194/tc-15-615-2021>
- Herrera-Lormendez, P., Mastrantonas, N., Douville, H., Hoy, A. and Matschullat, J. Synoptic circulation changes over Central Europe from 1900 to 2100: Reanalyses and Coupled Model Intercomparison Project phase 6, *International Journal of Climatology* (0), 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7481>
- Hocking, J., Vidot, J., Brunel, P., Roquet, P., Silveira, B., Turner, E., and Lupu, C.: A new gas absorption optical depth parameterisation for RTTOV version 13, *Geosci. Model Dev.*, 14, 2899–2915, 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-2899-2021>
- Hofer S, Amory C, Kittel C, Carlsen T, Le Toumelin L and Storelvmo T (2021), "The contribution of drifting snow to cloud properties and the atmospheric radiative budget over Antarctica", *Geophysical Research Letters*. Vol. 48(22), pp. e2021GL094967. <https://doi.org/10.1029/2021GL094967>
- Honnert, R., V. Masson, C. Lac, and T. Nagel, A theoretical analysis of mixing length for atmospheric models from micro to large scales, *Front. Earth Sci.*, 8, 537, 2021. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.582056>
- Hourdin, F., D. Williamson, C. Rio, F. Couvreur, R. Roehrig, N. Villefranque, I. Musat, L. Fairhead, F. B. Diallo, V. Volodina, 2021 : Process-based climate model development harnessing machine learning. Part II : model calibration from single column to global. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://dx.doi.org/10.1029/2020ms002225>
- Hwong, Y., S. Song, S. Sherwood, A. Stirling, C. Rio, R. Roehrig et al.. Characterizing Convection Schemes Using Their Responses to Imposed Tendency Perturbations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13 (5). <https://dx.doi.org/10.1029/2021ms002461>
- Ilyina T., H. Li, A. Spring, W. Müller, Laurent Bopp, et al.. Predictable Variations of the Carbon Sinks and Atmospheric CO2 Growth in a Multi Model Framework. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48 (6). <https://dx.doi.org/10.1029/2020gl090695>

- Ivusi, S., Güttler, I., Somot, S., Gueremy, J.-F., Horvath, K. and Alias, A. Modelling extreme precipitation over the Dinaric Alps: An evaluation of the CNRM-ALADIN regional climate model, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (147:741), 2021, pp. 4425–4453. <https://doi.org/10.1002/qj.4187>
- Jahangir, E., Libois, Q., Couvreur, F., Vié, B., & Saint-Martin, D. (2021). Uncertainty of SW cloud radiative effect in atmospheric models due to the parameterization of liquid cloud optical properties. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2021MS002742. <https://doi.org/10.1029/2021MS002742>
- Joly, D., Gilbert, D., Diaz-de-Quijano, M. et al. Enhancing air quality forecasts by geomatic downscaling: an application to daily PM10 concentrations in France. *Theor Appl Climatol* 143, 327–339 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03418-7>
- Jones, C. D., Hickman, J. E., Rumbold, S. T., Walton, J., Lamboll, R. D., Skeie, R. B., Fiedler, S., Forster, P. M., Rogelj, J., Abe, M., Botzet, M., Calvin, K., Cassou, C., Cole, J. N. S., Davini, P., Deushi, M., Dix, M., Fyfe, J. C., Gillett, N. P., Ilyina, T., Kawamiya, M., Kelley, M., Kharin, S., Koshiro, T., Li, H., Mackallah, C., Müller, W. A., Nabat, P., van Noije, T., Nolan, P., Ohgaito, R., Olivie, D., Oshima, N., Parodi, J., Reerink, T. J., Ren, L., Romanou, A., Seferian, R., Tang, Y., Timmreck, C., Tjiputra, J., Tourigny, E., Tsigaridis, K., Wang, H., Wu, M., Wyser, K., Yang, S., Yang, Y. and Ziehn, T. The Climate Response to Emissions Reductions Due to COVID-19: Initial Results From CovidMIP," *Geophysical Research Letters* (48:8), 2021. <https://doi.org/10.1029/2020GL091883>
- Jouanno, J., Benshila, R., Berline, L., Soulie, A., Radenac, M.-H., Morvan, G., Diaz, F., Sheinbaum, J., Chevalier, C., Thibaut, T., Changeux, T., Menard, F., Berthet, S., Aumont, O., Ethe, C., Nabat, P. and Mallet, M. A NEMO-based model of Sargassum distribution in the tropical Atlantic: description of the model and sensitivity analysis (NEMO-Sarg1.0), *Geoscientific Model Development* (14:6), 2021, pp. 4069–4086. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4069-2021>
- Jézéquel E., M. Cathelain, V. Masson, F. Blondel. Validation of Wind Turbine Wakes Modelled by the Meso-NH LES Solver Under Different Cases of Stability. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1934, pp.012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1934/1/012003>
- Kageyama, M., Sime, L. C., Sicard, M., Guarino, M.-V., de Vernal, A., Stein, R., Schroeder, D., Malmierca-Vallet, I., Abe-Ouchi, A., Bitz, C., Braconnot, P., Brady, E. C., Cao, J., Chamberlain, M. A., Feltham, D., Guo, C., LeGrande, A. N., Lohmann, G., Meissner, K. J., Menviel, L., Morozova, P., Nisanicoglu, K. H., Otto-Bliesner, B. L., Oishi, R., Buarque, S. R., Salas y Melia, D., Sherriff-Tadano, S., Stroeve, J., Shi, X., Sun, B., Tomas, R. A., Volodin, E., Yeung, N. K. H., Zhang, Q., Zhang, Z., Zheng, W. and Ziehn, T. A multi-model CMIP6-PMIP4 study of Arctic sea ice at 1270.167emka: sea ice data compilation and model differences, *Climate of the Past* (17:1), 2021, pp. 37–62. <https://doi.org/10.5194/cp-17-37-2021>
- Karas A, Karbou F, Giffard-Roisin S, Durand P and Nicolas Eckert (2021), "Automatic Color Detection-Based Method Applied to Sentinel-1 SAR Images for Snow Avalanhe Debris Monitoring", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3131853>
- Karbou F, Veyssièrre G, Coleou C, Dufour A, Gouttevin I, Durand P, Gascoin S and Grizonnet M (2021a), "Monitoring Wet Snow Over an Alpine Region Using Sentinel-1 Observations", *Remote Sensing*. Vol. 13(3), pp. 381. <https://doi.org/10.3390/rs13030381>
- Keeble, J., Hassler, B., Banerjee, A., Checa-Garcia, R., Chiodo, G., Davis, S., Eyring, V., Griffiths, P. T., Morgenstern, O., Nowack, P., Zeng, G., Zhang, J., Bodeker, G., Burrows, S., Cameron-Smith, P., Cugnet, D., Danek, C., Deushi, M., Horowitz, L. W., Kubin, A., Li, L., Lohmann, G., Michou, M., Mills, M. J., Nabat, P., Olivie, D., Park, S., Seland, Ø., Stoll, J., Wieners, K.-H. and Wu, T. Evaluating stratospheric ozone and water vapour changes in CMIP6 models from 1850 to 2100, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:6), 2021, pp. 5015–5061. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5015-2021>
- Khodayar, S., Davolio, S., Di Girolamo, P., Lebeau-pin Brossier, C., Flaounas, E., Fourrie, N., Lee, K.-O., Ricard, D., Vie, B., Bouttier, F., Caldas-Alvarez, A., and Ducrocq, V.: Overview towards improved understanding of the mechanisms leading to heavy precipitation in the western Mediterranean: lessons learned from HyMeX, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17051–17078, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17051-2021>
- Kidd, C., Huffman, G., Maggioni, V., Chambon, P. and Oki, R. The Global Satellite Precipitation Constellation: current status and future requirements, *Bulletin of the American Meteorological Society* 0, 2021, pp. 1–47. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0299.1>
- Klein C., Jackson L., Parker D., Marsham J., Taylor C., Rowell D., Guichard F. et al.. Combining CMIP data with a regional convection-permitting model and observations to project extreme rainfall under climate change. *Environmental Research Letters*, 2021, 16 (10), pp.104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac26f1>
- Kravitz, B., MacMartin, D. G., Visionsi, D., Boucher, O., Cole, J. N. S., Haywood, J., Jones, A., Lurton, T., Nabat, P., Niemeier, U., Robock, A., Seferian, R. and Tilmes, S. Comparing different generations of idealized solar geoengineering simulations in the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:6), 2021, pp. 4231–4247. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4231-2021>
- Kukui, A., Chartier, M., Wang, J., Chen, H., Dusanter, S., Sauvage, S., Michoud, V., Locoge, N., Gros, V., Bourriane, T., Sellegri, K., and Pichon, J.-M.: Role of Criegee intermediates in the formation of sulfuric acid at a mediterranean (Cape Corsica) site under influence of biogenic emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 13333–13351, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-13333-2021>
- Kwok, Y.T., R. Schoetter, C. de Munck, K.K.L. Lau, M.S. Wong and E.Y.Y. Ng, 2021: High-resolution mesoscale simulation of the microclimatic effects of urban development in the past, present, and future Hong Kong. *Urban Climate*, 37(100850), 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100850>
- Kwok, Y.T., de Munck C, Lau K, Ng E. 2021. To what extent can urban ventilation features cool a compact built-up environment during a prolonged heatwave? A mesoscale numerical modelling study for Hong Kong. *Sustainable cities and society, Special issue: the Creation of Cool Cities and Communities*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103541>
- Kwon T, Shibata H., Kepfer-Rojas S. et al, Effects of Climate and Atmospheric Nitrogen Deposition on Early to Mid-Term Stage Litter Decomposition Across Biomes, *Frontiers in Forests and Global Change*, vol4 p90, 2021. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.678480>
- Köberl, J., Francois, H., Cognard, J., Carmagnola, C., Pretenthaler, F., Damm, A. and Morin, S. The demand side of climate services for real-time snow management in Alpine ski resorts: Some empirical insights and implications for climate services development, *Climate Services* (22), 2021, pp. 100238. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100238>
- Lackner, G., D. F. Nadeau, F. Domine, A.-C. Parent, G. Leonardini, A. Boone, F. Anctil, and V. Fortin, 2021: The effect of soil on the summertime surface energy budget of a humid 2 Subarctic tundra in northern Quebec, Canada. *J. of Hydrometeor.*, 22, 2547-2564. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0243.1>
- Lahaye N., A. P. and (2021), S. G. L.-S. Instability of lenticular vortices: results from laboratory experiments, linear stability analysis and numerical simulations, *Fluids* 2021 0. <https://doi.org/10.3390/fluids6110380>
- Lamotte, C., Guth, J., Maréchal, V., Cussac, M., Hamer, P. D. et al.. Modeling study of the impact of SO2 volcanic passive emissions on the tropospheric sulfur budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21 (14), pp.11379 - 11404. <https://doi.org/10.5194/acp-21-11379-2021> hal-03382624
- Lamy K., Thierry Portafaix, Colette Brogniez, Kaisa Lakkala, Mikko Pitkänen, et al.. UV-Indien network: ground-based measurements dedicated to the monitoring of UV radiation over the western Indian Ocean. *Earth System Science Data*, 2021, 13, pp.4275 - 4301. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4275-2021> hal-03346434
- Lannuque V., Bastien Sauvage, Brice Barret, Hannah Clark, Gilles Athier, et al.. Origins and characterization of CO and O₃ in the African upper troposphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21 (19), pp.14535-14555 <https://doi.org/10.5194/acp-21-14535-2021> hal-03370413
- Law-Chune, S., Aouf, L., Dalphiné, A. et al. WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. *Ocean Dynamics* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01433-w>
- Le Merle, E., Hauser, D., Peureux, C., Aouf, L., Schippers, P., Dufour, C., & Dalphiné, A. (2021). Directional and frequency spread of surface ocean waves from SWIM measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2021JC017220. <https://doi.org/10.1029/2021JC017220>
- Le Page M., Fakir Y., Jarlan L., Boone A., Berjamy B., et al.. Projection of irrigation water demand based on the simulation of synthetic crop coefficients and climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25 (2), pp.637-651. <https://doi.org/10.5194/hess-25-637-2021>
- Le Roux, E., Evin, G., Eckert, N., Blanchet, J., and Morin, S. : Elevation-dependent trends in extreme

- snowfall in the French Alps from 1959 to 2019, *The Cryosphere*, 15, 4335–4356.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-4335-2021>
- Le Roy, B., A. Lemonsu and R. Schoetter, 2021: A statistical-dynamical downscaling methodology for the urban heat island applied to the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 56, 2487–2508. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05600-z>
- Le Toumelin L, Amory C, Favier V, Kittel C, Hofer S, Fettweis X, Gallée H and Kayetha V (2021), "Sensitivity of the surface energy budget to drifting snow as simulated by MAR in coastal Adelie Land, Antarctica", *The Cryosphere*. Vol. 15(8), pp. 3595-3614.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-3595-2021>
- Lee K. O., Brice Barret, Eric Le Flochmoen, Pierre Tulet, Silvia Bucci, et al.. Convective uplift of pollution from the Sichuan Basin into the Asian monsoon anticyclone during the StratoClim aircraft campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21, pp.3255 - 3274.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-3255-2021>
insu-03169354
- Lemarié, F., Samson, G., Redelsperger, J.-L., Giordani, H., Brivoal, T., and Madec, G.: A simplified atmospheric boundary layer model for an improved representation of air–sea interactions in eddying oceanic models: implementation and first evaluation in NEMO (4.0), *Geosci. Model Dev.*, 14, 543–572, 2021.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-543-2021>
- Lemonsu A, de Munck C, Redon E, Masson V, Keravec P, Rodriguez F, Legain D. 2021. Influence of the local urban environment on the thermoradiative and hydrological behaviour of a garden lawn. *JAMS*.
<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-21-0067.1>
- Leonarski, L.; C-Labonnote, L.; Compiègne, M.; Vidot, J.; Baran, A.J.; Dubuisson, P. Potential of Hyperspectral Thermal Infrared Spaceborne Measurements to Retrieve Ice Cloud Physical Properties: Case Study of IASI and IASI-NG. *Remote Sens.* 2021, 13, 116.
<https://doi.org/10.3390/rs13010116>
- Lepetit, P., Ly, C., Barthes, L., Mallet, C., Viltard, N., Lemaitre, Y. and Rottner, L. Using Deep Learning for Restoration of Precipitation Echoes in Radar Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (), 2021, pp. 1–14.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3052582>
- Lestringant, R.; Bergot, T. Analysis of Small-Scale Spatial Variability of Fog at Paris Charles de Gaulle Airport. *Atmosphere* 2021, 12, 1406.
<https://doi.org/10.3390/atmos12111406>
- Libois, Q. and Vidot, J., Application à la météorologie opérationnelle et à la modélisation du climat", *La Météorologie* (113), 2021, pp. 29-30.
- Lucas-Picher, P., Argüeso, D., Brisson, E., Trambly, Y., Berg, P., Lemonsu, A., Kotlarski, S. and Caillaud, C. Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps, *WIREs Climate Change* (12:6), 2021.
<https://doi.org/10.1002/wcc.731>
- Majumdar, S. J., J. Sun, B. Golding, P. Joe, J. Dudhia, O. Caumont, K. C. Gouda, P. Steinle, B. Vincendon, J. Wang, and N. Yussouf, 2021: Multiscale forecasting of high-impact weather: current status and future challenges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3) (Mar. 2021), E635–E659.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0111.1>
- Mallet, M., Nabat, P., Johnson, B., Michou, M., Haywood, J. M., Chen, C. and Dubovik, O. Climate models generally underrepresent the warming by Central Africa biomass-burning aerosols over the Southeast Atlantic, *Science Advances*, (7:41), 2021.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abg9998>
- Mandement, M. and Caumont, O.: A numerical study to investigate the roles of former Hurricane Leslie, orography and evaporative cooling in the 2018 Aude heavy-precipitation event, *Weather Clim. Dynam.*, 2, 795–818, 2021.
<https://doi.org/10.5194/wcd-2-795-2021>
- Mangla, R., Indu, J., Chambon, P. and Mahfouf, J.-F. First steps towards an all-sky assimilation framework for tropical cyclone event over Bay of Bengal region: Evaluation and assessment of GMI radiances, *Atmospheric Research* (257), 2021, pp. 105564.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105564>
- Marinescu P. J., van den Heever S. C., Heikenfeld M., Barrett A. I., Barthlott C., Hoose C., Fan J., Fridlind A. M., Matsui T., Miltenberger a. K., Stier P., Vie B., White B. A., and Zhang Y.. Impacts of Varying Concentrations of Cloud Condensation Nuclei on Deep Convective Cloud Updrafts—A Multimodel Assessment, *Journal of the Atmospheric Sciences*.
<https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0200.1>
- Marquet, P. and Bailey, A. Comparisons of H2O pathways with moist isentropes". Research activities in Earth system modelling. *Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 51. WCRP Report No.13/2021. WMO, Geneva.*, () , 2021.
- Marquet, P. and Brozkova, R. Jean-Francois Geleyn et la prévision numérique du temps, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 19-20.
<http://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0013>
- Marquet., P. Computation of moist-air surface entropy at Mauna Loa. Research activities in Earth system modelling. *Working Group on Numerical Experimentation. Report No. 51. WCRP Report No.13/2021. WMO, Geneva.*, () , 2021.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30703.36004>
- Martet, M., Brousseau, P., Watrelet, E., Guillaume, F. and Mahfouf, J.-F. Operational Assimilation of Radar Data from the European EUMETNET Programme OPERA in the Meteo-France Convective-Scale Model AROME, *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications* (Vol. IV), 2021, pp. 629–644.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-77722-7_24
- Materia, S., C. Ardilouze, C. Prodhomme, M.G. Donat, M. Benassi, F.J. Doblas-Reyes, D. Peano, L.P. Caron, P. Ruggieri, S. Gualdi : Summer temperature response to extreme soil water conditions in the Mediterranean transitional climate regime. *Climate Dynamics*.
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05815-8>
- Matiu M, Crespi A, Bertoldi G, Carmagnola CM, Marty C, Morin S, Schöner W, Cat Berro D, Chiogna G, De Gregorio L, Kotlarski S, Majone B, Resch G, Terzago S, Valt M, Beozzo W, Cianfarra P, Gouttevin I, Marcolini G, Notarnicola C, Petitta M, Scherrer SC, Strasser U, Winkler M, Zebisch M, Cicogna A, Cremonini R, Debernardi A, Faletto M, Gaddo M, Giovannini L, Mercalli L, Soubeyroux J-M, Sušnik A, Trenti A, Urbani S and Weigluni V (2021), "Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019", *The Cryosphere*. Vol. 15(3), pp. 1343–1382.
<https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- Maurer C., D. Arnold Arias, Jérôme Brioude, M. Haselsteiner, F. Weidle, et al.. Evaluating the added value of multi-input atmospheric transport ensemble modeling for applications of the Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty organization (CTBTO). *Journal of Environmental Radioactivity*, 2021, 237, pp.106649.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106649>
hal-03277768
- Mazoyer, M., D. Ricard, G. Rivière, J. Delanoë, P. Arbogast, B. Vié, C. Lac, Q. Cazenave, J. Pelon : Microphysics impacts on the warm conveyor belt and ridge building of the NAWDEX IOP6 cyclone. *Monthly Weather Review*, 149(12), 3961-3980.
<https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0061.1>
- Mcfarquhar G., Chris Bretherton, Roger Marchand, Alain Protat, Paul Demott,... Roberts G. C., ... et al.. Observations of clouds, aerosols, precipitation, and surface radiation over the Southern Ocean: An overview of CAPRICORN, MARCUS, MICRE and SOCRATES. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, pp.E894-E928.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0132.1>
- McGregor G., Ren C. (2021) Urban Climate Science for Planning Healthy Cities. In: Ren C., McGregor G. (eds) Urban Climate Science for Planning Healthy Cities. *Biometeorology*, vol 5.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-87598-5_1
- Menard CB, Essery R, Krinner G, Arduini G, Bartlett P, Boone A, Brutel-Vuilmet C, Burke E, Cuntz M, Dai Y, Decharme B, Dutra E, Fang X, Fierz C, Gusev Y, Hagemann S, Haverd V, Kim H, Lafaysse M, Marke T, Nasonova O, Nitta T, Niwano M, Pomeroy J, Schädler G, Semenov VA, Smirnova T, Strasser U, Swenson S, Turkov D, Wever N and Yuan H (2021), "Scientific and Human Errors in a Snow Model Intercomparison", *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 102(1), pp. E61-E79.
<https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0329.1>
- Menard, R., Skachko, S. and Pannekoucke, O. Numerical discretization causing error variance loss and the need for inflation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (), 2021.
<https://doi.org/10.1002/qj.4139>
- Mezzina, B., Palmeiro, F. M., Garca-Serrano, J., Blade, L., Batte, L. and Benassi, M. Multi-model assessment of the late-winter stratospheric response to El Niño and La Niña, *Climate Dynamics* (), 2021.
<https://doi.org/10.1007/s00382-021-05836-3>
- Mignot, J., Hourdin, F., Deshayes, J., Boucher, O., Gastineau, G. et al.. The Tuning Strategy of IPSL-CM6A-LR. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13 (5).
<https://doi.org/10.1029/2020MS002340>
hal-03252771
- Morel L., Ouafae Moudni, Frédéric Durand, Joëlle Nicolas, Jean-Michel Follin, et al.. On the relation between GPS tropospheric gradients and the local topography. *Advances in Space Research*, 2021, 68 (4), pp.1676-1689.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.008>
hal-03456483

- Morin S, Raphaëlle Samacoïts HF, Carlo M. Carmagnola BA, O. Cenk Demiroglu MP, Jean-Michel Soubeyroux ML, Sam Franklin GG, Debbie Kite AAH, Emmanuelle George CB and Samuel Almond GDeAC (2021), "Pan-European meteorological and snow indicators of climate change impact on ski tourism", *Climate Services*. Vol. 22, pp. 100215. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100215>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulla, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., and Thépaut, J.-N.: ERA5-Land : a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Ngoungue Langue, C. G., Lavaysse, C., Vrac, M., Peyrillé, P., and Flamant, C.: Seasonal forecasts of the Saharan heat low characteristics: a multi-model assessment, *Weather Clim. Dynam.*, 2, 893–912, 2021. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-893-2021>
- Otto-Bliesner, B. L., Brady, E. C., Zhao, A., Briërley, C. M., Axford, Y., Capron, E., Govin, A., Hoffman, J. S., Isaacs, E., Kageyama, M., Scussolini, P., Tzedakis, P. C., Williams, C. J. R., Wolff, E., Abe-Ouchi, A., Braconnot, P., Buarque, S. R., Cao, J., de Vernal, A., Guarino, M. V., Guo, C., LeGrande, A. N., Lohmann, G., Meissner, K. J., Menviel, L., Morozova, P. A., Nisancioglu, K. H., Oishi, R., Salas y Melia, D., Shi, X., Sicard, M., Sime, L., Stepanek, C., Tomas, R., Volodin, E., Yeung, N. K. H., Zhang, Q., Zhang, Z. and Zheng, W. Large-scale features of Last Interglacial climate: results from evaluating the lig127k simulations for the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP4), *Climate of the Past* (17:1), 2021, pp. 63–94. <https://doi.org/10.5194/cp-17-63-2021>
- Pannekoucke O. and Arbogast P. SymPKF (v1.0): a symbolic and computational toolbox for the design of parametric Kalman filter dynamics, *Geoscientific Model Development*, vol. 14, no. 10, pp. 5957–5976, Oct. 2021. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5957-2021>
- Pannekoucke, O. An anisotropic formulation of the parametric Kalman filter assimilation, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* (73:1), 2021, pp. 1–27. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1926660>
- Pannekoucke, O., Menard, R., Aabaribaoune, M. E. and Plu, M. "A methodology to obtain model-error covariances due to the discretization scheme from the parametric Kalman filter perspective, *Nonlinear Processes in Geophysics* (28:1), 2021, pp. 1–22. <https://doi.org/10.5194/npg-28-1-2021>
- Peano, D., Hemming, D., Materia, S., Delire, C., Fan, Y. et al. Plant phenology evaluation of CRESCENDO land surface models ? Part 1: Start and end of the growing season. *Biogeosciences*, 2021, 18 (7), pp.2405 - 2428. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2405-2021> hal-03207635
- Pelletier, C., Lemarié, F., Blayo, E., Bouin, M. N., & Redelsperger, J. L., 2021 : Two-sided turbulent surface-layer parameterizations for computing air–sea fluxes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(736), 1726-1751. <https://doi.org/10.1002/qj.3991>
- Petrie, R., Denvil, S., Ames, S., Levavasseur, G., Fiore, S., Allen, C., Antonio, F., Berger, K., Bretonniere, P.-A., Cinquini, L., Dart, E., Dwarakanath, P., Druken, K., Evans, B., Franchisteguy, L., Gardoll, S., Gerbier, E., Greenslade, M., Hassell, D., Iwi, A., Jukes, M., Kindermann, S., Lacinski, L., Mirto, M., Nasser, A. B., Nassisi, P., Nienhouse, E., Nikonov, S., Nuzzo, A., Richards, C., Ridzwan, S., Rixen, M., Serradell, K., Snow, K., Stephens, A., Stockhouse, M., Vahlenkamp, H. and Wagner, R. Coordinating an operational data distribution network for CMIP6 data, *Geoscientific Model Development* (14:1), 2021, pp. 629–644. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-629-2021>
- Phillips, V. T. J., Yano, J.-I., Deshmukh, A., and Waman, D.: Comment on "Review of experimental studies of secondary ice production" by Korolev and Leisner (2020), *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 11941–11953, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-11941-2021>
- Piccioni, F., Casenave, C., Lemaire, B. J., Le Moigne, P., Dubois, P., and Vinçon-Leite, B.: The thermal response of small and shallow lakes to climate change: new insights from 3D hindcast modelling, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 439–456, 2021. <https://doi.org/10.5194/esd-12-439-2021>
- Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., Ban, N., Giorgi, F., Stocchi P., Alias A., Belusic, D., Berthou, S., Caillaud, C., M. Cardoso, R., Chan, S., Bossing Christensen, O., Dobler, A., de Vries, H., Goergen, K., J. Kendon, E., Keuler, K., Lenderink, G., Lorenz, T., N. Mishra, A., Panitz, H.-J., Schär, C., M. M. Soares, P., Truhetz, H., Vergara-Temprado, J. (2021) The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Clim Dyn.* <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>.
- Pietri A., Xavier Capet, Francesco d'Ovidio, Marina Lévy, Julien Le Sommer, Jean-Marc Molines, and Hervé Giordani. Skills and Limitations of the Adiabatic Omega Equation: How Effective Is It to Retrieve Oceanic Vertical Circulation at Mesoscale and Submesoscale?. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51 (3), pp.931-954. <https://dx.doi.org/10.1175/jpo-d-20-0052.1>
- Pinto, J.O., J. Elston, D. O'Sullivan, B. Baker, J. Jacob, S. Taylor, G. Roberts, K. Barfuss, B. Pignat, C. Marshall, M. Steiner, N. Omanovic, M. Fengler The Status and Future of Small Uncrewed Aircraft Systems (UAS) in Operational Meteorology, *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0138.1>
- Piontek, D., Bugliaro, L., Kar, J., Schumann, U., Marengo, F., Plu, M. and Voigt, C. The New Volcanic Ash Satellite Retrieval VACOS Using MSG/SEVIRI and Artificial Neural Networks: 2. Validation, *Remote Sensing* (13:16), 2021, pp. 3128. <https://doi.org/10.3390/rs13163128>
- Piriou, J.-M. and Brozkov 1, R. Les travaux de Jean-François Geleyn sur la convection, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 87-93. <http://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0024>
- Planton Y., Eric Guilyardi, Andrew T. Wittenberg, Jiwoo Lee, Peter J. Gleckler, Tobias Bayr, Shayne McGregor, Michael J. McPhaden, Scott Power, Romain Roehrig, Jérôme Vialard, and Aurore Voltaire. Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package. *Bull Am Meteorol Soc.* <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0337.1>
- Plu, M., Bigeard, G., Sic, B., Emili, E., Bugliaro, L., Amraoui, L. E., Guth, J., Josse, B., Mona, L. and Piontek, D. Modelling the volcanic ash plume from Eyjafjallajökull eruption (May 2010) over Europe: evaluation of the benefit of source term improvements and of the assimilation of aerosol measurements, *Natural Hazards and Earth System Sciences* (21:12), 2021, pp. 3731–3747. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3731-2021>
- Plu, M., Scherllin-Pirscher, B., Arnold Arias, D., Baro, R., Bigeard, G., Bugliaro, L., Carvalho, A., ElAmraoui, L., Eschbacher, K., Hirtl, M., Maurer, C., Mulder, M. D., Piontek, D., Robertson, L., Rokitsky, C.-H., Zobl, F., and Zopp, R. : An ensemble of state-of-the-art ash dispersion models : towards probabilistic forecasts to increase the resilience of air traffic against volcanic eruptions, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2973–2992, 2021. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2973-2021>
- Pourret, V., Mahfouf, J.-F., Guidard, V., Moll, P., Doerenbecher, A. and Pignat, B. Variational bias correction for Mode-S aircraft derived winds, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* (73:1), 2021, pp. 1–28. <https://doi.org/10.1080/16000870.2021.1886808>
- Prandi, P., Meyssignac, B., Ablain, M., Spada, G., Ribes, A. and Benveniste, J. Local sea level trends, accelerations and uncertainties over 1993-2019, *Scientific Data* (8:1), 2021. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00786-7>
- Prodhomme, C., Materia, S., Ardilouze, C., White, R. H., Batte, L., Guemas, V., Fragkoulidis, G. and Garca-Serrano, J. Seasonal prediction of European summer heatwaves, *Climate Dynamics* (), 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05828-3>
- Qasmi S., Sanchez-Gomez E., Ruprich-Robert Y., Boé J., Cassou C. Modulation of the Occurrence of Heatwaves over the Euro-Mediterranean Region by the Intensity of the Atlantic Multidecadal Variability. *Journal of Climate*, 2021, 34 (3), pp.1099-1114. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0982.1>
- Reale, M., Narvaez, W. D. C., Cavicchia, L., Conte, D., Coppola, E., Flaounas, E., Giorgi, F., Gualdi, S., Hochman, A., Li, L., Lionello, P., Podrascanin, Z., Salon, S., Sanchez-Gomez, E., Scoccimarro, E., Sein, D. V. and Somot, S. Future projections of Mediterranean cyclone characteristics using the Med-CORDEX ensemble of coupled regional climate system models, *Climate Dynamics* (), 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06018-x>
- Redemann, J., Wood, R., Zuidema, P., Doherty, S. J., Luna, B., LeBlanc, S. E., Diamond, M. S., Shinzuka, Y., Chang, I. Y., Ueyama, R., Pfister, L., Ryoo, J.-M., Dobracki, A. N., da Silva, A. M., Longo, K. M., Kacenenbogen, M. S., Flynn, C. J., Pistone, K., Knox, N. M., Piketh, S. J., Haywood, J. M., Formenti, P., Mallet, M., et al.: An overview of the ORACLES (Observations of Aerosols above Clouds and their InteractionS) project: aerosol–cloud–radiation interactions in the southeast Atlantic basin, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 1507–1563, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1507-2021>
- Reinares Martínez I., Stéphanie Evan, F Wienhold, Jérôme Brioude, E. Jensen, et al.. Unprecedented Observations of a Nascent in Situ Cirrus in the Tropical Tropopause Layer. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48 (4) <https://doi.org/10.1029/2020GL090936> hal-03045631

- Reuter B, Léo Viallon-Galinier SH, Alec van Herwijnen SM and Pascal Hagenmuller eSM (2021), "Characterizing snow instability with avalanche problem types derived from snow cover simulations", *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 194, pp. 103462.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103462>
- Ruevuelo J, Cluzet B, Duran N, Fructus M, Lafaysse M and M. Dumont EC (2021), "Assimilation of surface reflectance in snow simulations: impact on bulk snow variables", *Journal of Hydrology*. Vol. 603, pp. 126966.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126966>
- Ribes, A., Qasmi, S. and Gillett, N. P. Making climate projections conditional on historical observations, *Science Advances* (7:4), 2021, pp. eabc0671.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc0671>
- Ricaud, P., J.-L. Attié, R. Chalinel, F. Pasternak, J. Léonard, I. Pison, E. Pattey, R. L. Thompson, Z. Zelinger, J. Lelieveld, J. Sciare, N. Saitoh, J. Warner, A. Fortems-Cheiney, H. Reynal, J. Vidot, L. Brooker, L. Berdeu, O. Saint-Pé, P. K. Patra, M. Dostál, J. Suchánek, V. Nevrlý, C. Groot Zwaafink, The Monitoring Nitrous Oxide Sources (MIN2OS) satellite project. *Remote Sensing of Environment*, Volume 266, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112688>
- Rieutord, T., Aubert, S. and Machado, T. Deriving boundary layer height from aerosol lidar using machine learning: KABL and ADABL algorithms, *Atmospheric Measurement Techniques* (14:6), 2021, pp. 4335–4353.
<https://doi.org/10.5194/amt-14-4335-2021>
- Rindraharisaona E., Guilhem Barroul, Emmanuel Cordier, Fabrice R. Fontaine, Alicia Gonzalez. Cyclone Signatures in the South-West Indian Ocean from Two Decades of Microseismic Noise. *Atmosphere*, 2021, 12
<https://doi.org/10.3390/atmos12040488>
hal-03215317
- Riviere, G., Wimmer, M., Arbogast, P., Piriou, J.-M., Delanoë, J., Labadie, C., Cazenave, Q. and Pelon, J. The impact of deep convection representation in a global atmospheric model on the warm conveyor belt and jet stream during NAWDEX IOP6, *Weather and Climate Dynamics* (2:4), 2021, pp. 1011–1031.
<https://doi.org/10.5194/wcd-2-1011-2021>
- Robin Waldman, Joël Hirschi, Aurore Voltaire, Christophe Cassou, Rym Msadek. Clarifying the Relation between AMOC and Thermal Wind: Application to the Centennial Variability in a Coupled Climate Model. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51 (2), pp.343-364.
<https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0284.1>
- Rochetin N., Hohenegger C., Touzé-peiffer L., Villefranque N.. A Physically Based Definition of Convectively Generated Density Currents: Detection and Characterization in Convection-Permitting Simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13 (7), pp.e2020MS002402.
<https://doi.org/10.1029/2020ms002402>
- Rose C., Matti Rissanen, Siddharth Iyer, Jonathan Duplissy, Chao Yan, et al.. Investigation of several proxies to estimate sulfuric acid concentration under volcanic plume conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, 21 (6), pp.4541 - 4560.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-4541-2021>
hal-03180376
- Rose, C., Collaud Coen, M., Andrews,...., Tulet, P., Vakkari, V., van Zyl, P. G., Velarde, F., Villani, P., Vratolis, S., Wagner, Z., Wang, S.-H., Weinhold, K., Weller, R., Yela, M., Zdimal, V., and Laj, P. et al.: Seasonality of the particle number concentration and size distribution: a global analysis retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17185–17223, 2021.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-17185-2021>
- Rousseau, D., Jarraud, M. and Marquet, P. Les débuts de Jean-Francois Geleyn : Mayence, Paris et son expérience au CEPMMT, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 23-28.
<https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0015>
- Royer A, Picard G, Vargel C, Langlois A, Gouttevin I and Dumont M (2021), "Improved Simulation of Arctic Circumpolar Land Area Snow Properties and Soil Temperatures", *Frontiers in Earth Science*, pp. 9:685140.
<https://doi.org/10.3389/feart.2021.685140>
- Ruggieri P., Bellucci A., Nicolí D., Athanasiadis P., Gualdi S.,...Qasmi S. ... et al.. Atlantic Multidecadal Variability and North Atlantic Jet: A Multimodel View from the Decadal Climate Prediction Projec. *Journal of Climate*, 2021, 34 (1), pp.347-360.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0981.1>
- Ruprich-Robert, Y., Moreno-Chamarro, E., Levine, X... Qasmi S. ... et al. Impacts of Atlantic multidecadal variability on the tropical Pacific: a multi-model study. *npj Clim Atmos Sci* 4, 33 (2021).
<https://doi.org/10.1038/s41612-021-00188-5>
- Saint-Martin, D., Geoffroy, O., Voldoire, A., Cattiaux, J., Brient, F., Chauvin, F., et al. (2021). Tracking changes in climate sensitivity in CNRM climate models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2020MS002190.
<https://doi.org/10.1029/2020MS002190>
hal-03288073
- Sanchez, K. J., Roberts, G. C., Saliba, G., Russell, L. M., Twohy, C., Reeves, J. M., Humphries, R. S., Keywood, M. D., Ward, J. P., and McRobert, I. M.: Measurement report: Cloud processes and the transport of biological emissions affect southern ocean particle and cloud condensation nuclei concentrations, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 3427–3446, 2021.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-3427-2021>
- Sandells, M., Lowe, H., Picard, G., Dumont, M., Essery, R., Floury, N., Kontu, A., Lemmetyinen, J., Maslanka, W., Morin, S., Wiesmann, A. and Matzler, C. "X-Ray Tomography-Based Microstructure Representation in the Snow Microwave Radiative Transfer Model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (), 2021, pp. 1–15.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3086412>
- Sans M., El-Hafi M., V. Eymet, V. Forest, Fournier R., Villefranque N. Null-collision meshless Monte-Carlo - A new reverse Monte-Carlo algorithm designed for laser-source emission in absorbing/scattering inhomogeneous media. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 271, pp.1-18/107725.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107725>
- Sauvage, C., Lebeau-pin Brossier, C., and Bouin, M.-N.: Towards kilometer-scale ocean-atmosphere-wave coupled forecast: a case study on a Mediterranean heavy precipitation event, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 11857–11887, 2021.
<https://doi.org/10.5194/acp-21-11857-2021>
- Solmon, F., Elguindi, N., Mallet, M. et al. 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>
- Stavropoulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Andrieu, H., Lemonsu, A., Calmet, I. et al.. Coupling detailed urban energy and water budgets with TEB-Hydro model: Towards an assessment tool for nature based solution performances. *Urban Climate*, 2021, 39, pp.100925.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100925>
hal-03320823
- Steffenel L. A., Vagner Anabor, Damaris Kirsch Pinheiro, Lissette Guzman, Gabriela Dornelles Bittencourt, et al.. Forecasting upper atmospheric scalars advection using deep learning: an O3 experiment. *Machine Learning*, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10994-020-05944-x>
hal-03160652
- Stephan, C. C., Schnitt, S., Schulz, H., Bellenger, H., de Szoeké, S. P., Acquistapace, C., Baier, K., Dauhut, T., Laxenaire, R., Morfa-Avalos, Y., Person, R., Melendez, E. Q., Bagheri, G., Böck, T., Daley, A., Güttler, J., Helfer, K. C., Los, S. A., Neuberger, A., Röttenbacher, J., Raeke, A., Ringel, M., Ritschel, M., Sadoulet, P., Schirmacher, I., Stolla, M. K., Wright, E., Charpentier, B., Doerenbecher, A., Wilson, R., Jansen, F., Kinne, S., Reverdin, G., Speich, S., Bony, S. and Stevens, B. Ship- and island-based atmospheric soundings from the 2020 EUREC4A field campaign, *Earth System Science Data* (13:2), 2021, pp. 491–514.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-491-2021>
- Stevens B, Bony S, Farrell D,... Couvreur F,... 2021: EUREC4A, *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4067–4119, 2021.
<https://doi.org/10.5194/essd-13-4067-2021>
- Taillardat, M. (2021). Skewed and Mixture of Gaussian Distributions for Ensemble Postprocessing. *Atmosphere*, 12(8), 966.
<https://doi.org/10.3390/atmos12080966>
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., ..., Seferian, R., Sellar, A., Semmler, T., Shi, X., Song, Z., Steger, C., Stouffer, R., Swart, N., Tachiiri, K., Tang, Q., Tatebe, H., Voldoire, A., Volodin, E., Wyser, K., Xin, X., Yang, S., Yu, Y. and Ziehn, T. et al. Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project~(ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth System Dynamics* (12:1), 2021, pp. 253–293.
<https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
- Teckentrup L., de Kauwe M., Pitman A., Goll D., Haverd V., Jain A., Joetzjer E. et al.. Assessing the representation of the Australian carbon cycle in global vegetation models. *Biogeosciences*, 2021, 18 (20), pp.5639-5668.
<https://doi.org/10.5194/bg-18-5639-2021>
- Termonia, P. and Pottier, P. Jean-François Geleyn, fondateur et premier directeur de programme d'Aladin, *La Météorologie* (112), 2021, pp. 63-67.
<http://dx.doi.org/10.37053/lameteorologie-2021-0021>
- Thompson C., Christelle Barthe, Soline Bielli, Pierre Tulet, Joris Pianezze. Projected Characteristic

- Changes of a Typical Tropical Cyclone under Climate Change in the South West Indian Ocean. *Atmosphere*, 2021, 12 (2), pp.232. <https://doi.org/10.3390/atmos12020232> hal-03134335
- Thornhill, G. D., Collins, W. J., Kramer, R. J., Olivie, D., Skeie, R. B., O'Connor, F. M., Abraham, N. L., Checa-Garcia, R., Bauer, S. E., Deushi, M., Emmons, L. K., Forster, P. M., Horowitz, L. W., Johnson, B., Keeble, J., Lamarque, J.-F., Michou, M., Mills, M. J., Mulcahy, J. P., Myhre, G., Nabat, P., Naik, V., Oshima, N., Schulz, M., Smith, C. J., Takemura, T., Tilmes, S., Wu, T., Zeng, G. and Zhang, J. Effective radiative forcing from emissions of reactive gases and aerosols a multi-model comparison, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:2), 2021, pp. 853–874. <https://doi.org/10.5194/acp-21-853-2021>
- Thornhill, G., Collins, W., Olivie, D., Skeie, R. B., Archibald, A., Bauer, S., Checa-Garcia, R., Fiedler, S., Folberth, G., Gjernmundsen, A., Horowitz, L., Lamarque, J.-F., Michou, M., Mulcahy, J., Nabat, P., Naik, V., O'Connor, F. M., Paulot, F., Schulz, M., Scott, C. E., Seferian, R., Smith, C., Takemura, T., Tilmes, S., Tsigaridis, K. and Weber, J. Climate-driven chemistry and aerosol feedbacks in CMIP6 Earth system models, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:2), 2021, pp. 1105–1126. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1105-2021>
- Tiberi-Wadier, A.-L., Goutal, N., Ricci, S., Sergent, P., Taillardat, M., Bouttier, F. and Monteil, C. Strategies for hydrologic ensemble generation and calibration: on the merits of using model-based predictors, *Journal of Hydrology* (0), 2021, pp. 126233. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126233>
- Tramblay, Y., Ribes, A., Somot, S., Neppel, L., Lucas-Picher, P., Vinet, F. and Sauquet, E. Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en Méditerranée, *LHB* (107:1), 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1080/00186368.2021.1912971>
- Trimmer, H., P. Weihs, S. Faroux, H. Formayer, P. Hamer, K. Hasel, J. Laimighofer, D. Leidinger, V. Masson, I. Nadeem, S.M. Oswald, M. Revesz and R. Schoetter, 2021: Thermal conditions during heat waves of a mid-European metropolis under consideration of climate change, urban development scenarios and resilience measures for the mid 21st century. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(1), 9-32. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0966>
- Tulet P., Bertrand Aunay, Guilhem Barruol, Christelle Barthe, Remi Belon, et al. ReNovRisk: a multidisciplinary programme to study the cyclonic risks in the South-West Indian Ocean. *Natural Hazards*, In press. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04624-w> hal-03165702
- Turko, M., M. Gosset, M. Kacou, C. Bouvier, N. Chahinian, A. Boone, M. Alcoba, 2021: Rainfall measurement from Commercial microwave links for urban hydrology in Africa: a simulation framework for sensitivity analysis. *J. Hydrometeorol.*, 22, 1819-1834. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0163.1>
- Twohy, C., Demott, P., Russell, L., Toohey, D., Rainwater, B. et al. Cloud-Nucleating Particles Over the Southern Ocean in a Changing Climate. *Earth's Future*, 2021, 9 (3). <https://doi.org/10.1029/2020EF001673>. meteo-03450986
- Umgiesser, G., Bajo, M., Ferrarin, C., Cucco, A., Lionello, P., Zanchettin, D., Papa, A., Tosoni, A., Ferla, M., Coraci, E., Morucci, S., Crosato, F., Bonometto, A., Valentini, A., Orlić, M., Haigh, I. D., Nielsen, J. W., Bertin, X., Fortunato, A. B., Pérez Gómez, B., Alvarez Fanjul, E., Paradis, D., Jourdan, D., Pasquet, A., Mourre, B., Tintoré, J., and Nicholls, R. J.: The prediction of floods in Venice: methods, models and uncertainty (review article), *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2679–2704, 2021. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2679-2021>
- Vannitsem, S., Bremnes, J. B., Demaeyer, J., Evans, G. R., Flowerdew, J., Hemri, S., ... & Ylhaisi, J. (2021). Statistical Postprocessing for Weather Forecasts: Review, Challenges, and Avenues in a Big Data World. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(3), E681-E699. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0308.1>
- Veillon F, Dumont M, Amory C and Mathieu Fructus (2021), "A versatile method for computing optimized snow albedo from spectrally fixed radiative variables: VALHALLA v1.0", *Geoscientific Model Development*. Vol. 14(12), pp. 7329-7343. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-7329-2021>
- Verhoelst T., Gala Pinaridi, Henk J. Eskes, Ann Mari Fjæraa, Klaas Folkert Boersma, et al.. Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5p TROPOMI NO2 measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14 (1), pp.481-510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021> insu-02635842v2
- Vidal N., Franck Donnadieu et Joël Van Baelen, « Histoire de radars », *e-Phaistos* [En ligne], IX-2 | 2021, mis en ligne le 26 octobre 2021, consulté le 24 janvier 2022. <https://doi.org/10.4000/ephaistos.9128>
- Villefranche, N., Blanco, S., Couvreur, F., Fournier, R., Gautrais, J., Hogan, R. J., et al. (2021). Process-based climate model development harnessing machine learning: III. The representation of cumulus geometry and their 3D radiative effects. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2020MS002423. <https://doi.org/10.1029/2020MS002423>
- Visioni, D., MacMartin, D. G., Kravitz, B., Boucher, O., Jones, A., Lurton, T., Martine, M., Mills, M. J., Nabat, P., Niemeier, U., Seferian, R. and Tilmes, S. Identifying the sources of uncertainty in climate model simulations of solar radiation modification with the G6sulfur and G6solar Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics* (21:13), 2021, pp. 10039–10063. <https://doi.org/10.5194/acp-21-10039-2021>
- Vittorioso, F., Guidard, V. and Fourrie, N. An Infrared Atmospheric Sounding Interferometer—New Generation (IASI-NG) channel selection for numerical weather prediction, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (147:739), 2021, pp. 3297–3317. <https://doi.org/10.1002/qj.4129>
- Volpi, D., Meccia, V. L., Guemas, V., Ortega, P., Bilbao, R., Doblas-Reyes, F. J., Amaral, A., Echevarria, P., Mahmood, R. and Corti, S. A Novel Initialization Technique for Decadal Climate Predictions, *Frontiers in Climate* (3), 2021. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.681127>
- Wang, J. K., Aouf, L., Dalphinnet, A., Zhang, Y. G., Xu, Y., Hauser, D., & Liu, J. Q. (2021). The wide swath significant wave height: An innovative reconstruction of significant wave heights from CFOSAT's SWIM and scatterometer using deep learning. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091276. <https://doi.org/10.1029/2020GL091276>
- Wang, J. K., Aouf, L., Dalphinnet, A., Li, B. X., Xu, Y., & Liu, J. Q. (2021). Acquisition of the significant wave height from CFOSAT SWIM spectra through a deep neural network and its impact on wave model assimilation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016885. <https://doi.org/10.1029/2020JC016885>
- Wang, J., Aouf, L., Badulin, S.. Retrieval of wave period from altimetry : Deep learning accounting for random wave field dynamics, *Remote Sensing of Environment*, Volume 265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112629>
- Witschas, B., C. Lemmerz, O. L., U. Marksteiner, O. R., F. Weiler, F. F., A. Dabas, T. F. and D. Huber a, d. M. V. Spectral drift analysis of the Aeolus Fabry-Perot and Fizeau interferometers during the first years of operation., *Atmospheric Measurement Techniques* (0). <https://doi.org/10.5194/amt-15-1465-2022>
- Wurtz, J., Bouniol, D., Vié, B., Lac, C. Evaluation of the AROME model's ability to represent ice crystal icing using in situ observations from the HAIC 2015 field campaign. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147 (738), pp.2796-2817. <https://doi.org/10.1002/qj.4100> hal-03357442
- Xue, Y., Yao, T., Boone, A., Diallo, I., Liu, Y. et al.. Impact of Initialized Land Surface Temperature and Snowpack on Subseasonal to Seasonal Prediction Project, Phase I (LS4P-I): organization and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14, pp.4465-4494. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4465-2021> hal-03369899
- Yang, H, Ciais, P, Wang, Y, ... Joetzer E., ... et al. Variations of carbon allocation and turnover time across tropical forests. *Global Ecol Biogeogr.* 2021; 30: 1271– 1285. <https://doi.org/10.1111/geb.13302>
- Yano, J., Wactlawczyk, M. Nondimensionalization of the Atmospheric Boundary-Layer System: Obukhov Length and Monin–Obukhov Similarity Theory. *Boundary-Layer Meteorol* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10546-021-00657-7>
- Yano, J.-I. and Wedi, N. P.: Sensitivities of the Madden–Julian oscillation forecasts to configurations of physics in the ECMWF global model, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 4759–4778, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4759-2021>
- Yano, Jun-Ichi, Initiation of Deep Convection through Deepening of Well-Mixed Boundary Layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 147 (739), pp.3085-3095. <https://dx.doi.org/10.1002/qj.4117>
- Yano, Jun-Ichi, MJO as a Gestalt, *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2021. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0046.1>

Yano, Jun-Ichi, Agostino Manzato. Does More Moisture in the Atmosphere Lead to More Intense Rains? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021.1, 2021.
<https://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-21-0117.1>

Yao, Y., Ciaï, P., Viovy, N., Li, W., Cresto-Aleina, F., Yang, H., Joetzjer E. et al. (2021). A data-driven global soil heterotrophic respiration dataset and

the drivers of its inter-annual variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 35, e2020GB006918.
<https://doi.org/10.1029/2020GB006918>

Zamo, M, Bel, L, Mestre, O. Sequential aggregation of probabilistic forecasts—Application to wind speed ensemble forecasts. *J R Stat Soc Series C*. 2021; 70: 202– 225.
<https://doi.org/10.1111/rssc.12455>

Zennoune A, Latil P, Ndoye F-T, Flin F, Perrin J, Geindreau C and Benkhalifa H (2021), "3D Characterization of Sponge Cake as Affected by Freezing Conditions Using Synchrotron X-ray Microtomography at Negative Temperature", *Foods*. Vol. 10(12), pp. 2915-2937.
<https://doi.org/10.3390/foods10122915>

Thèses de doctorat

AUDOIN, O., "Calibration et analyse de sensibilité de la paramétrisation de la turbulence du modèle ARPEGE-CLIMAT - Application aux couches limites stables en Antarctique". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s193395>

BERARD-CHENU, L., "Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : la place de la production de neige". Université Grenoble Alpes, 2021.
<http://www.theses.fr/s231399>

BERNARD, E., "Réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s294526>

BRIVOAL, T., "Une modélisation alternative haute résolution du couplage air-mer et de ses effets sur la dynamique océanique dans l'Atlantique Nord-Est". Université de Toulouse, 2021.
<https://www.theses.fr/2021TOU30211>

BURGOT, T., "Viabilité et performance des solveurs points de grille dans la résolution du problème implicite du noyau dynamique du modèle AROME". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s191236>

COSTES, A., "Couplage bidirectionnel feu-atmosphère pour la propagation des incendies de forêt : modélisation, incertitudes et sensibilités". Université de Toulouse, 2021.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03641042/>

DESCHAMPS-BERGER, C., "Apport de la photogrammétrie spatiale pour la modélisation du manteau neigeux". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/2021TOU30044>

DUMAS, G., "Mise en place de services climatiques au sein de la Métropole Toulousaine à base d'un réseau d'observation pour le monitoring de l'îlot de chaleur urbain". Université de Toulouse, 2021.

HAFFAR, I., "Comportement de l'eau dans les carburants aéronautiques à basse température". Université Grenoble Alpes, 2021.
<http://www.theses.fr/2021GRALU017>

LAMOTTE, C., "Étude de l'impact des émissions de SO2 volcanique aux échelles globale et régionale avec le modèle de chimie-transport MOCAGE". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s294505>

LE PETIT, P., "Méthodes d'apprentissage profond pour l'estimation de paramètres météorologiques à partir d'images webcam. Applications au suivi des épisodes de neige en plaine". Université Paris-Saclay, 2021.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03625313>

LE ROY, B., "Methodologie d'étude des impacts du changement climatique sur la ville par descente d'échelle statistico-dynamique. Application à la région parisienne". Université de Toulouse, 2021.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03533358/>

MAURY, N., "Étude des processus dynamiques et microphysiques dans les nuages convectifs peu profonds : synergie entre simulations numériques et observations par une flotte de drones". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s294214>

MHEDHBI, Z., "Construire une expertise climatique locale pour mettre à l'agenda l'adaptation au changement climatique dans la planification et

l'aménagement urbains. Le cas du Grand Tunis". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s171245>

MUCIA, A., "Assimilation de données satellitaires pour le suivi et la prévision des sécheresses agricoles et des ressources en eau". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s214975>

THOMAS, G., "Potentiel de l'assimilation des données de radar à double polarisation pour la prévision du temps à échelle convective". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s185867>

VAN HYFTE, S., "Mise en œuvre et évaluation d'un nouveau système de réanalyse des paramètres de surface à haute résolution sur la France". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s221605>

WIMMER, M., "Représentation des erreurs de modélisation dans le système de prévision d'ensemble régional PEARO". Université de Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s294417>

WURTZ, J., "Étude et simulation des conditions météorologiques favorables au givrage par cristaux de glace à l'aide du modèle AROME et de la campagne HAIC". INPT, Toulouse, 2021.
<http://www.theses.fr/s214944>

ZGHEIB, T., "Trajectoires du risque avalancheux résultant de changements sociaux-environnementaux dans les hautes vallées des Alpes françaises". Université de Grenoble Alpes.
<http://theses.fr/2021GRALU010>

Habilitation à diriger des recherches soutenue en 2021

BENARD P., 2021 : "Les contraintes opérationnelles dans les modèles de prévision numérique du temps : implications scientifiques".
<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03420313>

SAINT-MARTIN D., 2021 : "Modélisation numérique du climat : de la théorie à la pratique".
<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03414672>

Glossaire

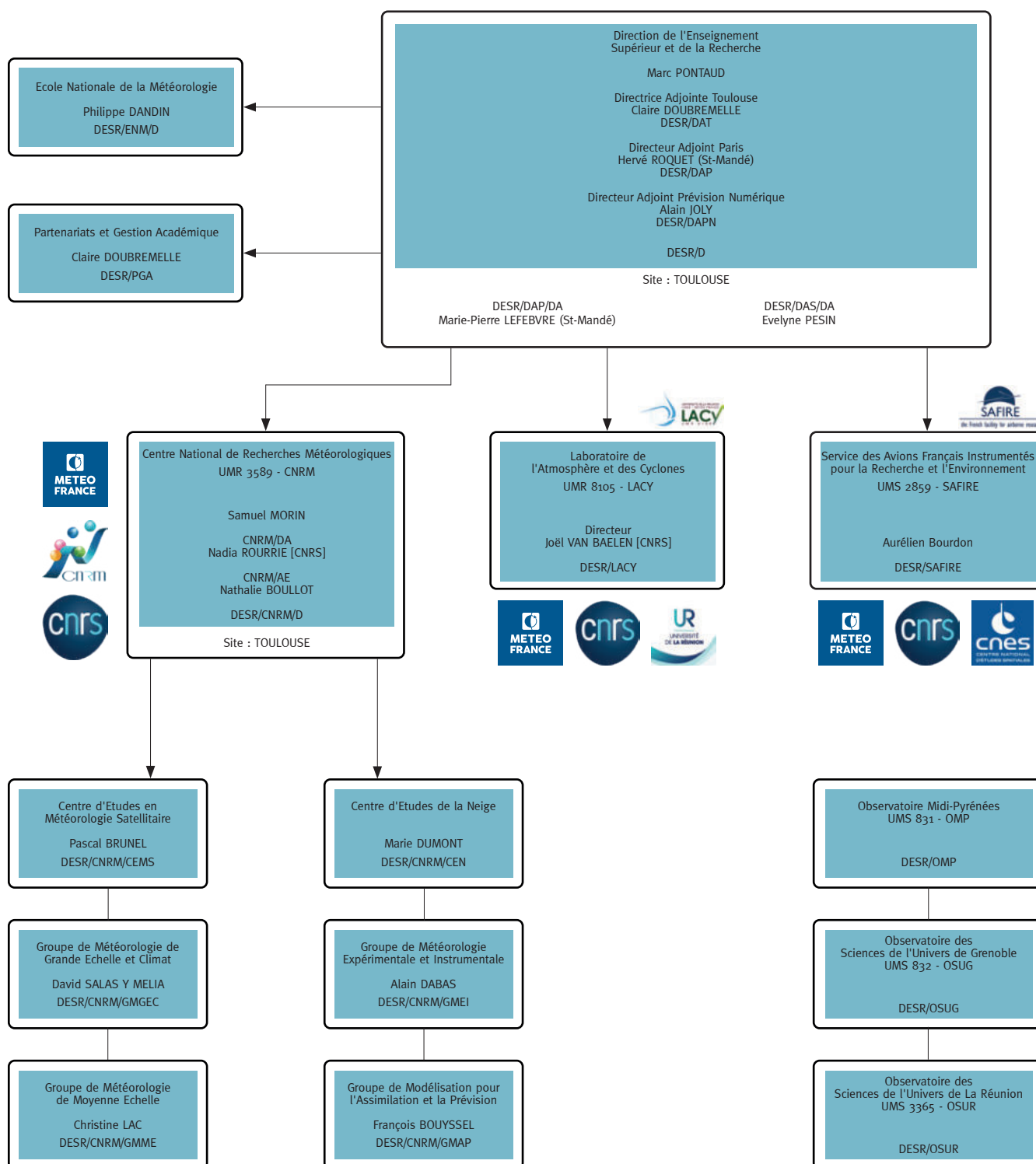
3DEnVar	Schéma d'assimilation variationnel ensembliste tridimensionnel	CMCC	Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique (Italie)
3SR	Sols, Solides, Structures, Risques	CMIP	Projet d'intercomparaison des modèles couplés
4DEnVar	Schéma associant l'approche variationnelle utilisée traditionnellement à Météo-France aux approches ensemblistes utilisées	CMIP5 and CMIP6	Climate Models Intercomparison Project n°5 and 6
ADAMONT	Impacts du changement climatique et adaptation en territoire de montagne	CMO	Couche Limite Océanique
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	CNES	Centre National d'Études Spatiales
ADM	Atmospheric Dynamics Mission	CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología (Espagne)	CNRM-CM6	Version 6 du Modèle de Climat du CNRM
AEOLUS	Atmospheric Explorer Observations with a Lidar UV System	CNRM-RCSM6	sixième version du système couplé de modélisation régionale
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational	CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques
ALAMO	Air-Launched Autonomous Micro Observer	CO	Monoxyde de Carbone
ALPHA	Algorithmes et modèles pour la Production Homogène globale	COMSI	Comité scientifique
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer	COP	Conférence des Parties
ANR	Agence Nationale de la Recherche	COPERNICUS	European Earth observation system http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/
AOS	Aérosols secondaires organiques	CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling Experiment
AOS	Atmosphere Observing Systems		modèle d'océan
AROME	Applications de la Recherche à l'Opérationnel à MEsoéchelle	CROCO	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France
AROME-PI	Configuration AROME Prévision Immédiate	CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle	Cry-ObsClim	CRYosphere as a CLIMate OBServatory
ASCAT	Advanced SCATterometer	C3S	Copernicus Climate Change Service
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	CTRIP	CNRM-Total Routing Integrated Pathway
BIDER		DAK	Doubling Adding KNMI
BIPER		DCSC	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
BSC	Barcelona Supercomputing Center	DCT	Diffraction Contrast Tomography
BSRN	Baseline Surface Radiation Network	DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	DESR	Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
CAMS	projet Européen Copernicus	DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
CART	Classification And Regression Trees	DIRAG	Direction Inter-Régionale Antilles Guyane
CAT	Turbulence en Air Clair	DIROI	Direction InterRégionale Océan Indien
CCM-I	Chemistry-Climate Model Initiative	DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
Cedre	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux	DRE	Effet radiatif direct
CEMS	Centre d'Etude en Météorologie Satellitaire	DRIAS	Portail d'accès à des données climatiques
CEN	Centre d'Etudes de la Neige	DSM	Direction des Services Météorologiques
CEPMET	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	DSO	Direction des Systèmes d'Observation
CEREA		DSSF	Downwelling surface short-wave radiation flux
CERES	Satellite	DWD	service météorologique allemand
CFOSAT	Chinese-French SATellite	ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
CGLS	Copernicus Global Land Service	ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
CIFRE	Conventions Industrielles de Formation par la REcherche	EcRad	code de transfert radiatif
CLA	Couche Limite Atmosphérique	ECUME	ECUME paramétrisation des vagues
CLIMSNOW	Adaptation au changement climatique et projections de l'évolution de enneigement	EDMF	Eddy-Diffusivity-Mass-Flux
CLIO	Lidar	EDR	Eddy Dissipation Rate
CLMcom-CCLM4-8-17	Modèle climatique régional	ELTER	Infrastructures de Recherche Européenne sur le Long-terme en Ecologie
		ENAC	Ecole Nationale Aviation Civile
		ENSO	El Nino Southern Oscillation
		EOF	Fonction Orthogonale Empirique
		EPS-SG	Système polaire de 2 ^e génération d'EUMETSAT
		ERA	European Re-Analysis

ERC-IVORI	projet sur les transformations physiques du manteau neigeux	IRS	InfraRed Sounder
ESA	European Space Agency	ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
ESGF	Earth System Grid Federation	KNMI	Institut royal météorologique des Pays-Bas
ETP	Évapotranspiration Potentielle	LA	Laboratoire d'Aérodologie
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques	LAAS	Laboratoire Analyse Architecture Systèmes
EUREC4A	Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate	LACY	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105
EUROCORDEX	Modèle régional de climat	LAI	Leaf Area Index
EUSPA	l'Agence du programme spatial de l'Union européenne	LAMP	Laboratoire de Météorologie Physique
FCI	Flexible Combined Imager	LARGE	Laboratoire de recherche en géosciences et énergie
FORUM	Sondeur Infrarouge	LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales
FTP	File Transfert Protocol	LDAS	Land Data Assimilation System.
GCM	Modèle de circulation Générale	LEFE	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
GELATO	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean	LES	Large Eddy Simulation
GEO	Group on Earth Observations	LIAISE	Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment
GET	laboratoire de Géosciences Environnement Toulouse	LIDAR	light detection and ranging
GES	gaz à effet de serre	LIMA	schémas microphysiques
GHER	GeoHydrodynamic and Environmental Research	LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
GHG	Green House Gases	LMI	Lifetime Maximum Intensity
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat	LSA	Land Surface Analysis
GIRAFE	capteur Gravimétrique Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarqué	LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
GlacioClim	National Observation Service: GLAciers as a CLIMate Observatory	LWC	Liquid Water Content
GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision	MAE	Erreur Moyenne Absolue
GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale	MCT	Modèle de Chimie Transport
GNSS	systèmes mondiaux de navigation par satellite	MEB	Multi-Energy-Balance
GOES	Satellites météorologiques géostationnaires américains	MEDSCOPE	Mediterranean Services Chain based On climate Predictions
GOME-2	Global Ozone Monitoring Experiment	MEPRA	Modèle Expert d'Aide à la Prévision du Risque d'Avalanche
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	MERCATOR-OCEAN	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle
GSX	partenaire de Météo-France exploitant l'outil PROSNOW	MERIT-DEM	Modèle Numérique de terrain
GTG	Graphical Turbulence Guidance	MESO-NH	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique
HCERES	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	Met Office	Service national britannique de météorologie
HCL	Hauteur de Couche Limite	METAR	MEteorological Aerodrome Report
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	METOP	MEteorological Operational Polar satellites
HITRAN	High-resolution TRANsmission molecular absorption database	MFWM	Météo-France WAve Model
HKO	Hong Kong Observatory	MIN2OS	Projet de satellite de surveillance des sources de protoxyde d'azote
HOMONIM	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins	MJO	Madden-Julian Oscillation
HRIR	High Resolution Infrared Radiometer	Mlake	Modèle de bilan de masse des lacs
HSRL	High Spectral Resolution Radar	MOCAGE	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model	MODCOU	MODèle hydrologique COUpilé surface-souterrain.
HyMeX	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment	MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)
IAGOS	In-service Aircraft for Global Observing System	MOHC-HadGEM2-ES	Modèle climatique global
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge	MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbure
IASI-NG	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge nouvelle génération	MOUV.RE	MOdeling Ultraviolet Radiation at REunion island
ICE3	Schéma de nuages	MPI	Max Planck Institute
ICICLE	Campagne de mesures	MPI-M	Max-Planck-Institut für Meteorologie - Institut Max-Planck de météorologie
ICON	Modèle du DWD	MRIR	Medium Resolution Infrared Radiometer
ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER	MSG	Météosat Seconde Génération
IFS	Integrated Forecasting System	MSU	Microwave Sounder Unit
Ifts	Institut de la Filtration et des Techniques Séparatives	MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
IGE	Institut des Géosciences de l'Environnement	MTG	Météosat Troisième Génération
INERIS		MTG-I	Meteosat Third Generation – Imager
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique	MW	Micro Ondes
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement	MWR	radiomètre micro-ondes
IODC	Indian Ocean Data Coverage	N2O	Protoxyde d'azote
IPCC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	NAO	Oscillation Nord-Atlantique
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace	NAWDEx	North Atlantic Waveguide and Downstream Impact Experiment
IR	Infra Rouge	NCAR	National Center for Atmospheric Research
IRD	Institut de Recherche pour le Développement	NEMO	Nucleus for European Modelling of Ocean
IRIS	InfraRed Interferometer Spectrometer	NEPHELAe	Network for studying Entrainment and microPHysics of cLOUDs using Adaptive Exploration
		NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration
		NWP	Numerical Weather Prediction
		OA	Océan-Atmosphère
		OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
		OAD	Outils d'Aide à la Décision

OLCI	capteur satellitaire	SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
OMM	Organisation Météorologique Mondiale	Shom	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales	SIRS	Satellite InfraRed Spectrometer
ONERC	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique	SMA	Seychelles Meteorological Authority
OOPS	object-oriented Prediction System restructuring the IFS	Smart4RES	Projet d'amélioration de la prévision de production à court terme d'énergie renouvelable solaire et éolienne
OPAR	Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion	SNO	Service National d'Observation
OPG	Orages Points de Grille	SOERE Cry-ObsClim	Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement
OSSE	Simulations des Systèmes d'observation	SOFOG3D	SOuth westFOGs 3D (compréhension des processus de petites échelles pour améliorer les prévisions du brouillard)
OSTIA	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis	SOOI	Sud-Ouest Océan Indien
OSUG	Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble	SRON	Space Research Organisation Netherlands
OZCAR	Observatoires de la Zone Critique : Applications et Recherche	SSH-Aerosols	Module du modèle MOCAGE
PCMT	Prognostic. Condensates Microphysics and Transport	SSM	Special Sensor Microwave
PEARO	Prévision d'Ensemble Arome	SSP	Shared Socio-economic Pathway
PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège	SST	Sea Surface Temperature
PI	Prévision Immédiate	Stratéole-2	Projet franco-américain dédié à l'étude des phénomènes atmosphériques au niveau de l'équateur terrestre
PIROI	Plateforme d'Intervention Régionale dans l'Océan Indien de la Croix-Rouge	SURFEX	code de SURFace EXternalisé
PISSARO	Projet de prévision à l'échelle intra-saisonnière pour des applications sur le bassin sud-ouest de l'océan Indien (SOO)	SWI	Soil Wetness Index
PM10	PM10 (particules aérosols de moins de 10 microns) ca	SWIM	Surface Wave Investigation and Monitoring
PNRC	Parc Naturel Régional de Chartreuse	SYNOP	Données d'observations issues des messages internationaux d'observation en surface
PNT	Prévision Numérique du Temps	TAF	Terminal Aerodrome Forecast
POI	Période d'Observation Intensive	TCCON	Total Carbon Column Observing Network
PRESCILIA	jeu de données de pluie quotidienne	TEB	Town Energy Balance
PROSNOW	Provision of a prediction for Snow management	TEMSI	TEMps Significatif (aéronautique)
RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu	THIR	Temperature-Humidity Infrared Radiometer
RALI	RADAR + LIDAR embarqués	TIROS	Television InfraRed Operational Sounder
RCM	Modèle de Climat Régional	TROPOMI	TROPOspheric Monitoring Instrument
RCP	Representative Concentration Pathway	TSEN	Thermodynamic sensors - système d'observation de haute précision sur ballon
RCP8.5	8.5 W/m ² Representative Concentration Pathway corresponding to a 8.5 W/m ² radiative forcing at the end of the 21st century compared to preindustrial climate	TSM	Températures de Surface de la Mer
RGB	Red Green Blue (satellite)	UERRA	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
RHT	Relative Humidity Threshold	UK	United Kingdom
RMSE	Root Mean Square Error	UMR	Unité Mixte de Recherche
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS	UTC	Temps universel coordonné
S2S	Sub-seasonal to Seasonal	UTCI	Universal Thermal Climate Index
S8	Système 8 de prévision saisonnière de Météo-France	UTLS	Haute Troposphère Basse Stratosphère
SAF OSI	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice	VAAC	centre d'avertissement des cendres volcaniques
SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	VIIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige	WCB	Warm Convection Belts
SAR	Synthetic Aperture Radar	WIRE	Winter Risks for Energy
SBG	Subgrid (phénomènes sous-grille)	WMO	World Meteorological Organization
SCO	Spatial Climate Observatory	WW3	Modèle de prévisions de vagues côtières
SDI	Sahara Dust Index		
SESAR	Single European Sky ATM Research		

Organigramme de la Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR)

1^{er} Octobre 2021

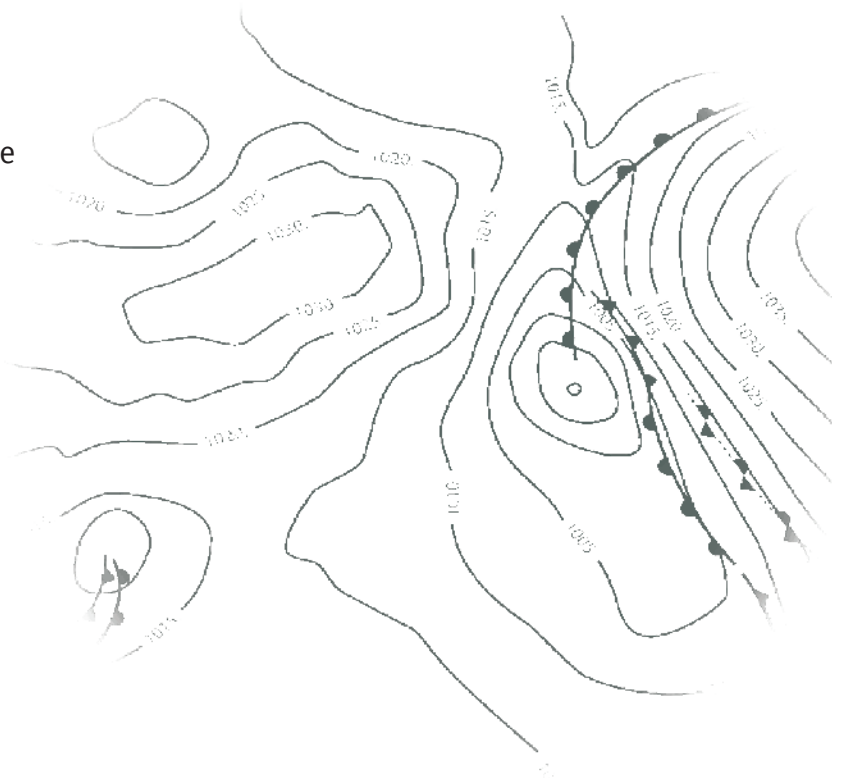


Météo-France

73, avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex
Tél. : +33 (0) 1 77 94 77 94
Fax : +33 (0) 1 77 94 70 05
www.meteofrance.com

Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

42, avenue Gaspard Coriolis
31057 Toulouse Cedex 1 France
Tél. : +33 (0) 5 61 07 93 70
Fax : +33 (0) 5 61 07 96 00
<http://www.meteofrance.fr/activites-recherche>
Courriel : desr_contact@meteo.fr



Création DIRCOM

Météo-France est certifié ISO 9001
par AFNOR Certification
© Météo-France 2022
Copyright juin 2022
ISSN : 2116-438X