



HAL
open science

Météo-France : Rapport recherche 2020

Pontaud Marc

► **To cite this version:**

| Pontaud Marc. Météo-France : Rapport recherche 2020. Météo-France. 2021. hal-04659398

HAL Id: hal-04659398

<https://hal.science/hal-04659398v1>

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.

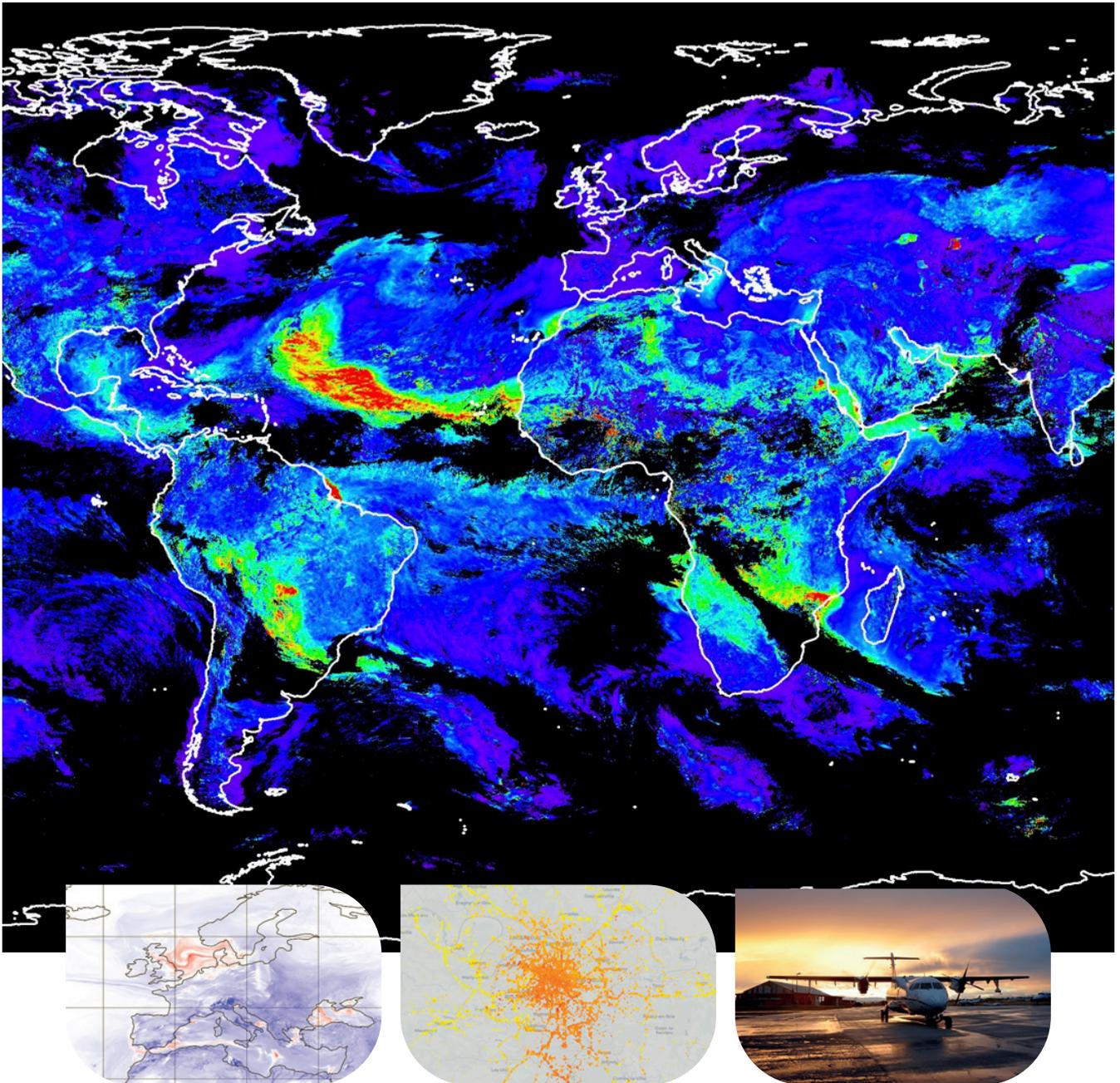


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



METEO
FRANCE



Rapport **Recherche**
2020

Rapport Recherche 2020

Sommaire

Prévision numérique du temps et assimilation de données ● page 6

Étude et modélisation des processus ● page 14

Climat ● page 20

Modélisation du climat
Diagnostic, étude et impacts
Prévision saisonnière

Chimie, aérosols et qualité de l'air ● page 30

Neige ● page 36

Océanographie ● page 40

Techniques, campagnes et produits d'observation ● page 44

Techniques et produits d'observation
Campagnes de mesures

Recherche et aéronautique ● page 52

Annexes ● page 54

La recherche occupe une place privilégiée au sein de Météo-France tant elle vient en support à l'ensemble des métiers de l'établissement. Elle est la source des progrès qui sont ensuite mis en œuvre en matière d'observation, de prévision numérique du temps et du climat. Elle permet à l'établissement d'améliorer sans cesse la qualité de ses produits opérationnels et d'ouvrir de nouveaux chantiers pour répondre aux attentes de la société et des pouvoirs publics.

Élément majeur pour tout Service Météorologique de dimension internationale, l'arrivée fin 2020 de deux nouveaux supercalculateurs qui proposent, depuis tout début 2021, une augmentation de puissance d'un facteur 5,5. Les chaînes de prévision y sont installées. La première grande évolution est en cours de construction et sera testée à partir de mi-2021. Elle devra être validée – normalement- début 2022 et apporter des progrès significatifs tant au niveau des prévisions mondiales que des prévisions métropolitaines et ultramarines. À noter que ces deux nouvelles machines basées sur des processeurs CPU sont également dotées de quelques processeurs GPU permettant de tester des approches nouvelles pour l'adaptation des codes numériques sur les architectures futures mais aussi un post-traitement intégré des prévisions d'ensembles.

L'année 2020 a permis la consolidation de la Stratégie Scientifique 2020-2030, avec de nouveaux échanges avec les membres du COMSI et une présentation en Conseil d'Administration. Maintenant approuvée, cette Stratégie Scientifique alimentera plus largement l'Établissement dans le cadre la construction de son prochain Contrat d'Objectifs et de Performance pour la période 2022-2026. Cette Stratégie s'articule autour de cinq grands axes :

- Progresser dans la connaissance et l'anticipation des phénomènes extrêmes et de leurs impacts, dans un contexte de changement climatique
- Poursuivre la transition vers des systèmes de modélisation environnementale intégrés et partagés entre la prévision et le climat
- Adapter les outils de modélisation aux exigences opérationnelles sur les architectures de calcul de demain
- Valoriser les prévisions météorologiques et climatiques, en réponse aux attentes des bénéficiaires internes et externes



- Renforcer la dynamique de coopérations nationales et internationales, en veillant à la convergence avec le CEPMMT

Ces axes seront alimentés par un ensemble de travaux sur la généralisation de la prévision d'ensemble et sa valorisation, sur un nouveau système intégré (« système Terre ») régional pour aller jusqu'aux impacts, sur un système hectométrique pour les sites à enjeux et sur la ville qui réunit nombre d'enjeux météo-climatiques. Il s'agira également de participer aux exercices du GIEC, de déterminer toujours mieux le changement climatique à l'échelle locale, en métropole comme en outre-mer pour bien traiter les phénomènes extrêmes, et de faire progresser la prévision saisonnière et sa valorisation. Côté montagne, la période qui s'ouvre, préparera une rupture avec le développement d'un nouveau système de prévision du risque d'avalanche sur les massifs, représentés alors à une résolution de 250 mètres et intégrant de nouvelles observations spatiales. Plus largement pour l'ensemble des sujets, les travaux porteront sur la bonne prise en compte des grands programmes spatiaux annoncés jusqu'en 2030, mais aussi des opportunités offertes par l'observation spatiale à « bas coût » et les données de masse. L'intelligence artificielle sera un outil majeur pour le traitement de ces données d'observation, pour le post-traitement des prévisions d'ensemble et l'optimisation de nos modèles numériques. Nos efforts se porteront aussi, en coordination européenne et nationale, sur l'adaptation de nos codes numériques aux nouvelles architectures des prochains calculateurs haute performance.



Au niveau international, Météo-France concrétise sa politique de coopération privilégiée avec le CEPMMT autour du modèle global Arpège/IFS, notamment sur différents aspects de la physique qui apporteront prochainement des progrès sur nos prévisions mondiales. Météo-France voit aboutir le rapprochement des consortiums Aladin et Hirlam par la mise en place au 1^{er} janvier 2021 du nouveau consortium ACCORD qui regroupe 26 pays autour du modèle régional AROME-HARMONIE-ALARO. La direction de ce nouveau consortium a été confiée à un ingénieur de Météo-France.

L'Établissement poursuit sa politique de participation active aux programmes d'Eumetsat qui se matérialisera pas notre engagement dans les CDOP 4 de cinq des « Satellite Application Facilities ». En 2020, dans un contexte compliqué lié au contexte COVID, les observations d'ADM-Aeolus (assimilation des profils de vent dans le modèle global) et de CFOSAT (assimilation des observations de vagues dans le modèle d'état de surface de la mer) ont été prises en compte dans les différents modèles. La préparation des futures missions MTG et METOP-SG, qui embarqueront de nouveaux instruments à fort potentiel, sera poursuivie ainsi que la préparation de certains instruments embarqués dans le cadre des programmes Sentinel. Météo-France maintient sa forte participation aux projets européens dont Copernicus, et prépare son implication avec ses partenaires ACCORD dans le projet DestinE porté par le triumvirat ESA-EUMETSAT-ECMWF.

Au niveau national, Météo-France poursuit son implication dans la communauté scientifique qui se manifeste par des liens divers avec de nombreux acteurs dont le CNRS, le CNES, les Universités et par sa participation à AllEnvi. L'Établissement est partie prenante de l'infrastructure de recherche Data Terra avec ses pôles de données et de services AERIS et THEIA, de Kalideos-Alpes sous l'égide du CNES, et participe aux Infrastructures de Recherche ACTRIS-FR et CLIMERI-France. En particulier, AERIS est une opportunité et un vecteur pour faciliter l'accès du monde de la recherche, aux données opérationnelles de l'établissement.

Sur le plan expérimental et des campagnes de mesures, l'activité a été fortement impactée par le contexte COVID. On pourra se réjouir que, malgré cette difficulté majeure, la campagne SOFOG-3D, inscrite au Contrat d'Objectifs et de Performance 2017-2021, a pu atteindre ses objectifs. En revanche, on regrettera le report en 2021 de la campagne LIAISE qui vise à mieux comprendre les régions semi-arides et y améliorer nos prévisions, notamment pour le bilan hydrique. SAFIRE a de son côté dû reporter en 2021, voir annuler, les campagnes prévues entre mars et septembre 2020. Néanmoins la campagne EUREC⁴A, avant le premier confinement a pu se dérouler de parfaite façon. Pour le remplacement de l'avion de recherche haute altitude Falcon 20, Météo-France a soutenu, aux côtés des autres tutelles de SAFIRE, la démarche mise en œuvre qui a été retenue dans le cadre du PIA3+. L'Établissement accompagnera le projet en maintenant ses moyens à l'Unité SAFIRE mais ne pourra pas participer financièrement à l'investissement initial.

La très grande partie des travaux de recherche qui intéressent directement Météo-France sont conduits par l'UMR CNRM. C'est l'occasion de saluer et souhaiter le meilleur, à la nouvelle équipe de direction du CNRM (Samuel Morin et Nadia Fourrié) qui prend ses fonctions au 1^{er} janvier 2021. D'autres travaux de recherche sont également conduits au sein de l'UMR LACy et dans certaines directions thématiques de l'Établissement. Tous ces travaux sont détaillés dans la suite du présent document. Ils sont nombreux, divers, novateurs et passionnants. Ils illustrent parfaitement le large spectre de nos activités recherche, toutes essentielles à l'Établissement et à son devenir.

Mais 2020 a été l'année COVID avec ses difficultés et complications. Il convient de saluer ici tous les acteurs, chercheurs, ingénieurs, techniciens, administratifs, contractuels, doctorants, stagiaires et particulièrement celles et ceux qui ont eu à animer des équipes ou à encadrer des collègues. Il convient aussi de saluer les équipes supports et en particulier au service informatique qui a joué un rôle crucial durant cette période. Grand merci à tous et espérons que l'année 2021 finira par avoir raison de cette pandémie.

Bonne lecture.



Marc Pontaud
Directeur Scientifique
de Météo-France,
Directeur de l'Enseignement
Supérieur et de la Recherche

Prévision numérique du temps et assimilation de données

Une part importante des activités de recherche et développement menées en prévision numérique du temps (PNT) au cours de l'année 2020 a été consacrée à la mise en œuvre d'évolutions de la chaîne opérationnelle, au portage de cette chaîne sur les nouveaux supercalculateurs Bull-AMD et à la préparation de la prochaine version des systèmes de PNT. De nouvelles données ont ainsi été assimilées opérationnellement, telles que les données de vents nuageux du satellite américain Goes17, les données avion Afirs et Tamdar distribuées par la compagnie FLYTH, les vents du lidar spatial Aeolus et les données de plusieurs récepteurs satellites de géolocalisation par radio-occultation. Ces deux derniers types de données ont eu un impact positif très significatif sur les scores objectifs de prévision. De nombreux travaux ont été réalisés pour préparer la prochaine chaîne en double, qui s'avère être la première étape de mise en œuvre de la prospective calcul à l'origine de l'acquisition des nouvelles machines. Celle-ci vise notamment à un alignement de la résolution spatiale des systèmes ensemblistes (PEARP et PEARO) avec celle des systèmes déterministes (Arpège et Arome-France), à une augmentation de la résolution horizontale des systèmes Arome déployés en Outremer, et à un transfert vers l'opérationnel de nombreuses améliorations techniques et scientifiques.

En parallèle, des activités de recherche ont été menées pour préparer les évolutions à plus long terme des systèmes de PNT. Un schéma d'assimilation, dit « EnVar », combinant l'approche variationnelle et l'approche ensembliste, est développé 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 ». Ce type d'algorithme « EnVar » est particulièrement adapté pour analyser de nouvelles variables, comme par exemple les hydrométéores du modèle Arome. Des recherches sur les noyaux dynamiques sont conduites pour améliorer la performance du modèle Arome sur des machines massivement parallèles. L'utilisation du champ d'ozone du modèle Morage permet d'améliorer les calculs de transfert radiatif dans l'assimilation de données, préfigurant les bénéfices d'une modélisation intégrant davantage de composantes du système Terre. Des travaux de recherches sont effectués pour développer l'utilisation des prévisions d'ensemble (post-traitement par des techniques d'intelligence artificielle, intégration dans des outils d'aide à la décision, etc.)

Prise en compte des hydrométéores dans le 3DEnVar AROME

La place des hydrométéores dans l'assimilation de données à échelle convective est une question sensible.

Ces variables tridimensionnelles du modèle AROME décrivent l'eau atmosphérique sous forme condensée : contenus massiques d'eau nuageuse liquide, de cristaux de glace, de pluie, de neige et de graupel. Elles n'étaient jusqu'alors pas affectées par l'assimilation de données, leur ajustement aux autres variables analysées (humidité spécifique, température etc.) étant laissé à la charge du modèle, après assimilation. Ce comportement est sous-optimal, et constitue un des obstacles à l'assimilation directe des observations sensibles aux précipitations

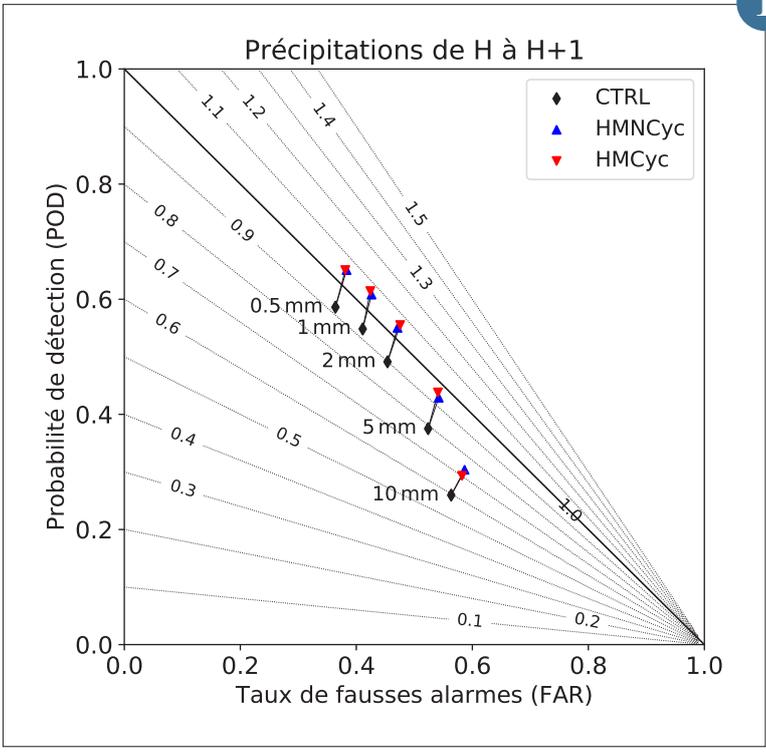
et aux nuages (radars, imageurs micro-ondes...). L'implémentation au CNRM d'un prototype de 3DEnVar¹ pour AROME a cependant permis de prendre en compte ces variables, l'approche ensembliste permettant une description en temps réel de leurs statistiques d'erreurs de prévision. Des méthodes de filtrage par localisation du bruit d'échantillonnage de ces erreurs ont dû toutefois être implémentées.

L'ajout des hydrométéores comme variables de l'analyse a été évalué dans un cadre proche de l'opérationnel mais à résolution dégradée (3,2 km au lieu de 1,3 km), ce qui a permis d'étendre la période d'évaluation à 3 mois (mai – août 2018). Même sans

assimiler d'observations supplémentaires, l'impact observé est positif aux échéances de la prévision immédiate. En particulier, les améliorations sont statistiquement significatives pour le positionnement des nuages (jusqu'à 6 h) et pour les précipitations (première heure). La robustesse de ces résultats est confirmée par leur relative indépendance vis-à-vis du schéma de localisation choisi pour le 3DEnVar.

1. 3DEnVar : Schéma d'assimilation variationnel ensembliste tridimensionnel

1



L'impact de l'ajout des hydrométéores est globalement positif dans les expériences en configurations cyclée (HMCyc) et non-cyclées (HMNCyc) par rapport à l'expérience de contrôle (CTRL). Les lignes de niveau indiquent la valeur du biais fréquentiel.

AEOLUS : Utilisation opérationnelle dans le modèle global de prévisions du temps

Le satellite AEOLUS de l'Agence Spatiale Européenne est en orbite héliosynchrone depuis le 22 août 2018.

La première que constitue l'utilisation d'un LIDAR Doppler pour la mesure de profils de vents depuis l'espace a nécessité un travail considérable de calibration/validation. Ainsi, à partir du 20 avril 2020, des produits de vent AEOLUS ont été diffusés en temps réel aux centres de prévisions météorologiques opérationnels, avec une qualité jugée suffisante pour être assimilées dans le modèle global de prévision numérique ARPEGE. Le CNRM/GMAP, fortement impliqué dans ce travail préparatoire, a pu utiliser ces données dès leur mise à disposition. C'est ainsi qu'après avoir montré un impact très positif sur la qualité des scores de prévisions (cf. Figure), leur assimilation opérationnelle est intervenue peu de temps après : le 30 juin 2020.

L'utilisation de ces données en opérationnel a été d'autant plus intéressante qu'elle est venue compenser le manque de données avions induit par la crise sanitaire (cf. l'impact

positif dans l'hémisphère Nord qui n'avait pas été montré jusqu'alors). Les données AEOLUS représentent seulement 0,42 % du nombre total de données assimilées dans le modèle ARPEGE, mais elles contribuent à hauteur de 2,5 % à l'information apportée par les observations au modèle et elles sont les troisièmes les plus efficaces (par observation individuelle) pour réduire l'erreur de prévision à 24 heures.

Météo-France a ainsi rejoint le CEPMMT et le DWD (service météorologique allemand) dans le groupe des premiers centres météorologiques à assimiler opérationnellement ces données.

L'importance des vents AEOLUS pour la prévision numérique du temps a amené l'ESA à prolonger de plus d'un an cette mission innovante (fin 2022).

2

Détection, suivi et représentation des cyclones tropicaux dans la prévision d'ensemble globale PEARP

Cette étude s'intéresse au système de prévision d'ensemble global PEARP utilisé à Météo-France, et qui est basé sur le modèle global ARPEGE. A ce jour, il n'existe pas d'évaluation systématique de la PEARP sur ses capacités à bien prévoir les trajectoires et l'intensité des cyclones tropicaux. Dans ce but, une approche originale a été développée dans laquelle des scores orientés « objets » ont été calculés à partir d'un outil de suivi des cyclones tropicaux développé au sein du CNRM, et préalablement adapté à la PEARP. Les cyclones de la période s'étendant du 5 juillet au 14 décembre 2019, sur tous les bassins du globe, ont été simulés avec la PEARP, puis les prévisions ont été confrontées aux analyses cycloniques disponibles (Best-Track).

L'évaluation montre des résultats tout à fait comparables à l'état de l'art, i.e. des erreurs de trajectoires en moyenne de l'ordre de 500-600 km à 120h d'échéance (Fig a), en dépit d'un biais lent simulé. Ces erreurs sont bien cohérentes avec la dispersion de l'ensemble. Enfin, l'exemple du cyclone Dorian montre que la PEARP est capable, pour ce cas, de bien cerner l'incertitude et la possibilité d'un système très intense impactant les Bahamas et le sud-est des États-Unis trois ou quatre jours en amont (Fig b).

Cette évaluation de type « objet » pour les cyclones permettra d'améliorer *in-fine* la PEARP en matière de prévision cyclonique et ouvre des perspectives quant à son utilisation dans un système d'ensemble à haute résolution avec le modèle Arome dédié aux Outre-Mer.

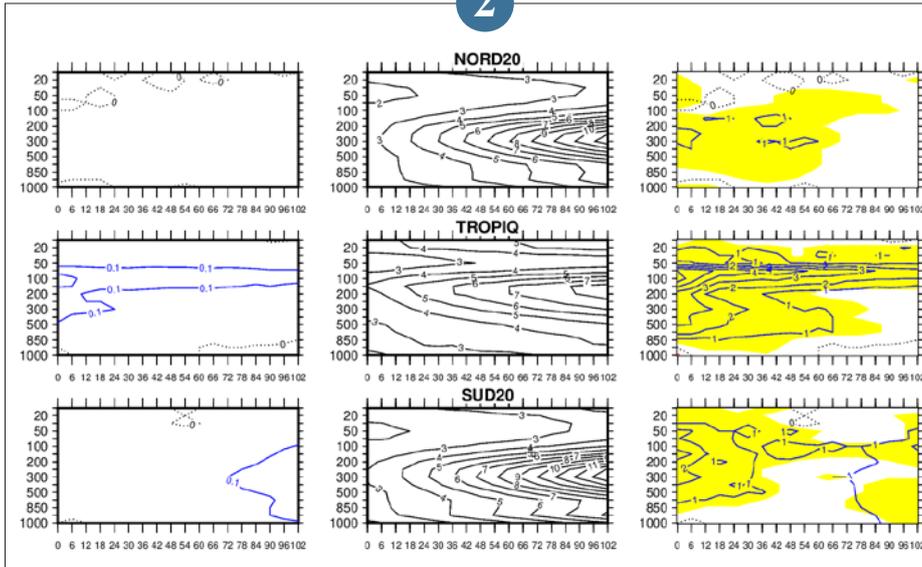
4

Impact de l'ozone dans RTTOV sur les prévisions ARPEGE

Pour extraire de l'information des observations satellitaires utile au modèle global de prévision numérique du temps ARPEGE, le modèle de transfert radiatif rapide RTTOV est un outil numérique indispensable. Il permet de simuler ces observations à partir d'une information réaliste de l'état de l'atmosphère (température, vapeur d'eau) ainsi que de sa composition chimique. Pour la prévision numérique du temps, les concentrations de certains gaz et aérosols sont approximées par des profils climatologiques. À Météo-France, le Modèle de Chimie Transport (MCT) MOCAGE est capable de simuler de manière réaliste la concentration de nombreux gaz et aérosols présents dans l'atmosphère. Un couplage des modèles ARPEGE et MOCAGE permettrait d'améliorer l'assimilation des observations satellitaires infrarouges dans ARPEGE. C'est ainsi que l'utilisation de champs d'ozone réalistes fournis par MOCAGE dans RTTOV a rendu plus précise la simulation des canaux sensibles à l'ozone du sondeur hyperspectral IASI à bord du satellite Metop. Une simulation plus précise de certains canaux situés dans des bandes d'absorption du CO₂ ou de la vapeur d'eau a également été observée. Des expériences d'assimilation de ces données dans le modèle ARPEGE, montrent que le changement apporté aux simulations de ces canaux améliore progressivement la qualité des analyses météorologiques. Un impact positif indirect sur l'assimilation d'autres observations, indépendantes de l'ozone, telles que les radiosondages, les observations satellitaires micro-ondes ou de GNSS Radio-occultation a été noté grâce à de meilleures prévisions à courte échéance du modèle ARPEGE. Les prévisions météorologiques à plus longue échéance (jusqu'à 102 h) sont également améliorées pour différents paramètres (vent, température, humidité) Le travail se poursuit pour faire bénéficier le modèle opérationnel ARPEGE de ces innovations et l'étendre à d'autres constituants atmosphériques.

3

2



Impact relatif des mesures de vent AEOLUS sur la prévision du vent du modèle ARPEGE dans l'hémisphère Nord (ligne du haut), les Tropiques (ligne du milieu) et l'hémisphère Sud (ligne du bas) (avril à mai 2020). La colonne de gauche est la variation de l'écart quadratique moyen de l'erreur de prévision du vent (en m/s) par rapport à l'analyse du CEPMMT aux échéances de 0 à 102 heures (abscisse) et en fonction du niveau de pression (ordonnée en hPa) par rapport à une expérience de référence sans assimilation des données AEOLUS. La colonne du milieu est l'écart quadratique moyen de l'erreur de prévision du vent pour l'expérience de référence, et la colonne de droite est le rapport entre la colonne de gauche et la colonne du milieu (en pourcentage). Les lignes de niveaux bleus marquent une réduction de l'erreur de prévision. Le fond jaune indique les zones où les statistiques sont jugées significatives.

3

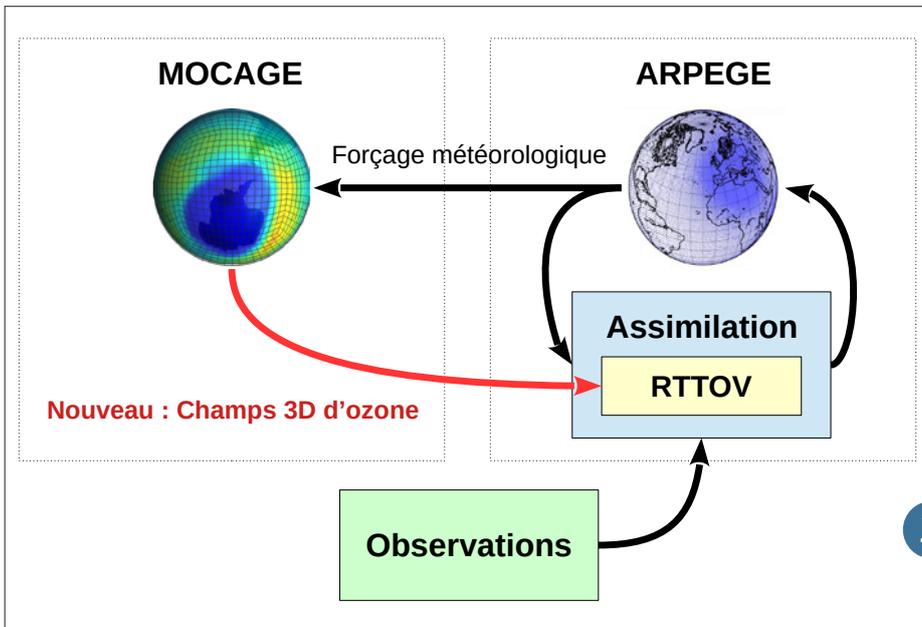
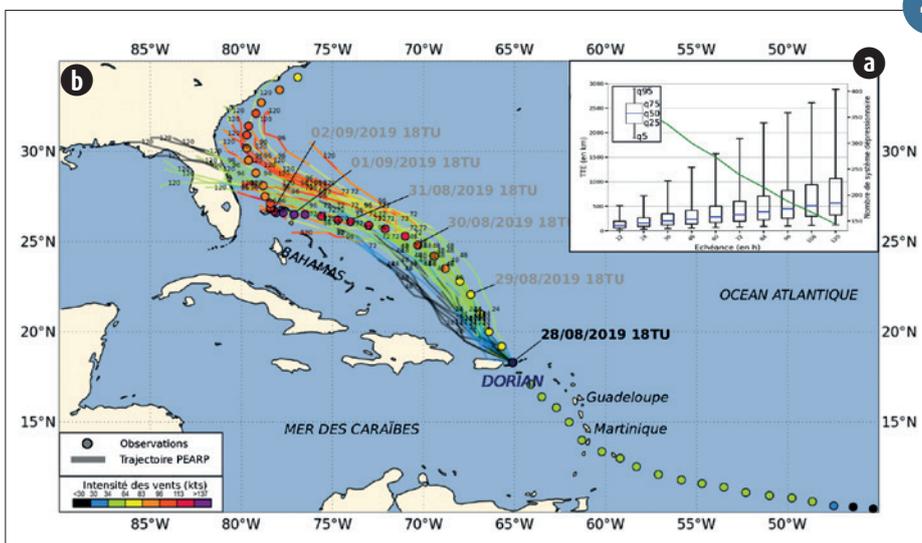


Schéma de synthèse résumant une première étape du couplage entre les modèles ARPEGE (prévision numérique du temps) et MOCAGE (chimie atmosphérique) pour le système terre. La flèche rouge indique le nouvel ajout des champs tridimensionnels (3D) d'ozone dans le modèle de transfert radiatif RTTOV.

4



(a) Evolution des distributions des erreurs de trajectoire en fonction de l'échéance (période 05/07/19 - 14/12/19) et (b) Panache trajectoires - intensités pour la prévision PEARP du cyclone Dorian du 28/08/19 à 18TU à une échéance de 120h.

Vers une dynamique en point de grille pour le modèle AROME

Le modèle opérationnel AROME possède une dynamique très efficace grâce à l'utilisation de pas de temps longs qui peuvent être obtenus en maintenant la stabilité et la précision du modèle en raison de l'utilisation d'un algorithme semi-lagrangien et semi-implicite. Le schéma semi-implicite nécessite l'inversion d'un problème elliptique sur l'horizontale à chaque pas de temps. Ce problème est inversé très efficacement dans un espace dit « spectral ». Ainsi à chaque pas de temps une transformée de l'espace point de grille vers l'espace spectral est effectuée, différents calculs sont réalisés en spectral puis on effectue la transformée inverse pour poursuivre les calculs en point de grille. Le spectral permet également de calculer les dérivées avec une grande précision, et d'appliquer un filtrage pour diffuser

efficacement les variables du modèle. Les transformées spectrales étant très coûteuses en communications on voudrait pouvoir s'en passer pour améliorer la performance du modèle sur des machines très massivement parallèles.

Nous avons donc cherché à réaliser l'inversion du problème implicite en point de grille par des méthodes itératives en utilisant des solveurs travaillant dans l'espace de Krylov. Les résultats obtenus montrent que l'on peut avoir la même qualité de prévision comme le montre la figure, pour un cout informatique faible de seulement trois itérations en moyenne.

5

Premiers résultats d'un schéma d'assimilation 4DEnVar pour AROME-France

Depuis avril 2015, le système d'assimilation d'AROME-France fournit des analyses rafraîchies à une fréquence horaire en utilisant les observations disponibles les plus récentes possible. Certaines de ces observations, comme les observations des radars de précipitations, sont disponibles à des fréquences plus élevées (toutes les 15 minutes). Une meilleure utilisation de ces observations passe maintenant par le remplacement du schéma d'assimilation 3D utilisé actuellement par une version 4D, prenant en compte la dimension temporelle dans la construction de l'analyse.

Pour AROME-France, cette transition se fera vers un schéma dit 4DEnVar, qui associe l'approche variationnelle utilisée traditionnellement à Météo-France aux approches ensemblistes utilisées par un nombre croissant de services opérationnels de prévision numérique du temps. Les statistiques d'erreur d'ébauche, éléments clés d'un système d'assimilation, n'y sont plus modélisées sous de nombreuses hypothèses, mais directement déduites des perturbations issues d'un ensemble d'assimilations. Elles sont donc dépendantes

de la situation météorologique. En outre, les corrélations d'erreur temporelles permettent de prendre en compte la dimension temporelle dans le processus d'analyse sans avoir besoin de développer les versions linéaire tangente et adjointe du modèle de prévision.

Le prototype d'un tel système, assimilant les observations disponibles toutes les 15 minutes et plus, est actuellement en cours de développement et ses performances prometteuses commencent à être évaluées sur certains événements. Sur la situation du 28 mai 2018 par exemple, la répartition géographique et l'intensité des plus forts cumuls observés y sont bien mieux simulées.

6

Adaptation et évaluation de RTTOV aux observations des satellites infrarouges et micro-ondes des années 1970 et 1980

Dans le cadre du projet C3S 311c de sauvetage des données satellitaires issues d'instruments ayant volés dans les années pré 1970 à 1980, l'opérateur d'observation satellitaire RTTOV a été adapté et évalué pour ces anciens instruments. L'objectif principal est de numérisées, reformatées, ré-étalonnées et homogénéisées ces observations pour être assimilées dans la prochaine ré-analyse ERA4 du CEPMMT.

Ces instruments étaient principalement sur des satellites défilants américains de la génération des Nimbus, TIROS et DMSP comprenant à la fois des sondeurs multi-spectraux infrarouges (SIRS, THIR, MRIR, HRIR), un sondeur hyperspectral infrarouge (IRIS) et des sondeurs micro-ondes (MSU, SSM, SMMR). Ces instruments avaient des résolutions spatiales beaucoup plus grossières que les instruments actuels (allant de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres contre quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres actuellement) mais sont une source unique d'observations de la Terre à ces périodes.

Pour simuler ces observations, RTTOV a été adapté à partir des informations retrouvées dans les archives sur les fonctions de réponse spectrale des instruments. Une évaluation de la qualité des simulations RTTOV a été proposée à partir d'une large base de profils atmosphériques couvrant le globe ce qui a permis de mettre en évidence des biais latitudinaux du modèle RTTOV. L'évolution des bases de données spectroscopiques indispensables aux simulations RTTOV ont été comparé aux bruits instrumentaux pour voir si ces instruments y étaient sensibles. La figure jointe montre par exemple que l'instrument IRIS avait un bruit instrumental tel qu'il n'est pas sensible à la spectroscopie.

Le projet C3S devrait être reconduit dans la phase 2 pour travailler sur d'autres anciens instruments.

7

Classification automatique de la texture des prévisions de pluie à haute résolution

Le modèle à haute résolution Arome fournit des prévisions de pluie très réalistes. Ces prévisions ne peuvent cependant pas être interprétées à l'échelle de la maille du modèle. Pour caractériser la pluie en un point, il est nécessaire de considérer le champ de pluie prévu autour de ce point. Ce constat est particulièrement vrai lorsque l'on s'intéresse

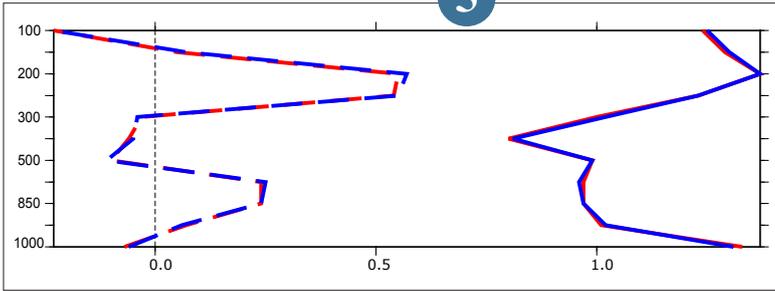
à la texture des pluies prévues, c'est-à-dire à leur caractère continu ou intermittent.

En tenant compte de cette spécificité, nous avons élaboré une méthode automatique de segmentation des champs de pluie en fonction de leur texture qui repose sur des outils empruntés au domaine de l'apprentissage machine : les forêts aléatoires

et les réseaux de neurones convolutifs. Les résultats obtenus sont très proches des zonages effectués par les experts. Ils ouvrent ainsi la voie à l'utilisation de cette méthode de segmentation pour la vérification des prévisions, ou l'ébauche automatique de cartes météorologiques.

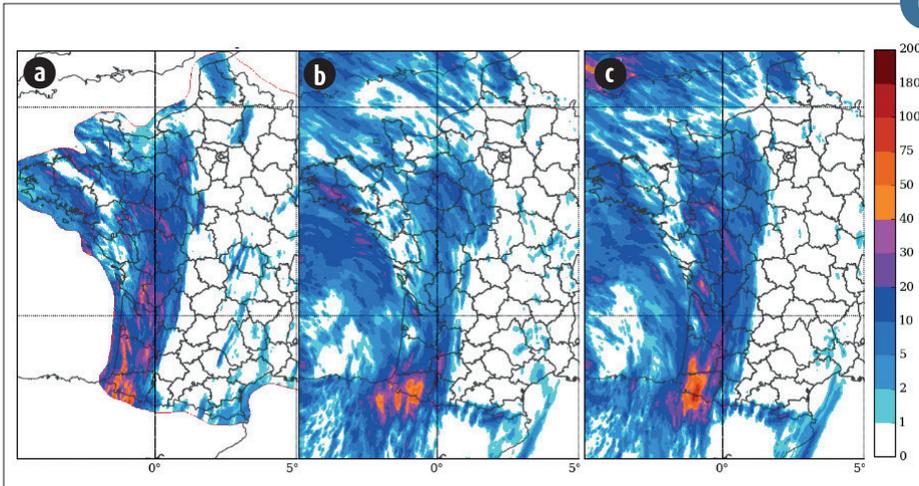
8

5



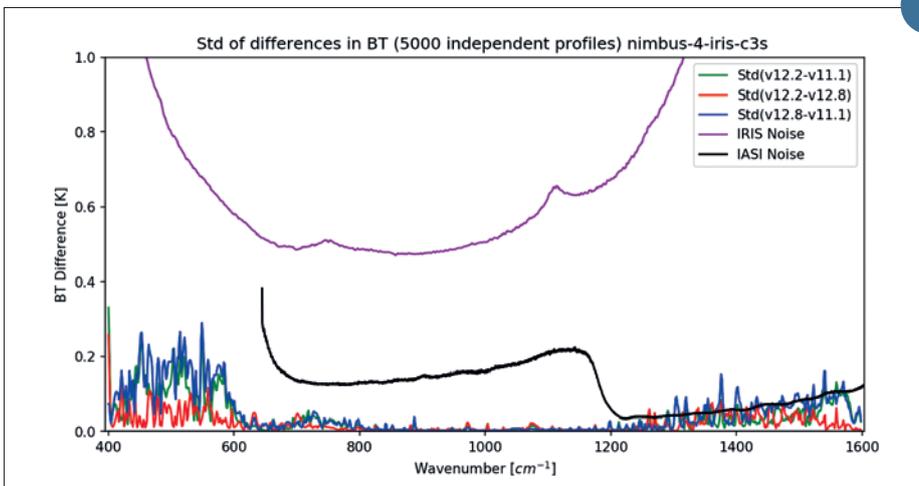
Comparaison de la qualité du modèle entre la méthode spectrale (rouge) et point de grille (bleu) en fonction de la hauteur (axe des y) et en pression). En pointillé le biais et en trait plein l'erreur quadratique moyenne tous deux par rapport aux observations de radiosondage.

6



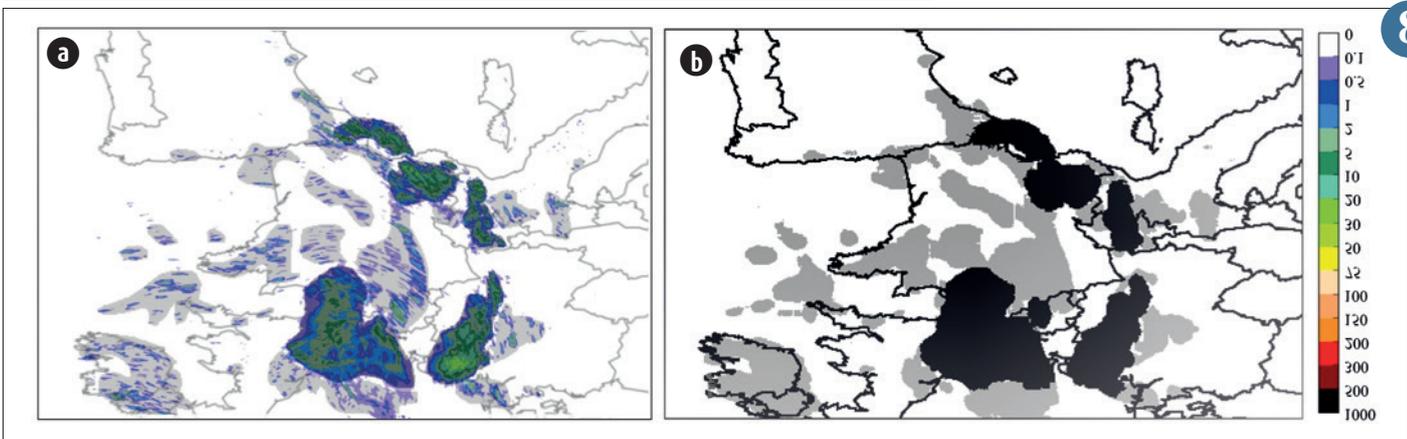
Précipitations accumulées sur une période de 24h le 28 mai 2018 observées par les radars (a) et simulées par le cumul des prévisions 1h issues des 24 cycles d'assimilation successifs en 3D-Var (b) et en 4D-EnVar (c).

7



Exemple de l'évaluation de la variabilité des évolutions des bases spectroscopiques entre 3 versions de codes raie-par-raie LBLRTM basée sur 3 versions de HITRAN 2004 (v11.1), 2008 (v12.2) et 2012 (v12.8). Comparaison de ces variabilités au bruit instrumental d'IRIS (en rose) qui montre que l'instrument IRIS n'est pas assez sensible à ces variabilités. En revanche l'instrument hyperspectral de dernière génération IASI moins bruité (en noir) y est sensible dans la bande de vapeur d'eau au-dessus de 1200 cm^{-1} .

8



(a) Précipitations cumulées sur 1h prévues par les modèles Arome. Les zones ombrées en gris clair représentent les pluies intermittentes, les zones ombrées en gris foncé représentent les pluies continues. Cette segmentation a été faite manuellement par un expert.
 (b) Résultat de la segmentation automatique des précipitations avec un réseau de neurones convolutif. Les pluies intermittentes sont représentées en gris clair, les pluies continues en noir.

Utilisation des prévisions d'ensemble en modélisation agronomique

En protection des cultures la dynamique des maladies et ravageurs dépend fortement des conditions météorologiques. Des traitements phytosanitaires permettent de maîtriser une partie des épidémies, mais leur usage doit être limité en raison de leurs impacts sur l'environnement et la santé. Pour accompagner les agriculteurs dans le positionnement des traitements des outils d'aide à la décision (OAD) sont proposés, qui s'appuient sur la modélisation des dynamiques épidémiques et sur les prévisions météorologiques. La fiabilité de ces OAD reste néanmoins imparfaite, en particulier parce que les prévisions météorologiques sont incertaines. Plusieurs approches simples sont couramment mises en œuvre pour prendre en compte cette incertitude météorologique dans les OAD, tandis que l'utilisation des prévisions d'ensemble reste en grande partie à explorer. Une première évaluation de l'impact des prévisions d'ensemble a été conduite dans une OAD simulant l'évolution

du ver de la grappe de vigne, et a mis évidence une amélioration significative de la prévision des dates de traitement par rapport aux approches existantes.

L'anticipation des traitements est essentielle et cela nécessite de disposer de prévisions météorologiques de bonne qualité sur des échéances longues. Ce besoin a motivé le développement d'une méthode innovante permettant de combiner, sans discontinuité temporelle, les prévisions d'ensemble Arome, Arpège et IFS. Ces prévisions « sans couture » permettent ainsi aux OAD de bénéficier de la qualité des prévisions Arome haute résolution à courte échéance.

La prochaine étape sera le développement d'une plateforme de démonstration afin de valoriser ces prévisions d'ensemble auprès de la communauté agricole.

9

Impact d'une représentation explicite de la végétation sur la modélisation du manteau neigeux en forêt

Le modèle de surface ISBA développé au CNRM et intégré à la plateforme de modélisation des surfaces SURFEX est un schéma dit *composite*. C'est-à-dire qu'il représente la couche de sol superficielle et la végétation comme une surface homogène dont les propriétés physiques résultent de pondérations entre les propriétés du sol et de la végétation (albédo, rugosité par exemple).

Une nouvelle option, MEB (Multi-Energy-Balance), représente le sol et la végétation de manière distincte. Ce développement permet notamment une approche plus réaliste de la modélisation des flux d'eau et d'énergie au-dessus, dans et sous de la canopée avec un traitement propre à chacun des compartiments et la prise en compte de nouveaux processus (ombrage de la canopée sur le sol, transfert radiatif dans la végétation, interception de la neige par la canopée).

L'une des raisons qui a motivé ce développement est une faiblesse du modèle ISBA à modéliser l'évolution du manteau neigeux en forêt (Napoly et al. 2020). En effet, le caractère composite du schéma ne permet pas de représenter le manteau neigeux entre le sol et la canopée.

MEB permet de résoudre ce problème (Fig) en prolongeant d'environ trois semaines l'existence du manteau neigeux sur cet exemple, en meilleur accord avec les observations. En effet, cette représentation permet au manteau neigeux de recouvrir le sol sous la canopée forestière en quasi totalité et ainsi de couper les échanges directs entre le sol et l'atmosphère. Dans le cas sans MEB, le contact n'est pas coupé et l'atmosphère va pouvoir réchauffer le sol au début du printemps qui va à son tour faire fondre prématurément le manteau neigeux. MEB peut être aussi couplé au modèle de neige CROCUS dans SURFEX. L'étape suivante consiste à évaluer MEB à l'échelle globale.

10

Post-traitement statistique de prévisions d'ensemble par des techniques d'intelligence artificielle

A l'instar des prévisions déterministes, les prévisions d'ensemble ne sont pas parfaites et une correction simultanée de leur biais et de leur dispersion est nécessaire afin de fournir des prévisions fiables.

Le but est d'entraîner un algorithme sur la relation entre des observations passées et les erreurs commises par l'ensemble. Nous utilisons pour cela des techniques d'intelligence artificielle, afin de prendre en compte l'apport de nombreuses variables météorologiques ou encore géographiques. De plus, pour les modèles globaux, une descente d'échelle statistique est effectuée pour atteindre l'échelle kilométrique.

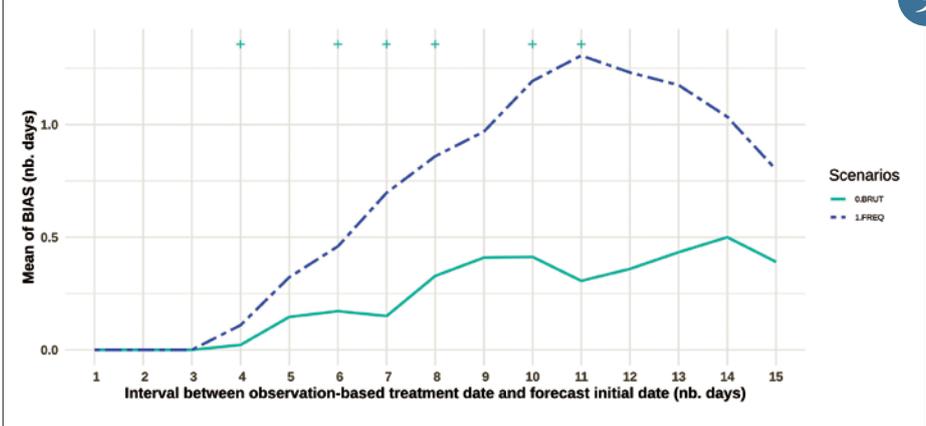
En outre, la mise en place opérationnelle de ces solutions requiert des architectures informatiques originales pour traiter de longues archives de données passées, et pour pouvoir post-traiter de tels modèles d'ensemble en quelques minutes pour un coût informatique de deux ordres de grandeur inférieur aux ressources utilisées pour le modèle d'origine.

Ces techniques sont appliquées aux prévisions d'ensemble ARPEGE et AROME. Les résultats montrent une fiabilité accrue des prévisions, et nous observons aussi une meilleure détection des événements extrêmes, sans pour autant augmenter le taux de fausses alarmes.

Ce travail a débouché en 2020 sur la mise en place opérationnelle des post-traitements des ensembles ARPEGE et AROME pour la température de surface et les précipitations horaires. L'avenir consiste à étendre ces algorithmes à d'autres variables météorologiques et à expérimenter de nouvelles techniques mettant l'accent sur la prévision de phénomènes extrêmes. Ce travail montre enfin l'intérêt stratégique de disposer de longues archives de prévisions pour améliorer la performance des algorithmes futurs.

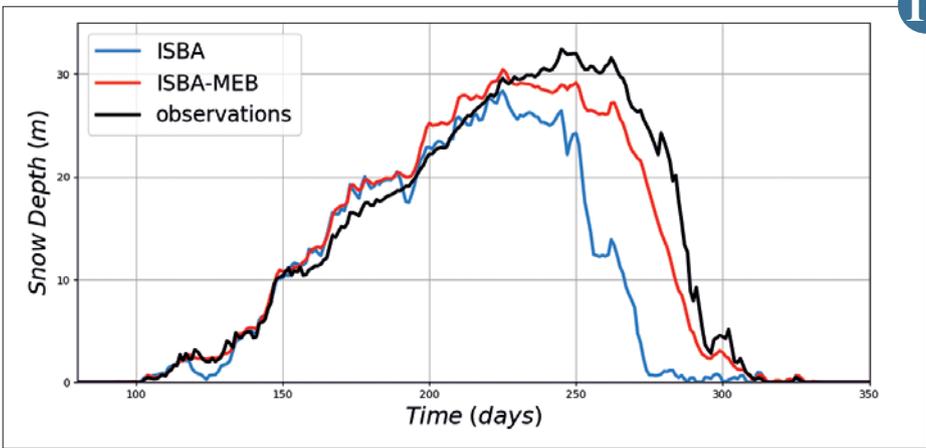
11

9

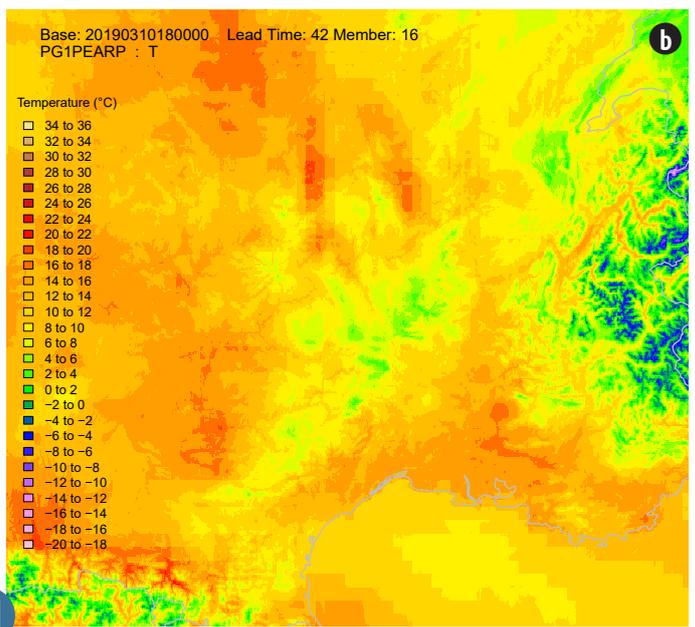
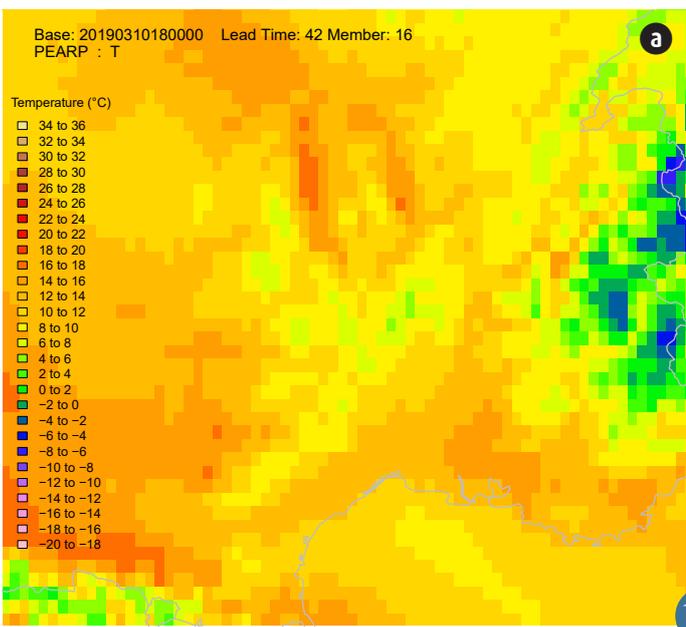


◀ Biais de la moyenne des dates de traitement prévues, en fonction du nombre de jours entre la date de traitement de référence et le début de la prévision. Les résultats sont moyennés sur 8 parcelles agricoles pour les années 2018 et 2019. Les signes + en haut indiquent que la performance de la prévision d'ensemble (en turquoise) est statistiquement meilleure que la performance de l'approche existante dite « fréquentielle » (en bleu).

10



◀ Evolution moyenne annuelle de la hauteur du manteau neigeux sur l'un des sites forestier BERMS situé au Canada (10 ans de données).



11

▲ (a) Membre d'une prévision d'ensemble ARPEGE de température sur le sud de la France. (b) Le même membre après post-traitement et descente d'échelle statistique.

Étude et modélisation des processus

Les travaux de recherche sur les études de processus visent à améliorer la compréhension des phénomènes et leur représentation dans les modèles de prévision numérique du temps et de climat, jusqu'à concevoir des services météo-climatiques pertinents. Les études de processus s'appuient généralement sur une approche complémentaire entre observation et modélisation : les simulations numériques à échelle fine, validées par les observations, apportent une description détaillée permettant de mieux caractériser les processus, et ainsi de mieux les représenter dans les modèles de plus grande échelle.

Toutes les simulations atmosphériques présentées ci-dessous s'appuient sur le modèle de recherche Més0-NH. Utilisé à des résolutions spatiales métriques, il permet ainsi de caractériser les écoulements et les échanges complexes aux bords des nuages convectifs, ainsi que les processus qui les gouvernent, tels que le refroidissement évaporatif des gouttelettes nuageuses.

Plus près de la surface, la méthode dite des frontières immergées permet de résoudre explicitement l'écoulement autour de bâtiments. L'ajout d'un recyclage de la turbulence dans une configuration multi-échelle reproduit la cascade d'énergie des grands vers les petits tourbillons, et apporte ainsi un degré de réalisme supplémentaire pour simuler les effets aérodynamiques à l'échelle des quartiers.

Aux échelles hectométriques, visées par la prévision numérique du temps ces prochaines années, le modèle en tant que laboratoire numérique permet d'analyser des événements fortement précipitants, comme les inondations de l'Aude de 2018, en validant à partir des observations dont celles provenant d'objets connectés. Sur ce cas, l'emplacement des précipitations exceptionnelles s'avère déterminé par la localisation en premier lieu du front froid quasi-stationnaire, et en second lieu des bandes convectives sous le vent de l'orographie.

Un autre phénomène à enjeu est le givrage par eau surfondue pour la prévision aéronautique, car les modèles de prévision ont beaucoup de difficulté à prévoir des quantités significatives d'eau à température négative, d'autant plus critiques qu'elles sont associées à de grosses gouttes. Les attentes sont également importantes dans les domaines du transport et de l'énergie. Une nouvelle génération de schémas de microphysique nuageuse permet de mieux représenter la distribution dimensionnelle des hydrométéores, avec des processus plus finement paramétrés, qui s'avère prometteuse pour améliorer la prévision du risque.

Les vagues de chaleur constituent un autre type d'événement météorologique extrême, dont on cherche à mieux documenter les mécanismes physiques et dynamiques à leur origine, ainsi que leur évolution climatique. Une analyse de simulations sur la vague de chaleur de 2010 au Sahel a permis d'expliquer l'impact négatif d'une paramétrisation de la convection profonde, dont on pourra s'affranchir à des résolutions spatiales plus fines que 5km.

Toujours aux latitudes tropicales, mais en zone humide, le même modèle couplé en ligne avec des modèle de chimie-aérosols et de chimie aqueuse s'appuie sur la campagne Bio-Maïdo pour mieux comprendre les mécanismes chimiques et biologiques en présence de nuages contrôlant la formation de matière organique sur les particules fines en suspension dans l'air (les aérosols organiques secondaires).

Enfin, progresser dans la compréhension et la modélisation des processus des surfaces continentales impose une prise en compte croissante des facteurs anthropiques affectant le cycle de l'eau. Une étape a été franchie avec l'intégration de la dynamique des lacs dans le modèle SURFEX-CTRIP, afin de représenter l'ensemble du cycle hydrologique par le couplage avec le réseau de rivières. Cet ensemble constituera aussi un élément essentiel du futur système couplé à domaine limité et résolution kilométrique visé pour la prévision météorologique et environnementale, qui est un des éléments ambitieux de la stratégie scientifique de Météo-France pour la prochaine décennie.

Analyse de l'événement de fortes précipitations des 14 et 15 octobre 2018 dans le département de l'Aude

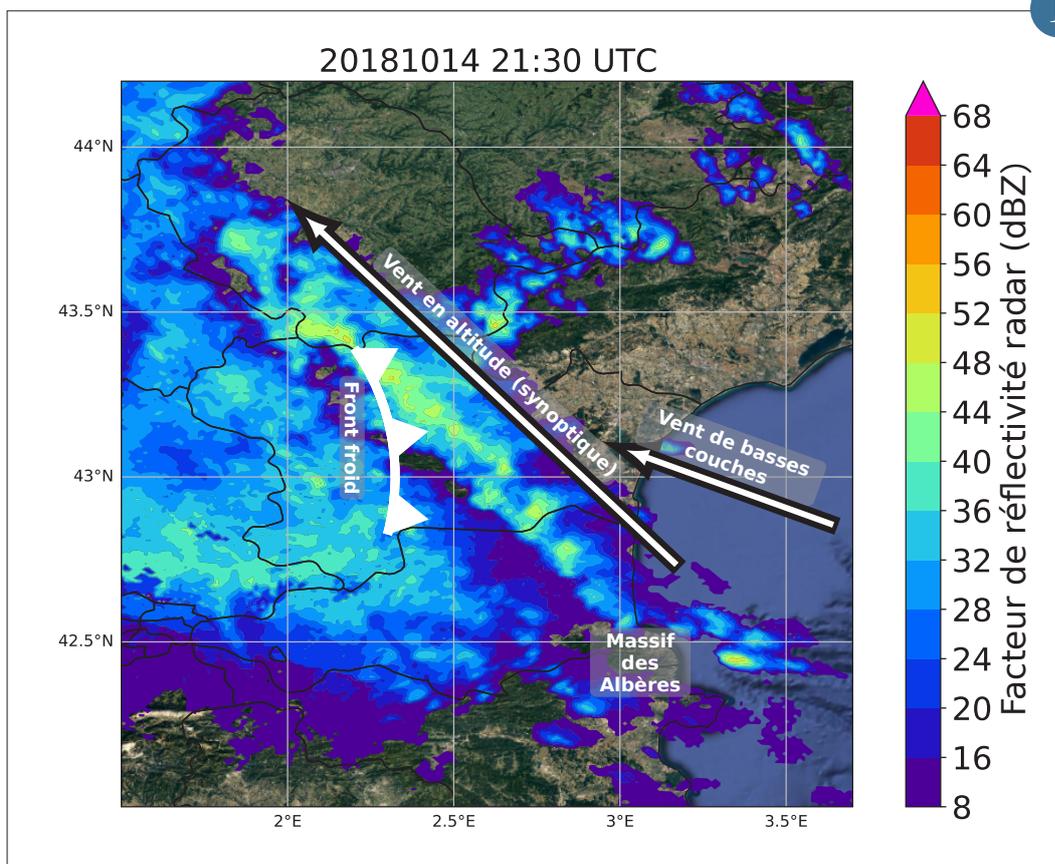
Les 14 et 15 octobre 2018, de fortes précipitations se sont abattues sur le département de l'Aude et les départements voisins, occasionnant des crues éclair dévastatrices ayant entraîné une quinzaine de victimes et des centaines de millions d'euros de dégâts. Cet événement extrême a été étudié en détail du point de vue météorologique. Pour ce faire, les modèles de prévision numérique et les réseaux d'observation opérationnels ont été mobilisés, ainsi que des modèles de recherche et des observations de stations météorologiques personnelles. Ces dernières ont entre autres permis de délimiter

plus finement les différentes masses d'air près du sol et d'améliorer les estimations de précipitations.

Le modèle de recherche Més0-NH, utilisé à 500 m de résolution horizontale (contre 1,3 km pour le plus fin des modèles opérationnels à Météo-France), a permis de montrer le rôle crucial du massif des Albères (voir Figure) dans l'initiation des orages qui se sont ensuite propagés vers le département de l'Aude. Il a également permis de déterminer l'importance d'une masse d'air froide pré-existante à l'ouest sur laquelle a buté l'air chaud provenant de la Méditerranée et qui a

contribué à l'intensification des précipitations dans la partie nord du département. On a enfin montré que les restes de l'ouragan Leslie qui abordaient au même moment le bassin méditerranéen n'ont joué qu'un rôle limité et seulement en fin d'événement dans l'alimentation des orages en humidité.

Outre leur contribution aux connaissances sur les fortes précipitations méditerranéennes, ces travaux ouvrent des perspectives dans l'utilisation accrue de données participatives et préparent l'utilisation des futurs modèles de prévision aux résolutions hectométriques.



▲ Mosaïque de facteur de réflectivité (dBZ) du réseau de radars de Météo-France le 14 octobre 2018 à 21:30 UTC. Sont indiquées schématiquement les directions du vent en altitude et en basses couches (jet de basses couches chaud et humide), ainsi que les positions du massif des Albères et la trace au sol du front froid. Les dégâts les plus importants ont été observés au nord de l'Aude, près du point de jonction du front froid et de la ligne de cellules orageuses alimentée par le jet de basses couches.

Turbulence et dynamique à échelle fine sur les bords d'un cumulus congestus

Un cumulus congestus a été simulé avec le modèle de recherche Mésos-NH à une résolution de 5 mètres afin d'étudier la dynamique de petite échelle et le mélange sur ses bords.

Nous avons obtenu un nuage très réaliste avec des structures typiques d'un nuage en phase de croissance : de fortes ascendances associées à un cœur de flottabilité positive, de larges tourbillons situés près du sommet du nuage formant une circulation toroïdale et une enveloppe subsidente entourant le nuage.

Une partition du nuage et de son environnement (Figure a) est utilisée afin de caractériser la dynamique, la flottabilité et la turbulence près des bords du nuage. L'intérieur du nuage est principalement ascendant et à flottabilité positive (Figure b). Les bords du nuage sont caractérisés par une présence accrue de subsidences et portent la marque d'une inversion de la flottabilité (valeurs négatives). Le refroidissement

évaporatif des gouttelettes nuageuses contribue à l'inversion de flottabilité près des bords du nuage et à atténuer l'ensemble de la circulation convective.

La turbulence sur les bords est de plus fine échelle que celle située à l'intérieur du nuage. A 5 mètres de résolution, la production dynamique de turbulence sous-maille (liée au cisaillement de vent) domine largement sur la production thermique (liée à la flottabilité). Cette dernière est plus forte sur les bords qu'à l'intérieur du nuage.

Afin de généraliser ces résultats, ces études de processus physiques à l'interface entre le nuage et son environnement vont être poursuivies en testant notamment différentes conditions de vent et d'humidité pour l'environnement et en examinant des nuages plus développés comme des cumulonimbus.

2

Améliorer la prévision d'eau liquide surfondue : la campagne ICICLE

Le givrage est un phénomène dangereux pour l'aéronautique, qui survient lorsqu'un avion traverse un nuage contenant de l'eau liquide surfondue (à température négative). Les gouttes surfondues, instables, congèlent très facilement sur la carlingue, et l'accumulation de glace peut déstabiliser l'appareil.

Les modèles numériques de prévision du temps ont tendance à fortement sous-estimer l'occurrence d'eau liquide surfondue dans les nuages. Afin de mieux comprendre ce biais et les conditions propices au givrage, la campagne de mesures ICICLE a eu lieu en février 2019 à Rockford (USA). Une trentaine de vols réalisés en conditions givrantes apportent des informations détaillées sur la composition nuageuse.

Des simulations Mésos-NH ont été réalisées pour deux cas d'études issus de cette campagne, en utilisant différentes configurations des schémas microphysiques ICE3 et LIMA. Les résultats de cette étude montrent que le schéma à deux moments

LIMA est plus favorable à l'eau liquide surfondue qu'ICE3, notamment grâce à sa représentation plus réaliste de la nucléation et de la déposition de vapeur sur les cristaux. La taille des gouttelettes d'eau surfondue, un paramètre important pour déterminer la sévérité du givrage, est également assez bien prévue. Les simulations (à une résolution de 2km) ont également montré un fort impact du schéma de condensation sous-maille sur la fraction liquide des nuages froids, ce qui devra être vérifié à des résolutions plus fines. La poursuite de cette étude permettra d'améliorer la capacité de nos modèles à prévoir l'occurrence d'eau liquide surfondue, et donc de mieux anticiper le phénomène de givrage, essentiel pour l'aéronautique, mais également les secteurs des transports et de l'énergie par exemple.

3

Modélisation du climat urbain à échelle métrique

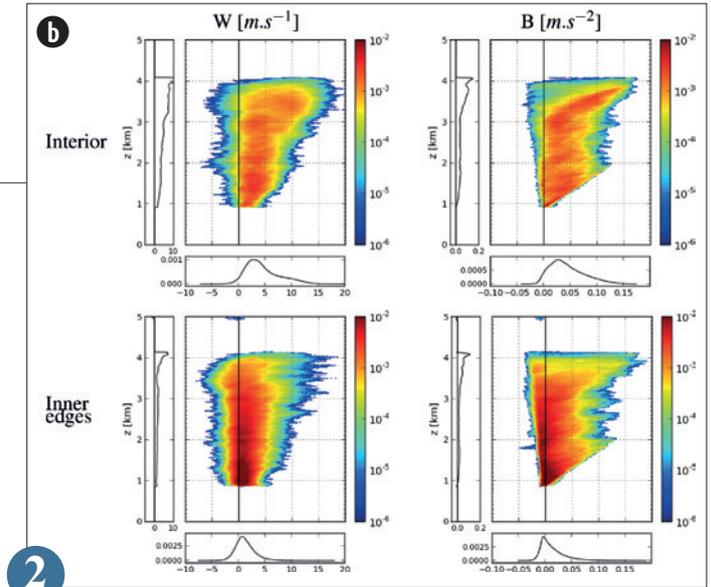
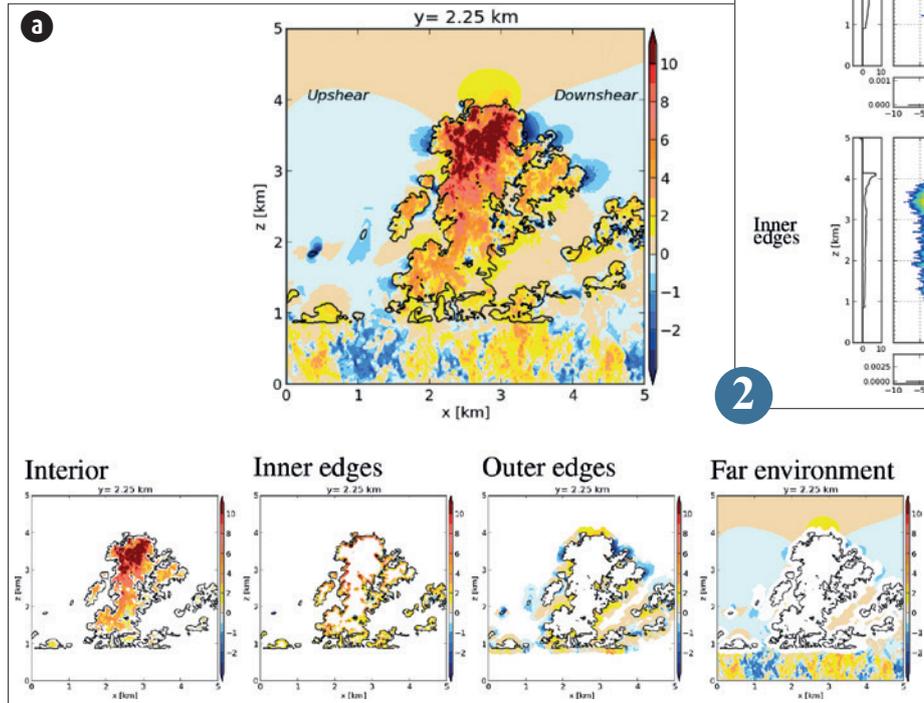
Modéliser le climat urbain à échelle métrique est nécessaire afin de représenter la complexité des géométries urbaines et leur interaction avec les paramètres météorologiques comme la température, le vent et les flux radiatifs très hétérogènes en milieu urbain. Une version du modèle Mésos-NH qui permet de résoudre explicitement les bâtiments a été développée, afin de pouvoir qualifier des quartiers en termes de confort thermique et de ventilation ainsi que pour servir de référence à des modèles de climat urbain comme TEB qui simplifient la géométrie urbaine.

L'objectif de l'étude est d'analyser l'influence de la turbulence dans la couche limite atmosphérique sur l'écoulement et la dispersion d'un polluant relâché dans un environnement urbain idéalisé sous des conditions météorologiques réalistes (expérience MUST ; Figure 1). Deux approches de modélisation sont testées : une approche fine-échelle qui ne tient pas compte de la turbulence de couche limite en amont de la ville et qui est comparable aux approches de modélisation choisies par des bureaux d'études et une approche multi-échelle qui utilise la méthode des grilles imbriquées dans Mésos-NH pour tenir compte de la turbulence de couche limite atmosphérique. Les résultats montrent que la configuration multi-échelle améliore les profils verticaux de la vitesse du vent et de l'énergie cinétique de turbulence. Suite à l'augmentation de l'intensité de la turbulence, l'approche multi-échelle simule des concentrations maximales du polluant plus basses et est plus en accord avec les observations que l'approche fine échelle.

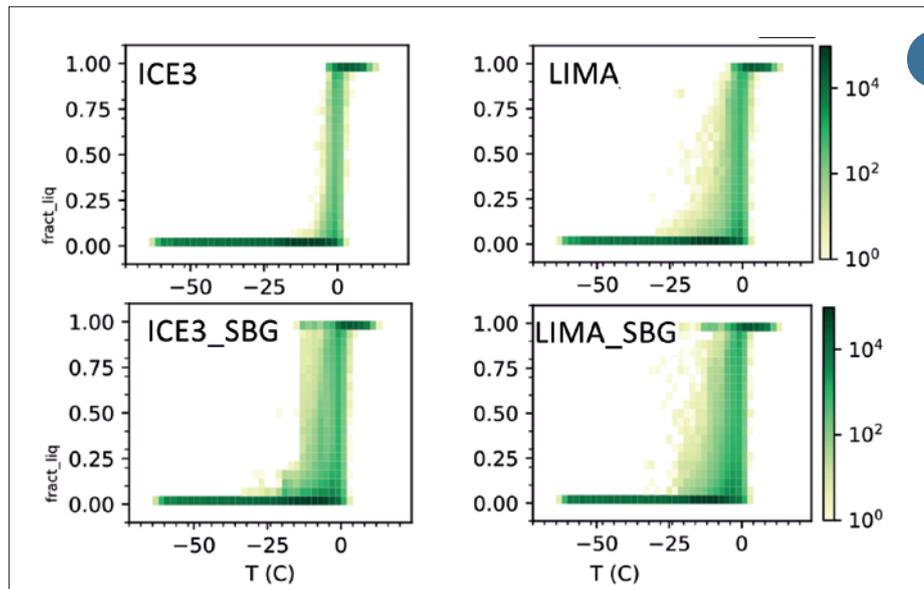
Par la suite, des analyses similaires seront faites pour un ensemble de quartiers représentatifs des morphologies urbaines françaises.

4

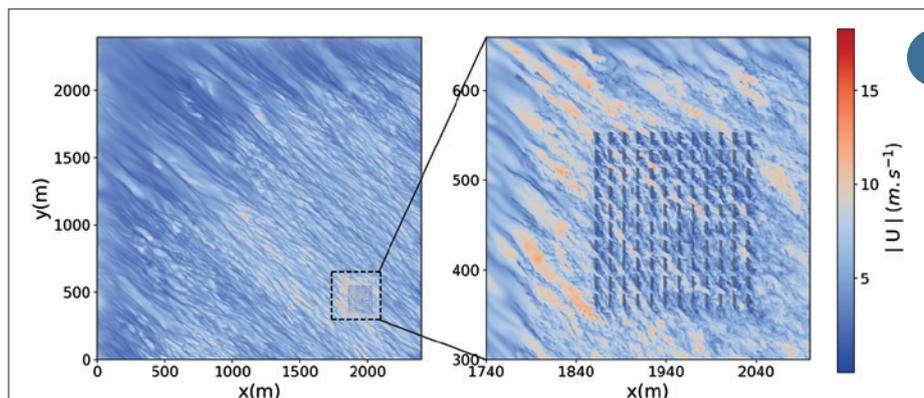
(a) Coupe verticale des vitesses verticales (m/s) au sein d'un cumulus congestus (contours du nuage en ligne noire) et de son environnement (en haut) et partition (en bas) avec de gauche à droite : l'intérieur du nuage (à plus de 50 m des bords), bords intérieurs (épaisseur de 50 m), bords extérieurs (150 m) et environnement lointain à plus de 150 m.



(b) Distribution verticale des vitesses verticales W (à gauche, m/s) et de la flottabilité B (à droite, m/s^2) pour l'intérieur du nuage (en haut) et pour ses bords intérieurs (en bas). Les profils verticaux moyens et les distributions moyennes sont indiqués respectivement à gauche et en dessous de chaque vignette.



Nombre de mailles du modèle ayant une fraction liquide et une température données, à 12 UTC le 17/02/2019. SBG indique les simulations ayant utilisé le schéma de condensation sous-maille.



Modélisation de l'écoulement à travers un quartier idéalisé en tenant compte de la turbulence de la couche limite atmosphérique en amont du quartier via la méthode des grilles imbriquées dans Mésó-NH.

Représentation explicite du bilan de masse des lacs dans le cycle hydrologique global

La modélisation du Système Terre au CNRM intègre une composante continentale, qui représente le cycle hydrologique global grâce au système couplé ISBA-CTRIP. Aujourd'hui, la résolution de $1/12^\circ$ du réseau hydrographique permet une bonne représentation des processus de fine échelle, incluant la propagation en rivière, les plaines d'inondation et les écoulements souterrains. Néanmoins, les performances d'un tel système peuvent être améliorées, notamment dans des régions de forte densité lacustre comme le Nord du Canada et la Scandinavie, en y ajoutant une composante représentant la dynamique des lacs qui a un impact direct sur les débits.

Un modèle de bilan de masse des lacs (MLake) a été développé pour prévoir et anticiper des évolutions de la ressource en eau. Ce modèle prend en compte les différents processus qui contribuent à la variation du volume d'eau des lacs, en particulier, les précipitations, l'évaporation (simulée avec le modèle SURFEX/FLake), les débits entrants (simulés par CTRIP) et sortants (paramétrés), le ruissellement de surface et l'infiltration de l'eau dans le sol (simulés par SURFEX/ISBA), ainsi que les échanges d'eau avec les aquifères et les prélèvements. La cartographie des lacs dans le modèle est issue du recoupement entre le Modèle Numérique de Terrain

à haute résolution MERIT-HYDRO et un masque de lac global kilométrique dérivé de la base de données globale de lacs Global Lake DataBase (GLDB). La prise en compte explicite dans la résolution du bilan d'eau de surface passe par le développement de deux masques : l'un assurant la cohérence hydrologique et l'autre garantissant un partage correct du ruissellement de surface entre les différents compartiments hydrologiques (Fig.a). Le modèle simule les lacs d'une superficie supérieure à 1 km^2 et permet de suivre l'évolution de leurs stocks et d'avoir un diagnostic sur la variation des niveaux d'eau.

Une évaluation préliminaire en mode offline à l'échelle globale du système ISBA-CTRIP incluant l'effet des lacs, a montré une nette amélioration de ses performances dans les régions où la présence de lacs pilote la propagation des débits (Fig.b). Par ailleurs, l'introduction de MLake dans ce système couplé va permettre de modéliser l'effet des barrages sur les réservoirs.

5

Vague de chaleur et schéma de convection : cas d'étude Sahélien

Au printemps, le Sahel est enclin à des vagues de chaleur particulièrement éprouvantes pour les populations. Sur les dernières décennies, ces épisodes se sont intensifiés, plus rapidement que le réchauffement global. Cette tendance devrait se poursuivre au cours du 21^e siècle. La présente étude vise à améliorer la compréhension de ces événements, notamment afin de mieux critiquer les modèles numériques utilisés pour réaliser ces projections climatiques. Elle se concentre sur la vague de chaleur d'avril 2010 au Sahel. Elle se fonde sur des simulations réalisées avec le modèle à aire limitée Méso-NH, utilisé dans deux configurations différentes, avec ou sans l'activation du schéma de convection profonde. Ces simulations ont été évaluées à l'aide d'un ensemble d'observations in-situ et spatiales.

L'activation du schéma de convection profonde génère des précipitations non observées avec un mauvais phasage de la convection. L'évaporation de la pluie refroidit

et humidifie la couche limite atmosphérique, limitant la capacité du modèle à reproduire les propriétés de la vague de chaleur.

La simulation sans schéma de convection profonde est en bien meilleur accord avec les observations. En particulier, la poussée de mousson est bien reproduite, permettant ainsi une augmentation de la vapeur d'eau sur le Sahel, un effet de serre accru, et in fine l'augmentation des températures minimales. Quelques biais persistent potentiellement en lien avec la concentration des poussières élevée pendant l'épisode et une sous-estimation de l'occurrence nuageuse.

En conclusion, une résolution spatiale horizontale suffisante permettant de s'abstenir de la paramétrisation de la convection profonde s'avère importante pour simuler correctement une vague de chaleur. Une grande partie des modèles de climat actuels seraient donc potentiellement pénalisés.

6

Le programme Bio-Maïdo

Le programme Bio-Maïdo vise à améliorer notre compréhension des processus de formation et de transformation des aérosols organiques secondaires (AOS) atmosphériques. En effet, les incertitudes sur les processus en jeu doivent être levées pour répondre aux questions des impacts des aérosols sur la qualité de l'air, la santé et le changement climatique.

Les objectifs de Bio-Maïdo sont les suivants : comprendre quelles sont les voies de formation majoritaires des AOS en atmosphère tropicale humide (contributions respectives des phases gazeuse et aqueuse) ; améliorer les

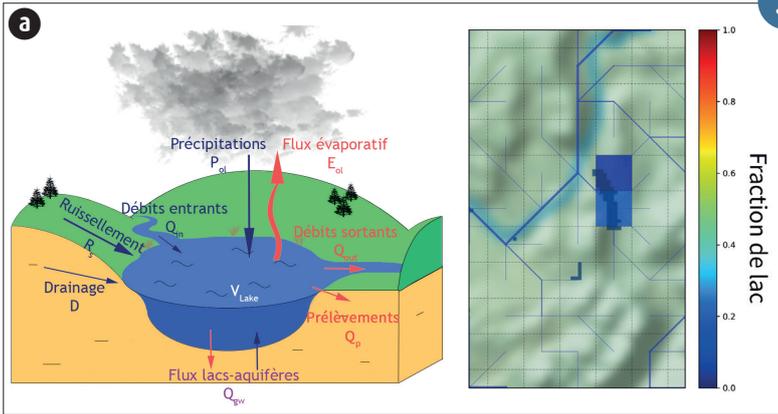
processus multiphasiques conduisant à la formation d'AOS dans les modèles tridimensionnels ; comprendre comment la présence de bactéries dans la phase aqueuse contribue à la formation des AOS (Figure 1).

Étant donné que l'environnement tropical de l'île de La Réunion présente des conditions optimales pour étudier ces processus, et que La Réunion bénéficie de la présence de l'OPAR, la stratégie proposée repose sur une campagne de mesures d'ampleur sur plusieurs sites de La Réunion afin de caractériser les sources d'émission des gaz et des aérosols, et d'évaluer les voies multiphasiques de formation et d'oxydation des AOS en incluant l'effet des bactéries présentes dans l'eau nuageuse. Ce travail s'effectue en synergie avec des études de modélisation avec un modèle explicite de chimie du nuage et un modèle tridimensionnel de transport/chimie incluant un module de chimie des nuages.

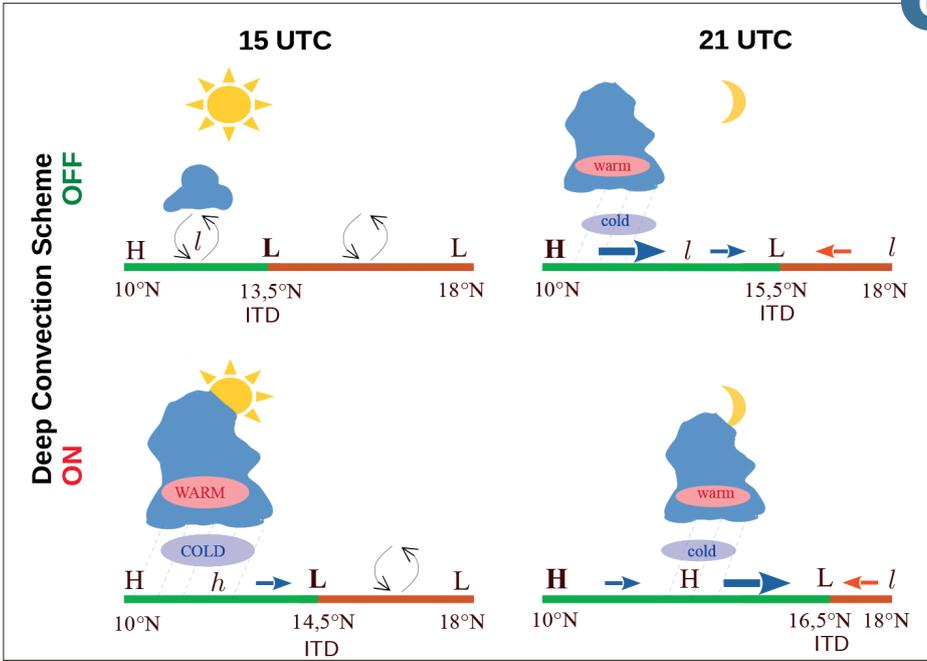
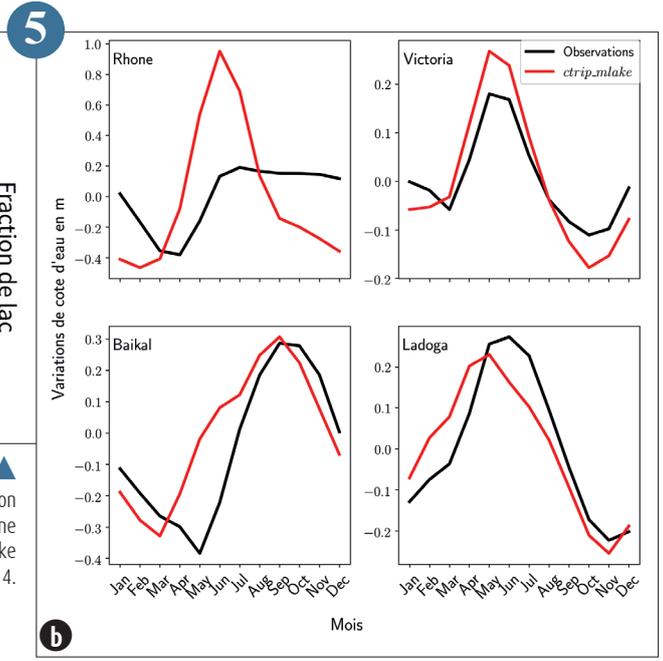
La campagne de mesure de Bio-Maïdo a eu lieu en mars-avril 2019 et a mobilisé l'ensemble du consortium du programme constitué de six partenaires : le LAERO, le LACy, le LaMP, l'IGE, le LSCE, le CNRM et le LaRGE.

Les données issues de cette campagne sont en cours d'exploitation et de valorisation.

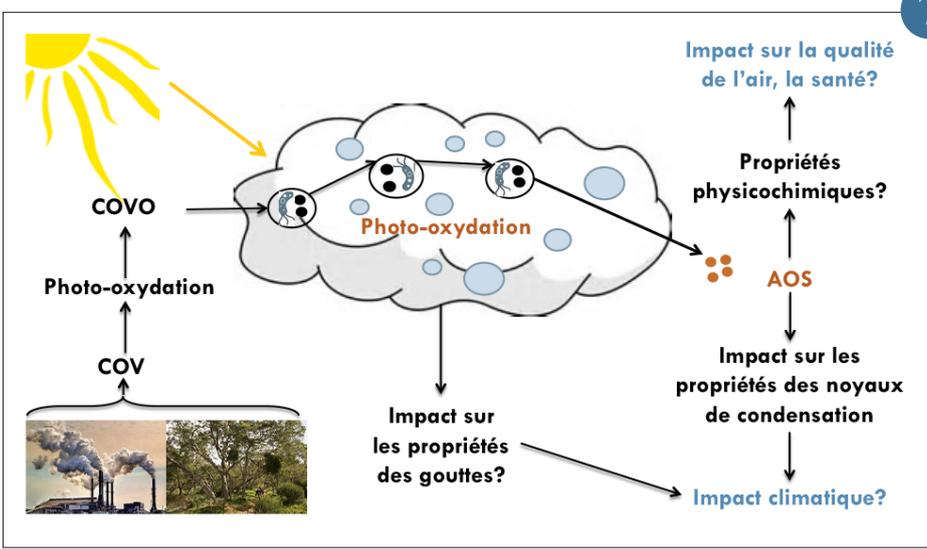
7



(a) Schéma des processus impliqués dans le bilan de masse d'un lac et l'intégration du lac du Bourget dans le bassin versant du Rhône
 (b) Cycles saisonniers des variations de niveau d'eau simulées par CTRIP-MLake et des observations issues d'Hydroweb sur la période 1993-2014.



▲ Schéma reprenant les principales différences entre les deux simulations, sans le schéma de convection profonde (en haut) et avec (en bas). Au Sahel, en basses couches, les hautes pressions (« H ») se situent au sud et les basses pressions (« L ») et le minimum au niveau de la dépression inter-tropicale « L ». Dès que la turbulence diurne cesse, le jet nocturne souffle, advectant un air frais et humide, pouvant occasionner des précipitations. Dans la simulation où le schéma de convection profonde est activé, son déclenchement prématuré entraîne une surpression favorisant la branche nord du jet nocturne au détriment de sa branche sud. Aussi, de l'air frais et humide est advecté de plus en plus au nord.



▲ Principaux processus conduisant à la formation d'aérosols organiques secondaires en présence de nuages et les impacts associés.

Climat

Météo-France dispose d'une capacité unique en France de modélisation des changements climatiques passés et futurs de l'échelle globale à l'échelle locale, de prévision des variations saisonnières du climat et d'observations météorologiques. Cela place l'établissement en excellente position pour comprendre le climat, le changement et la variabilité climatique incluant les extrêmes, et pour développer des services climatiques en soutien aux démarches d'adaptation.

Les outils de modélisation climatique globale et régionale sont développés au sein d'un continuum au niveau du CNRM, incluant plus largement les modèles de prévision numérique du temps. La plate-forme de modèles climatiques globaux CNRM-CM du CNRM-CERFACS a permis au laboratoire de participer à CMIP6 au meilleur niveau international. L'un des indicateurs de succès de la participation du CNRM à l'exercice, outre la qualité reconnue de ses modèles, est le fait que, fin 2020, les données produites par CNRM-CM restent les plus téléchargées au monde. Bien que déjà significative, l'exploitation des résultats de CMIP6 par la communauté de recherche va se poursuivre pendant plusieurs années. Parmi les études menées en 2020 au CNRM, signalons des résultats originaux sur l'évolution des nappes souterraines à partir de simulations avec CNRM-CM, ce modèle étant le seul parmi les modèles CMIP6 à représenter les nappes d'eau souterraines des aquifères, et une autre sur la correction du réchauffement futur simulé sur la base d'observations effectuées depuis 1850.

En parallèle de la valorisation des résultats de CMIP6, le développement de nos modèles se poursuit, avec notamment la mise au point et les premiers tests d'un schéma de convection océanique inspiré de paramétrisations de la convection atmosphérique et, plus en amont, des mesures du contenu en azote et carbone de tourbières qui permettront d'améliorer la prochaine génération de modèles de climat du CNRM. Concernant la prévision saisonnière, le nouveau système 7 est adossé à CNRM-CM et continue à progresser en qualité de prévision par rapport aux systèmes précédents, notamment pour les précipitations sur de nombreuses régions de la planète.

Côté observations, 2020 a été l'année la plus chaude en France depuis le début des relevés, confirmant le réchauffement de long terme. Les tendances sur les précipitations sont plus difficiles à interpréter, mais des travaux menés par la DCSC montre qu'une augmentation du maximum quotidien des précipitations se dessine dans plusieurs régions de France, en particulier sur le pourtour méditerranéen et le Grand-Est. D'une manière générale, le cumul annuel des précipitations tend à augmenter en moyenne sur le pays, mais l'augmentation de l'évaporation tend à réduire l'humidité des sols sauf en hiver.

Enfin, l'année 2020 a été marquée par la finalisation du développement du portail DRIAS-2020, qui fournit sur la France métropolitaine des données corrigées issues d'une sélection de modèles régionaux EuroCordex.

1

Modélisation du climat

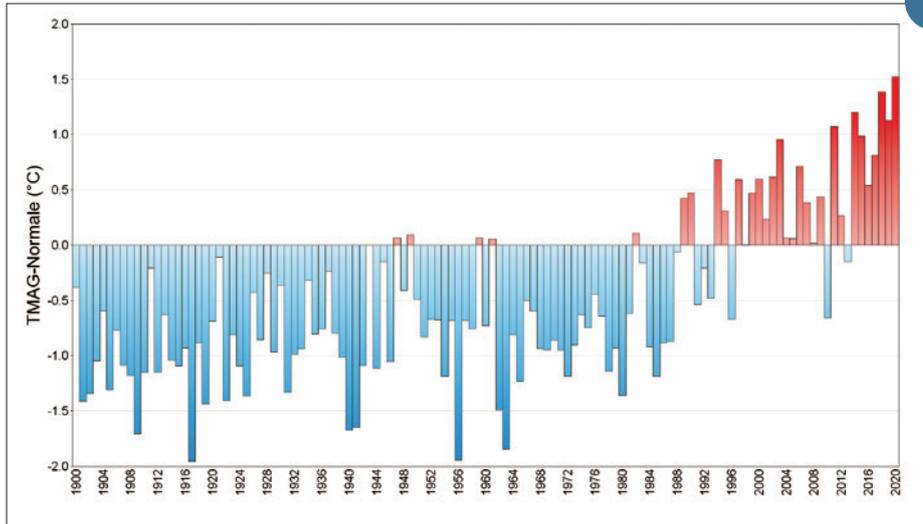
Développement d'un nouveau système couplé régional pour l'étude du climat Méditerranéen : CNRM-RCSM6

Reconnu internationalement pour sa recherche en modélisation régionale du climat, le CNRM a récemment mis au point la sixième version de son système couplé de modélisation régionale (CNRM-RCSM6, figure a, <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1098>), pour améliorer la compréhension de la variabilité climatique régionale passée et future en Méditerranée. Ce système intègre les différentes composantes du système climatique, à savoir l'atmosphère (ALADIN v6), les surfaces continentales (SURFEX v8), la mer Méditerranée (NEMOMED12) et les rivières (CTRIP). Les communications entre ces modèles sont gérées par le coupleur OASIS-MCT à une fréquence horaire. Les améliorations concernent surtout la mise en place d'une physique atmosphérique prognostique, l'intégration

d'un schéma interactif d'aérosols (TACTIC) et l'augmentation de la résolution horizontale et verticale (12 km et 91 niveaux pour l'atmosphère, 6 km et 75 niveaux pour l'océan). Tous ces développements assurent une meilleure consistance entre CNRM-RCSM6 et son équivalent à l'échelle globale, le modèle de système terre CNRM-ESM2-1, qui partage les mêmes composantes. Suite à une étape de réglage du système les premiers résultats montrent une amélioration significative des flux de surface. La tendance de la température de surface de la mer est particulièrement bien reproduite sur la période historique (figure b) grâce en particulier à la prise en compte de l'évolution des aérosols. Ce modèle a aussi pu être utilisé pour montrer des résultats originaux sur les canicules océaniques en Méditerranée. Enfin une première simulation de la période

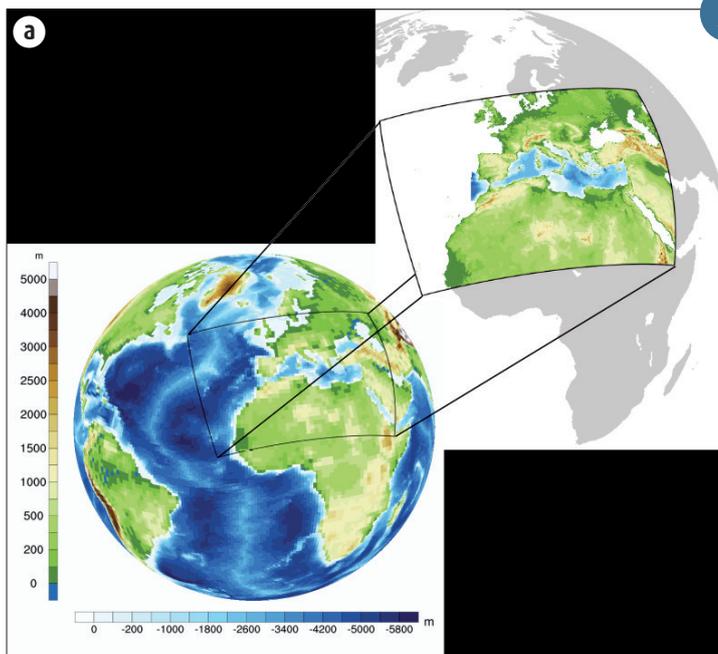
historique et du scénario ssp585 de CMIP6 (figure b) a permis d'enrichir l'analyse multi-modèles et multi-scénarios du climat Méditerranéen dans le cadre de l'initiative Med-CORDEX (www.medcordex.eu).

2



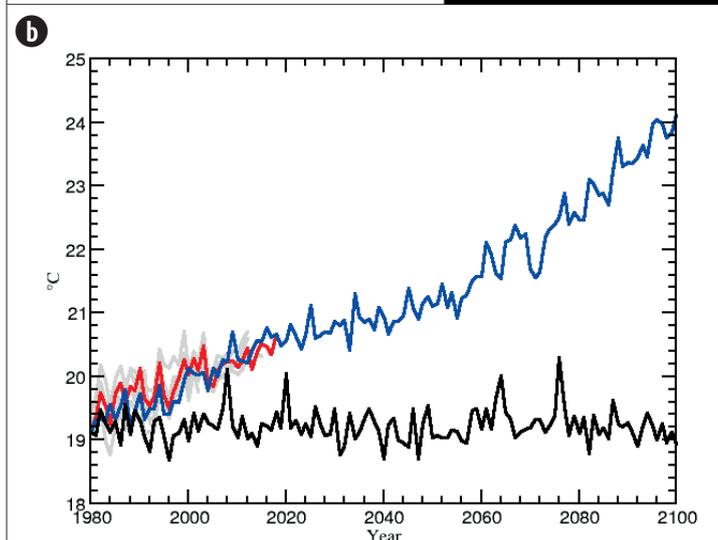
1

Écart à la moyenne annuelle de référence 1981-2010 de la température moyenne annuelle sur la France (1900 à 2020). © Météo-France.



2

(a) Orographie et bathymétrie du modèle CNRM-RCSM6 en regard du modèle de climat global [© CNRM/ P. Nabat and A. Voldoire]
 (b) Moyenne annuelle de la température de surface de la Méditerranée : diverses observations (gris), simulations du modèle CNRM-RCSM6 (période 1980-2018 pilotée par ERA-Interim en rouge, période historique et scénario ssp585 pilotés par CNRM-ESM2-1 en bleu, et simulation de contrôle associée en noir).



Une paramétrisation en flux de masse pour la convection océanique

La convection océanique est un processus de petite échelle qui joue un rôle important dans la formation des eaux profondes et intermédiaires et, in-fine, dans la circulation thermohaline à grande échelle. Par conséquent, la convection océanique occupe une place centrale dans le contrôle du climat mondial. Une nouvelle paramétrisation unidimensionnelle de la convection pénétrante a été développée afin d'avoir une meilleure représentation du mélange vertical dans les modèles de circulation générale des océans. Notre approche s'inspire des paramétrisations atmosphériques de la convection peu profonde qui suppose que dans la couche limite convective, les flux dans une maille de modèle résultent de deux échelles de mélange différentes: les petits tourbillons, qui sont représentés par une contribution en diffusion tourbillonnaire (ED), et les grands tourbillons associés aux thermiques, qui sont représentés par une contribution en flux de masse (MF). Ici les contributions locales (petits tourbillons) et non locales (grands tourbillons) sont unifiées dans une paramétrisation dite Eddy-Diffusivity-Mass-Flux (EDMF) qui traite simultanément l'intégralité du mélange vertical. EDMF est aujourd'hui implémenté dans le modèle océanique communautaire NEMO. Comme illustration, la Figure montre la série chronologique du flux thermique net de surface (haut) à la bouée Lion en Méditerranée occidentale pendant l'hiver 2013 et la vitesse verticale convective (bas) simulée par EDMF à cet endroit. L'intensité et la fréquence des pertes de chaleur en surface contrôlent la variabilité des plumes convectives. En particulier, les 3 plus fortes pertes de chaleur en surface ont généré des vitesses verticales proches de 10 cm/s en accord avec les estimations in-situ déduites des gliders. EDMF est un nouveau paradigme du mélange océanique qui conduit à des simulations plus réalistes des propriétés hydrologiques des masses d'eau. À l'avenir, il devrait permettre d'obtenir des projections climatiques plus fiables.

3

Diagnostic, étude et impacts

Mesure du contenu en carbone et en azote d'une tourbière groenlandaise pour améliorer les modèles de climat

Les tourbières jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone. A l'échelle globale, ces zones humides représentent un tiers des stocks de carbone dans le sol, soit à peu près autant que l'atmosphère. Durant les derniers millénaires elles ont accumulé du carbone du fait de leur sol inondé, pauvre en oxygène qui freine la décomposition de la matière organique du sol. Toutefois, en changement climatique, leur capacité à séquestrer le carbone est très incertaine.

La tourbière de Nuuk (fig. a) au Groenland est un site bien instrumenté avec un suivi des variables physiques et des flux de CO₂ et CH₄ depuis 2009, ce qui est particulièrement utile pour valider les modèles de surface continentale inclus dans les modèles de climat. Toutefois, le stock de carbone, ainsi que sa répartition verticale dans la tourbière était inconnu. Or le stock de carbone est un des facteurs déterminant les émissions de CO₂ et CH₄ du sol et est nécessaire

pour évaluer correctement les modèles de surfaces continentales. Le doctorant Xavier Morel a profité d'une campagne de terrain du CENPERM (Université de Copenhague) en juillet 2017 pour mesurer pour la première fois le stock de carbone de la tourbière, ainsi que son contenu en azote. Les carottages ont été réalisés sur deux transects qui incluent les lieux de mesures des flux de CO₂ et CH₄. Les échantillons ont été analysés à Nuuk, puis Copenhague et les résultats sont disponibles sur la base de données PANGEA. Ces stocks et profils (fig. b), qui viennent compléter les mesures de flux constituent un ensemble de données uniques pour le développement et la validation des modèles de climat. Au CNRM, le doctorant a ainsi pu tester et améliorer son modèle détaillé de carbone du sol et d'émissions de CH₄ inclus dans ISBA.

4

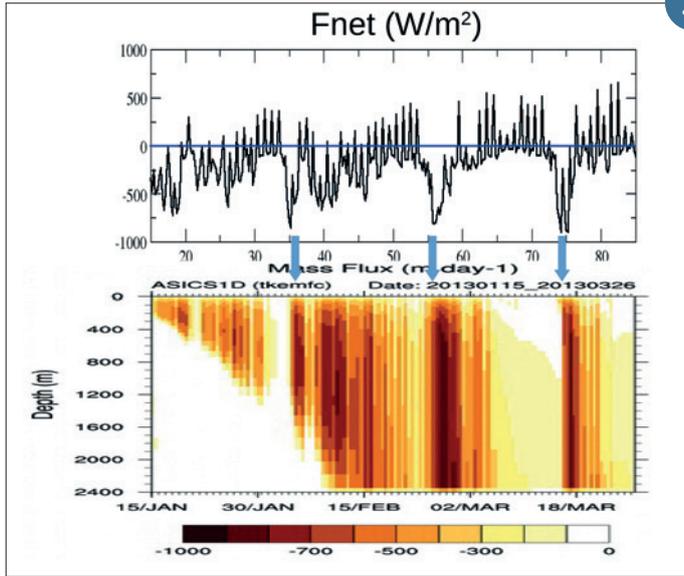
Des nouvelles projections climatiques combinant modélisation et observations

La communauté scientifique produit régulièrement des projections climatiques dans le but de quantifier les changements climatiques attendus au 21^e siècle et au-delà. Ces projections étaient jusqu'ici basées sur des simulations de modèles climatiques. Mais, en ce début de 21^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.

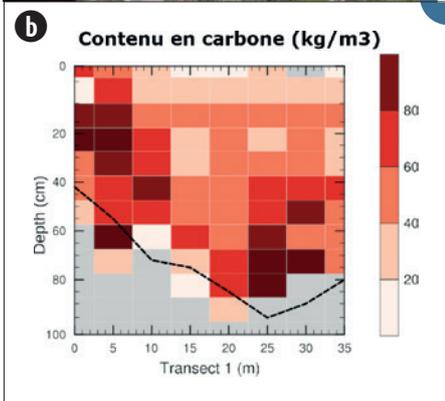
En utilisant une nouvelle méthode statistique, nous avons calculé le réchauffement climatique attendu au 21^e en combinant ensemble les dernières simulations climatiques (exercice CMIP6) et les observations réalisées depuis 1850. Nos résultats suggèrent que l'incertitude issue des simulations climatiques 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 21^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 (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). Nous estimons par ailleurs que le réchauffement actuel (en 2020) atteint +1.22°C (+/-0.15°C), dont +1.15°C attribuables aux activités humaines. 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.

5

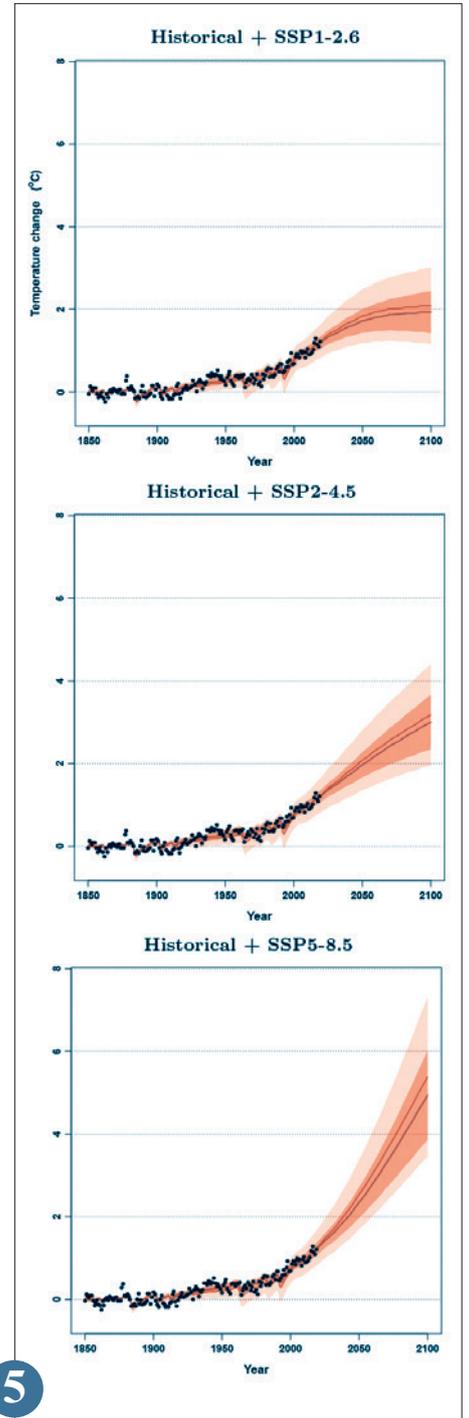


▲ Séries temporelles du Flux Net de Surface ($W \cdot m^{-2}$, haut) et du Flux de Masse Convectif ($m \cdot j^{-1}$, bas) à la bouée Lion (Méditerranée Occidentale, Golfe du Lion)



▲ (a) Vue de la tourbière ($64^{\circ}7'51.5''$ N, $51^{\circ}23'10.5''$ O) en juillet 2017 avec les dispositifs de mesure de flux (flux turbulent et chambres automatiques).

▲ (b) Contenu en carbone du sol ($kg \cdot m^{-3}$) en fonction de la profondeur, mesuré le long du premier transect, parallèle au ponton d'accès. Le tireté représente le fond de la tourbière, la limite entre le sol organique (tourbe) et minéral (adapté de Morel et al, 2020)



▲ 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.

Evolution à l'échelle globale des nappes d'eau souterraines en climat futur

Les nappes d'eau souterraines contenues dans les aquifères jouent un rôle important au sein du cycle hydrologique et sont essentielles pour l'activité humaine et les écosystèmes. Dans une étude récente menée à l'échelle globale, nous avons évalué la réponse des aquifères non-confinés face au changement climatique grâce aux modèles de climat globaux du CNRM. Ces modèles de climat sont aujourd'hui à l'international, les seuls représentant les processus hydrogéologiques impliquant les aquifères. Cette analyse s'appuie sur les simulations réalisées dans le cadre de CMIP6 en vue du 6^e rapport du GIEC suivant plusieurs scénarios d'évolution de concentrations de gaz à effet de serre. Ici, seul le scénario « SSP245 » considéré par la communauté scientifique comme le plus probable actuellement est montré (Fig. 1). Les résultats de cette étude soulignent que la hauteur des nappes aquifères devrait augmenter en moyenne globale d'ici 2100. Cette évolution du niveau

des nappes aquifères est principalement liée à celle des précipitations. Cette augmentation est d'ailleurs cohérente vis-à-vis de l'intensification globale des précipitations prévue par la grande majorité des modèles de climat utilisés par la communauté scientifique internationale. Néanmoins, comme pour les précipitations, l'évolution des aquifères n'est pas uniforme et présente de larges disparités régionales. Certaines régions déjà arides devraient voir une forte diminution de leurs réserves d'eau souterraines. En croisant ces résultats avec des projections d'évolution de densité de population et d'utilisation d'eau, il résulte que la diminution du niveau des nappes aquifères dans ces régions pourrait s'accroître et engendrer un risque accru de pénurie en eau.

6

Impact du changement climatique sur les variables hydroclimatiques en France

Entre 2017 et 2019, Météo-France a contribué au projet CHIMERE21, financé par l'agence de l'Eau Rhin-Meuse. Ce projet a permis d'étudier l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique de la Meuse, grâce à l'utilisation de projections climatiques issues d'Euro-Cordex et de plusieurs modèles hydrologiques. Nous avons ensuite mené une étude sur l'ensemble de la France et sur plusieurs variables hydroclimatiques.

Les évolutions des températures de surface et des précipitations ont été analysées pour les 5 couples de modèles GCM/RCM du projet. La température augmente tous les mois de l'année (d'environ 2,8 à 4,5 degrés pour le RCP 8.5 à l'horizon 2100), c'est en été que cette hausse est la plus marquée. Les précipitations annuelles sont en augmentation, ceci est particulièrement vrai en hiver. En été, les modèles sont plus contrastés avec des baisses et des hausses, et les disparités régionales sont fortes entre le nord et le sud de la France, plus concerné par une baisse des précipitations estivales. L'évolution de l'humidité du sol (SWI) est le résultat de l'équilibre entre la hausse globale des précipitations (qui humidifient le sol) et la hausse des températures qui favorise

l'évaporation (qui assèche le sol). A l'échelle de la France, en fin de siècle, le SWI présente une très légère hausse l'hiver, et une baisse aux intersaisons, et jusqu'à environ 20% en été. La période de sécheresse s'allonge aux intersaisons, le nombre de jours de sol sec augmente par exemple d'environ 30 jours en fin de siècle pour le RCP8.5 sur le bassin Adour-Garonne (figure 1).

L'enneigement est en globale diminution, par exemple sur les Alpes en hiver, il diminue de l'ordre de -20% pour le futur proche, jusqu'à -60% en fin de siècle.

Cette étude sera enrichie en 2021 de l'analyse des projections hydroclimatiques issues du jeu de données DRIAS-2020.

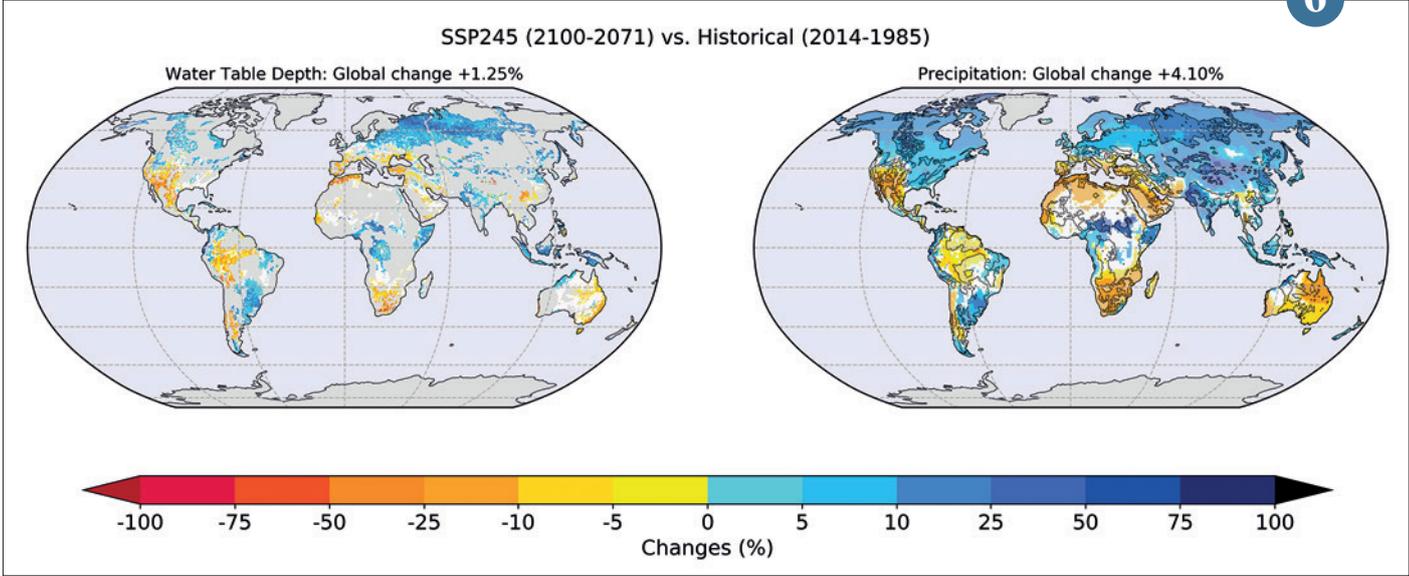
7

Evolution des précipitations en France

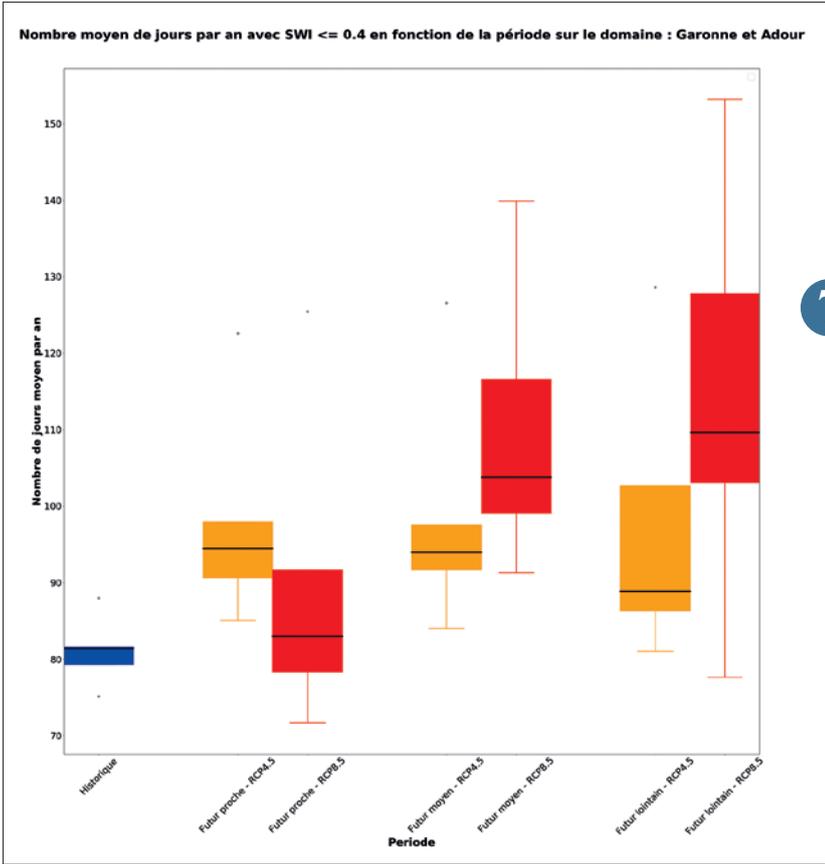
Caractériser les évolutions moyennes et extrêmes des précipitations en France est un enjeu sociétal primordial, notamment pour la production agricole. Des travaux récents ont mis en évidence une augmentation de l'intensité et de la fréquence des événements pluvieux extrêmes sur le pourtour méditerranéen au cours des dernières décennies. Un jeu de 274 séries d'observations quotidiennes de référence est retenu pour établir un diagnostic sur la période 1961-2012 sur l'ensemble du territoire métropolitain. Ces séries sont sélectionnées sur des critères d'homogénéité temporelle et d'absence de données manquantes. L'étude se base sur l'évolution de 11 indices standards recommandés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (Expert Team on Sector-Specific Climate Indices).

Les évolutions de l'intensité des précipitations moyennes et extrêmes sont respectivement caractérisées par le cumul des précipitations quotidiennes et le maximum des précipitations en une journée. L'évolution de la fréquence est examinée via le nombre de jours où le cumul quotidien dépasse un seuil donné. A l'échelle de la station, peu d'évolutions sont significatives et il est difficile de tirer des conclusions à plus grande échelle. Pour améliorer le rapport signal/bruit, nous calculons des évolutions à l'échelle régionale. Les résultats confirment le caractère singulier du pourtour méditerranéen, connu comme un « hot-spot » du changement climatique, et où l'augmentation des extrêmes de précipitations est particulièrement significative. Quel que soit l'indice considéré, l'intensité des précipitations est aussi à la hausse en Bretagne, Grand-Est, Bourgogne-Franche-Comté et Auvergne – Rhône-Alpes.

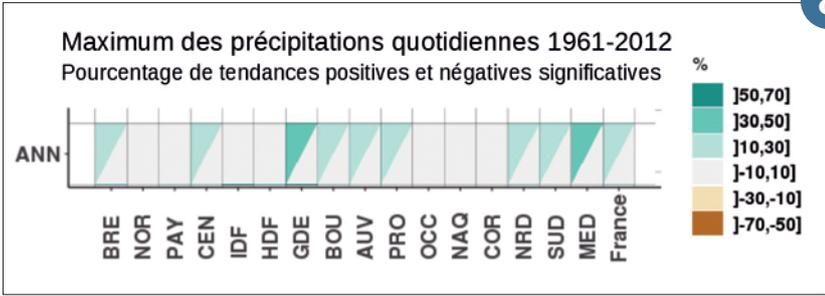
8



▲ Evolution (en %) de la hauteur des nappes dans les aquifères (à gauche) et des précipitations (à droite) selon le scénario « SSP245 » d'évolution de gaz à effet de serre. Cette évolution est calculée sur les moyennes du niveau des aquifères ou du taux de précipitation entre les périodes 1985-2014 (présent) et 2071-2100 (futur). Le taux de changement global (en %) entre ces deux périodes est aussi donné. Les zones blanches sont celles où le signal en changement climatique n'est pas statistiquement significatif.



▲ Distribution (sur l'ensemble des modèles) du nombre annuel de jours de sol sec sur le bassin Adour Garonne (SWI < 0,4) pour les 5 modèles sur la période de référence 1976-2005 (en bleu) puis sur trois horizons du futur (proche 2021-2050, moyen 2051-2070, lointain 2071-2100) pour le RCP4.5 en orange et pour le RCP 8.5 en rouge



▲ Evolution annuelle du maximum quotidien de précipitation agrégée par zone géographique. En abscisses les zones géographiques : les 11 régions administratives du nord vers le sud, puis les zones nord (NRD), sud (SUD), pourtour méditerranéen (MED) et France. Un rectangle correspond à une zone géographique, et est divisé en deux : le triangle de gauche caractérise le pourcentage de tendances à la hausse significative, celui de droite le pourcentage de tendances à la baisse significative. La couleur du triangle indique la proportion de tendances significatives, respectivement à la hausse (vert) ou à la baisse (marron).

Diffusion des simulations climatiques du CNRM réalisées pour CMIP6

Le 6^e rapport de synthèse du GIEC sera publié dans le courant du 2^e semestre 2022. Ce rapport sera basé en particulier sur les travaux présentés dans les rapports spéciaux parus en 2018 et 2019 ainsi que sur les travaux menés par les groupes de travail 1 à 3 qui rendront leurs conclusions en 2021. Le CNRM est engagé dans ces rapports via la contribution directe de plusieurs collègues mais également via la réalisation de simulations climatiques globales dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison CMIP6. Débuté en 2014, cet exercice touche à sa fin pour le CNRM et un premier bilan peut être réalisé : 35 000 années simulées, environ 300 Millions d'heures de calcul sur 2016-2020 sur les calculateurs de Météo-France ayant généré environ 1.3 Po de données (310 simulations réalisées avec les 3 configurations de modèle du groupe CNRM-CERFACS). Produites aux standards exigés par CMIP6, ces simulations sont distribuées en accès libre via le nœud ESGF du CNRM. Grâce à l'engagement des ingénieurs et des chercheurs du CNRM en collaboration avec le CERFACS et l'IPSL, les simulations CMIP6 du CNRM ont été les premières à être distribuées dès l'été 2018. Bien que le nœud ESGF du CNRM ne distribue que ses propres simulations climatiques, il est le 3^e nœud au niveau mondial ayant distribué le plus grand volume de données depuis 2018. Il n'est dépassé que par deux nœuds qui proposent, en plus de leurs propres données, des copies de la majeure partie des simulations CMIP6 existantes dont celles du CNRM-CERFACS. Parmi les 39 institutions contributrices à CMIP6, les données les plus téléchargées sur la Fédération ESGF, tous nœuds confondus, sont celles du CNRM-CERFACS.

9

Attribution d'événements extrêmes

Afin d'estimer l'influence du changement climatique sur l'occurrence d'événements extrêmes, une nouvelle méthode d'attribution a été développée. Elle utilise les modèles climatiques (l'ensemble CMIP5 ou CMIP6) – qui fournissent un *a-priori* de la réalité – pour estimer la probabilité de réalisation des événements, qui est ensuite contrainte par les observations. Cette nouvelle approche a été appliquée à la canicule de juillet 2019, permettant d'estimer que la probabilité d'occurrence a été multipliée par 600 (20 à $+\infty$, intervalle 95%) en 2019, et que la température a augmenté de +2°C (+1.5°C à +2.7°C) par rapport à un monde sans influence humaine. La projection en 2040 (pour le scénario pessimiste RCP8.5) a permis d'estimer une probabilité multipliée par 3500 (75 à $+\infty$), et une augmentation de température de +3.6°C (+2.6°C à + 4.6°C). Ces développements ont fait l'objet d'une publication, et le code source permettant de reproduire l'exemple traité a été rendu public. Cette méthode a été appliquée à Météo-France à plusieurs événements extrêmes : canicules de août 2003, juin / juillet 2019 et la vague de chaleur de septembre 2020. Dans le cadre du projet Copernicus C3S-62, le KNMI, l'université d'Oxford, le Met Office, le Deutsche Wetterdienst, Météo France et le Dutch e-science center développent un prototype de service rapide d'attribution d'événement extrême utilisant cette nouvelle méthode et une autre développée par le KNMI. Dans ce cadre, un exercice d'attribution de la canicule de Sibérie de juillet 2020 a été mené. Ces résultats ont fait l'objet d'une première publication dans le World Weather Attribution et d'une seconde publication en cours de relecture.

10

Indicateurs climatiques passé/futur pour l'énergie éolienne en France

Les actions de transition énergétique engagées dans de nombreux pays dont la France s'appuient sur le développement de l'énergie éolienne et nécessitent de disposer d'indicateurs climatiques adaptés à la fois sur le climat passé et les projections climatiques pour vérifier la pertinence des productions énergétiques projetées. Jusqu'à ces dernières années, les données climatiques disponibles pour le secteur de l'éolien ne concernaient que des données locales ou des réanalyses globales. Plus récemment, un rejeu du modèle AROME a été réalisé pour produire un atlas éolien à 2,5 km sur la France, couvrant la période 2000-2019.

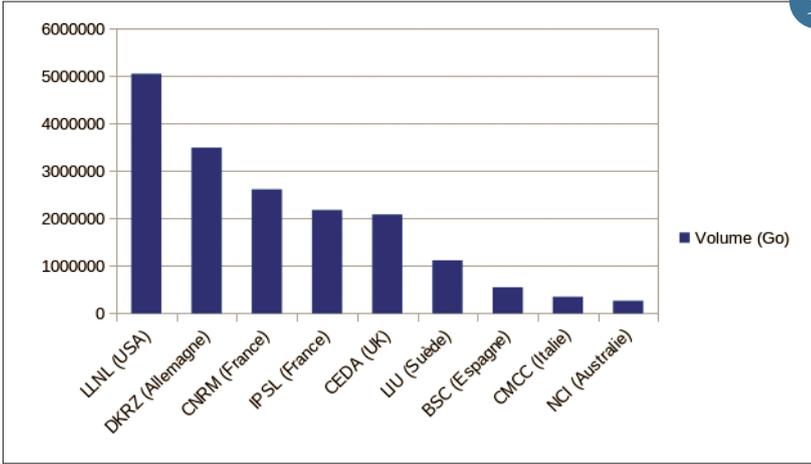
Des travaux ont été engagés en 2020 pour étendre ces analyses à la réanalyse SAFRAN disponible à la résolution 8 km sur la France depuis 1958, ainsi que les projections climatiques du jeu DRIAS-2020.

Comme la hauteur des moyeux des éoliennes se situe autour de 100 m, les énergéticiens ont besoin de disposer de mesures de vent à 100 m. Ainsi, après avoir évalué la qualité du vent 10 m de SAFRAN en le comparant aux observations et au rejeu AROME, une reconstruction d'un vent 100 m a été réalisée à partir de différentes méthodes puis une analyse a été menée sur l'évolution du potentiel éolien en France entre 1958 et 2019.

L'étude a aussi exploré l'évolution du potentiel éolien en climat futur en France à partir d'indicateurs climatiques basés sur des données de vent du jeu DRIAS-extrapolés à 100 m. Il s'agit de 12 projections climatiques en scénario RCP8.5 débiaisées par la méthode ADAMONT. Ces données ont vocation à être mise à disposition sur le portail DRIAS en 2021.

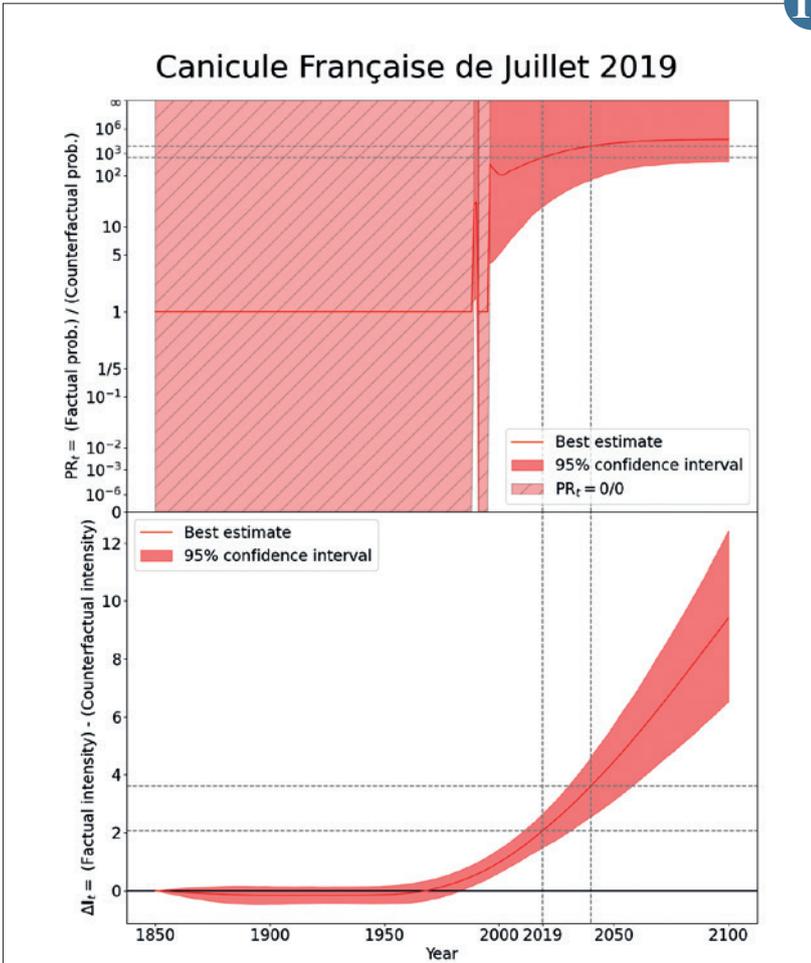
11

9



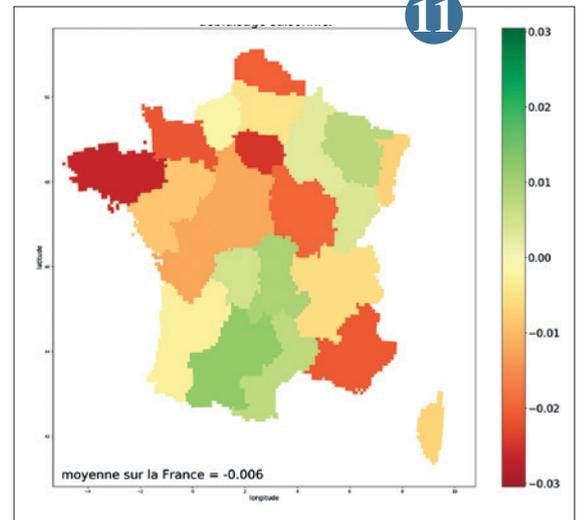
Volume de données (Go) distribué depuis 2018 par les principaux nœuds de la Fédération ESGF (source <http://esgf-ui.cmcc.it/esgf-dashboard-ui/>)

10



Dans les deux figures, la ligne rouge indique la valeur estimée, la zone rouge l'intervalle de confiance à 95%, les lignes grises en pointillés mettent en valeur les années 2019 et 2040. Haut : Augmentation de risque due au changement climatique. La zone rouge barrée correspond à une période où la probabilité que la canicule soit impossible en monde factuel et contrefactuel est au moins égale à 5%. Bas : Changement de température due au changement climatique.

11



Tendance régionale du vent moyen à 100 m pour la période 1959-2019 en France, calculée avec les données SAFRAN extrapolées à partir des profils verticaux saisonniers de la réanalyse ERA5

Evolution du climat en France au XXI^e siècle à partir du jeu DRIAS-2020

Le nouveau jeu de projections climatiques de référence DRIAS-2020 s'appuie sur un ensemble de trente simulations climatiques régionalisées sur le XXI^e siècle pour la métropole, corrigées avec la méthode ADAMONT appliquée sur la base SAFRAN. Ce sous-ensemble des simulations disponibles dans la base Eurocordex a été sélectionné pour sa représentativité des évolutions futures de température et précipitation sur la France métropolitaine.

Un diagnostic sur l'évolution du climat au XXI^e siècle a été établi à partir de cet ensemble de simulations qui couvre trois scénarios socio-économiques RCP2.6, RCP4.5 et RCP 8.5 :

- La température moyenne est en hausse pour les trois scénarios, avec une hausse continue jusqu'en fin de siècle (période 2071-2100) pour le RCP4.5 et RCP8.5, avec des valeurs médianes atteignant respectivement +2,1°C et +3,9°C. Ce réchauffement, plus marqué l'été présente une variabilité géographique avec une hausse plus forte sur l'est du pays. Cette évolution de la température se traduit aussi sur les extrêmes, avec notamment une forte augmentation du nombre de jours de vagues de chaleur dans les trois scénarios.

- L'évolution du cumul annuel de précipitation, stable ou en légère hausse selon les horizons et scénarios, est assortie d'une incertitude liée aux modèles, pouvant inverser le signe de la tendance. Cette évolution connaît une modulation saisonnière (hausse en hiver, baisse en été) et géographique (hausse sur la moitié nord et baisse sur certaines régions de la moitié sud). L'évolution des précipitations extrêmes et des sécheresses estivales présente également de fortes incertitudes.

L'ensemble des résultats sont détaillées dans le rapport DRIAS-2020 disponible notamment sur le portail DRIAS (www.drias-climat.fr).

12

Prévision saisonnière

Évaluation des re-prévisions des précipitations dans le Système 7 de Météo-France

Le Système 7 de prévision saisonnière de Météo-France utilise le modèle de climat couplé CNRM-CM6-1 à haute résolution pour fournir des prévisions d'ensemble à 7 mois d'échéance. Au-delà des scores déterministes, une évaluation probabiliste est réalisée à l'aide de re-prévisions sur la période 1993-2016.

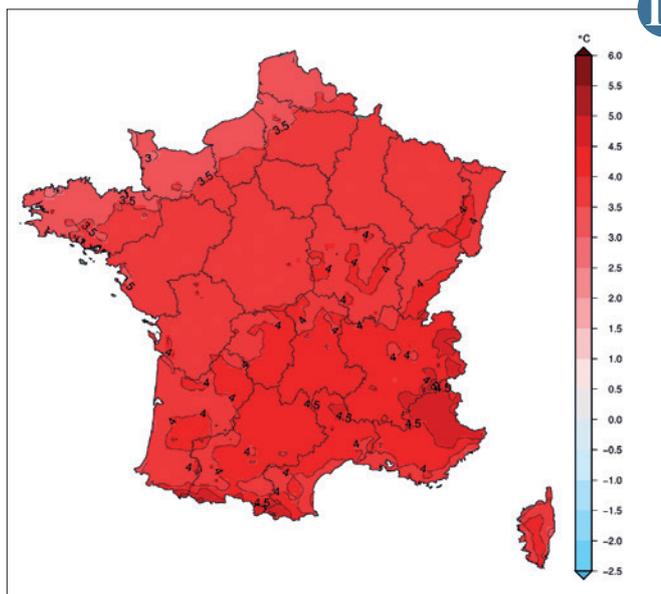
Pour mesurer la précision des prévisions des précipitations, nous calculons à chaque point de grille le score de Brier pour les prévisions de la saison juin-juillet-août (JJA) initialisées en mai pour les catégories inférieure, proche et supérieure à la normale déduites des 25 membres de l'ensemble. Le score de Brier est une distance moyenne entre la probabilité prévue et l'occurrence observée. Plus le score est faible, meilleure est la prévision. Nous utilisons ici comme référence l'analyse du GPCP. Le résultat dépend de la méthode utilisée pour définir les seuils des catégories : dans la figure (a), les seuils sont déterminés

par les anomalies de précipitation du GPCP. Le score de Brier englobe donc un biais moyen dans l'espace des probabilités. Dans la figure (b), les re-prévisions sont utilisées en validation croisée pour définir les seuils pour chaque année, corrigeant ainsi l'erreur de distribution. Les erreurs sur les déserts tropicaux, les forêts tropicales et l'Antarctique sont nettement réduites.

Des travaux ont également été entrepris pour caractériser l'impact de l'incertitude des observations sur la robustesse de ces mesures. En utilisant deux références (GPCP et MSWEP) pour définir une probabilité observée, le score de Brier est encore réduit sur le Pacifique occidental et le continent eurasiatique (non montré). Les travaux futurs incluent l'extension de cette évaluation à des scores probabilistes ordonnés.

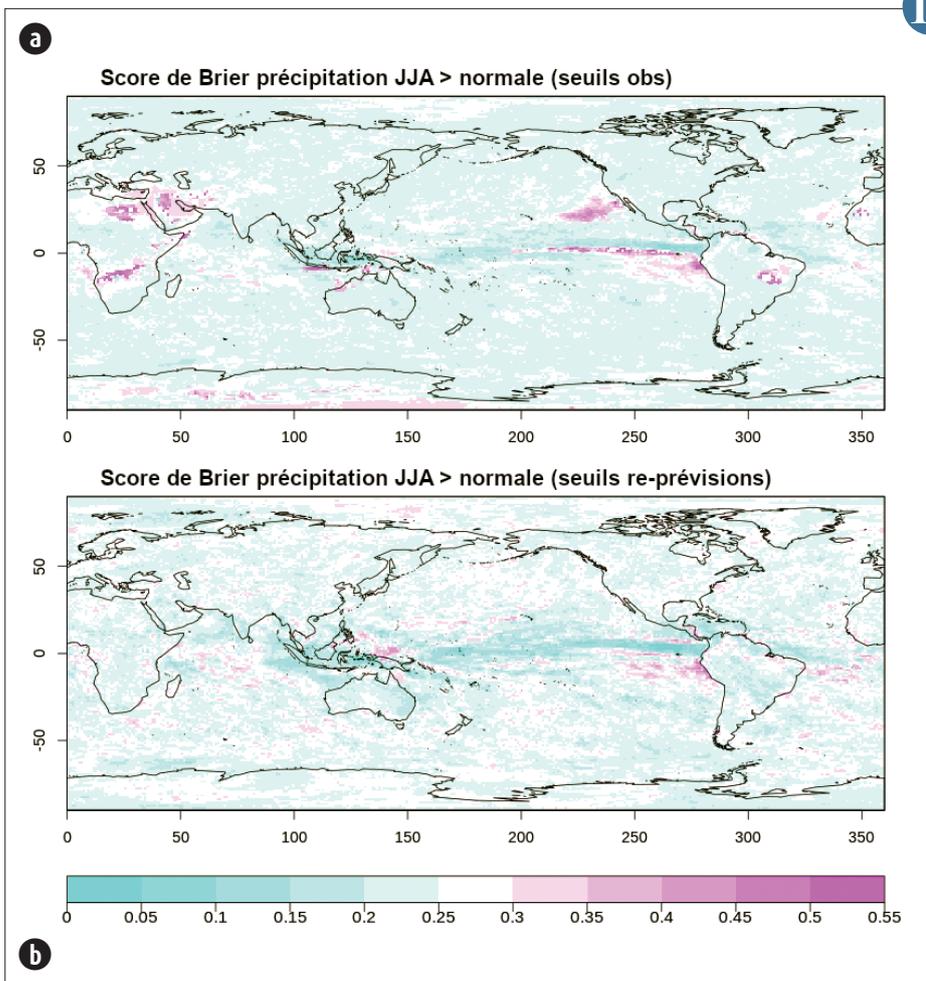
13

12



◀ Ecart de température moyenne pour la période 2071-2100 (référence 1976-2005) selon le scénario RCP 8.5 pour la médiane du jeu de référence DRIAS-2020

13



◀ Score de Brier pour les précipitations supérieures à la normale en juin, juillet et août (JJA) (dépassant le deuxième tercile) pour les re-prévisions du système 7 de Météo-France initialisées en mai, sur la période 1993-2016. Les seuils des probabilités des re-prévisions sont calculés en utilisant la distribution climatologique de GPCP (a) ou l'ensemble de re-prévisions en validation croisée (b).

Chimie, aérosols et qualité de l'air

La prévision de la composition chimique de l'atmosphère fait partie des missions de Météo-France et répond notamment aux besoins des Armées (vents de sables), de la navigation aérienne (cendres volcaniques) ou encore de Prév'Air (enjeux de santé). Le CNRM contribue fortement à ces missions en menant en amont les recherches nécessaires pour mieux comprendre la chimie et les particules (aérosols) atmosphériques, à la fois à travers ses activités d'observation et des approches de modélisation et d'assimilation de données.

En matière d'observations in situ, de nouveaux résultats ont été obtenus sur le vieillissement des particules de carbone-suie émises par les feux de biomasse, donnant un nouvel éclairage sur leur très forte capacité d'absorption du rayonnement solaire, avec des implications pour l'amélioration de la représentation des aérosols dans les modèles de qualité de l'air ou de climat.

Par ailleurs, forte de son expertise au meilleur niveau international en matière de restitution de la profondeur optique des aérosols à partir de mesures par satellite, une équipe du CNRM a combiné les données d'une ceinture composée de 5 satellites géostationnaires pour produire des cartes journalières quasi-globales d'épaisseurs optiques d'aérosols.

En aval des activités d'observation, le recours à l'assimilation de données d'aérosols dans MOCAGE permet d'améliorer les analyses et réanalyses de composition atmosphérique, mais aussi d'anticiper l'apport de futures missions spatiales. Cette année, l'assimilation de données du lidar CALIOP du satellite CALIPSO a été testée avec succès en vue de construire une climatologie d'aérosols. Par ailleurs, l'utilisation de MOCAGE a permis de documenter l'impact des éruptions volcaniques sur la qualité de l'air, ou encore celui de l'impact de la pandémie de Covid-19 via la prise en compte de la réduction des émissions d'origine humaine en Europe. Enfin, des simulations de plusieurs décennies menées avec MOCAGE dans le cadre du projet international CCMI-2 ont confirmé la bonne capacité du modèle à simuler les états moyens et la variabilité interannuelle de l'ozone troposphérique et stratosphérique.

Concernant les applications opérationnelles, il faut noter que les deux anciennes chaînes de prévision de la qualité de l'air MOCAGE pour le service régional Copernicus et le système national Prév'Air ont été fusionnées en une seule chaîne, avec à la clé de meilleures prévisions. Cette nouvelle chaîne fournit également des prévisions sur l'ensemble du globe.

1

Cartes quasi-globales d'épaisseur optique des aérosols et d'albédo de surface à partir d'une combinaison de satellites météorologiques géostationnaires

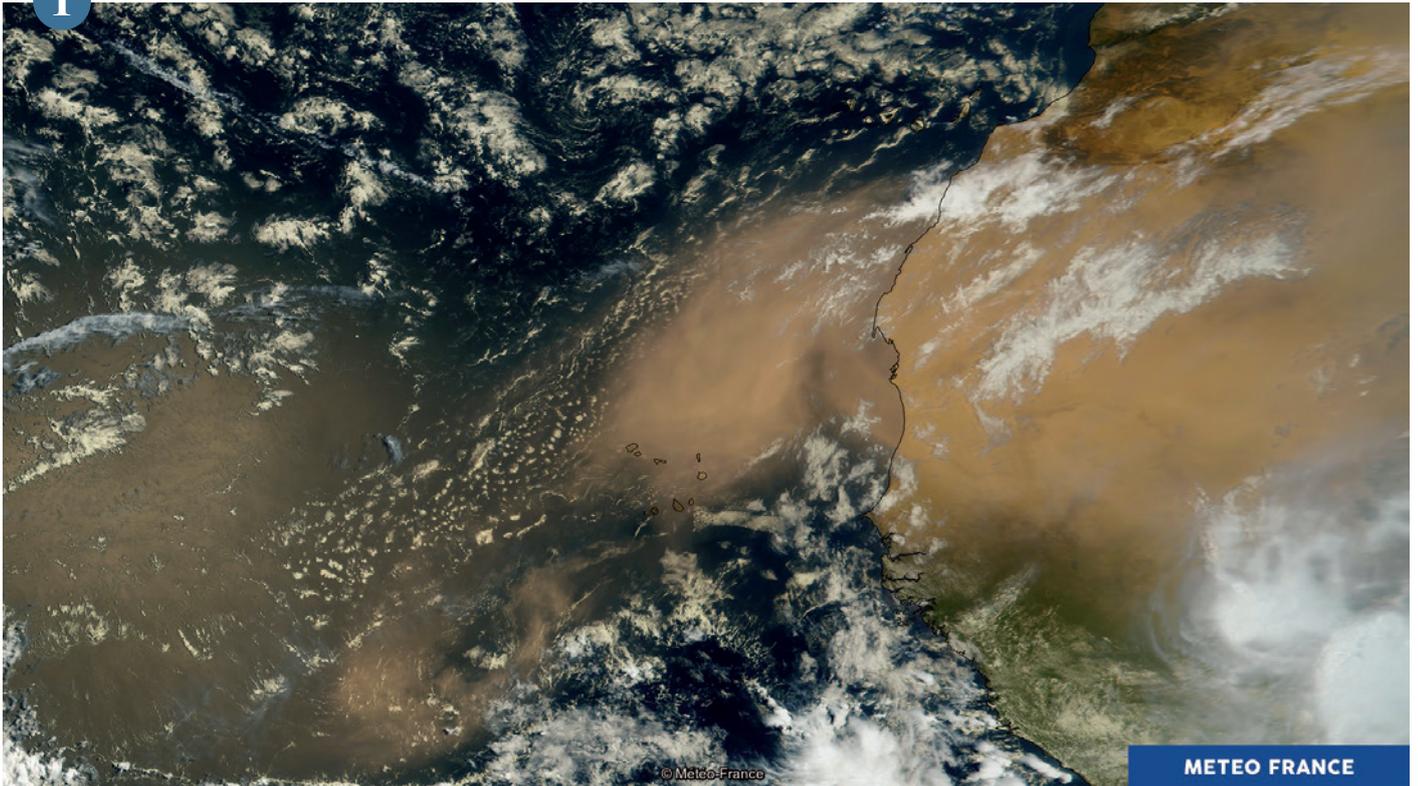
Les satellites météorologiques géostationnaires reçoivent aujourd'hui une grande attention de la communauté de télédétection en raison de leurs performances de plus en plus avancées pour la surveillance continue des aérosols et des propriétés de surface. Cependant, les missions géostationnaires sont limitées par leur couverture partielle de la Terre, ce qui les rend inappropriées pour surveiller les aérosols transportés sur des longues distances ou assimiler les produits satellitaires résultants dans des modèles globaux, par exemple. Cette limitation a été surmontée lors d'une récente collaboration entre le CNRM et le centre de données et de

services ICARE grâce à l'utilisation simultanée des missions géostationnaires GOES-West, GOES-East, MSG, IODC et Himawari. La combinaison de ces cinq satellites répartis autour de la planète donne une ceinture géostationnaire (appelée GEO-ring) couvrant tout le globe à l'exception des pôles, qui ne sont pas vus depuis l'orbite géostationnaire. Les données acquises par ce GEO-ring sont actuellement traitées par ICARE en temps quasi réel à l'aide de l'algorithme AERUS-GEO, développé au CNRM. Comme exemple, la figure ci-dessous montre les cartes quasi-globales d'épaisseur optique des aérosols journalière et d'albédo de surface restituées par AERUS-GEO pour le 31 août 2020. Ces

observations satellitaires ont un fort potentiel pour l'étude des aérosols et des surfaces continentales grâce à leur complétude et leur précision. A l'avenir, le CNRM travaillera à l'amélioration de ces résultats grâce à la prochaine mission MTG-I, qui complètera un GEO-ring exclusivement composé de satellites de nouvelle génération.

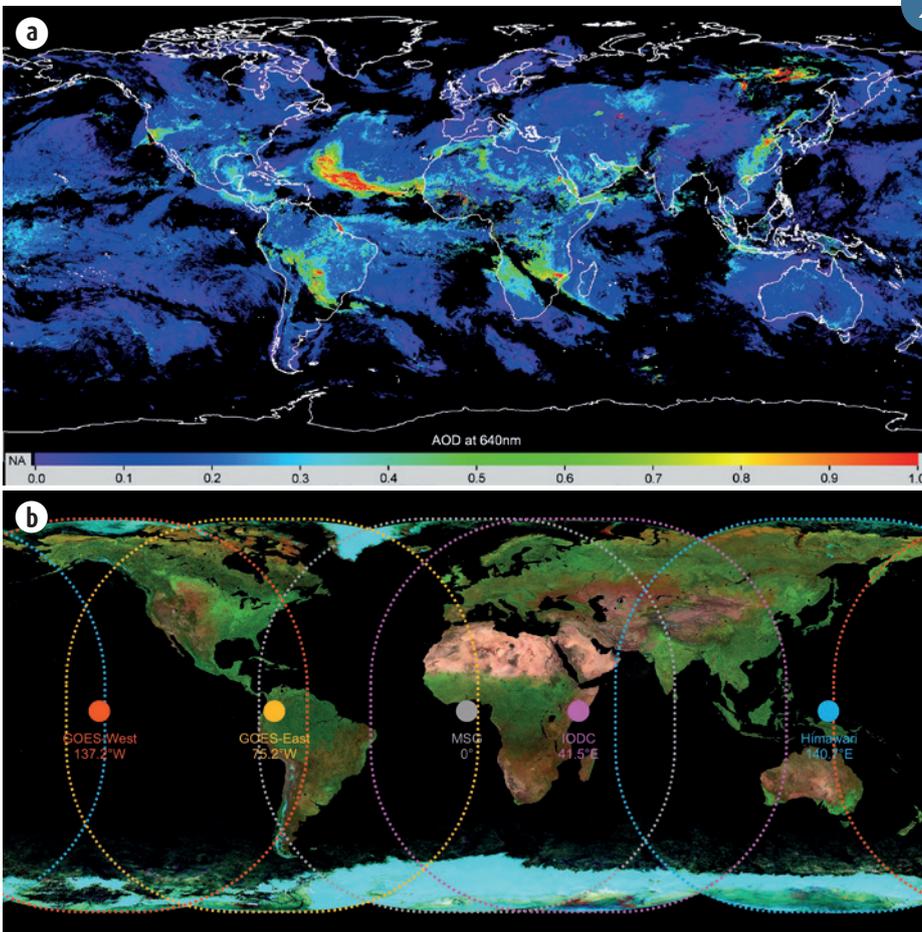
2

1



▲ Image du satellite GOES-16, le 09/06/2020 à 1 h 15 UTC : les vents soufflent fort depuis trois jours sur le Sahara et soulèvent des particules de sable, créant un panache à l'ouest du continent africain. Ce type d'événement se produit régulièrement, contribuant à fertiliser la forêt amazonienne. © Météo-France.

2



◀ Cartes d'épaisseur optique des aérosols journalière (a) et d'albédo de surface (b) estimées par AERUS-GEO le 31 août 2020. Le position et la couverture de chaque satellite du GEO-ring sont superposées. La carte d'albédo est obtenue en combinant les albédos estimés à 0,6 (bleu), 0,8 (vert) et 1,6 (rouge) microns.

Importance des données du lidar CALIOP à bord du satellite CALIPSO pour la construction d'une climatologie d'aérosols par assimilation de données

Vu leurs effets sur le bilan radiatif terrestre, sur la santé humaine et sur divers secteurs économiques (énergie, transport, etc.), les aérosols font l'objet d'une surveillance par des outils de modélisation et d'observation. L'assimilation des observations d'aérosols permet une quantification de leurs concentrations ainsi que leur prévision, ce qui est important pour la prévision de la qualité de l'air dans le cadre de Copernicus et le développement des outils pré-opérationnels pour la prévision des cendres volcaniques dans le cadre des responsabilités VAAC (Volcanic Ash Advisory Centre) de Météo-France.

Le module d'assimilation d'aérosols couplé au modèle MOCAGE permet d'assimiler des observations d'épaisseur optique des aérosols ainsi que les informations issues des mesures lidar individuellement ou conjointement.

Le lidar CALIOP à bord du satellite CALIPSO permet de renseigner la structure verticale des aérosols. Afin de construire une climatologie d'aérosols issue de l'assimilation des observations CALIOP, nous avons assimilé les données CALIOP sur toute la période de mesure depuis 2007. Cette climatologie servira pour évaluer

l'impact des différents types d'aérosols lors d'événements extrêmes et pour obtenir une image complète et précise de leur structure verticale.

La figure ci-jointe illustre l'évolution temporelle pour les 4 trimestres de 2016 du coefficient de rétrodiffusion issu de l'analyse des données CALIOP au-dessus du Sahara africain. Les périodes de grandes émissions de poussières désertiques sont caractérisées par de fortes valeurs du coefficient de rétrodiffusion. L'activité d'émission de poussières s'intensifie pendant le printemps et l'été (entre Mars et Août) où les poussières désertiques peuvent monter assez haut dans l'atmosphère.

Ces recherches valorisant l'instrument CALIOP permettent également de préparer les futures missions de lidar spatial comme le programme EarthCare de l'Agence Spatiale Européenne ou l'étude internationale ACCP en partenariat avec le CNES.

3

Impact des réductions d'émissions anthropiques dues à la COVID-19 sur la qualité de l'air

La prévision de la qualité de l'air est un enjeu sanitaire et sociétal important. Des prévisions opérationnelles sont réalisées quotidiennement à Météo-France sur l'Europe dans le cadre du programme Européen Copernicus CAMS_50, ainsi que sur la France dans le cadre du consortium national Prév'Air.

Le contexte sanitaire particulier de 2020 et les restrictions de déplacements et d'activités qui ont été imposées ont fortement réduit les émissions anthropiques associées. Cela a eu un impact mesurable sur la qualité de l'air des grandes villes à travers toute l'Europe. Dans le cadre du projet Européen Copernicus CAMS_50, afin de déterminer l'impact de ces restrictions à l'échelle européenne, une modélisation à posteriori a été conduite à l'aide, entre autre, du modèle de transport-chimie MOCAGE, développé au CNRM et opérationnel à Météo-France.

Des facteurs de réduction des émissions dépendant à la fois du secteur d'émission,

du pays et du jour simulé ont été développés au Barcelona Supercomputing Center (BSC) et appliqués aux cadastres d'émissions utilisés en entrée du modèle MOCAGE. La période d'étude englobe les différents confinements européens (21 février 2020 – 31 juillet 2020). Les simulations réalisées avec le modèle MOCAGE indiquent une baisse significative de l'ordre de 15 % des concentrations d'ozone sur toute l'Europe, comme le montre la figure 1, représentant la différence relative d'ozone au sol le 1er mai 2020 à 12h, entre deux simulations avec réduction et sans réduction des émissions). Cependant, cette diminution des concentrations atmosphériques en composés chimiques n'est pas sensible sur les PM10 (particules aérosols de moins de 10 microns) car au printemps, les particules sont majoritairement dues aux activités agricoles, qui elle n'ont pas été impactées.

4

Quel impact des émissions de SO₂ volcanique sur le bilan troposphérique global en espèces soufrées ?

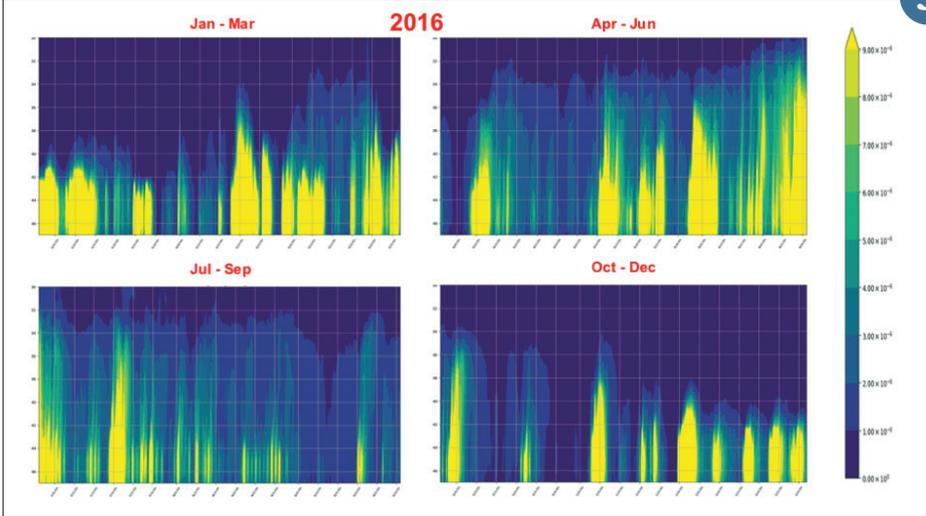
Avec les activités humaines, les sources naturelles telles que les volcans injectent des polluants dans l'atmosphère. À l'aide d'inventaires d'émissions globaux et du modèle de chimie-transport MOCAGE, il est possible de déterminer la quantité d'espèces soufrées émises, déposées et restantes dans la troposphère : c'est le calcul du bilan troposphérique.

L'étude est menée sur l'année 2013 qui est pauvre en événements éruptifs, ce qui suppose que seul le dégazage passif influence le bilan (Tab. 1). La comparaison de deux simulations, l'une avec émissions volcaniques et l'autre sans, permet d'estimer leur contribution dans le bilan. À l'échelle globale, environ 81 Tg de soufre sont émis, dont 15 % par les volcans. Cependant, la charge troposphérique en SO₂ et aérosols sulfatés due aux émissions volcaniques représente 14 et 27 % respectivement. Cette différence de ratio montre la plus grande capacité des émissions volcaniques à former des sulfates, comparées aux autres sources, notamment grâce à leur plus grande hauteur d'émission.

Ces résultats montrent l'impact que peuvent avoir les émissions volcaniques sur la composition chimique atmosphérique. Aux alentours des volcans, ces émissions soufrées jouent un rôle prédominant, en contribuant très fortement à la présence d'espèces soufrées dans l'atmosphère (Fig. 1). Ainsi, les volcans peuvent considérablement impacter la qualité de l'air locale, causer des problèmes environnementaux et sanitaires. Dans le futur, une étude similaire sera réalisée, mais sur l'année 2014. À la différence de 2013, cette année est très riche en événements éruptifs ce qui permettra de comparer l'apport supplémentaire de ce type d'émission sur le bilan troposphérique en espèces soufrées.

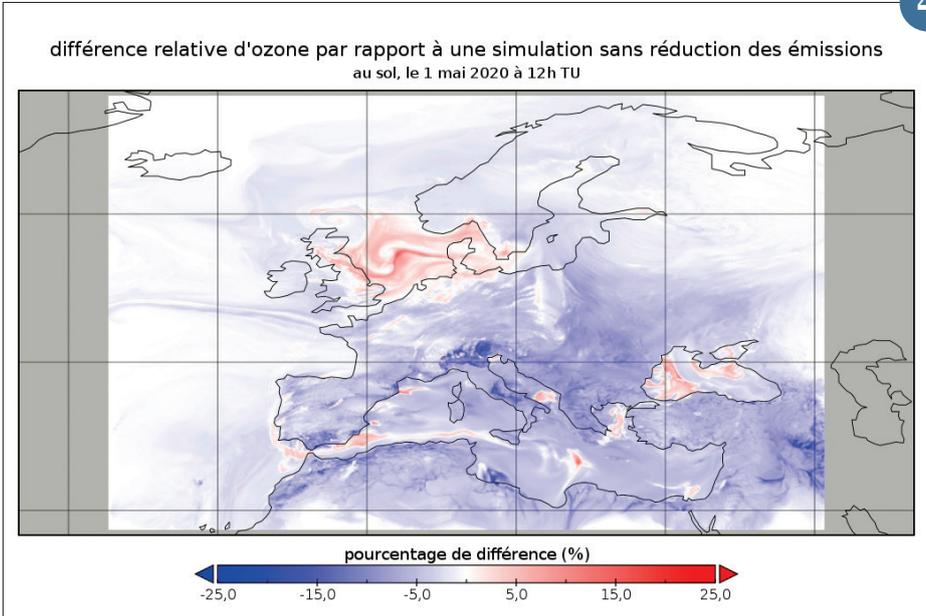
5

3



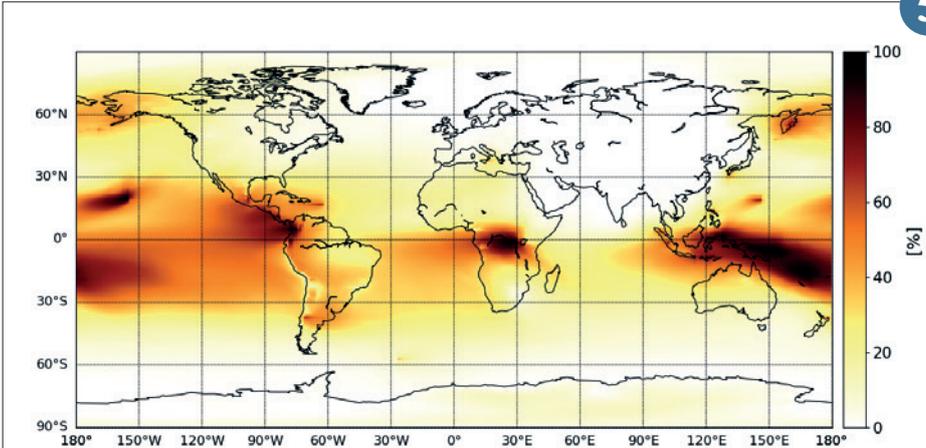
Évolution temporelle du coefficient de rétrodiffusion analysé issu de l'assimilation des données du lidar CALIOP au-dessus du Sahara africain et correspondant aux 4 trimestres de l'année 2016.

4



Différence relative de concentration d'ozone en surface le 1^{er} mai 2020 à 12h, entre une simulation de référence sans réduction des émissions et la simulation tenant compte des réductions dues à la situation sanitaire.

5



Contribution annuelle moyenne 2013 de colonne troposphérique d'aérosols sulfatés due aux émissions volcaniques (en %).

	Émission de soufre	Charge SO ₂	Charge Sulfate	Dépôt de soufre			Efficacité
				Humide	Sec	Sedim.	
Total (Tg)	81.41	0.17	0.82	42.41	27.81	9.80	-
<i>Contribution par sources au budget total (%)</i>							
Volcans	14.5	13.8	27.4	7.9	2.3	23.0	1.89
Autres	85.5	86.2	72.6	92.1	97.7	77.0	0.85

Bilan troposphérique global avec la moyenne annuelle 2013 des émissions de soufre, le budget en soufre et les quantités de dépôts en Tg. La contribution des espèces sulfurées due aux différentes sources d'émissions sont présentées en %. L'efficacité est le ratio entre la contribution à la charge d'aérosols sulfatés et la contribution aux émissions sulfurées pour une source spécifique.

Participation à la phase 2 de l'exercice international CCMi

L'initiative internationale CCMi (<https://blogs.reading.ac.uk/ccmi>) vise à améliorer notre connaissance des interactions chimie-climat pour le passé, le présent, et les projections futures. Pour cela, des exercices d'inter-comparaison entre modèles sont menés. Le CNRM participe à nouveau à l'exercice, cette fois pour la phase 2. Un des objectifs de cette phase 2 est de servir de support à l'élaboration du rapport WMO/UNEP sur l'évolution de la couche d'ozone, prévu pour 2022.

Pour cela, une nouvelle version de MOCAGE a été développée afin de mieux décrire les niveaux stratosphériques, avec une limite supérieure désormais à 0.1hPa, au lieu de 5hPa dans la version précédente. La résolution choisie est de 2°x2°, et le forçage météorologique provient du modèle CNRM-CM. Plusieurs simulations doivent être menées.

D'une part, on évalue la capacité des modèles à reproduire le passé, en effectuant des simulations de 1960 à 2018. D'autre part, des projections futures de l'évolution de la composition chimique sont simulées, avec deux scénarios prévus. En 2020, les simulations passées ont été réalisées, et les projections seront réalisées en 2021. Une autre nouveauté est également la requête par CCM-I de fournir un ensemble de simulations plutôt qu'une seule, pour essayer d'estimer les incertitudes. Pour chacune des simulations, un ensemble de 3 ou 4 réalisations est ainsi effectué avec MOCAGE.

La figure ci-dessous illustre l'évolution de 1970 à 2017 de la colonne totale d'ozone, en moyenne sur les longitudes, avec le temps comme axe des abscisses. A gauche, les observations issues de SBUV-MOD, à droite une des simulations MOCAGE sur le passé. Le modèle reproduit de façon satisfaisante l'évolution de l'ozone sur les 60 dernières années.

6

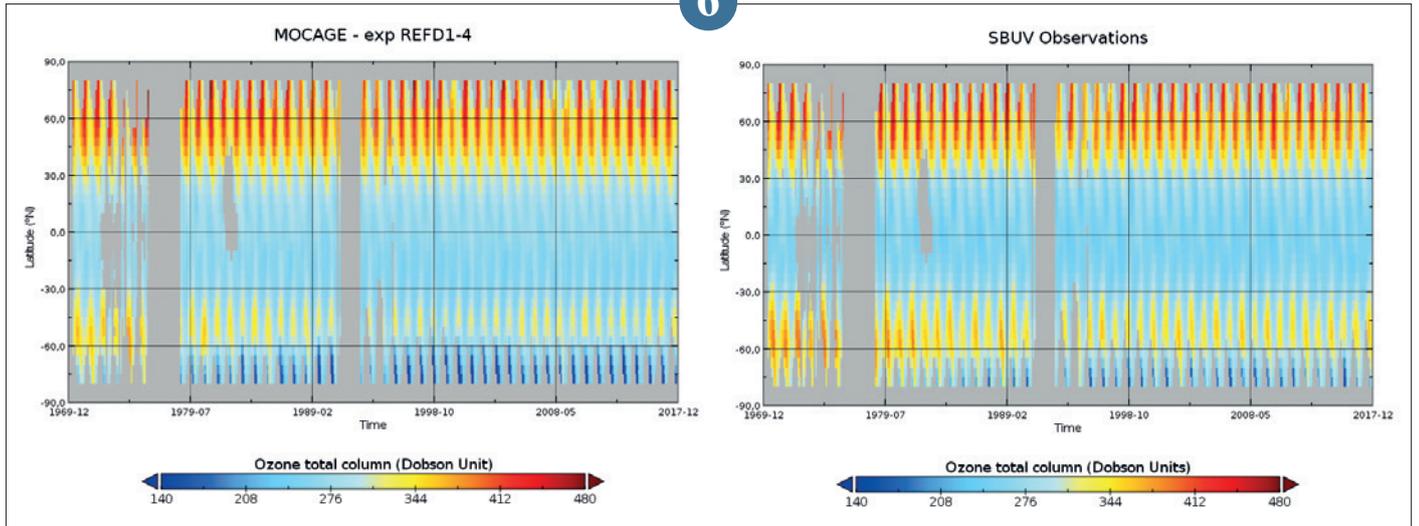
La mesure du vieillissement des particules de carbone-suie permet d'expliquer la capacité d'absorption exceptionnelle des aérosols de feux de biomasse

L'Afrique Australe est la plus importante source mondiale d'aérosols de feux de biomasse qui sont transportés sur une grande partie de l'océan Atlantique Sud. Ces aérosols présentent des propriétés d'absorption parmi les plus élevées recensées mondialement et ont ainsi la capacité de modifier le bilan radiatif et les propriétés des nuages, avec de potentiels effets climatiques à grande échelle (diminution de la température des océans, modification de la circulation dans la basse troposphère). Néanmoins, la cause de cette capacité d'absorption reste incertaine, ce qui génère de fortes incertitudes dans la représentation de ces propriétés dans les modèles de climat. Dans le cadre du projet Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa (DACCIWA), le groupe GMEI du CNRM a déployé un dispositif instrumental important à bord de

l'avion de recherche ATR-42 pour caractériser les propriétés physico-chimiques des aérosols en Afrique de l'Ouest. Ces observations couplées à des simulations avec le code de transfert radiatif EcRad ont permis de montrer que les particules de carbone-suie sont responsables de la forte absorption observée dans les panaches de feux de biomasse. Le vieillissement (état de mélange) que ces particules ont subi lors de leur transport dans l'atmosphère joue un rôle clef dans cette capacité d'absorption et doit être représenté dans les modèles de climat pour restituer les effets radiatifs direct et semi-direct des feux de biomasse en Afrique de l'Ouest.

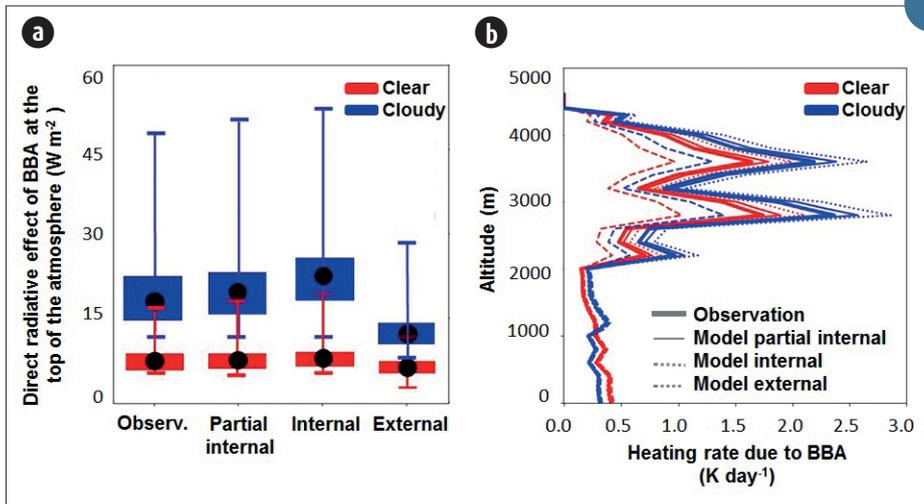
7

6



Evolution de la colonne totale d'ozone, en moyenne mensuelle et sur les longitudes, au cours du temps (selon l'axe des abscisses), de 1970 à 2017. A gauche, selon les observations de SBUV_MOD (https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/merged/), à droite selon le modèle MOCAGE pour une des quatre réalisations de l'ensemble calculé pour le projet CCM-1.

7



(a) Effet radiatif direct (DRE) au sommet de l'atmosphère et (b) profil du taux d'échauffement liés à la présence des aérosols de feux de biomasse. Ces paramètres sont calculés à partir des observations ou de différentes hypothèses sur l'état de mélange des particules de carbone-suie. A gauche, les boîtes à moustache représentent les valeurs médian (cercles noirs), les 25^e et 75^e percentiles (haut et bas des boîtes), ainsi que les valeurs minimum et maximum (barres d'erreur). A droite, les profils de taux d'échauffement sont moyennés sur la campagne.

Neige

La neige est une composante essentielle du système climatique de la Terre. Elle joue un rôle majeur de régulation climatique, de ressource en eau et d'élément clé du paysage, pour les sociétés humaines et les milieux naturels. La neige joue un rôle important pour de nombreux risques naturels tels que les avalanches et les crues nivales. Météo-France, notamment le Centre d'Etudes de la Neige (CEN, Météo-France – CNRS, CNRM), conduit des recherches pour mieux comprendre et prévoir l'évolution du manteau neigeux en montagne.

En 2020, plusieurs avancées majeures ont été concrétisées et valorisées. L'assimilation de données satellitaires dans les modèles de manteau neigeux est amené à jouer un rôle crucial, puisqu'elle permet de réduire drastiquement les incertitudes des simulations d'enneigement. Les données satellitaires offrent la possibilité unique d'obtenir des informations sur l'état du manteau neigeux sur de grandes étendues mais restent lacunaires (nuages, ombres par exemple). Une méthodologie novatrice a été mise en place afin de transférer l'information de l'observation des zones observées vers les zones non observées via un système d'assimilation. Les projets PROSNOW et CLIMSNOW ont permis le développement de services météo-climatiques pour l'industrie des sports d'hiver. L'impact important des dépôts de poussières sahariennes sur la durée d'enneigement a été étudié en détail pour plusieurs années et massifs montagneux. Enfin, à plus petite échelle, plusieurs verrous de notre compréhension actuelle des transports de masse et de chaleur dans la neige ont été levés, ouvrant la voie pour de nouvelles avancées décisives pour les modèles physiques d'évolution du manteau neigeux.

Assimilation d'observations satellites et in-situ dans les simulations du manteau neigeux

Connaître les propriétés physiques du manteau neigeux en montagne est essentiel pour prévoir les aléas naturels liés à la neige et optimiser la gestion des ressources en eau. Les observations disponibles n'offrent qu'une vision lacunaire du manteau neigeux. L'utilisation de modèles numériques est un complément indispensable donnant accès à toutes les propriétés physiques de la neige, à tout instant et en tout point. Cependant, leurs larges incohérences avec la réalité du terrain limitent fortement leur utilisation. L'assimilation d'observations pour contraindre les simulations est la principale perspective d'amélioration pour tous les groupes opérant des systèmes de modélisation numérique de la neige. Pour cela, le CNRM a développé un algorithme

original dit « filtre à particules séquentiel k-localisé ». Il consiste à échantillonner les membres d'un ensemble de simulation les plus cohérents avec les observations, en travaillant successivement sur les sous-domaines les plus pertinents. L'algorithme est facile à appliquer sur les modèles de neige les plus complexes comme Crocus. Il permet de propager l'information des pixels observés vers les pixels non observés (Figure) et garantit une variabilité spatiale de la neige réaliste malgré l'hétérogénéité de la couverture des observations. La plus-value a été démontrée pour l'assimilation de réflectances satellites optiques, de hauteurs de neige ponctuelles, et de hauteurs de neige obtenues par images stéréo sur les satellites Pléiades.

Les développements actuels visent à appliquer cet algorithme dans des simulations à haute résolution horizontale (250 mètres) permettant de tirer le meilleur parti de la résolution des observations satellites disponibles. A terme, les progrès obtenus dans les simulations seront bénéfiques pour tous les systèmes de prévision qui les utilisent sur les massifs français.

1

Développement de services météo-climatiques pour l'industrie des sports d'hiver

L'économie touristique en montagne repose fortement sur l'activité des stations de sport d'hiver. Elles exploitent le manteau neigeux, ressource fortement variable à basse et moyenne altitude, et en réduction sous l'effet du changement climatique. Les stations de sport d'hiver travaillent le manteau neigeux, notamment par le damage et la production de neige. Les avancées récentes ont fait progresser les moyens d'anticipation des conditions d'enneigement à diverses échelles de temps.

Le projet H2020 PROSNOW, coordonné par Météo-France au CNRM/CEN de 2017 à 2020, a rassemblé 13 partenaires dans les pays de l'Arc Alpin et 9 stations pilotes. Il a développé un outil innovant combinant

observations et prévisions météorologiques, modélisation du manteau neigeux naturel et géré (damage et production de neige), et observations in-situ (épaisseurs de neige mesurées par les dameuses, consommation d'eau pour la production de neige) et par télédétection satellitaire. Cet outil quantifie l'impact d'actions quotidiennes de gestion de la neige, à l'échéance de quelques jours à quelques mois. Ce service est d'ores et déjà exploité dans les Alpes et les Pyrénées par un consortium associant Dianeige, CGX et Météo-France.

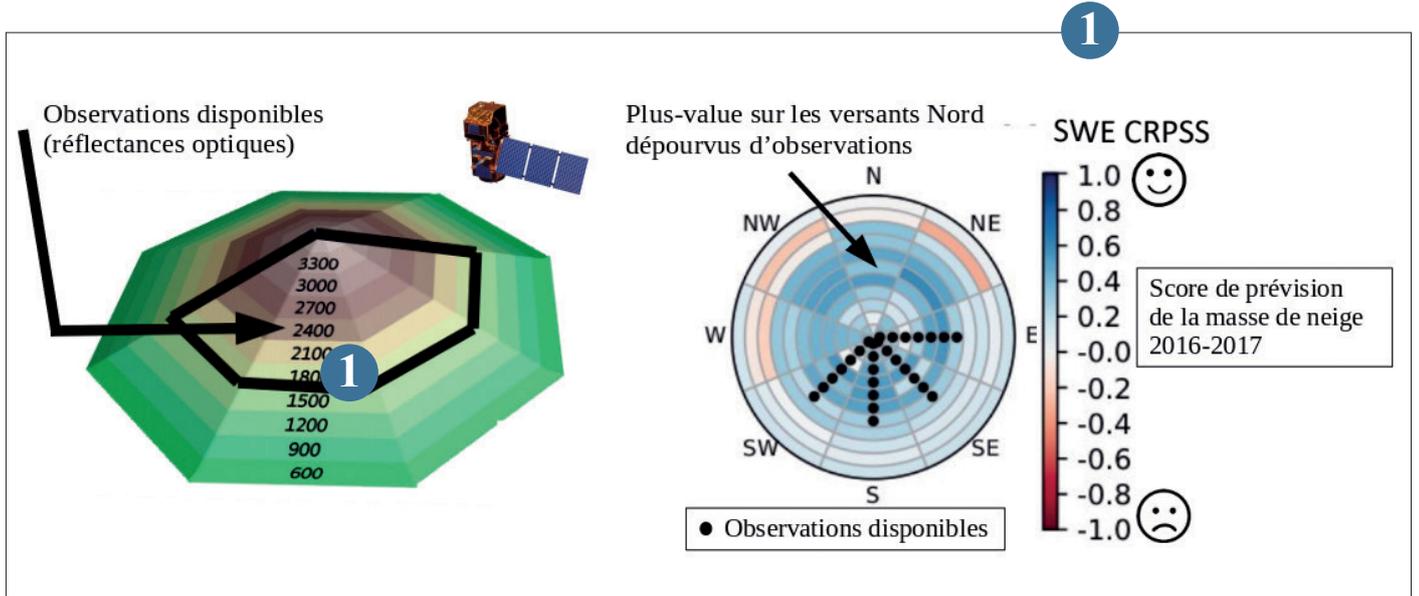
L'année 2020 a vu la concrétisation du service CLIMSNOW, commercialisé par Dianeige, Météo-France et INRAE, permettant d'accompagner l'adaptation au changement

climatique des stations de sport d'hiver par une estimation fine de l'impact de l'évolution climatique sur les conditions d'exploitation des stations, à l'échéance de plusieurs décennies. Météo-France a coordonné et produit des indicateurs d'enneigement naturel et géré pour l'ensemble de l'Europe, dans le cadre d'un contrat Copernicus Climate Change Service.

Liens utiles :

<http://prosnow.org/?lang=fr>
<https://www.climsnow.com/>
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-tourism-snow-indicators>

2



▲ Impact de l'assimilation de réflectances optiques disponibles 1 fois par semaine et uniquement sur les versants ensoleillés et au-dessus des forêts, sur les scores de prévision de la masse de neige dans le massif des Grandes Rousses (Isère) au cours de l'hiver 2016-2017. En bleu : amélioration, en rouge : dégradation. Le massif est représenté comme une pyramide, l'altitude augmente en se rapprochant du centre de cercle. Par rapport aux simulations n'assimilant pas d'observations, une plus-value très significative est obtenue non seulement sur les pentes observées mais aussi sur les versants Nord non observés.



▲ Production de neige et aperçu du service PROSNOW. PROSNOW a été mis en avant dans la contribution de la Commission Européenne à la GEO Week 2020 et mentionné dans la déclaration du Dr Patrick Child, directeur général adjoint pour la recherche et l'innovation (https://www.youtube.com/watch?v=_RjzWwSFhsw).

Impact des dépôts de poussières de sable sur l'évolution du manteau neigeux

En Mars 2018, les montagnes du Caucase se sont recouvertes d'un dépôt orange. Le phénomène d'une forte intensité a été largement relayé par les médias. Une forte tempête en provenance des côtes libyennes a transporté les particules minérales de sable saharien venues se déposer en Caucase. Ce type de phénomène est parfois visible en France, notamment dans les Alpes et les Pyrénées. Ce dépôt impacte en profondeur l'évolution du manteau neigeux, et plus particulièrement en fin de saison quand les couches orangées réapparaissent en surface. La couleur sombre, par rapport à la couleur blanche de la neige habituelle, provoque une augmentation de l'énergie solaire absorbée par la neige, énergie nécessaire et alors disponible pour une fonte accélérée. Pour suivre l'évolution des concentrations en poussières en surface de la neige (Figure 1), nous avons utilisé les images du satellite optique Sentinel-2 et des simulations numériques détaillées du couvert neigeux. Quelque soit l'altitude, les simulations

montrent que le dépôt de poussières a causé une fonte accélérée du manteau neigeux d'une à deux dizaines de jours. L'impact est plus marqué aux altitudes élevées, avec une date de fonte avancée de 23 ± 7 jours (2200 m), qu'aux altitudes plus faibles, 15 ± 3 jours (1600m), ce qui s'explique par le fait qu'en altitude la fonte a naturellement lieu plus tard, à un moment de la saison où l'énergie solaire disponible est plus importante. En France, on observe ce type de phénomène quasiment tous les hivers avec des intensités très variables. Au col du Lautaret dans les Alpes, nous avons étudié le phénomène en détail pendant deux hivers et montré que la poussière combinée au carbone suie avait raccourci la durée d'enneigement d'une dizaine de jours pour ces deux hivers.

3

Transport de masse et de chaleur dans la microstructure de la neige

Caractériser les transports de masse et de chaleur dans la neige est essentiel pour prévoir l'évolution de sa microstructure ainsi que le bilan thermique et hydrique de ce composant clé du système Terre, à l'interface entre l'atmosphère et le sol. Dans les modèles actuels, ces transports sont souvent considérés de manière découplée, par simplicité.

Nous avons étudié le couplage entre transports de masse et de chaleur dans la neige sèche à l'échelle microscopique, et sa traduction en termes de propriétés macroscopiques équivalentes. En combinant théorie, mesures, et simulations numériques à partir d'images tomographiques 3D, nous avons montré que, contrairement à une idée admise depuis 60 ans, la vapeur d'eau diffuse moins dans la neige que dans l'air. Comme illustré par la Figure, cette diffusion est néanmoins d'autant plus importante que la cinétique de changement de phase à la surface de la glace est rapide. De plus, nos résultats montrent que dans le cas où cette cinétique est très rapide, une hypothèse soutenue par plusieurs résultats

expérimentaux, transports de chaleur et de masse deviennent inextricablement liés. En effet, les molécules de vapeur transportent une certaine quantité d'énergie, qu'elles libèrent lors de leur condensation à la surface de la glace. Cette énergie transportée par la vapeur fait partie intégrante du flux de chaleur, et peut augmenter le transfert thermique jusqu'à 50% pour certains types de neige.

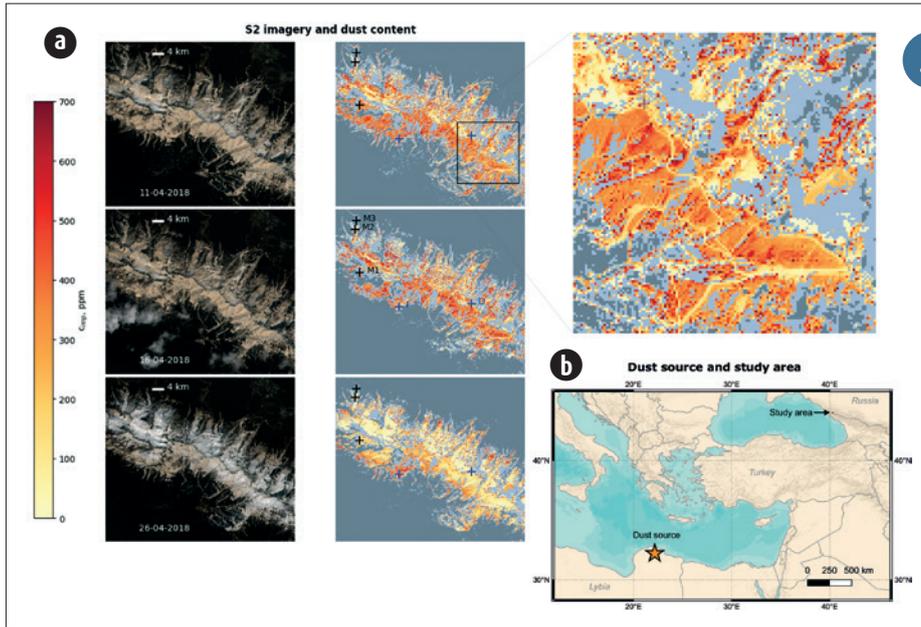
Ces travaux montrent que la quantification de la cinétique de surface de la glace est indispensable pour améliorer la modélisation du transport de chaleur et de vapeur dans la microstructure de la neige qui in fine gouverne l'évolution des manteaux neigeux.

4

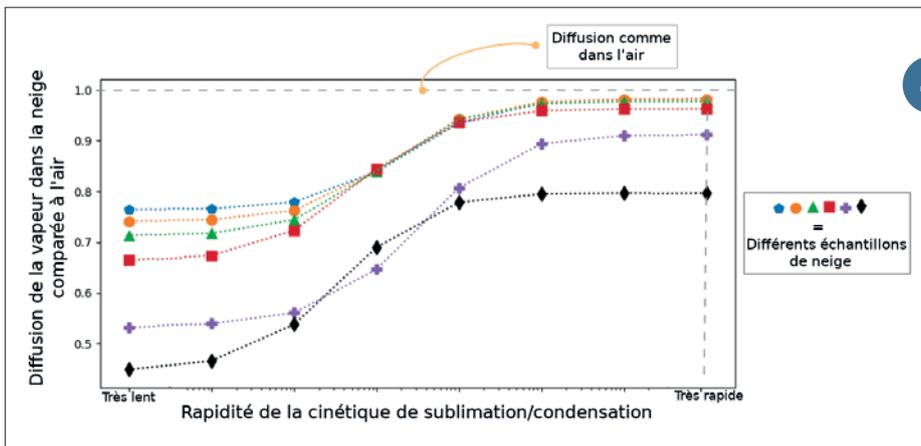
Impact des produits satellitaires de rayonnement sur l'enneigement en montagne

La surveillance du manteau neigeux en montagne est essentielle pour de nombreuses applications incluant le climat, l'hydrologie, l'écologie et la gestion des risques en montagne. Elle est cependant difficile à réaliser, tant nombreux sont les facteurs de variabilité encore aujourd'hui méconnus ou mal représentés dans les modèles. En particulier, le suivi de l'évolution du manteau neigeux dans les massifs montagneux nécessite de prendre en compte ses multiples interactions avec l'atmosphère, le sol et la topographie environnante. Cet article revient sur les interactions atmosphère-manteau neigeux et traite de l'apport de différents jeux de données de rayonnements incidents solaires et atmosphériques testés en forçage radiatif pour simuler l'évolution de l'enneigement en montagne. Il s'agit principalement des produits de rayonnements incidents solaires et grandes longueurs d'ondes du LSA SAF (DSSF et DSLF). Une évaluation de ces produits en montagne est présentée conjointement à celle des sorties des modèles AROME et SAFRAN et des mesures in-situ et un nouveau produit a été proposé (DSLFFnew). La figure montre la variation spatiale moyenne des produits DSLF ainsi que le gradient vertical des différents jeux de rayonnement grandes longueurs d'ondes. L'impact sur les simulations d'enneigement a été étudié. Les produits de rayonnement "satellites" présentent les meilleures performances, qu'il faut compléter par une prise en compte des effets du terrain sur le bilan radiatif à plus fine échelle. L'étude a mis en évidence que l'amélioration d'un ou de plusieurs forçages atmosphériques ne se traduit pas nécessairement par l'amélioration des simulations de l'enneigement; d'autres erreurs venant faire jeux de compensation en lien avec les flux turbulents et l'albédo de la neige.

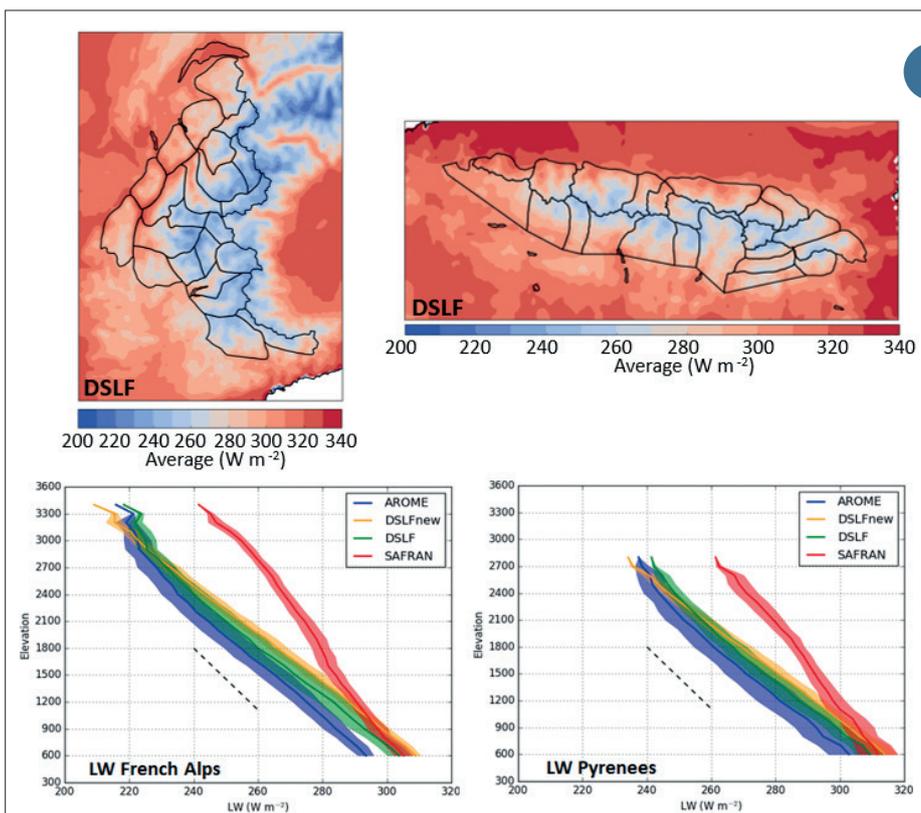
5



(a) Localisation du site d'étude et de la zone source des poussières, (b) Séries temporelles des données Sentinel-2, (gauche) image RGB, (droite) quantité de poussières en surface de la neige estimée à partir des images. Les zones grises correspondent aux zones nuageuse ou sans neige (gris foncé), de forte pente ou bruitées (gris clair). En haut à droite de l'image, un zoom sur une carte de contenu en poussière. Sur ce zoom, on peut observer les pistes de skis où le contenu en poussière est moins important.



Effet de la cinétique de surface sur la diffusion de la vapeur d'eau dans la neige. Dans tous les cas, la vapeur diffuse moins dans la neige que dans l'air.



En haut : Moyenne des DSLF (produit satellite) pour les Alpes et les Pyrénées calculée sur la période du 1^{er} août 2010 au 31 juillet 2014. En bas : Gradient vertical des produits LW dans les Alpes et Pyrénées françaises, avec LSA SAF en vert, AROME en bleu, SAFRAN en rouge, DSLFnew en orange. Les enveloppes représentent la moyenne \pm l'écart-type. La ligne noire pointillée représente le gradient vertical climatologique LW de $-29 W m^{-2} km^{-1}$ de Marty et al. (2002).

Océanographie

Cette année, l'océanographie est abordée suivant deux axes. Le premier met en avant des développements originaux dans le domaine de l'observation, avec deux approches très différentes. L'observation innovante des états de mer dans la frange littorale à l'aide de caméras simples relève des « systèmes d'opportunité », pratique bien ancrée dans la culture météorologique. Le potentiel de telles caméras est évalué ici en métropole (mais aussi aux Antilles) par rapport aux modèles opérationnels mis en œuvre par Météo-France. Ces travaux sont menés avec l'Institut de Recherche pour le Développement et une *startup* hébergée dans l'incubateur situé sur la Météopole. Une autre illustration, provenant du Centre de Météorologie Spatiale, nous montre comment les infrastructures d'observation de la Terre depuis l'espace sont exploitées pour combattre des fléaux tels que les sargasses. Météo-France innove et valorise ses savoir-faire, ses chaînes de traitement et systèmes de modélisation numérique pour développer sans cesse ses contributions à la compréhension de notre environnement et de ses dérèglements, et prévenir les risques.

Les risques majeurs et les phénomènes marquants sont également une motivation essentielle des travaux abordant la complexité des interactions air-mer et leur rôle dans des phénomènes couplés océan-atmosphère. Qu'il s'agisse de fronts de température de surface de la mer et de la réponse atmosphérique à laquelle ils peuvent être associés – songeons à la mer d'Iroise, aux brouillards associés aux excursions du front d'Ouessant liées à la marée, et au fort trafic maritime en sortie de Manche –, d'épisodes méditerranéens ou de cyclones, une modélisation plus sophistiquée du couplage entre l'atmosphère et l'océan est déterminante pour en améliorer la compréhension et les capacités de prévision. Là aussi, les efforts de recherche vont depuis les processus, revisités en profondeur, jusqu'aux outils de modélisation, depuis ceux réservés au laboratoire, trop lourds pour les opérations mais qui permettent d'étudier finement les mécanismes, jusqu'aux modèles utilisés en prévision. Les interactions océan-atmosphère, incluant les états de mer, sont la clé de nombre de phénomènes à enjeux forts pour nos territoires littoraux et les activités maritimes, sur l'ensemble de nos façades océaniques, en métropole comme dans nos outre-mers.

Téledétection des radeaux de Sargasse pour l'élaboration de bulletins d'alerte opérationnels

La téledétection des radeaux de Sargasses est un domaine relativement nouveau de téledétection devenant de plus en plus important à cause de l'impact nocif plus fréquent de celles-ci sur les communautés côtières, en particulier dans le secteur des Caraïbes et Guyane.

Depuis 2020, nous avons commencé à développer un système de surveillance opérationnel par satellite des radeaux de Sargasses en océan profond. Cette détection hauturière des Sargasses est nécessaire car elle est utilisée comme une information préparatoire pour la prévision numérique des échouements de Sargasses, mais aussi par les décideurs locaux qui peuvent choisir une bonne stratégie pour faire face à ce problème.

Actuellement, nous développons un ensemble d'algorithmes pour différents capteurs satellitaires (MODIS, OLCI, VIIRS, etc.) utilisant des longueurs d'onde dans le visible, l'infrarouge et le proche-infrarouge. La tâche est donc difficile, car l'une des caractéristiques les plus contraignantes concernant la téledétection à partir de ces longueurs d'ondes est la présence de nuages qui doivent être filtrés, ainsi que le reflet de soleil et la présence de zones turbides et peu profondes, etc. L'objectif principal de notre travail est la création d'un algorithme multi-capteurs fournissant les informations les plus précises sur la position des nappes de Sargasses à différentes résolutions spatiales et temporelles.

Les premiers résultats du développement de l'algorithme pour le capteur MODIS sont prometteurs et sont en train d'être validés par une équipe d'experts locaux en plus d'être comparés aux données de précédentes expéditions. Les nouveaux capteurs vont être ajoutés à l'algorithme opérationnel dans les prochaines années en vue d'augmenter la résolution temporelle et la qualité de l'information délivrée.

1

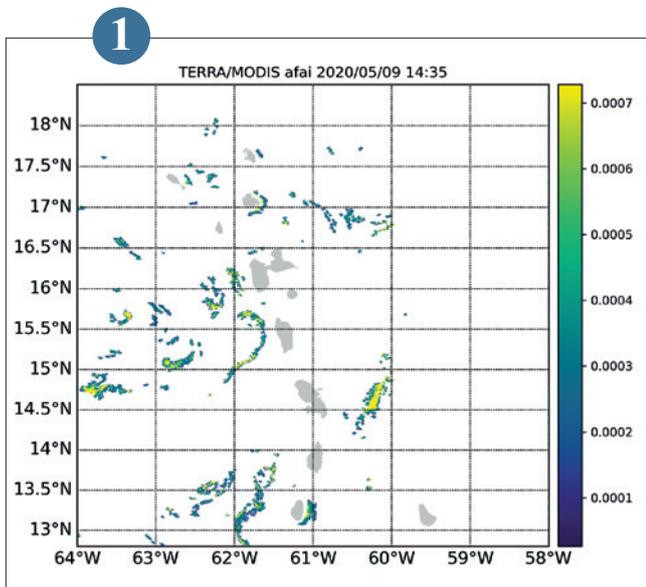
WASP (Wave-Age induced Stress Parameterization), une paramétrisation des flux turbulents tenant compte de la croissance des vagues

Une paramétrisation polyvalente des flux turbulents de quantité de mouvement et de chaleur en mer a été développée pour le modèle de surface SURFEX v8.0. Cette paramétrisation de la tension de vent dépendant de l'âge des vagues (WASP pour wave-age dependent stress parameterization) associe un calage sur les observations in situ disponibles en mer qui incluent des coefficients de transferts jusqu'à 60 m/s de vitesse de vent avec la possibilité d'activer la prise en compte de l'impact de la croissance des vagues sur la tension de vent. Elle est fondée sur différents principes physiques selon les tranches de vent considérées et l'état de l'art des processus de surface associés. Elle peut être utilisée avec les différents modèles atmosphériques de Météo-France couplés avec le modèle de surface SURFEX, à savoir AROME, ARPEGE et meso-NH. Elle a été validée sur plusieurs études de cas

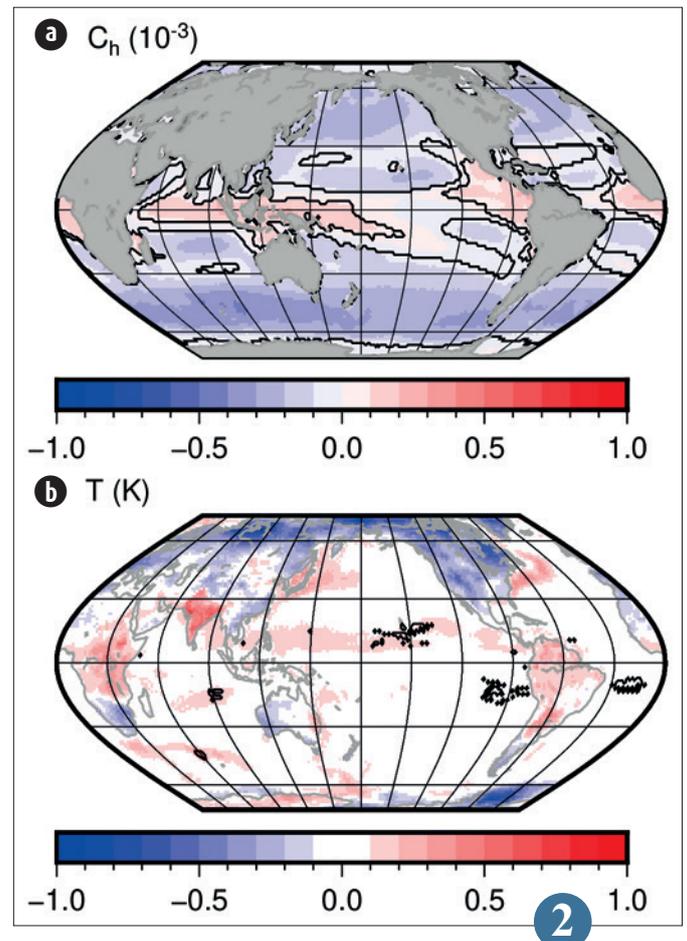
dans plus conditions de surface connues pour être sensibles à la représentation des flux turbulents : i) l'impact d'un front de SST sur l'écoulement de basses couches par vent faible ; ii) la simulation d'un événement cévenol où il a été montré que les vagues influencent l'écoulement de basses couches et déplacent les précipitations ; iii) un cyclone tropical ; et iv) une simulation climatique atmosphérique sur 35 ans. Cette nouvelle représentation des flux donne des résultats identique ou supérieurs aux différentes paramétrisations utilisées dans SURFEX jusqu'à présent.

2

Différence entre (a) les coefficients de transfert de chaleur sensible et (b) la température à 2 m en K sur les simulations climatiques atmosphériques avec la paramétrisation WASP et la paramétrisation actuelle ECUME. Les traits noirs indiquent les zones où la différence est significative à 95 %



Les radeaux des sargasses et leurs Index AFAI (Alternative Floating Algae Index) détectés en Océan Atlantique Ouest le 9 Mai 2020 avec le capteur MODIS/Terra



Validation d'un traitement d'images vidéo pour l'observation des vagues

L'observation de paramètres d'état de mer dans la frange littorale est cruciale pour la vigilance vagues submersion opérée par Météo-France, pour le suivi des états de mer comme pour l'amélioration des modèles de vagues. L'usage des images de caméras pour ce type d'observation fait l'objet de développements depuis plus de dix ans dans la communauté scientifique. La technique de mesure a été testée en collaboration avec la start-up Waves'n See, hébergée dans l'incubateur d'entreprises de Météo-France. Leur algorithme de restitution des paramètres d'états de mer à partir des images de webcam hérite des travaux de recherche menés à l'IRD. Les travaux ont porté sur deux caméras d'opportunité de Capbreton (Viewsurf, en partenariat avec l'IRD). L'échantillonnage temporel, puis le traitement des vidéos, ont permis de restituer la période des vagues. Des cas d'images rendues floues à cause des embruns ont été détectés et un filtre a été ajouté. Puis, le géoréférencement des images, sans connaissances préalables des caractéristiques des caméras, a été mené afin de calculer la hauteur des vagues.

Les résultats montrent une bonne corrélation avec les données du modèle de vagues en côtier de Météo-France, avec encore des progrès nécessaires. Ils sont d'autant plus encourageants que le cas étudié est une caméra d'opportunité d'un réseau existant, donc sans maîtrise ni connaissance de ses caractéristiques techniques.

La validation a été limitée par l'absence d'observations de référence in-situ. Afin de continuer les développements sur le sujet, cette étude sera prolongée en utilisant d'autres sites équipés de caméras, et ayant à proximité une bouée houlographe côtière.

3

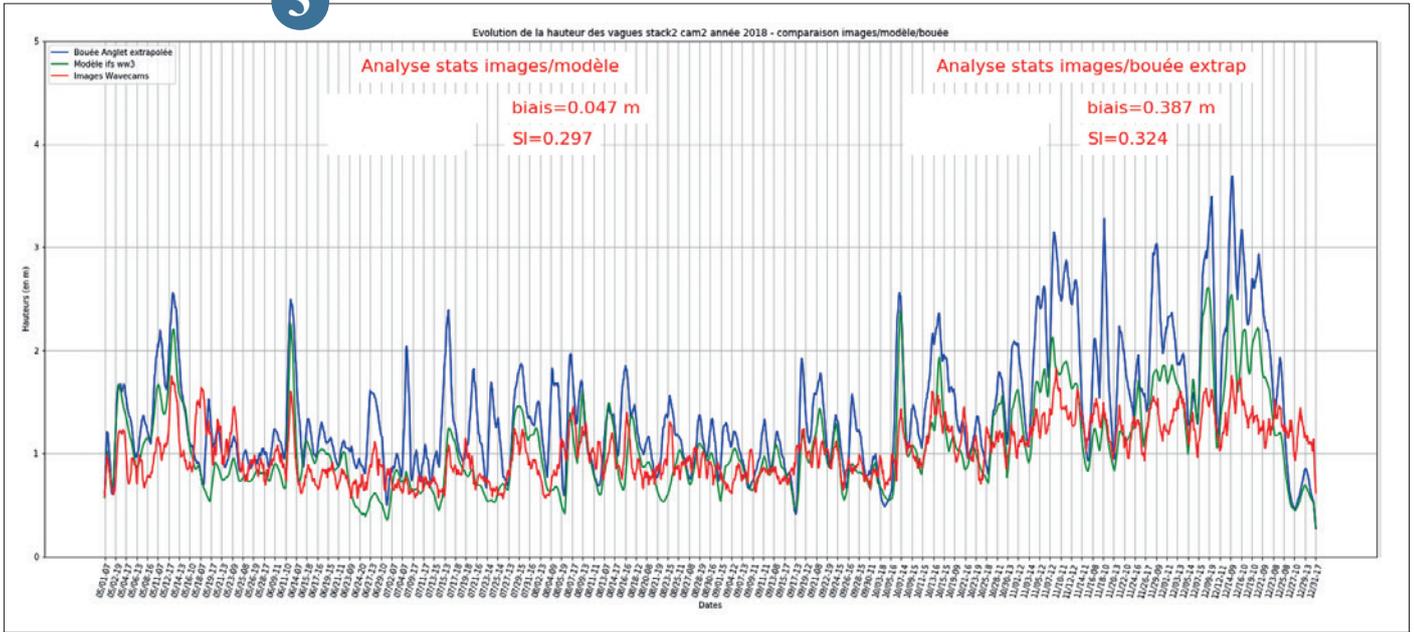
Couplage avec NEMO pour les AROME-OM

5 modèles AROME sont opérationnels depuis 2016 sur l'océan Indien, les caraïbes, la Guyane, la Nouvelle-Calédonie et la Polynésie. Les domaines des AROMES-OM sont majoritairement couverts par un océan tropical sur lequel peuvent se développer des cyclones tropicaux. Depuis 2017, le schéma de surface des AROMES-OM inclut une paramétrisation 1D de couche limite océanique (CMO) qui permet de tenir compte des changements rapides de la température de l'océan induits par les cyclones. Les simulations couplées initialement réalisées au LACy avec MésoNH et les modèles d'océan NEMO ou CROCO avaient montré que la paramétrisation de la CMO a tendance à sous estimer le refroidissement sous cyclones. Une configuration couplée d'AROME-Océan Indien-NEMO a été développée cette année afin de pouvoir tester l'impact du couplage 3D sur un plus grand nombre de cyclones et évaluer à terme son intérêt dans un contexte opérationnel. Les premières simulations montrent que le modèle couplé peut conduire à de très forts refroidissements océaniques dans les zones où le cyclone est quasi-stationnaire pendant plusieurs heures (figure). Des tests de sensibilité sur les processus de mélange dans le modèle océanique sont en cours afin d'optimiser la configuration de NEMO pour les résolutions utilisées et le forçage par des vents cycloniques. Cependant, vu l'extrême rareté des données océaniques dans les cyclones de l'océan Indien, il est difficile de valider l'état de l'océan à l'échelle de quelques dizaines de kilomètres dans des zones couvertes de nuages.

La configuration AROME-OI/NEMO va encore s'enrichir en 2021 grâce au couplage avec le modèle de vague WW3 ce qui permettra de tester de nouvelles paramétrisations des flux à l'interface océan-atmosphère intégrant les caractéristiques des vagues fournies par WW3.

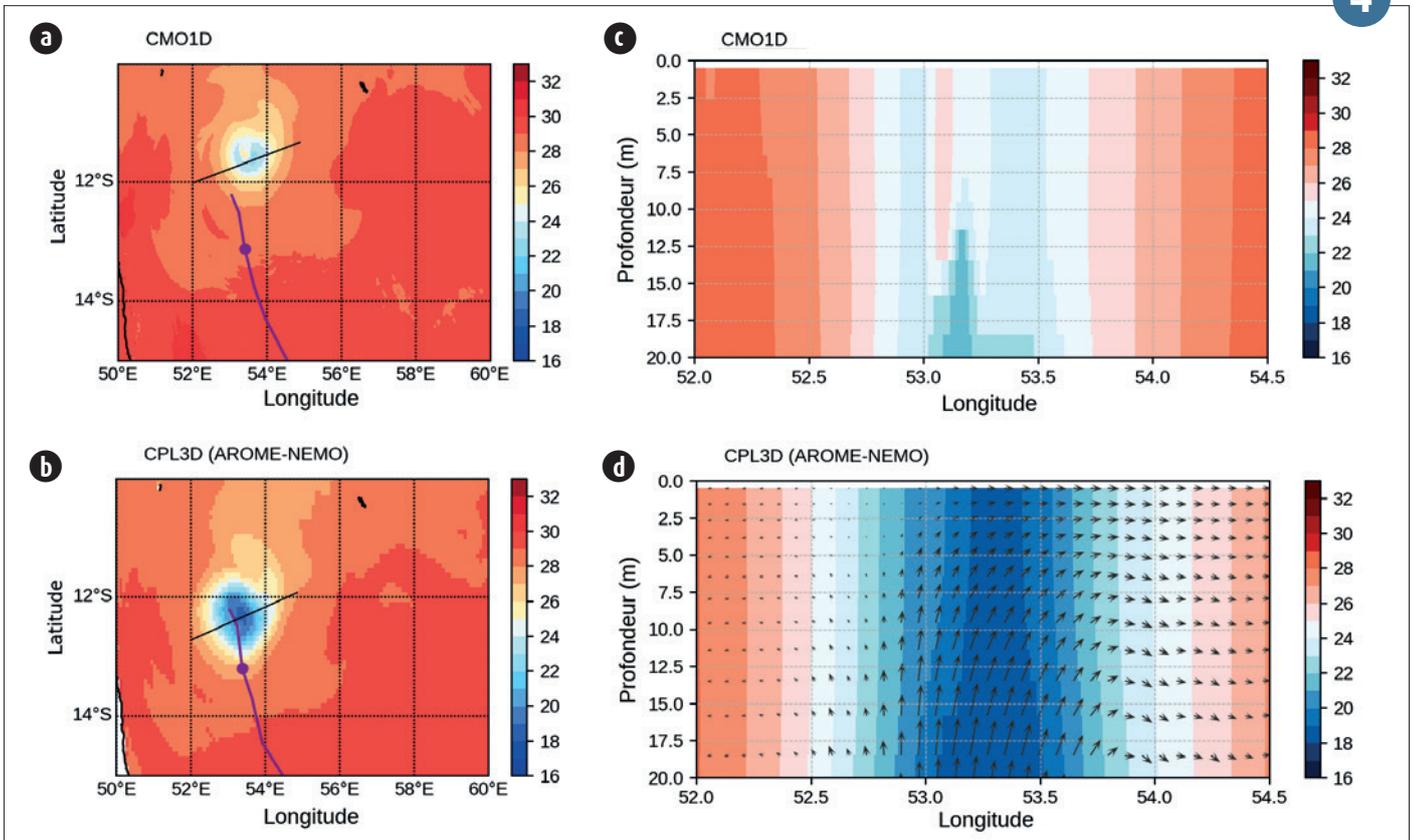
4

3



▲ Graphique de la hauteur des vagues (m) de la caméra (rouge), du modèle WW3 (vert) et de la bouée Anglet (bleu - réseau Candhis et université de Pau), à la caméra sud de Capbreton en 2018.

4



▲ SST (figures de gauche) et coupe verticale de la température océanique dans la CMO et des courants (figures de droite) après 12 heures de simulation dans le cas du cyclone Gelena (07/02/2019)
 (a)-(c) configuration opérationnelle avec la paramétrisation de la CMO 1D ;
 (b)-(d) simulation couplée AROME-NEMO ; un warm-up de l'océan de 24h est réalisé dans ce cas.

Techniques, campagnes et produits d'observation

L'activité de recherche expérimentale à Météo-France a été fortement perturbée par la pandémie. La plupart des campagnes prévues en 2020 a dû être repoussée. Celle sur le brouillard dans les Landes, démarrée en 2019 (programme SOFOG3D) a dû être interrompue légèrement avant terme. Elle a permis d'acquérir de précieuses données sur la structure 3D du brouillard grâce à un dispositif instrumental original. La campagne internationale EUREC4A à La Barbade sur les nuages d'alizée et les tourbillons océaniques a pu avoir lieu en tout début d'année. Y étaient impliqués l'ATR42 de SAFIRE, opérant très loin de ses bases, et les drones ultra-légers et légers du CNRM, les premiers volant en essaim, les seconds réalisant des vols à longue portée et basse altitude au-dessus de la mer, le tout en se coordonnant avec le trafic aérien. Les activités de développement instrumental ont été moins perturbées. Grâce à une solution technologique innovante empruntée au laboratoire GSMA, une sonde pour la mesure rapide de l'humidité sous ballon captif a pu être testée avec succès. Les flux turbulents de chaleur latente peuvent maintenant être mesurés en altitude. L'adaptation du dispositif d'observation du programme MAP-IO aux dures conditions de mer et aux faibles bandes passantes de télécommunication disponible sur le navire Marion-Dufresne a pu être validée. La préparation de Météosat Troisième Génération est en cours. Les données de la station d'observation pérenne de la météopole ont été utilisées par la DSM pour évaluer des modèles d'humectation de la végétation au profit des services rendus à l'agriculture. Enfin, l'étude de l'îlot de chaleur urbain, préoccupation des villes confrontées au réchauffement climatique, a bénéficié des observations de stations autonomes déployées en réseau à Toulouse, ainsi que des mesures de températures réalisées à bord des voitures personnelles, de plus en plus connectées. Appelées à se développer, ces techniques offrent un formidable potentiel de documentation des conditions climatiques à très fine échelle dans les villes.

Techniques et produits d'observation

Mesure et modélisation de la durée d'humectation

On trouve régulièrement de l'eau liquide à la surface de la végétation : c'est le phénomène d'humectation qui favorise les maladies fongiques et bactériennes. Sa durée est un élément déterminant des outils d'aide à la décision du monde agricole.

A partir d'expérimentations menées sur le site de Toulouse, avec l'appui du CNRM (GMEI) et de la DSO (DOS/CAPTEURS), l'équipe DSM/CS/AGRO a confirmé la grande variabilité dans les mesures d'humectation selon le capteur ou sa configuration d'installation (figure a). L'objectif final est une modélisation à partir de paramètres météo pour s'en affranchir.

Afin de réaliser cette étude, les données de durée d'humectation et météorologiques du site instrumenté METEOPOLE-FLUX disponibles depuis mi 2012 ont servi de référence pour 3 modèles :

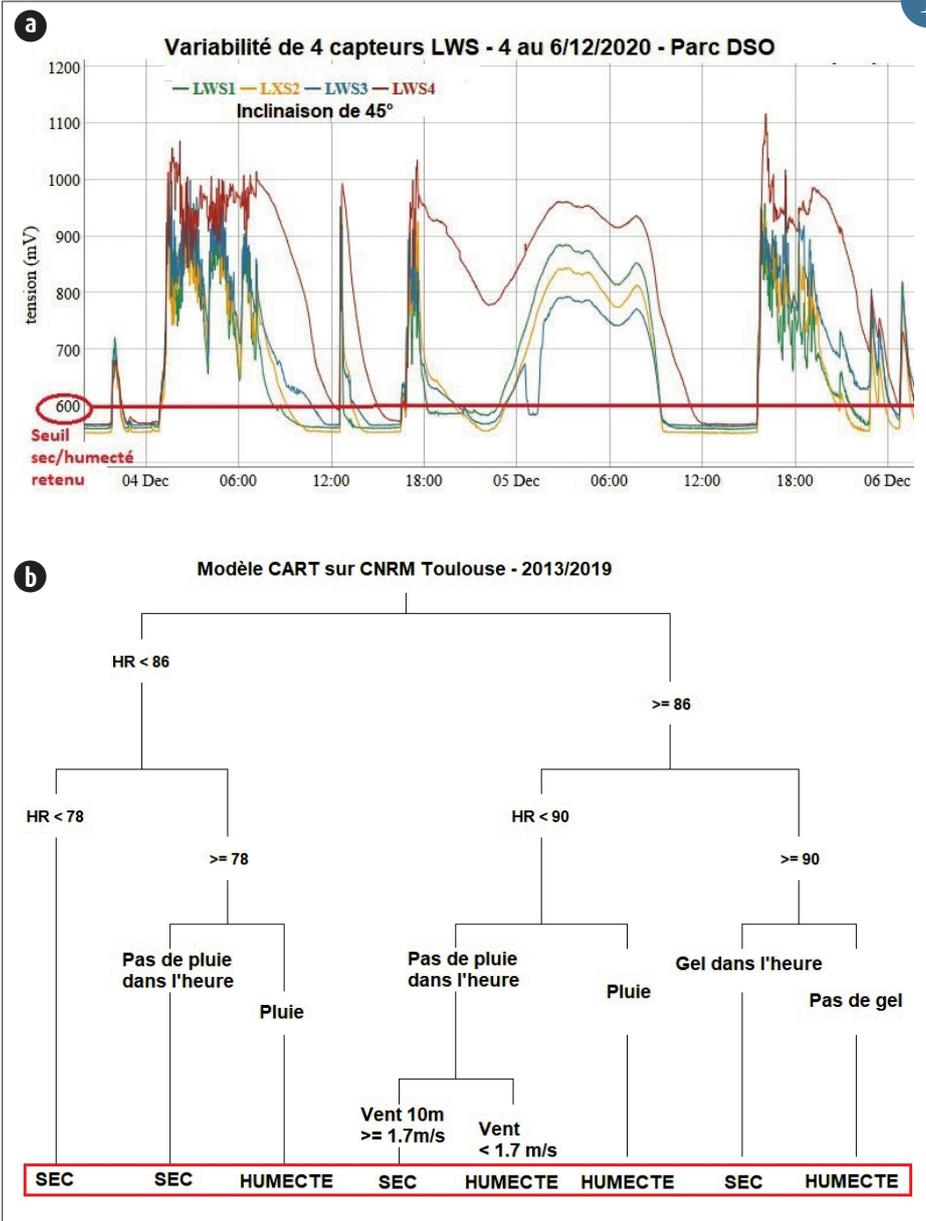
- RHT dont le meilleur ajustement statistique est obtenu pour le seuil d'humidité relative (HR) de 86 %.
- CART, basé sur un arbre de décision dont les prédicteurs les plus pertinents sont l'humidité relative, la pluie, la température et le vent (figure b).
- un modèle physique calibré considérant la feuille comme un réservoir ; il donne les moins bons résultats.

L'avantage va au modèle CART malgré une sous-estimation de la durée d'humectation. Par sa simplicité à mettre en œuvre, le RHT reste une alternative.

L'installation de capteurs sur d'autres lieux va permettre en 2021 de tester la portabilité géographique de ces résultats.

1

1



(a) Mesures comparées de 4 capteurs identiques
 (b) Arbre de décision

L'humidité à 20Hz sous ballon captif

Les processus turbulents et notamment les flux de chaleur sensible et latent sont principalement responsables des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère au sein de la couche limite atmosphérique (CLA).

C'est dans ce contexte que l'observation sur la verticale des paramètres turbulents présente un intérêt. La sonde présentée sur la figure « 1 » a été développée en 2010 afin de mesurer en altitude, d'une part les paramètres thermodynamiques à très haute fréquence (20Hz) et d'autre part le flux de chaleur sensible afin de connaître les échanges de chaleur au sein de la CLA.

Cet instrument léger, moins de 3 kilogrammes, mesure les paramètres thermodynamiques lors des profils verticaux réalisés sous ballon captif entre le sol et 800m. Ces mesures sont complémentaires aux mesures sur mât et/ou avions de recherche lors de campagne de mesure dédiée à la CLA.

Dans le but d'accroître nos connaissances sur les échanges d'humidité au sein de la couche limite, en coopération avec le laboratoire GSMA de Reims nous avons associé au capteur rapide existant un mini spectromètre avec une diode laser pesant moins d'un kilogramme afin de mesurer les fluctuations d'humidité pour calculer le flux de chaleur latente.

Pendant la campagne expérimentale du projet SOFOG3D cette sonde a été mise en œuvre afin de réaliser des tests. Depuis des corrections ont été nécessaires comme la position des miroirs par rapport à l'orientation de la sonde et du soleil. Les premiers résultats sont comparables aux mesures classiques. Ceux-ci doivent être confirmés par d'autres tests en chambre d'étalonnage.

En juillet 2021 elle sera déployée lors de la campagne LIAISE en Espagne en complément des mesures réalisées sur un mât de 50 m et celles sur avion.

Le déploiement de cette sonde représentera un fort atout dans cette campagne de mesure où la compréhension de la redistribution de l'humidité apporté par l'irrigation sur la verticale est essentielle.

2

Détection de la phase de l'eau aux sommets des nuages à partir des observations de satellites géostationnaires

L'estimation de la phase des nuages est essentielle pour la caractérisation des propriétés optiques des nuages. Actuellement, la phase des nuages est déterminée par un seuillage adaptatif opérant sur la différence de température de brillance des canaux infrarouges à 8,7 μm et 10,8 μm pour le radiomètre Seviri à bord du MSG. Le satellite MTG embarquera un radiomètre disposant d'une bande à 10,5 μm qui aura un impact négatif sur la capacité de détection de la phase des nuages.

En effet, les propriétés d'absorption de la glace et de l'eau liquide sont plus proches à 10,5 μm qu'à 10,8 μm . La bande à 10,5 μm voit ainsi sa capacité à séparer la phase de l'eau diminuée, comme le confirme les simulations présentées sur la figure. Le nuage de points à 10,8 μm (cf. figure a) possède une variabilité bien plus importante que celui à

10,5 μm (cf. figure b), et le chevauchement entre les nuages d'eau glacée et d'eau liquide est moins important pour la bande à 10,8 μm que pour la bande à 10,5 μm .

Le paramètre Beta-ratio est calculé comme le ratio des coefficients d'absorption effectif à différentes longueurs d'ondes. Les résultats de simulation de ce paramètre, sont présentés sur la figure c pour le satellite MSG et sur la figure d pour le satellite MTG. On remarque que les nuages en phase liquide et glacée sont bien mieux séparés offrant ainsi des perspectives intéressantes pour la classification de la phase au sommet des nuages.

3

Nouveaux Systèmes d'observation intra-urbains de l'îlot de chaleur

Les réseaux d'observations des services météorologiques visent en premier lieu à observer le temps à échelle synoptique et à méso-échelle. Les stations météorologiques sont ainsi en général placées hors des villes. Cependant, dans la perspective d'améliorer les modèles de prévision du temps en milieu urbain à échelle hectométrique, il convient de disposer d'observations à très haute résolution au sein des villes.

Un réseau d'environ 70 stations météorologiques a été co-construit entre le CNRM et Toulouse-Métropole, et intégré en propre dans la collectivité. L'Internet des Objets a été mobilisé afin de concevoir un réseau avec transmission des données en temps réel, ce qui permet de produire des cartes spatialisées de l'îlot de chaleur urbain. Ce réseau dense (figure a) a permis d'analyser la variabilité intra-urbaine de l'îlot de chaleur urbain. Par exemple, les zones industrielles, souvent décriées comme des zones de surchauffe par les acteurs urbains, se révèlent être en fait plus fraîches que les centres-villes et autres zones périurbaines sauf en fin d'après-midi.

D'autre part, les villes sont sources d'un grand nombre de données opportunes intéressantes pour la météorologie. Les voitures personnelles connectées sont de plus en plus présentes dans le parc automobile français. La nuit, les mesures des thermomètres embarqués sont particulièrement bonnes (moins de 1°C d'écart par rapport à des stations de référence). Ces données sont particulièrement riches pour étudier le micro-climat urbain. Une thèse a débuté sur ce sujet, et a permis de réaliser des cartographies de l'îlot de chaleur urbain sur différentes villes (figure b).

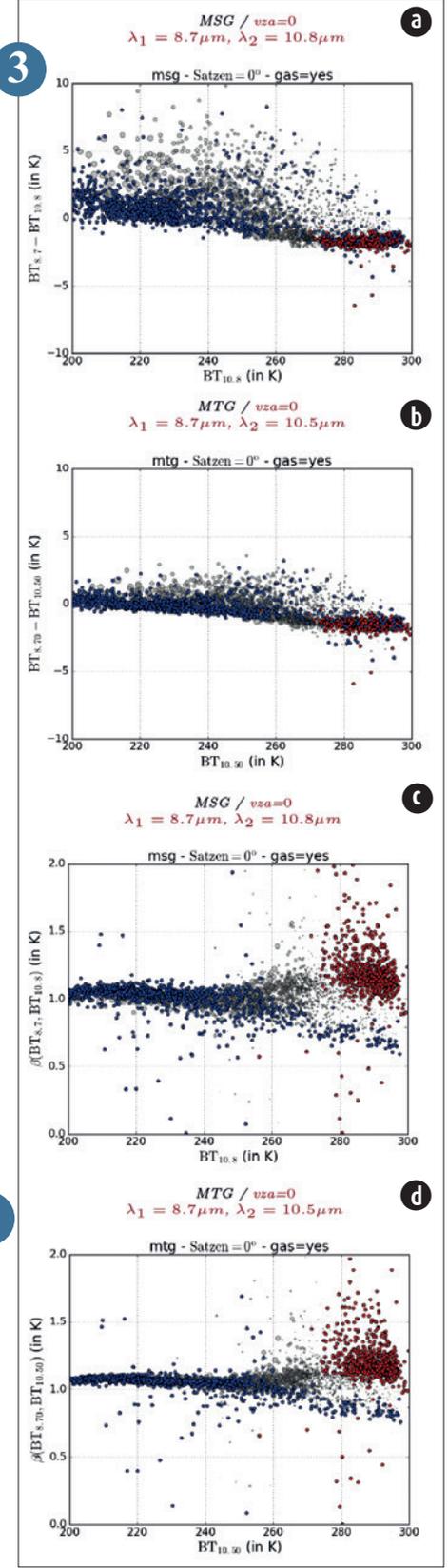
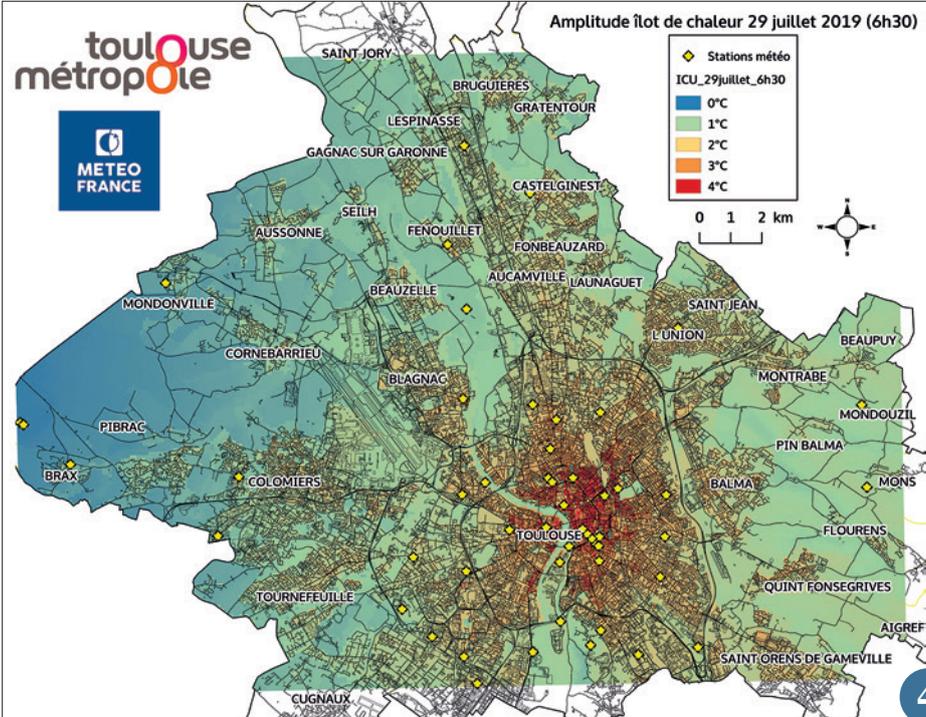
4



2

◀ Sonde de turbulence sous ballon captif lors d'un vol de test.
Le mini spectromètre qui mesure l'humidité rapide est installé sur le bras de droite de l'anémomètre sonique.

▶ Simulations des différences de température de brillance et de Beta-ratio pour des nuages d'eau liquide et d'eau glacé vue par les satellites Météosat Seconde Génération (a et c) et Météosat Troisième Génération (b et d).
Sur chaque graphique nous représentons les nuages d'eau liquide en rouge et les nuages d'eau glacée en bleu.
Les nuages mixtes sont représentés en gris.
On remarque que dans le plan (Beta-ratio - Température de Brillance) les phases et liquides et glacées sont mieux séparées que dans le plan (Différence de température de brillance - température de brillance).



▶ (a) îlot de chaleur mesuré par le réseau de stations co-construit avec Toulouse Métropole (le 29 juillet 2019, à 6h30). Source : thèse de G. Dumas.
(b) îlot de chaleur observé par véhicules personnels connectés sur l'agglomération parisienne le 03 août 2018 à 21 UTC. Source : thèse de E. Marquès.

Campagnes de mesures

La campagne internationale d'étude du brouillard du projet SOFOG3D (Southwest FOGs 3D experiment for processes study)

Bien prévoir les épisodes de brouillard est un enjeu essentiel pour en limiter les impacts sur les activités humaines, en particulier sur les transports. L'objectif principal du projet SOFOG3D, financé par Météo-France et l'ANR, est d'approfondir notre compréhension des processus mis en jeu, afin d'améliorer la prévision du brouillard. Coordonné par le CNRM, ce projet implique les laboratoires LMD et LATMOS de l'IPSL. Le Met Office, l'Université de Cologne, MeteoSwiss et des partenaires industriels étrangers ont participé à la campagne de mesure.

La campagne a été menée d'octobre 2019 à mars 2020 dans le sud-ouest de la France, avec un dispositif inédit permettant une caractérisation 3D de la couche limite atmosphérique. Trois domaines imbriqués ont été instrumentés, de l'échelle régionale jusqu'à l'échelle locale du super-site, sélectionné sur une exploitation agricole afin de contraster des zones cultivées avec des zones boisées (Figure 1). Des mesures radiatives, de flux turbulents de chaleur et d'humidité, des propriétés des aérosols et de la microphysique du brouillard et de dépôt d'eau liquide ont été réalisées sur 4 sites présentant des propriétés bien différentes afin d'explorer l'impact des hétérogénéités de surface sur le brouillard.

Deux radars nuage ont été déployés au super-site et un ballon captif embarquait une sonde de turbulence et un capteur mesurant les gouttelettes d'eau. Ce dispositif a permis pour la première fois un échantillonnage volumique de la couche de brouillard. La synergie entre radar nuage et radiomètre micro-ondes (MWR) va permettre d'améliorer la restitution des profils de température, d'humidité et de contenu en eau liquide. A l'échelle régionale, un réseau de MWR a été déployé pour évaluer l'apport de l'assimilation de ces mesures.

Durant les périodes d'observation intensive, 15 épisodes de brouillard ont été documentés avec le ballon captif, dont 7 avec des vols drones, et 180 radio-sondages ont été réalisés.

Cette base de données très riche va permettre de mener des études de processus originales, en s'appuyant sur des simulations numériques 3D à résolution métrique.

5

Etude des nuages d'alizés par drones pendant EUREC4A

En février et mars 2020, les drones du CNRM ont été déployés à La Barbade durant la campagne internationale de mesures, co-dirigée par le Max Planck Institute (Allemagne), le Laboratoire de Météorologie Dynamique (France) et le Caribbean Institute for Meteorology & Hydrology (Barbados). L'objectif de cette campagne est d'étudier les processus de formation des nuages des régions tropicales, qui constituent une source d'incertitude majeure pour les estimations du changement climatique.

Deux types de drones ont été utilisés :

- Des drones ultra-légers Skywalker X6 (2.5 kg, 1h d'autonomie) ont effectué des vols adaptatifs en essaim dans des cumulus pour effectuer des observations de son cycle de vie dans le cadre du projet NEPHELAE : 17 vols adaptatifs ont ainsi pu être réalisés avec des stratégies d'exploration autonomes en suivant le déplacement des nuages sur une dizaine de km.

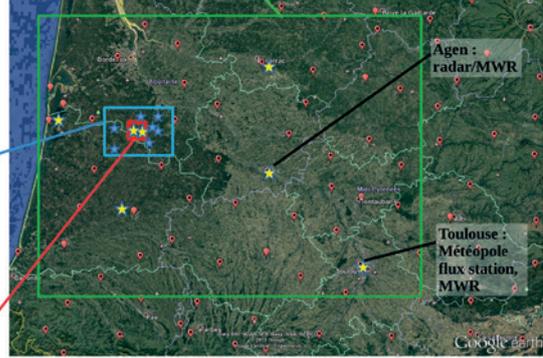
- Le drone Boréal (25 kg, 7h/700 km d'autonomie) a effectué des vols au-dessus de la mer dans «l'allée des alizés» pour caractériser les échanges océan-atmosphère. Bardé de capteurs (aérosols, turbulence, hauteur de vague, température, humidité) et équipé d'un transpondeur, ses vols ont été, pour la première fois, coordonnés avec les autres avions de recherche et les navires océanographiques, totalisant ainsi 33h de mesures et 3260 km parcourus. La participation du drone Boréal a été financé par l'ANR (S. Bony, LMD) et Météo France.

Ces dernières opérations apportent des observations météorologiques inédites pour répondre à des questions scientifiques essentielles (échanges océan-atmosphère, cycle de vie du nuage), et démontrent la complémentarité des observations par drones, dans un projet international d'envergure.

6

5

Grand domaine 300 x 200 km (correspondant au domaine du modèle de prévision AROME-500m) avec ~50 stations météorologiques du réseau opérationnel et le réseau de radiomètre micro-ondes (6 sites)

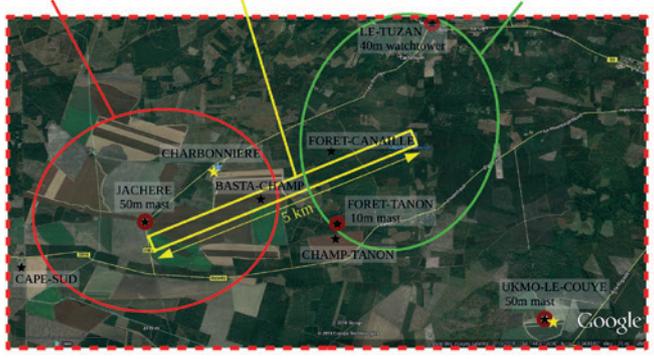


Domaine intermédiaire 30 x 50 km avec 8 stations de surface météo, avec mesure de visibilité, une tour de guet de 40m instrumentée, un mat flux de 10m et 2 télémètres)

Super-site 6 x 10 km

- zone d'opérations du ballon captif, des drones et des radiosondages,
- 2 radars nuage, 3 MWR, lidars aérosols et vent, 3 télémètres,
- container aérosols, microphysique du brouillard, 9 stations météo., mâts de 10m et 50m, et une seconde tour de guet de 40m instrumentée.

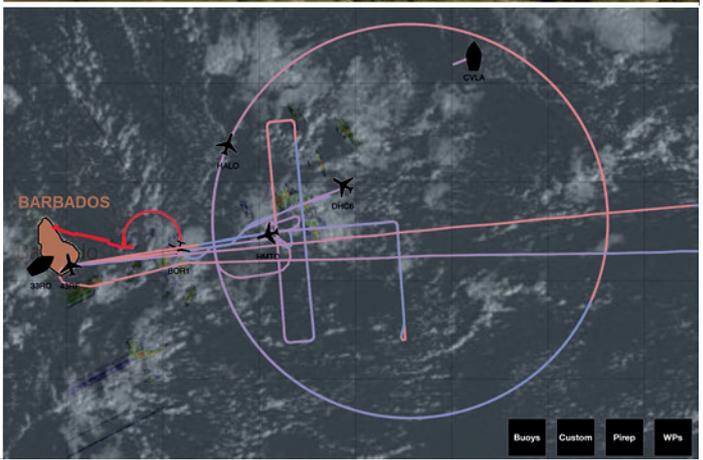
Surfaces cultivées Zone de vol des drones Forêt de pins des Landes



Stratégie expérimentale du projet SOFOG3D : les 3 domaines de mesures imbriqués dans la région Sud-Ouest et les positions des 9 sites de mesures sur le domaine du super-site.

En haut : Opérations NEPHELAE – EUREC4A avec les drones ultra-légers Skywalker X6 équipés d'un capteur de nuage, de capteurs de température et d'humidité relative (gauche). Une vue des nuages alizés lors de la campagne de mesures (droite).
En bas : Le drone Boréal équipé pour les mesures des échanges océan-atmosphère (gauche) et les trajectoires des vols coordonnés des avions de recherche pendant EUREC4A (droite).

6



EURECA, au plus près des cumulus d'alizés

L'Infrastructure de recherche aéroportée SAFIRE, commune à Météo-France, au CNRS et au Cnes a été l'un des piliers du dispositif d'observation du projet européen EURECA. Celui-ci, initié par les chercheurs du CNRS en France et du Max-Planck Institut en Allemagne, vise à mieux comprendre le fonctionnement des cumulus d'alizés et des tourbillons océaniques de moyenne échelle. Ces éléments déterminants pour le climat ont donc été explorés en détail depuis l'île de La Barbade par l'ATR42 de Météo-France exploité par SAFIRE, entre le 26 janvier et le 14 février 2020. Le dispositif expérimental du projet comportait également l'avion HALO allemand, les drones du CNRM, et des navires océanographiques français et allemands. Un navire et un avion américain, ainsi qu'un avion anglais ont rejoint le dispositif en raison de l'intérêt majeur du sujet de recherche. L'ATR42 de SAFIRE a rejoint la Caraïbe en empruntant la route des pionniers de l'Aéropostale : en cinq étapes dont 8 heures de traversée de l'Atlantique sud, du Cap Vert au Brésil, l'équipage a conduit à bon port l'avion tout spécialement préparé. C'est donc sur l'aéroport de Bridgetown que les experts de Safire ont dû appliquer une procédure très inhabituelle en remontant dans l'avion les nombreux équipements acheminés par fret aérien ou maritime pour alléger au maximum l'avion. Malgré les conditions de travail inhabituelles et difficiles pour l'équipe de SAFIRE, les données scientifiques sont bien au rendez-vous, à la satisfaction des responsables du projet.

7

SCARBO, une démonstration aéroportée d'une nouvelle technique de détection de gaz à effet de serre pour de futures missions spatiales

SAFIRE (Infrastructure de Recherche du CNRS, Météo-France et Cnes) a participé avec son Falcon 20 au temps fort du projet SCARBO, sa campagne de démonstration aéroportée. Le projet Horizon 2020 SCARBO (Space CARBon Observatory) est mis en œuvre par un consortium de 10 organisations européennes dirigé par Airbus Defence and Space. Il vise à résoudre un défi majeur de la surveillance des gaz à effet de serre (GES) anthropiques depuis l'espace : améliorer la revisite temporelle sur les différents sites d'intérêt tout en répondant aux exigences de précision et de résolution spatiale (conformément aux lignes directrices de l'UE sur la surveillance des GES anthropiques).

Les principaux objectifs de la campagne aéroportée étaient de réaliser une "preuve de concept" du capteur prototype miniaturisé NanoCarb - le faisant passer d'un concept technologique (TRL2) à une technologie validée dans un environnement pertinent (TRL5) - et de démontrer, pour la toute première fois, la correction améliorée des aérosols pour la récupération des gaz à effet de serre en utilisant des mesures réelles. Afin d'atteindre ces objectifs, deux capteurs ont été installés sur le Falcon 20 de SAFIRE :

- Le prototype aéroporté NanoCarb, co-développé par l'Université de Grenoble et l'ONERA, pour le suivi des panaches de CO₂,
- SPEXairborne (Spectro-polarimeter for Planetary EXploration), co-développé par Airbus-NL et SRON pour les mesures d'aérosols.

Grâce à la présence d'un spectromètre et d'un polarimètre multi-angle, la campagne aéroportée a été la première expérience de télédétection aérienne combinant CO₂ et aérosols. Le Falcon 20 de SAFIRE a effectué plusieurs vols ayant pour objectif de surveiller les forts émetteurs de CO₂ au-dessus de la Pologne et les zones à forte charge en aérosols (stations Aeronet) au-dessus de l'Italie et de l'Espagne. D'autres vols au-dessus de stations TCCON étaient initialement prévus pour la validation ainsi que des vols au-dessus de scènes de calibration pour soutenir les mesures NanoCarb.

En raison de la pandémie COVID-19 la campagne de démonstration originellement prévue en mai 2020 a été reportée sur un autre créneau en octobre. Les conditions de vol n'ont pas été aussi bonnes que prévu initialement et ont eu un impact la sélection des cibles de vols et sur l'exploitation des mesures. D'autres vols sont à organiser pour obtenir des mesures concluantes, et confirmer une avancée scientifique significative avec un bénéfice direct pour les futures missions spatiales de GES par satellite.

ACKNOWLEDGEMENTS

The SCARBO project has received funding from the European Union's H2020 research and innovation program under grant agreement No 769032, <http://scarbo-h2020.eu>.

8

Une architecture informatique éprouvée pour le programme MAP-10

L'ambition du LACy est de rendre pérenne le programme MAP-IO (Marion Dufresne Atmospheric Program - Indian Ocean) en faisant du navire un véritable laboratoire mobile.

L'informatique de MAP-IO a dû relever de véritables défis pour répondre aux puissantes contraintes de la rudesse des conditions marines et des limitations de la liaison réseau. Le navire subit les vibrations de ses moteurs et des tempêtes où des creux de 10m entraînent des chocs violents dont il faut protéger les instruments et les moyens informatiques. Deux serveurs en haute disponibilité sont installés au centre du navire où les mouvements sont moins brusques. Leur résistance à des accélérations de plusieurs G est garantie par le constructeur.

Les PC d'acquisition sont "durcis". Ils sont installés en salle "météo" où les contraintes mécaniques sont plus intenses et sont fixés sur une table amortissante conçue par le LACy. Comme l'humidité, la température et la

salinité de cette salle ne sont pas constantes, ces PC peuvent résister à de fortes variations de température ou d'humidité et leurs boîtiers sont en aluminium.

Toutes les connexions sont verrouillées afin d'éviter un détachement des câbles par mer forte.

La bande passante (très coûteuse) octroyée à MAP-IO par l'armateur est de 50 Mo par jour. Les concentrateurs MAP-IO analysent les données et choisissent celles devant être transmises en temps réel. Les autres sont récupérées lors des escales.

Un gros travail d'adaptation des softs d'acquisition à un fonctionnement autonome a été réalisé.

Les données sont monitorées et le système offre déjà aux PI des comptes FTP.

Ces premiers mois de fonctionnement ont permis la validation du système mis en place.

9



7

Retour de mission en fin de journée pour l'ATR42 de SAFIRE (JC Canonici)

Une partie de l'équipe SRON à bord du Falcon 20 de SAFIRE avec les instruments SPEXairborne et NanoCarb au second plan.
Crédits : SRON.



8



9



Station météo Vaisala
Antenne du GPS Alloy, protégé par de la graisse
Table amortissante de la salle météo

Recherche et aéronautique

Météo-France est fortement impliqué dans le volet météorologique du programme européen SESAR, qui vise à moderniser le système européen de gestion du trafic aérien.

Après les travaux de recherche menés en 2019 qui ont abouti à la mise à disposition opérationnelle des prévisionnistes d'un nouvel indice issu des prévisions déterministes d'ARPEGE pour diagnostiquer la turbulence subie par les avions, une étude menée en 2020 a démontré la plus-value apportée par l'utilisation des prévisions d'ensemble ARPEGE pour évaluer les risques de turbulence. Par ailleurs, d'autres travaux ont porté sur la réduction de visibilité, autre phénomène météorologique à fort enjeu pour le secteur aérien, et sa prévision en post-traitement du modèle AROME en utilisant des méthodes d'intelligence artificielle.

Dans un autre domaine, l'Infrastructure de Recherche SAFIRE, qui opère la flotte nationale des avions de recherche, a permis en 2020 d'évaluer et de qualifier le nouveau système mondial de sécurité en cas de détresse aéronautique (GADSS), démontrant ainsi l'importance de ces moyens aéroportés non seulement pour les travaux de la communauté scientifique, mais également pour les développements concernant l'amélioration de la sécurité aérienne.

HELIOS, des vols de tests pour améliorer la sécurité aérienne

Le Falcon 20 de Safire (Infrastructure de Recherche du CNRS, Météo-France et Cnes) a été utilisé en fin d'année 2020 pour démontrer et qualifier les capacités du nouveau système global du programme mondial de sécurité aérienne (GADSS).

Cette initiative européenne majeure a été réalisée avec le soutien financier de l'Agence européenne GNSS (GSA) dans le cadre du projet H2020 Helios, regroupant plusieurs partenaires industriels (Orolia, Air France, Airbus, etc.) et le Cnes. L'Agence européenne GNSS est l'agence de l'Union européenne chargée de gérer les opérations, la sécurité et la fourniture de services pour les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) européens, Galileo et EGNOS. Elle deviendra bientôt l'Agence du programme spatial de l'Union européenne (EUSPA).

Il s'agissait de la première occasion d'évaluer une mise en œuvre au niveau système du nouveau système mondial de sécurité en

cas de détresse aéronautique (GADSS), en particulier son composant de suivi autonome de la détresse (ADT). L'installation à bord du Falcon 20 d'un nouveau type de balise de détresse (Emergency Locator Transmitter Distress Tracking, ELT-DT) développé par Orolia a permis de réaliser ces tests en conditions réelles, avec le soutien des unités de service du trafic aérien espagnoles et françaises, les centres de contrôle de mission espagnols et français, les centres de coordination de sauvetage espagnols et français, ainsi que deux grands centres opérationnels de compagnies aériennes européennes.

Le Falcon 20 de Safire a ainsi suivi une trajectoire à travers l'Espagne et la France, et l'activation de la balise a été réalisée suivant un scénario bien préparé à l'avance, de manière à simuler une activation réelle d'un avion en détresse. La robustesse de la transmission de l'alerte et de la

localisation, qui implique la constellation de satellites Cospas Sarsat MEOSAR, ainsi que les performances de la réception et de la distribution au sol, ont été confirmées - même avec des attitudes extrêmes de l'avion. Ces tests ont également permis de revoir certains aspects organisationnels et de processus, en particulier l'insertion du processus de suivi de la détresse dans le processus général de gestion des alertes des aéronefs, y compris la communication entre les unités de services de la circulation aérienne, les centres de coordination des secours et les centres d'opérations des compagnies aériennes en France et en Espagne.

SAFIRE a ainsi participé à l'amélioration de la sécurité aérienne, en testant et validant les exigences du programme GADSS de localisation autonome de détresse, qui seront requis pour les nouveaux avions commerciaux construits après janvier 2023.

Utilisation de la prévision d'ensemble PEARP pour la prévision de la turbulence aéronautique

En juillet 2019, un nouveau diagnostic d'EDR pour prévoir la turbulence subie par les avions a été mis à disposition pour les prévisionnistes et les compagnies aériennes. Ce diagnostic est calculé avec le modèle global ARPEGE dans sa version déterministe. Au cours d'un stage réalisé par trois élèves ingénieurs de deuxième année de l'ENM, nous avons pu évaluer l'apport de la prévision d'ensemble d'ARPEGE pour la prévision de la turbulence en altitude.

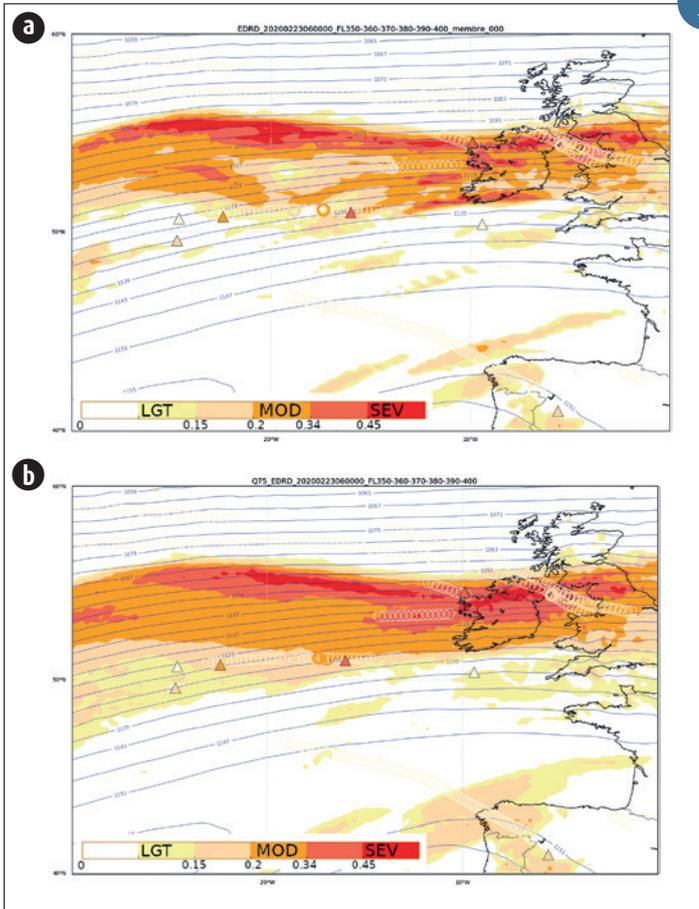
Bien que la résolution horizontale des ensembles soit plus faible que celle du modèle déterministe, de légères différences

entre les 35 membres de l'ensemble apportent une plus-value à seulement 12 h d'échéance. En utilisant 60 000 données d'EDR observé in-situ pendant le second semestre 2019 par des avions de ligne, nous avons montré que la bonne détection de turbulence modérée à sévère (1 % des cas) est augmentée de 8 % avec les ensembles par rapport au déterministe, sans dégradation du taux de fausse alarme. Comme souvent avec les événements rares, les cas de turbulence prévus avec une forte probabilité ne sont que trop rarement présents dans les observations : la fiabilité est faible.

Des études de cas ont de plus montré l'intérêt pour les prévisionnistes aéronautiques de disposer de statistiques sur les ensembles, comme par exemple des quantiles. Une information synthétique à destination des usagers a été imaginée sous forme d'une matrice de risque mettant en regard le risque et la probabilité associée.

1

1



▲ EDR prévue par le membre de contrôle de l'ensemble (a) et valeur du quantile 75 (b). Les triangles (resp. ronds en gras) représentent des reports de pilotes (resp. mesures auto EDR). Valeurs maximales prises sur le domaine vertical FL350/450. Les valeurs d'EDR prévues et observées sont indiquées avec la palette couleur. Situation du 23/02/2020 à 06 h simulée avec le run de 00 h.

Utilisation de forêts aléatoires en post-traitement du modèle AROME pour la prévision de la visibilité

La prévision des phénomènes de réduction de visibilité est un enjeu majeur pour le secteur aérien. Afin de répondre aux besoins de ce secteur et plus généralement du secteur des transports, Météo-France mène une action de recherche continue afin d'améliorer la qualité des prévisions de visibilité dans ses modèles de prévision numérique.

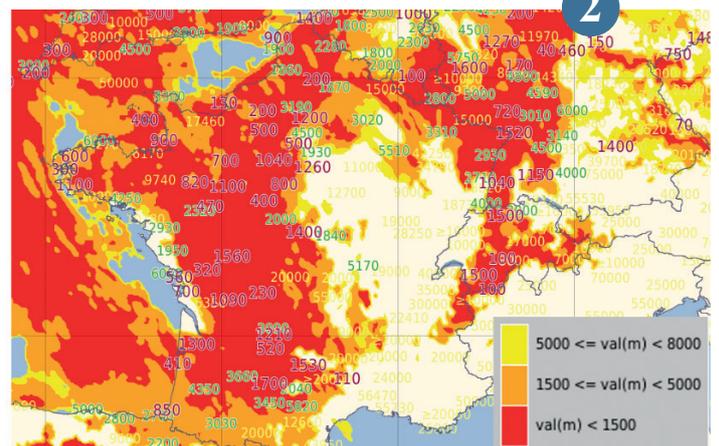
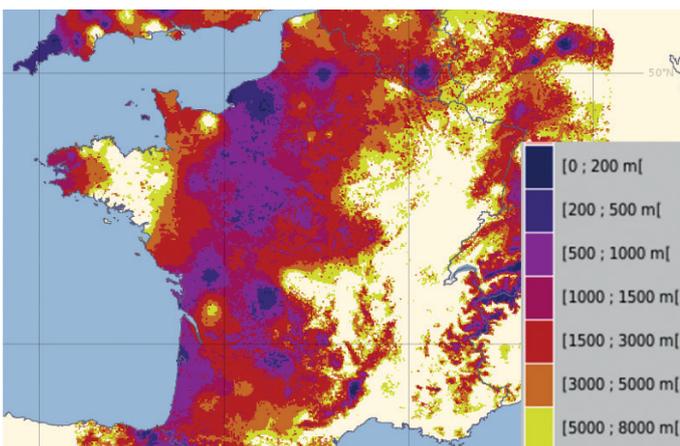
L'objectif de cette étude est de tester le potentiel des méthodes d'intelligence artificielle de type « forêts aléatoires » en post-traitement des modèles numérique, pour la prévision de la visibilité. L'apprentissage est basé sur les observations de visibilité du réseau français RADOME, et utilise plusieurs paramètres du modèle de prévision AROME comme prédicteurs. Deux approches sont comparées : une approche 2D utilisant uniquement des prédicteurs météorologiques prévus au niveau du sol, et une approche 3D utilisant des prédicteurs pris à différents niveaux verticaux de l'atmosphère.

Les scores obtenus pour l'hiver 2019-2020, pour la prévision de visibilité montrent des gains de détection d'événements de basse visibilité de +10 % pour l'approche 2D et jusqu'à +15 % pour l'approche 3D, par rapport aux diagnostics de visibilité existants à Météo-France. Les situations étudiées montrent un bon comportement du nouveau diagnostic (Figure – réduction de visibilité sur l'Europe occidentale).

Les résultats de l'étude permettent donc d'envisager une application opérationnelle. Dans cette optique, l'utilisation de l'approche 2D, de mise en œuvre rapide, est en cours de validation par les prévisionnistes. L'approche 3D nécessite des actions de recherche complémentaires pour optimiser la prise en compte de l'information sur la verticale : l'utilisation de réseaux de neurones est envisagée.

2

▼ Situation de réduction de visibilité sur l'Europe de l'Ouest le 27 janvier 2021 à 9TU. Figure de gauche – Produit de fusion de données observées CERVUS (Satellite + Radar + Observation de surface). Figure de droite – Diagnostic de visibilité par méthode d'apprentissage (approche 2D) en post-traitement du modèle AROME réseau 00TU. Valeurs numériques : Observations de visibilité des réseaux RADOME, SYNOP et SOLOMM (rouge : plage <1600 m, vert : plage [1600 – 6000 m], jaune : plage > 6000 m.



Annexes

Liste des publications scientifiques 2020 de la DESR

- Abeig, B., Morin, S., Demiroglu O., C., François, H., Rothleitner, M. and Strasser, U.: "Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism," *Int. J. Biometeorol.*, 2020.
- Adebiyi, A. A., Kok, J. F., Wang, Y., Ito, A., Ridley, D. A., Nabat, P. and Zhao, C.: "Dust Constraints from joint Observational-Modelling-experiMental analysis (DustCOMM): comparison with measurements and model simulations," *Atmos. Chem. Phys.* (20:2), 2020, pp. 829-863.
- Albergel, C., Zheng, Y., Bonan, B., Dutra, E., Rodriguez-Fernandez, N., Munier, S., Draper, C., de Rosnay, P., Muñoz-Sabater, J., Balsamo, G., Fairbairn, D., Meurey, C. and Calvet, J.-C.: "Data assimilation for continuous global assessment of severe conditions over terrestrial surfaces," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24:9), 2020, pp. 4291-4316.
- Alkama, R., Taylor, P. C., Martin, L. G.-S., Douville, H., Duveiller, G., Forzieri, G., Swingedouw, D. and Cescatti, A.: "Clouds damp the radiative impacts of polar sea ice loss," *The Cryosphere* (14:8), 2020, pp. 2673-2686.
- Allan, R. P., Barlow, M., Byrne, M. P., Cherchi, A., Douville, H., Fowler, H. J., Gan, T. Y., Pendergrass, A. G., Rosenfeld, D., Swann, A. L. S., Wilcox, L. J. and Zolina, O.: "Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change," *Ann. N.Y. Acad. Sci.* (1472:1), 2020, pp. 49-75.
- Allen, R. J., Turnock, S., Nabat, P., Neubauer, D., Lohmann, U., Olivieri, D., Oshima, N., Michou, M., Wu, T., Zhang, J., Takemura, T., Schulz, M., Tsigaridis, K., Bauer, S. E., Emmons, L., Horowitz, L., Naik, V., van Noije, T., Bergman, T., Lamarque, J.-F., Zanis, P., Tegen, I., Westervelt, D. M., Sager, P. L., Good, P., Shim, S., O'Connor, F., Akritidis, D., Georgoulias, A. K., Deushi, M., Sentman, L. T., John, J. G., Fujimori, S. and Collins, W. J.: "Climate and air quality impacts due to mitigation of non-methane near-term climate forcers," *Atmos. Chem. Phys.* (20:16), 2020, pp. 9641-9663.
- Amiri-Farhani, A., Allen, R. J., Li, K.-F., Nabat, P. and Westervelt, D. M.: "A La Niña-Like Climate Response to South African Biomass Burning Aerosol in CESM Simulations," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (125:6), 2020.
- Amraoui, L. E., Sic, B., Piacentini, A., Marécal, V., Frebourg, N. and Attié, J.-L.: "Aerosol data assimilation in the MOCAGE chemical transport model during the TRAQA/ChArMEx campaign: lidar observations," *Atmos. Meas. Tech.* (13:9), 2020, pp. 4645-4667.
- Andersen, J. K., Andreassen, L. M., Baker, E. H., Ballinger, T. J., Berner, L. T., Bernhard, G. H., Bhatt, U. S., Bjerke, J. W., Box, J. E., Britt, L., Brown, R., Burgess, D., Cappelen, J., Christiansen, H. H., Decharme, B., Derksen, C., Drozdov, D. S., Epstein, H. E., Farquharson, L. M., Farrell, S. L., Fausto, R. S., Fettweis, X., Fioletov, V. E., Forbes, B. C., Frost, G. V., Gerland, S., Goetz, S. J., Groöfs, J.-U., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Hendricks, S., Ialongo, I., Isaksen, K., Johnsen, B., Kaleschke, L., Kholodov, A. L., Kim, S.-J., Kohler, J., Labe, Z., Ladd, C., Lakkala, K., Lara, M. J., Loomis, B., Luks, B., Luoju, K., Macander, M. J., Malkova, G. V., Mankoff, K. D., Manney, G. L., Marsh, J. M., Meier, W., Moon, T. A., Mote, T., Mudryk, L., Mueter, F. J., Müller, R., Nyland, K. E., O'Neel, S., Overland, J. E., Perovich, D., Phoenix, G. K., Reynolds, M. K., Reijmer, C. H., Ricker, R., Romanovsky, V. E., Schuur, E. A. G., Sharp, M., Shiklomanov, N. I., Smeets, C. J. P. P., Smith, S. L., Streletskiy, D. A., Tedesco, M., Thoman, R. L., Thorson, J. T., Tian-Kunze, X., Timmermans, M.-L., Tømmervik, H., Tschudi, M., van As, D., van de Wal, R. S. W., Walker, D. A., Walsh, J. E., Wang, M., Webster, M., Winton, Ø., Wolken, G. J., Wood, K., Wouters, B. and Zador, S.: "The Arctic," *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (101:8), 2020, pp. S239-S286.
- Andresen, C. G., Lawrence, D. M., Wilson, C. J., McGuire, A. D., Koven, C., Schaefer, K., Jafarov, E., Peng, S., Chen, X., Gouttevin, I., Burke, E., Chadburn, S., Ji, D., Chen, G., Hayes, D. and Zhang, W.: "Soil Moisture and Hydrology Projections of the Permafrost Region: A Model Intercomparison," *The Cryosphere* (14), 2020, pp. 445-459.
- Aouade, G., L. Jarlan, J. Ezzahar, S. Er-Raki, A. Napoly, A. Benkaddour, S. Khabba, G. Boulet, S. Garrigues, A. Chehbouni, A. Boone: 2020: "Evapotranspiration partition using the multiple energy balance version of the ISBA-A-gs land surface model within the SURFEX platform v8.1 over two irrigated crops in a semi-arid Mediterranean region (Marrakech, Morocco)" *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3789-3814
- Aouf L., D. Hauser, B. Chapron, A. Toffoli, C. Tourrain, C. Peureux: "New directional wave satellite observations: Towards improved-waveforecasts and climate description in Southern Ocean", *Geophysical Research Letters*, 10.1029/2020GL091187
- Ardilouze, C., Materia, S., Batté, L., Benassi, M. and Prodhomme, C.: "Precipitation response to extreme soil moisture conditions over the Mediterranean," *Climate Dyn.*, 2020.
- Arora, V. K., Katavouta, A., Williams, R. G., Jones, C. D., Brovkin, V., Friedlingstein, P., Schwinger, J., Bopp, L., Boucher, O., Cadule, P., Chamberlain, M. A., Christian, J. R., Delire, C., Fisher, R. A., Hajima, T., Ilyina, T., Joetzjer, E., Kawamiya, M., Koven, C. D., Krasting, J. P., Law, R. M., Lawrence, D. M., Lenton, A., Lindsay, K., Pongratz, J., Raddatz, T., Séférian, R., Tachiiri, K., Tjiputra, J. F., Wiltshire, A., Wu, T. and Ziehn, T.: "Carbon concentration and carbon climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models," *Biogeosciences* (17:16), 2020, pp. 4173-4222.
- Audouin, O., Roehrig, R., Couvreur, F. and Williamson, D.: "Modeling the GABLS4 strongly-stable boundary layer with a GCM turbulence parameterization: parametric sensitivity or intrinsic limits?," *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2020.
- Auguste, F., Lac, C., Masson, V. and Cariolle, D.: "Large-Eddy Simulations with an Immersed Boundary Method: Pollutant Dispersion over Urban Terrain," *Atmosphere* (11:1), 2020, pp. 113.
- Baklanov, A., Cardenas, B., Lee, T.-c., Leroyer, S., Masson, V., Molina, L. T., Müller, T., Ren, C., Vogel, F. R. and Voogt, J. A.: "Integrated urban services: Experience from four cities on different continents," *Urban Clim.* (32), 2020, pp. 100610.
- Baray J.-L., Deguillaume L., Colomb A., Sellegrì K., Freney E. et al.: "Cézeaux-Aulnat-Opme-Puy De Dôme: a multi-site for the long-term survey of the tropospheric composition and climate change", *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13 (6), pp.3413-3445. 10.5194/amt-13-3413-2020
- Batté, L., Välisuo, I., Chevallier, M., Navarro, J. C. A., Ortega, P. and Smith, D.: "Summer predictions of Arctic sea ice edge in multi-model seasonal re-forecasts," *Climate Dyn.* (54:11-12), 2020, pp. 5013-5029.
- Bègue N., Shikwambana L., Bencherif H., Pallotta J., Sivakumar V. et al.: "Statistical analysis of the long-range transport of the 2015 Calbuco volcanic plume from ground-based and space-borne observations", *Annales Geophysicae*, 2020, 38 (2), pp.395 - 420. 10.5194/angeo-38-395-2020
- Bélaïr, S. and Boone, A. : « La représentation des surfaces continentales pour la prévision numérique du temps », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 059.
- Belke-Brea, M., Domine, F., Barrere, M., Picard, G., & Arnaud, L. (2020): "Impact of Shrubs on Winter Surface Albedo and Snow Specific Surface Area at a Low Arctic Site: In Situ Measurements and Simulations", *Journal of Climate*, 33(2), 597-609. Retrieved May 26, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/2/jcli-d-19-0318.1.xml>

- Belke-Brea, M., Domine, F., Boudreau, S., Picard, G., Barrere, M., Arnaud, L., & Paradis, M. (2020): "New Allometric Equations for Arctic Shrubs and Their Application for Calculating the Albedo of Surfaces with Snow and Protruding Branches", *Journal of Hydrometeorology*, 21(11), 2581-2594. Retrieved May 26, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/21/11/jhm-d-20-0012.1.xml>
- Bencherif H., Bègue N., Kirsch Pinheiro D., Du Preez D., Cadet J.-M. Et al.: "Investigating the Long-Range Transport of Aerosol Plumes Following the Amazon Fires (August 2019): A Multi-Instrumental Approach from Ground-Based and Satellite Observations", *Remote Sensing*, 2020, *Advances in Remote Sensing of Biomass Burning*, 12 (22), pp.3846. 10.3390/rs12223846
- Bencherif H., Tohir A., Mbatha N., Sivakumar V., Du Preez D., Bègue N., Coetzee G.: "Ozone Variability and Trend Estimates from 20-Years of Ground-Based and Satellite Observations at Irene Station, South Africa", *Atmosphere*, 2020, *Tropospheric Ozone Observations*, 11, 10.3390/atmos11111216
- Berard-Chenu, L., Cognard, J., François, H., Morin, S. and George, E.: "Do changes in snow conditions have an impact on snowmaking investments in French Alps ski resorts?," *Int. J. Biometeorol.*, 2020.
- Bergot, T., Bessemoulin, P. and Sarraz, C. : « Apport des campagnes de mesures pour la compréhension des interactions sol-végétation-atmosphère », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 046.
- Bigeard, G., Arteta, J. and Plu, M.: "Improving the Representation of Agricultural Ammonia Emissions for a Better Air Quality Forecasting Over France: A Simple Model to Estimate Fertilization Dates from Meteorological Constraints" *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2020.
- Bigeard, G., Sic, B., Amraoui, L. E. and Plu, M.: "Monitoring Volcanic ASH with the Chemistry-Transport Model Mocage: Improvements of Source Term and Assimilation of Observations" *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2020.
- Bleischmidt, A.-M., Arteta, J., Coman, A., Curier, L., Eskes, H., Foret, G., Gielen, C., Hendrick, F., Maréchal, V., Meleux, F., Parmentier, J., Peters, E., Pinardi, G., Piters, A. J. M., Plu, M., Richter, A., Segers, A., Sofiev, M., Valdebenito, A. M., Roozendaal, M. V., Vira, J., Vlemmix, T. and Burrows, J. P.: "Comparison of tropospheric NO₂ columns from MAX-DOAS retrievals and regional air quality model simulations," *Atmos. Chem. Phys.* (20:5), 2020, pp. 2795-2823.
- Blein, S., Roehrig, R., Voldoire, A. and Faure, G.: "Meso-scale contribution to airsea turbulent fluxes at GCM scale," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (146:730), 2020, pp. 2466-2495.
- Blockley, E., Vancoppenolle, M., Hunke, E., Bitz, C., Feltham, D., Lemieux, J., Losch, M., Maisonnave, E., Notz, D., Rampal, P., Tietsche, S., Tremblay, B., Turner, A., Massonnet, F., Ólason, E., Roberts, A., Aksenov, Y., Fichefet, T., Garric, G., Iovino, D., Madec, G., Rousset, C., Salas y Melia, D., & Schroeder, D. (2020): "The Future of Sea Ice Modeling: Where Do We Go from Here?," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(8), E1304-E1311.
- Boé, J., Somot, S., Corre, L. and Nabat, P.: "Large discrepancies in summer climate change over Europe as projected by global and regional climate models: causes and consequences," *Climate Dyn.*, 2020.
- Bogning, S., Frappart, F., Paris, A., Blarel, F., Niño, F., Saux Picart, S., Lanet, P., Seyler, F., Mahé, G., Onguene, R., Bricquet, J.-P., Etame, J., Paiz, M.-C. and Braun, J.-J.: "Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry," *Adv. Space Res.*, 2020.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I. and Galiez, C.: "A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps: 1967–2015," *Earth Syst. Sci. Data* (12), 2020, pp. 1973-1983.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., Galiez, C., Condom, T. and Sauquet, E.: "Deep learning applied to glacier evolution modelling," *The Cryosphere* (14), 2020, pp. 565-584.
- Bonan, B., Albergel, C., Zheng, Y., Barbu, A. L., Fairbairn, D., Munier, S. and Calvet, J.-C.: "An ensemble square root filter for the joint assimilation of surface soil moisture and leaf area index within the Land Data Assimilation System LDAS-Monde: application over the Euro-Mediterranean region," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24:1), 2020, pp. 325-347.
- Bordoais, L., Nycander, J. and Paci, A.: "Computation of Density Perturbation and Energy Flux of Internal Waves from Experimental Data," *Fluids*, 2020.
- Boucher, O., Servonnat, J., Albright, A. L., Aumont, O., Balkanski, Y., Bastrikov, V., ...Rio, C, ... & Vuichard, N.: "Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), 2020.
- Bouin, M.-N. and Brossier, C. L.: "Impact of a medicane on the oceanic surface layer from a coupled, kilometre-scale simulation," *Ocean Sci.* (16:5), 2020, pp. 1125-1142.
- Bouin, M.-N. and Lebeauupin Brossier, C.: "Surface processes in the 7 November 2014 medicane from air–sea coupled high-resolution numerical modelling," *Atmos. Chem. Phys.* (20), 2020, pp. 6861-6881.
- Bourdier a., Diels J.-C., Delage O.: "Calculation of the refractive index for plane waves propagating in ionized gas", *Results in Physics*, 2020, 18, pp.103250. 10.1016/j.rinp.2020.103250
- Bousquet O., Barbary D., Bielli S., Kébir S., Raynaud L., Malardel S., Faure G.: "An evaluation of tropical cyclone forecast in the Southwest Indian Ocean basin with AROME-Indian Ocean convection-permitting numerical weather predicting system", *Atmospheric Science Letters*, 2020, 21 (3), pp.e950. 10.1002/asl.950
- Bousquet O., Lees E., Durand J., Peltier A., Duret A., et al.: "Densification of the Ground-Based GNSS Observation Network in the Southwest Indian Ocean: Current Status, Perspectives, and Examples of Applications in Meteorology and Geodesy", *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8, pp.566105. 10.3389/feart.2020.566105
- Bouttier, F. and Marchal, H.: "Probabilistic thunderstorm forecasting by blending multiple ensembles," *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* (72:1), 2020, pp. 1-19.
- Boysen, L. R., Brovkin, V., Pongratz, J., Lawrence, D. M., Lawrence, P., Vuichard, N., Peylin, P., Liddicoat, S., Hajima, T., Zhang, Y., Rocher, M., Delire, C., Séférian, R., Arora, V. K., Nieradzki, L., Anthoni, P., Thiery, W., Laguë, M. M., Lawrence, D. and Lo, M.-H.: "Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models," *Biogeosciences* (17:22), 2020, pp. 5615-5638.
- Braud I., Chaffard V., Coussot C., Galle S., Juen P. et al.: "Building the information system of the French Critical Zone Observatories network: Theia/OZCAR-IS", *Hydrological Sciences Journal, In press*, pp.1-19. 10.1080/02626667.2020.1764568
- Brilouet, P.-E., Durand, P., Canut, G. and Fourrié, N.: "Organized Turbulence in a Cold-Air Outbreak: Evaluating a Large-Eddy Simulation with Respect to Airborne Measurements," *Boundary Layer Meteorol.* (175:1), 2020, pp. 57-91.
- Bromwich, D. H., Werner, K., Casati, B., Powers, J. G., Gorodetskaya, I. V., Massonnet, F., Vitale, V., Heinrich, V. J., Liggett, D., Arndt, S., Barja, B., Bazile, E., Carpentier, S., Carrasco, J. F., Choi, T., Choi, Y., Colwell, S. R., Cordero, R. R., Gervasi, M., Haiden, T., Hirasawa, N., Inoue, J., Jung, T., Kalesse, H., Kim, S.-J., Lazzara, M. A., Manning, K. W., Norris, K., Park, S.-J., Reid, P., Rigor, I., Rowe, P. M., Schmithüsen, H., Seifert, P., Sun, Q., Uttal, T., Zannoni, M. and Zou, X.: "The Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere (YOPP-SH)," *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (101:10), 2020, pp. E1653-E1676.
- Brumer, S. E., Garnier, V., Redelsperger, J.-L., Bouin, M.-N., Arduin, F. and Accensi, M.: "Impacts of surface gravity waves on a tidal front: A coupled model perspective," *Ocean Modell.* (154), 2020, pp. 101677.
- Brunner, L., McSweeney, C., Ballinger, A. P., Befort, D. J., Benassi, M., Booth, B., Coppola, E., de Vries, H., Harris, G., Hegerl, G. C., Knutti, R., Lenderink, G., Lowe, J., Nogherotto, R., O'Reilly, C., Qasmi, S., Ribes, A., Stocchi, P. and Undorf, S.: "Comparing Methods to Constrain Future European Climate Projections Using a Consistent Framework," *J. Climate* (33:20), 2020, pp. 8671-8692.
- Cadet J.-M., Bencherif H., Cadet N., Lamy K., Portafaix T. et al.: "Solar UV Radiation in the Tropics: Human Exposure at Reunion Island (21° S, 55° E) during Summer Outdoor Activities" *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17 (21), 10.3390/ijerph17218105
- Cadet J.-M., Portafaix T., Bencherif H., Lamy K., Brogniez C. et al.: "Inter-Comparison Campaign of Solar UVR Instruments under Clear Sky Conditions at Reunion Island (21 • S, 55 • E)", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17 (8), pp.2867. 10.3390/ijerph17082867
- Calonne, N., Richter, B., Löwe, H., Cetti, C., ter Schure, J., Herwijnen, A. V., Fierz, C., Jaggi, M. and Schneebeli, M.: "The RHOSSA campaign: multi-resolution monitoring of the seasonal evolution of the structure and mechanical stability of an alpine snowpack," *The Cryosphere* (14:6), 2020, pp. 1829-1848.
- Calvet, J.-C. and Champeaux, J.-L. : « L'apport de la télédétection spatiale à la modélisation des surfaces continentales », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 052.
- Cappelaere, B., Feurer, D., Vischel, T., Ottlé, C., Issoufou, H., Saux Picart, S., Mainassara, I., Oi, M.,

- Chazarin, J.-P., Barral, H., Coudert, B. & Demarty, J.: "Modeling land surface fluxes from uncertain rainfall: a case study in the Sahel with field-driven stochastic rainfields", *Atmosphere* 2020, 11(5), 465; <https://doi.org/10.3390/atmos11050465>
- Cattiaux, J., F. Chauvin, O. Bousquet, S. Malardel and C.-L. Tsai (2020): "Projected changes in the Southern Indian Ocean cyclone activity assessed from high-resolution experiments and CMIP5 models", *Journal of Climate*, 33 (12), 4975–4991. doi:10.1175/JCLI-D-19-0591.1
- Charles, E., Meyssignac, B. and Ribes, A.: "Observational Constraint on Greenhouse Gas and Aerosol Contributions to Global Ocean Heat Content Changes," *J. Climate* (33:24), 2020, pp. 10579-10591.
- Cimini, D., Haeffelin, M., Kotthaus, S., Löhnert, U., Martinet, P., O'Connor, E., Walden, C., Collaud-Coen, M. and Preissler, J.: "Towards the profiling of the atmospheric boundary layer at European scale—introducing the COST Action PROBE.," *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 2020.
- Cluzet, B., Revuelto, J., Lafaysse, M., Tuzet, F., Cosme, E., Picard, G., Arnaud, L. and Dumont, M.: "Towards the assimilation of satellite reflectance into semi-distributed ensemble snowpack simulations," *Cold Reg. Sci. Technol.* (170), 2020, pp. 102918.
- Coopmann, O., Guidard, V., Fourrié, N. and Josse, B.: "Use of variable ozone in a radiative transfer model for the global Météo-France 4D-Var system," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2020.
- Coopmann, O., Guidard, V., Fourrié, N., Josse, B. and Marécal, V.: "Update of Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) channel selection with correlated observation errors for numerical weather prediction (NWP)," *Atmos. Meas. Tech.* (13:5), 2020, pp. 2659-2680.
- Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo, J. M., Giorgi, F., Meijgaard, E., Kadygrov, N., Iles, C., Corre, L., Sandstad, M., Somot, S., Nabat, P., Vautard, R., Levvasseur, G., Schwingshackl, C., Sillmann, J., Kjellström, E., Nikulin, G., Aalbers, E., Lenderink, G., Christensen, O. B., Boberg, F., Sørland, S. L., Demory, M.-E., Bülow, K., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K. and Wulfmeyer, V.: "Assessment of the European climate projections as simulated by the large EURO-CORDEX regional and global climate model ensemble," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020.
- Coppola, E., Sobolowski, S., Pichelli, E., Raffaele, F., Ahrens, B., Anders, I., Ban, N., Bastin, S., Belda, M., Belusic, D., Caldas-Alvarez, A., Cardoso, R. M., Davolio, S., Dobler, A., Fernandez, J., Fita, L., Fumiere, Q., Giorgi, F., Goergen, K., Güttler, I., Halenka, T., Heinzeller, D., Hodnebrog, Ø., Jacob, D., Kartsios, S., Katragkou, E., Kendon, E., Khodayar, S., Kunstmann, H., Knist, S., Lavngullon, A., Lind, P., Lorenz, T., Maraun, D., Marelle, L., van Meijgaard, E., Milovac, J., Myhre, G., Panitz, H.-J., Piazza, M., Raffa, M., Raub, T., Rockel, B., Schär, C., Sieck, K., Soares, P. M. M., Somot, S., Srncac, L., Stocchi, P., Tölle, M. H., Truhetz, H., Vautard, R., de Vries, H. and Warrach-Sagi, K.: "A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean," *Climate Dyn.*, 2020.
- Coursol, L., Libois, Q., Gauthier, P. and Blanchet, J.-P.: "Optimal Configuration of a Far-Infrared Radiometer to Study the Arctic Winter Atmosphere," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (125:14), 2020.
- Couvreux, F., Bazile, E., Rodier, Q., Maronga, B., Matheou, G., Chinita, M. J., Edwards, J., van Stratum, B. J. H., van Heerwaarden, C. C., Huang, J., Moene, A. F., Cheng, A., Fuka, V., Basu, S., Bou-Zeid, E., Canut, G. and Vignon, E.: "Intercomparison of Large-Eddy Simulations of the Antarctic Boundary Layer for Very Stable Stratification," *Boundary Layer Meteorol.* (176:3), 2020, pp. 369-400.
- Couvreux, F., Hourdin, F., Williamson, D., Roehrig, R., Volodina, V., Villefranque, N., Rio, C., Audouin, O., Salter, J., Bazile, E., Briant, F., Favot, F., Honnert, R., Lefebvre, M.-P., Madeleine, J.-B., Rodier, Q. and Xu, W.: "Process-based climate model development harnessing machine learning: I. a calibration tool for parameterization improvement," *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2020.
- Cussac, M., Marécal, V., Thouret, V., Josse, B. and Sauvage, B.: "The impact of biomass burning on upper tropospheric carbon monoxide: a study using MOCAGE global model and IAGOS airborne data," *Atmos. Chem. Phys.* (20:15), 2020, pp. 9393-9417.
- Cuxart, J. and A. Boone, 2020: "Evapotranspiration over land from a Boundary-Layer Meteorology perspective." *Boundary-Layer Meteorology*, doi:10.1007/s10546-020-00550-9
- de Rosnay, P., Muñoz-Sabater, J., Albergel, C., Isaksen, I., English, S., Drusch, M. and Wigneron, J.-P.: "SMOS brightness temperature forward modelling and long term monitoring at ECMWF," *Remote Sens. Environ.* (237), 2020, pp. 111424.
- Decharme, B., Delire, C. and Boone, A. : « La représentation des surfaces continentales dans la modélisation du climat à Météo-France », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 067.
- Delire, C., Séférian R., Decharme B., Alkama R., Calvet J.-C., Carrer D., Gibelin A.-L., Joetzer E., Morel X., Rocher M., Tzanos D.: "The global land carbon cycle simulated with ISBA-CTRIP : improvements over the last decade", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, <https://doi.org/10.1029/2019MS001886>, 2020.
- Denjean, C., Bourriane, T., Burnet, F., Mallet, M., Maury, N., Colomb, A., Dominutti, P., Brito, J., Dupuy, R., Sellegri, K., Schwarzenboeck, A., Flamant, C. and Knippertz, P.: "Overview of aerosol optical properties over southern West Africa from DACCWA aircraft measurements," *Atmos. Chem. Phys.* (20:8), 2020, pp. 4735-4756.
- Denjean, C., Brito, J., Libois, Q., Mallet, M., Bourriane, T., Burnet, F., Dupuy, R., Flamant, C. and Knippertz, P.: "Unexpected Biomass Burning Aerosol Absorption Enhancement Explained by Black Carbon Mixing State," *Geophys. Res. Lett.* (47:19), 2020.
- Derkani, M. H., A. Alberello, F. Nelli, L. G. Bennetts, K. G. Hessner, K. MacHutchon, K. Reichert, L. Aouf, S. S. Khan, and A. Toffoli: "Wind, waves, and surface currents in the Southern Ocean: Observations from the Antarctic Circumnavigation Expedition." *Earth System Science Data*, 2020, <https://doi.org/10.5194/essd-2020-255>.
- Deschamps-Berger, C., Gascoïn, S., Berthier, E., Deems, J., Gutmann, E., Dehecq, A., Shean, D. and Dumont, M.: "Snow depth mapping from stereo satellite imagery in mountainous terrain: evaluation using airborne laser-scanning data," *The Cryosphere* (14:9), 2020, pp. 2925-2940.
- Destouches, M., Montmerle, T., Michel, Y. and Ménétrier, B.: "Estimating optimal localization for sampled background-error covariances of hydrometeor variables," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (147:734), 2020, pp. 74-93.
- Di Girolamo P., de Rosa B., Flamant C., Summa D., Bousquet O., Chazette P., Totems J., Cacciani M.: "Water vapor mixing ratio and temperature inter-comparison results in the framework of the Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment-Special Observation Period 1", *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 2020, 1, pp.113-153. 10.1007/s42865-020-00008-3
- Di Girolamo, Paolo, and Marie-Noelle Bouin: "Characterization of Complex Water Vapour Field Structures and their Genesis Based on the Combined use of Raman Lidar Measurements and MESO-NH Model Simulations." *EPJ Web of Conferences*. Vol. 237. *EDP Sciences*, 2020.
- Douville, H., Decharme, B., Delire, C., Colin, J., Joetzer, E., Roehrig, R., Saint-Martin, D., Oudar, T., Stchepounoff, R. and Voldoire, A.: "Drivers of the enhanced decline of land near-surface relative humidity to abrupt 4xCO₂ in CNRM-CM6-1," *Climate Dyn.*, 2020.
- Du Preez D. J., Bencherif H., Bègue N., Clarisse L., Hoffman R. et al.: "Investigating the Large-Scale Transport of a Volcanic Plume and the Impact on a Secondary Site", *Atmosphere*, 2020, 11 (5), pp.548. 10.3390/atmos11050548
- Du Preez D., Parisi A., Millar D., Bencherif H., Wright C.: "Comparison of GOME-2 UVA Satellite Data to Ground-Based UVA Measurements in South Africa", *Photochemistry and Photobiology*, 2020, 10.1111/php.13308
- Duongé, L., Lac, C., Vié, B., Bergot, T. and Price, J. D.: "Fog in heterogeneous environments: the relative importance of local and non-local processes on radiative-advective fog formation," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (146:731), 2020, pp. 2522-2546.
- Duflot, V., Tulet, P., Flores, O., Barthe, C., Colomb, A., Deguillaume, L., Vaitilingom, M., Perring, A., Huffman, A., Hernandez, M. T., Sellegri, K., Robinson, E., O'Connor D., J., Gomez, O. M., Burnet, F., Bourriane, T., Strasberg, D., Rocco, M., Bertram, A. K., Chazette, P., Totems, J., Fournel, J., Stamenoff, P., Metzger, J.-M., Chabasset, M., Rousseau, C., Bourriane, E., Sancelme, M., Delort, A.-M., Wegener, R. E., Chou, C. and Elizondo, P.: "Preliminary results from the FARCE 2015 campaign: multidisciplinary study of the forest-gas-aerosol-cloud system on the tropical island of La Réunion," *Atmos. Chem. Phys.*, 2020.
- Dumont, M., Tuzet, F., Gascoïn, S., Picard, G., Kutuzov, S., Lafaysse, M., Cluzet, B., Nheili, R. and Painter, T. H.: "Accelerated snow melt in the Russian Caucasus mountains after the Saharan dust outbreak in March 2018," *J. Geophys. Res. Earth Surf.* (125), 2020.
- Emery, C. M., A. Paris, S. Biancamaria, A. Boone, S. Calmant, P.-A. Garambois, J. Santos de Silva and C. David, 2020: "Discharge estimation via assimilation of multi-satellite-based discharge

- products: case study over the Amazon basin." *IEEE Geosci. and Remote Sens. Letters*, doi: 10.1109/LGRS.2020.3020285
- Emery, C. M., Biancamaria, S., Boone, A., Ricci, S., Rochoux, M. C., Pedinotti, V. and David, C. H.: "Assimilation of wide-swath altimetry water elevation anomalies to correct large-scale river routing model parameters," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24:5), 2020, pp. 2207-2233.
- Erdmann, F., Defer, E., Caumont, O., Blakeslee, R. J., Pédeboy, S. and Coquillat, S.: "Concurrent satellite and ground-based lightning observations from the Optical Lightning Imaging Sensor (ISS-LIS), the low-frequency network Meteorage and the SAETTA Lightning Mapping Array (LMA) in the northwestern Mediterranean region," *Atmos. Meas. Tech.* (13:2), 2020, pp. 853-875.
- Essery, R., H. Kim, L. Wang, P. Bartlett, A. Boone, C. Brutel-Vuilmet, E. Burke, M. Cuntz, B. Decharme, E. Dutra, X. Fang, C. Fierz, Y. Gusev, S. Hagemann, V. Haverd, A. Kontu, G. Krinner, M. Lafaysse, Y. Lejeune, T. Marke, D. Marks, C. Marty, C. Ménard, O. Nasonova, T. Nitta, J. Pomeroy, G. Schadler, V. Semenov, T. Smirnova, S. Swenson, D. Turkov, N. Wever and H. Yuan, 2020: "Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models." *The Cryosphere*, 14, 4687-4698. doi:10.5194/tc-14-4687-2020
- Evan S., Brioude J., Rosenlof K., Davis S., Vömel H. et al.: "Effect of deep convection on the tropical tropopause layer composition over the southwest Indian Ocean during austral summer", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20 (17), pp.10565-10586. 10.5194/acp-20-10565-2020
- Faure, G., Chambon, P. and Brousseau, P.: "Operational Implementation of the AROME Model in the Tropics: Multiscale Validation of Rainfall Forecasts," *Weather Forecasting* (35:2), 2020, pp. 691-710.
- Fiolleau, T., Roca, R., Cloche, S., Bouniol, D. and Raberanto, P.: "Homogenization of Geostationary Infrared Imager Channels for Cold Cloud Studies Using Megha-Tropiques/ScARaB," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (58:9), 2020, pp. 6609-6622.
- Fitzpatrick, R. G. J., Parker, D. J., Marsham, J. H., Rowell, D. P., Guichard, F. M., Taylor, C. M., Cook, K. H., Vizy, E. K., Jackson, L. S., Finney, D., Crook, J., Stratton, R. and Tucker, S.: "What Drives the Intensification of Mesoscale Convective Systems over the West African Sahel under Climate Change?," *J. Climate* (33:8), 2020, pp. 3151-3172.
- Fontaine, E., Schwarzenboeck, A., Leroy, D., Delanoë, J., Protat, A., Dezitter, F., Strapp, J. W. and Lilie, L. E.: "Statistical analysis of ice microphysical properties in tropical mesoscale convective systems derived from cloud radar and in situ microphysical observations," *Atmos. Chem. Phys.* (20:6), 2020, pp. 3503-3553.
- Foucras, M., Zribi, M., Albergel, C., Baghdadi, N., Calvet, J.-C. and Pellarin, T.: "Estimating 500-m Resolution Soil Moisture Using Sentinel-1 and Optical Data Synergy," *Water* (12:3), 2020, pp. 866.
- Fourteau, K., Domine, F., & Hagenmuller, P. (2020): "Macroscopic water vapor diffusion is not enhanced in snow", *The Cryosphere*. In press. <https://doi.org/10.5194/tc-2020-183>, 2020.
- Francon, L., Corona, C., Till-Bottraud, I., Choler, P., Carlson, B. Z., Charrier, G., Améglie, T., Morin, S., Eckert, N., Roussel, E., Lopez-Saez, J. and Stoffel, M.: "Assessing the effects of earlier snow melt-out on alpine shrub growth: The sooner the better?," *Ecol. Indic.* (115), 2020.
- Fréville, H., Chami, M. and Mallet, M.: "Analysis of the Transport of Aerosols over the North Tropical Atlantic Ocean Using Time Series of POLDER/PARASOL Satellite Data," *Remote Sensing* (12:5), 2020, pp. 757.
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quééré, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H. C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P. M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gressor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R. A., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozzi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Smith, A. J. P., Sutton, A. J., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, X., and Zaehle, S.: "Global Carbon Budget 2020", *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2020-286>, in press, 2020.
- Fumière, Q., Déqué, M., Nuissier, O., Somot, S., Alias, A., Caillaud, C., Laurantin, O. and Seity, Y.: "Extreme rainfall in Mediterranean France during the fall: added value of the CNRM-AROME Convection-Permitting Regional Climate Model," *Climate Dyn.* (55:1-2), 2020, pp. 77-91.
- Gainusa-Bogdan, A., D. Swingedouw, P. Yiou, J. Cattiaux, F. Codron and S. Michel (2020): "AMOC and summer sea ice as key drivers of the spread in Mid-Holocene winter temperature patterns over Europe in PMIP3 models", *Global and Planetary Change*, 184, 103055. doi :10.1016/j.gloplacha.2019.103055
- Gardes, T., Schoetter, R., Hidalgo, J., Long, N., Marques, E. and Masson, V.: "Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities," *Science of The Total Environment* (737), 2020, pp. 139253.
- Garratt, J., Wilczak, J., Holtslag, A., Schmid, H., Grachev, A., Beljaars, A., Foken, T., Fairall, C., Hicks, B., Kusaka, H., Martilli, A., Masson, V., Mauder, M., Oncley, S., Rotach, M. and Tjernström, M.: "Commentaries on Top-Cited Boundary-Layer Meteorology Articles," *Boundary Layer Meteorol.* (177), 2020, pp. 169-188.
- Gascoïn, S., Barrou Dumont, Z., Deschamps-Berger, C., Marti, F., Salgues, G., López-Moreno, J. I., Revuelto, J., Michon, T., Schattan, P. and Hagolle, O.: "Estimating Fractional Snow Cover in Open Terrain from Sentinel-2 Using the Normalized Difference Snow Index," *Remote Sensing* (12), 2020, pp. 2904.
- Gehlen, M., Berthet, S., Séférian, R., Ethé, C. and Penduff, T.: "Quantification of Chaotic Intrinsic Variability of Sea-Air CO₂ Fluxes at Interannual Timescales," *Geophys. Res. Lett.* (47:22), 2020.
- Gerbaux, M., Spandre, P., François, H., George, E. and Morin, S.: « Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures », *Journal of Alpine Research* (Revue de géographie Alpine) (108-4), 2020.
- Giese, A., A. Boone, P. Wagon and R. Howley, 2020: "Incorporating moisture content in surface energy balance modeling of a debris-covered glacier". *The Cryosphere*, 14, 1555-1577.
- Giordani, H., Bourdallé-Badie, R. and Madec, G.: "An Eddy-Diffusivity Mass-Flux Parameterization for Modelling Oceanic Convection," *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2020.
- Good, P., Chadwick, R., Holloway, C. E., Kennedy, J., Lowe, J. A., Roehrig, R. and Rushley, S. S.: "High sensitivity of tropical precipitation to local sea surface temperature," *Nature* (589:7842), 2020, pp. 408-414.
- Gouhier, M., Deslandes, M., Guéhenneux, Y., Hereil, P., Cacault, P. and Josse, B.: "Operational Response to Volcanic Ash Risks Using HOTVOLC Satellite-Based System and MOCAGE-Accident Model at the Toulouse VAAC," *Atmosphere* (11:8), 2020, pp. 864.
- Granero-Belinchon, C., Adeline, K., Lemonsu, A. and Briottet, X.: "Phenological Dynamics Characterization of Alignment Trees with Sentinel-2 Imagery: A Vegetation Indices Time Series Reconstruction Methodology Adapted to Urban Areas," *Remote Sensing* (12:4), 2020, pp. 639.
- Grimmond, S., Bouchet, V., Molina, L. T., Baklanov, A., Tan, J., Schlünzen, K. H., Mills, G., Golding, B., Masson, V., Ren, C., Voogt, J., Miao, S., Lean, H., Heusinkveld, B., Hovespyan, A., Teruggi, G., Parrish, P. and Joe, P.: "Integrated urban hydrometeorological, climate and environmental services: Concept, methodology and key messages," *Urban Clim.* (33), 2020, pp. 100623.
- Gruber, A., Lannoy, G. D., Albergel, C., Al-Yaari, A., Brocca, L., Calvet, J.-C., Colliander, A., Cosh, M., Crow, W., Dorigo, W., Draper, C., Hirschi, M., Kerr, Y., Konings, A., Lahoz, W., McColl, K., Montzka, C., Muñoz-Sabater, J., Peng, J., Reichle, R., Richaume, P., Rüdiger, C., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wigneron, J.-P. and Wagner, W.: "Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors?," *Remote Sens. Environ.* (244), 2020, pp. 111806.
- Guieu, C., D'Ortenzio, F., Dulac, F., Taillandier, V., Doglioli, A., Petrenko, A., Barrillon, S., Mallet, M., Nabat, P. and Desboeufs, K.: "Introduction: Process studies at the airsea interface after atmospheric deposition in the Mediterranean Sea objectives and strategy of the PEACETIME oceanographic campaign (May/June 2017)," *Biogeosciences* (17:22), 2020, pp. 5563-5585.
- Gutiérrez, C., Somot, S., Nabat, P., Mallet, M., Corre, L., van Meijgaard, E., Perpiñan, O. and A. Gaertner, M.: "Future evolution of surface solar radiation and photovoltaic potential in Europe: investigating the role of aerosols," *Environ. Res. Lett.* (15:3), 2020, pp. 034035.

- Habets, F., Etchevers, P. and Le Moigne, P. : « La représentation des surfaces continentales pour la prévision hydrologique », *La Météorologie* (108), 2020, pp. 088.
- Hamidi, Y., Raynaud, L., Rottner, L. and Arbogast, P.: "Texture-based classification of high-resolution precipitation forecasts with machine-learning methods," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (146:732), 2020, pp. 3014-3028.
- Hanzer, F., Carmagnola, C., Ebner, P. P., Koch, F., Monti, F., Bavay, M., Bernhard, M., Lafaysse, M., Lehning, M., Strasser, U., François, H. and Morin, S.: "Simulation of snow management in Alpine ski resorts using three different snow models," *Cold Reg. Sci. Technol.* (172), 2020.
- Hauck, J., Zeising, M., Le Quéré, C., Gruber, N., Bakker, D. C. E., Bopp, L., Chau, T. T. T., Gürses, Ö., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Resplandy, L., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R.: "Consistency and challenges in the ocean carbon sink estimate for the Global Carbon Budget". *Front. Mar. Sci.*, 7, 852. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2020.571720>, 2020.
- Hauser D., C. Tourain, L. Hermozo, D. Alraddawi, L. Aouf, B. Chapron, A. Dalphiné, et al.: "Radar observation of surface oceanwaves and windfromspace: first results from the SWIM instrument on-board CFOSAT", *IEEE Transaction on Geoscience and RemoteSensing*, 10.1109/TGRS.2020.2994372, 2020
- Hauser, D., C. Tourain, L. Hermozo, D. Alraddawi, L. Aouf, B. Chapron, A. Dalphiné, L. Delaye, M. Dalila, E. Dormy, F. Gouillon, V. Gressani, A. Grouazel, G. Guitton, R. Husson, A. Mironov, A. Mouche, A. Ollivier, L. Oruba, F. Piras, R. Rodriguez Suquet, P. Schippers, C. Tison, Ngan Tran: "New Observations From the SWIM Radar On-Board CFOSAT: Instrument Validation and Ocean Wave Measurement Assessment", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 10.1109/tgrs.2020.2994372.
- Hdidou, F. Z., Mordane, S., Moll, P., Mahfouf, J.-F., Erraji, H. and Dahmane, Z.: "Impact of the variational assimilation of ground-based GNSS zenith total delay into AROME-Morocco model," *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* (72:1), 2020, pp. 1-13.
- Héron D., Evan S., Brioude J., Rosenlof K., Posny F., Metzger J.-M., Cammas J.-P.: "Impact of convection on the upper-tropospheric composition (water vapor and ozone) over a subtropical site (Réunion island; 21.1°S, 55.5°E) in the Indian Ocean", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20 (14), pp.8611-8626. 10.5194/acp-20-8611-2020
- Hirtl, M., Arnold, D., Baro, R., Brenot, H., Coltelli, M., Eschbacher, K., Hard-Stremayer, H., Lipok, F., Maurer, C., Meinhard, D., Mona, L., Mulder, M. D., Papagiannopoulos, N., Pernsteiner, M., Plu, M., Robertson, L., Rokitsky, C.-H., Scherllin-Pirscher, B., Sievers, K., Sofiev, M., de Cerff, W. S., Steinheimer, M., Stuefer, M., Theys, N., Uppstu, A., Wagenaar, S., Winkler, R., Wotawa, G., Zobl, F. and Zopp, R.: "A volcanic-hazard demonstration exercise to assess and mitigate the impacts of volcanic ash clouds on civil and military aviation," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (20:6), 2020, pp. 1719-1739.
- Honnert, R., Efstathiou, G. A., Beare, R. J., Ito, J., Lock, A., Neggers, R., Plant, R. S., Shin, H. H., Tomassini, L. and Zhou, B.: "The Atmospheric Boundary Layer and the Gray Zone of Turbulence: A Critical Review," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (125:13), 2020.
- Hourdin, F., Rio, C., Grandpeix, J.Y., Madeleine, J.B., Cheruy, F., Rochetin, N., Jam, A., Musat, I., Idelkadi, A., Fairhead, L. and Foujols, M.A.: "LMDZ6A: The atmospheric component of the IPSL climate model with improved and better tuned physics" *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), 2020
- Hourdin, F., Rio, C., Jam, A., Traore, A.-K. and Musat, I.: "Convective Boundary Layer Control of the Sea Surface Temperature in the Tropics," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:6), 2020.
- Hourdin, F., Williamson, D., Rio, C., Couvreur, F., Roehrig, R., Villefranche, N., Musat, I., Fairhead, L., Diallo, F. B. and Volodina, V.: "Process-based climate model development harnessing machine learning: II: model calibration from single column to global," *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2020.
- Ilyina, T., H. Li, A. Spring, W. A. Muller, L. Bopp, M. O. Chikamoto, G. Danabasoglu, M. Dobrynin, J. Dunne, F. Fransner, P. Friedlingstein, W. Lee, N. S. Lovenduski, W.J. Merryeld, J. Mignot, J.Y. Park, Séférian, R., R. Sospedra-Alfonso, M. Watanabe, S.: "Yeager: Predictable variations of the carbon sinks and atmospheric CO₂ growth in a multi-model framework". *Geophysical Research Letters*, 47, <https://doi.org/10.1029/2020GL090695>, 2020.
- Ito, A., Hajima, T., Lawrence, D. M., Brovkin, V., Delire, C., Guenet, B., Jones, C. D., Malyshev, S., Matera, S., McDermid, S. P., Peano, D., Pongratz, J., Robertson, E., Shevliakova, E., Vuichard, N., Wärlind, D., Wiltshire, A. and Ziehn, T.: "Soil carbon sequestration simulated in CMIP6-LUMIP models: implications for climatic mitigation," *Environ. Res. Lett.* (15:12), 2020, pp. 124061.
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M., Benestad, R., Boberg, F., Buonomo, E., Cardoso, R. M., Casanueva, A., Christensen, O. B., Christensen, J. H., Coppola, E., Cruz, L. D., Davin, E. L., Dobler, A., Domnguez, M., Fealy, R., Fernandez, J., Gaertner, M. A., Garcia-Dez, M., Giorgi, F., Gobiet, A., Goergen, K., Gomez-Navarro, J. J., Aleman, J. J. G., Gutiérrez, C., Gutiérrez, J. M., Güttler, I., Haensler, A., Halenka, T., Jerez, S., Jiménez-Guerrero, P., Jones, R. G., Keuler, K., Kjellström, E., Knist, S., Kotlarski, S., Maraun, D., van Meijgaard, E., Mercogliano, P., Montavez, J. P., Navarra, A., Nikulin, G., de Noblet-Ducoudré, N., Panitz, H.-J., Pfeifer, S., Piazza, M., Pichelli, E., Pietikäinen, J.-P., Prein, A. F., Preuschmann, S., Rechid, D., Rockel, B., Romera, R., Sanchez, E., Sieck, K., Soares, P. M. M., Somot, S., Srnec, L., Sørland, S. L., Termonia, P., Truhetz, H., Vautard, R., Warrach-Sagi, K. and Wulfmeyer, V.: "Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community," *Reg. Environ. Change* (20:2), 2020.
- Jafari, M., Gouttevin, I., Couttet, M., Wever, N., Michel, A., Sharma, V., Rossman, L., Maass, N., Nicolaus, M. and Lehning, M.: "The Impact of Diffusive Water Vapor Transport on Snow Profiles in Deep and Shallow Snow Covers and on Sea Ice," *Front. Earth Sci.* (8), 2020, pp. 249.
- Jenny, J.-P., Anneville, O., Arnaud, F. and et al.: "Scientists' Warning to Humanity: Rapid degradation of the world's large lakes," *J. Great Lakes Res.* (46:4), 2020, pp. 686-702.
- Joly, L., Coopmann, O., Guidard, V., Decarpenterie, T., Dumelié, N., Cousin, J., Burgalat, J., Chauvin, N., Albora, G., Maamary, R., Khair, Z. M. E., Tzanos, D., Barrié, J., éric Moulin, Aressy, P. and Belleudy, A.: "The development of the Atmospheric Measurements by Ultra-Light Spectrometer (AMULSE) greenhouse gas profiling system and application for satellite retrieval validation," *Atmos. Meas. Tech.* (13:6), 2020, pp. 3099-3118.
- Joshi V., Sharma S., Niranjana Kumard K., Patel N., Kumar P., Bencherif H. et al. « Analysis of the middle atmospheric ozone using SABER observations: a study over mid-latitudes in the northern and southern hemispheres », *Climate Dynamics*, 2020, 10.1007/s00382-020-05124-6Joulin, P.-A., Mayol, M. L., Masson, V., Blondel, F., Rodier, Q., Cathelain, M. and Lac, C.: "The Actuator Line Method in the Meteorological LES Model Meso-NH to Analyze the Horns Rev 1 Wind Farm Photo Case," *Front. Earth Sci.* (7), 2020.
- Krinner, G., Kharin, V., Roehrig, R., Scinocca, J. and Codron, F.: "Historically-based run-time bias corrections substantially improve model projections of 100 years of future climate change," *Communications Earth & Environment* (1:1), 2020.
- Kwiatkowski, L., Torres, O., Bopp, L., Aumont, O., Chamberlain, M., Christian, J. R., Dunne, J. P., Gehlen, M., Ilyina, T., John, J. G., Lenton, A., Li, H., Lovenduski, N. S., Orr, J. C., Palmieri, J., Santana-Falcón, Y., Schwinger, J., Séférian, R., Stock, C. A., Tagliabue, A., Takano, Y., Tjiputra, J., Toyama, K., Tsujino, H., Watanabe, M., Yamamoto, A., Yool, A., and Ziehn, T. : "Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections", *Biogeosciences*, 17, 3439–3470, <https://doi.org/10.5194/bg-17-3439-2020>, 2020.
- Kwok, Y. T., De-Munck, C., Schoetter, R., Ren, C. and Lau, K. K.-L.: "Refined dataset to describe the complex urban environment of Hong Kong for urban climate modelling studies at the mesoscale," *Theor. Appl. Climatol.* (142), 2020, pp. 129-150.
- Laj P., Bigi A., Rose C., Andrews E., Lund Myhre C. et al.: "A global analysis of climate-relevant aerosol properties retrieved from the network of Global Atmosphere Watch (GAW) near-surface observatories", *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13, pp.4353 - 4392. 10.5194/amt-13-4353-2020
- Lakkala K., Kujanpää J., Brogniez C., Henriot N., Arola A. et al.: "Validation of the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPMI) surface UV radiation product ", *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13, pp.6999 - 7024. 10.5194/amt-13-6999-2020
- Lamare, M., Dumont, M., Picard, G., Larue, F., Tuzet, F., Delcourt, C. and Arnaud, L.: "Simulating optical top-of-atmosphere radiance satellite images over snow-covered rugged terrain," *The Cryosphere* (14:11), 2020, pp. 3995-4020.
- Langford A., Alvarez R., Brioude J., Caputi D., Conley S. et al.: "Ozone Production in the Soberanes Smoke Haze: Implications for Air Quality in the San Joaquin Valley During the California Baseline Ozone Transport Study", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125 (11), 10.1029/2019JD031777
- Largerone, C., Dumont, M., Morin, S., Boone, A., Lafaysse, M., Metref, S., Cosme, E., Jonas, T., Winstral, A. and Margulis, S. A.: "Toward Snow

- Cover Estimation in Mountainous Areas Using Modern Data Assimilation Methods: A Review," *Front. Earth Sci.* (8), 2020.
- Largeron, Y., Guichard, F., Roehrig, R., Couvreur, F. and Barbier, J.: "The April 2010 North African heatwave: when the water vapor greenhouse effect drives nighttime temperatures," *Climate Dyn.* (54:9-10), 2020, pp. 3879-3905.
- Larue, F., Picard, G., Arnaud, L., Ollivier, I., Delcourt, C., Lamare, M., Tuzet, F., Revuelto, J. and Dumont, M.: "Snow albedo sensitivity to macroscopic surface roughness using a new ray-tracing model," *The Cryosphere* (14:5), 2020, pp. 1651-1672.
- Lavaud, L., Bertin, X., Martins, K., Arnaud, G. and Bouin, M.-N.: "The contribution of short-wave breaking to storm surges: The case Klaus in the Southern Bay of Biscay," *Ocean Modell.* (156), 2020.
- Le Moigne, P. and Minvielle, M.: « Surfex : une plateforme pour simuler les flux des surfaces océaniques et continentales », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 082.
- Le Page, M., L. Jarlan, M. El Hajj, M. Zribi, N. Baghdadi, and A. Boone, 2020: "Potential for the detection of irrigation events on maize plots using Sentinel-1 soil moisture products". *Remote Sens.*, 12, 1621, doi:10.3390/rs12101621
- Lees E., Bousquet O., Leclair de Bellevue J.: "Analysis of diurnal to seasonal variability of Integrated Water Vapour in the South Indian Ocean basin using ground-based GNSS and fifth-generation ECMWF reanalysis (ERA5) data", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, pp.1-20. 10.1002/qj.3915
- Lellouch G, Carrer D, Vincent C, Pardé M, C. Frietas S, Trigo IF.: "Evaluation of Two Global Land Surface Albedo Datasets Distributed by the Copernicus Climate Change Service and the EUMETSAT LSA-SAF". *Remote Sensing*. 2020; 12(11):1888.
- LeMoigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D. and Rousset-Regimbeau, F.: "The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for (France)", *Geosci. Model Dev.* (13), 2020, pp. 3925-3946.
- Libois, Q., C.-Labonnote, L. and Camy-Peyret, C. « Forum mesurera infrarouge lointain émis par la Terre », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 004.
- Liddicoat, S. K., Wiltshire, A. J., Jones, C. D., Arora, V. K., Brovkin, V., Cadule, P., Hajima, T., Lawrence, D. M., Pongratz, J., Schwinger, J., Séférian, R., Tjiputra, J. F., & Ziehn, T.: "Compatible Fossil Fuel CO2 emissions in the CMIP6 Earth System Models' Historical and Shared Socioeconomic Pathway experiments of the 21st Century". *J. Clim.*, 1, 1–72, doi:10.1175/JCLI-D-19-0991.1, 2020.
- Lindsay, N., Libois, Q., Badosa, J., Migan-Dubois, A. and Bourdin, V.: "Errors in PV power modelling due to the lack of spectral and angular details of solar irradiance inputs," *Sol. Energy* (197), 2020, pp. 266-278.
- Lopez-Moreno, J. I., Soubeyroux, J. M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Duran-Gomez, N., Lafaysse, M., Vernay, M., Carmagnola, C. and Morin, S.: "Long-term trends (1958-2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees," *Int. J. Climatol.* (40:14), 2020, pp. 6122-6136.
- Lucas-Picher, P., Arsenault, R., Poulin, A., Ricard, S., Lachance-Cloutier, S. and Turcotte, R.: "Application of a High-Resolution Distributed Hydrological Model on a U.S.-Canada Transboundary Basin: Simulation of the Multiyear Mean Annual Hydrograph and 2011 Flood of the Richelieu River Basin," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:4), 2020.
- Lucas-Picher, P., Lachance-Cloutier, S., Arsenault, R., Poulin, A., Ricard, S., Turcotte, R. and Brissette, F.: "Will Evolving Climate Conditions Increase the Risk of Floods of the Large U.S.-Canada Transboundary Richelieu River Basin?," *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* (57:1), 2020, pp. 32-56.
- MacDougall, A. H., Frölicher, T. L., Jones, C. D., Rogelj, J., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Arora, V. K., Barrett, N. J., Brovkin, V., Burger, F. A., Eby, M., Eliseev, A. V., Hajima, T., Holden, P. B., Jeltsch-Thömmes, A., Koven, C., Mengis, N., Menviel, L., Michou, M., Mokhov, I. I., Oka, A., Schwinger, J., Séférian, R., Shaffer, G., Sokolov, A., Tachiiri, K., Tjiputra, J., Wiltshire, A. and Ziehn, T.: "Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂", *Biogeosciences* (17:11), 2020, pp. 2987-3016.
- Madeleine, J.B., Hourdin, F., Grandpeix, J.Y., Rio, C., Dufresne, J.L., Vignon, E., Boucher, O., Konsta, D., Cheruy, F., Musat, I. and Idelkadi, A.: "Improved representation of clouds in the atmospheric component LMDZ6A of the IPSL-CM6A Earth system model", *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(10), 2020.
- Mallet, M., Solmon, F., Nabat, P., Elguindi, N., Waquet, F., Bouniol, D., Sayer, A. M., Meyer, K., Roehrig, R., Michou, M., Zuidema, P., Flamant, C., Redemann, J. and Formenti, P.: "Direct and semi-direct radiative forcing of biomass-burning aerosols over the southeast Atlantic (SEA) and its sensitivity to absorbing properties: a regional climate modeling study," *Atmos. Chem. Phys.* (20:21), 2020, pp. 13191-13216.
- Mandement, M. and Caumont, O.: "Contribution of personal weather stations to the observation of deep-convection features near the ground," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (20:1), 2020, pp. 299-322.
- Mansour, K., Decesari, S., Facchini, M., Belosi, F., Pagliano, M., Sandrini, S., Bellacicco, M., Marullo, S., Santoleri, R., Ovadnevaite, J., Ceburnis, D., O'Dowd, C., Roberts, G., Sanchez, K. and Rinaldi, M.: "Linking Marine Biological Activity to Aerosol Chemical Composition and Cloud-Relevant Properties over the North Atlantic Ocean," *J. Geophys.*, 2020.
- Margirier, F., Testor, P., Heslop, E., Mallil, K., Bosse, A., Houpert, L., Mortier, L., Bouin, M.-N., Coppola, L., D'Ortenzio, F., de-Madron, X. D., Mourre, B., Prieur, L., Raimbault, P. and Taillandier, V.: "Abrupt warming and salinification of intermediate waters interplays with decline of deep convection in the Northwestern Mediterranean Sea," *Sci. Rep.* (10), 2020.
- Marquet, P., Mahfouf, J.-F. and Holdaway, D.: "Definition of the Moist-Air Exergy Norm: A Comparison with Existing Moist Energy Norms," *Mon. Weather Rev.* (148:3), 2020, pp. 907-928.
- Martinet, P., Cimini, D., Burnet, F., Ménétrier, B., Michel, Y. and Unger, V.: "Improvement of numerical weather prediction model analysis during fog conditions through the assimilation of ground-based microwave radiometer observations: a 1D-Var study," *Atmos. Meas. Tech.* (13:12), 2020, pp. 6593-6611.
- Masson V., E. Bocher, B. Bucher, Z. Chitu, S. Christophe, C. Fortelius, R. Hamdi, A. Lemonsu, A. Perrels, B. Van Schaeybroeck, B. Wichers Schreur, L. Velea, Y. Beddar, J.-C. Calvet, A. Delcloo, A. Druel, F. Duchêne, G. Dumas, J. Gautier, M. Goret, M. Horttanainen, R. Kouznetsov, A. Le Bris, S. Lecorre, B. Le Roy, Y. Palamarchuk, G. Petit, R. Ruuhela, O. Saranko, M. Sofiev, P. Siljamo, H. Van de Vyver, P. van Velthoven, A. Votsis (2020): "The Urban Climate Services URCLIM project", *Climate Services*, 20, 10.1016/j.cliser.2020.100194
- Masson, V. and Lemonsu, A. : « Comment Joël Noilhan a influencé la modélisation et les études en climat urbain », *La Météorologie* (:108), 2020, pp. 093.
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., Votsis, A. and Zeidler, J.: "City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges," *Urban Clim.* (31), 2020, pp. 100536.
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J. and Voogt, J.: "Urban Climates and Climate Change," *Annu. Rev. Environ. Resour.* (45), 2020, pp. 411-444.
- Matthews, H. D., K. Tokarska, Z. R. J. Nicholls, J. Rogelj, J. P. Canadell, P. Friedlingstein, T. L. Frölicher, P. M. Forster, N. P. Gillett, T. Ilyina, R. B. Jackson, C. D. Jones, C. Koven, R. Knutti, A. H. MacDougall, M. Meinshausen, N. Mengis, Séférian, R., K. Zickfeld: "Opportunities and challenges in using carbon budgets to guide climate policy". *Nat. Geosci.* 13, 769–779 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00663-3>
- Mbatha N., Bencherif H.: "Time Series Analysis and Forecasting Using a Novel Hybrid LSTM Data-Driven Model Based on Empirical Wavelet Transform Applied to Total Column of Ozone at Buenos Aires, Argentina (1966–2017)", *Atmosphere*, 2020, 11 (5), 10.3390/atmos11050457
- McFarquhar, G. M., Bretherton, C., Marchand, R., Protat, A., DeMott, P. J., Alexander, S. P., Roberts, G. C., Twohy, C. H., Toohey, D., Siems, S., Huang, Y., Wood, R., Rauber, R. M., Lasher-Trapp, S., Jensen, J., Stith, J., Mace, J., Um, J., Järvinen, E., Schnaiter, M., Gettelman, A., Sanchez, K. J., McCluskey, C. S., Russell, L. M., McCoy, I. L., Atlas, R., Bardeen, C. G., Moore, K. A., Hill, T. C. J., Humphries, R. S., Keywood, M. D., Ristovski, Z., Cravigan, L., Schofield, R., Fairall, C., Mallet, M. D., Kreidenweis, S. M., Rainwater, B., D'Alessandro, J., Wang, Y., Wu, W., Saliba, G., Levin, E. J. T., Ding, S., Lang, F., Truong, S. C. H., Wolff, C., Haggerty, J., Harvey, M. J., Klekociuk, A. and McDonald, A.: "Observations of clouds, aerosols, precipitation, and surface radiation over the Southern Ocean: An overview of CAPRICORN, MARCUS, MICRE and SOCRATES," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020.
- Mede, T., Chambon, G., Nicot, F. and Hagenmuller, P.: "Micromechanical investigation of snow failure under mixed-mode loading," *Int. J. Solids Struct.* (199), 2020, pp. 95-108.

- Ménard, C., R. Essery, G. Krinner, G. Arduini, P. Bartlett, A. Boone, C. Brutel-Vuilmet, E. Burke, J. Colin, M. Cuntz, Y. Dai, B. Decharme, E. Dutra, L. Fang, C. Fierz, Y. Gusev, S. Hagemann, V. Haverd, H. Kim, M. Lafaysse, T. Marke, O. Nasonova, T. Nitta, M. Niwano, J. Pomeroy, G. Schaedler, V. Semenov, T. Smirnova, U. Strasser, S. Swenson, D. Turkov, N. Wever, and H. Yuan, 2020: "Scientific and human errors in a snow model intercomparison". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, doi:10.1175/BAMS-D-19-0329.1
- Ménégoz, M., Valla, E., Jourdain, N. C., Blanchet, J., Beaumet, J., Wilhelm, B., Gallée, H., Fettweis, X., Morin, S. and Anquetin, S.: "Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24:11), 2020, pp. 5355-5377.
- Merchant, C. J., Saux-Picart, S. and Waller, J.: "Bias correction and covariance parameters for optimal estimation by exploiting matched in-situ references," *Remote Sens. Environ.* (237), 2020, pp. 111590.
- Merryfield, W. J., Baehr, J., Batté, L., Becker, E. J., Butler, A. H., Coelho, C. A. S., Danabasoglu, G., Dirmeyer, P. A., Doblak-Reyes, F. J., Domeisen, D. I. V., Ferranti, L., Ilyina, T., Kumar, A., Müller, W. A., Rixen, M., Robertson, A. W., Smith, D. M., Takaya, Y., Tuma, M., Vitart, F., White, C. J., Alvarez, M. S., Ardilouze, C., Attard, H., Baggett, C., Balmaseda, M. A., Beraki, A. F., Bhattacharjee, P. S., Bilbao, R., de Andrade, F. M., DeFlorio, M. J., Daz, L. B., Ehsan, M. A., Fragkoulidis, G., Grainger, S., Green, B. W., Hell, M. C., Infanti, J. M., Isensee, K., Kataoka, T., Kirtman, B. P., Klingaman, N. P., Lee, J.-Y., Mayer, K., McKay, R., Mecking, J. V., Miller, D. E., Neddermann, N., Ng, C. H. J., Osso, A., Pankatz, K., Peatman, S., Pegion, K., Perlwitz, J., Recalde-Coronel, G. C., Reintges, A., Renkl, C., Solaraju-Murali, B., Spring, A., Stan, C., Sun, Y. Q., Tozer, C. R., Vigaud, N., Woolnough, S. and Yeager, S.: "Current and emerging developments in subseasonal to decadal prediction," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020.
- Meyer D., R. Schoetter, V. Masson, S. Grimon, 2020 : "Enhanced software and platform for the Town Energy Balance (TEB) model". *The Journal of Open Source Software*, doi:10.21105/joss.02008
- Meyer, D., Schoetter, R., Riechert, M., Verrelle, A., Tewari, M., Dudhia, J., Masson, V., van Renswoude, M. and Grimon, S.: "WRF-TEB: Implementation and Evaluation of the Coupled Weather Research and Forecasting (WRF) and Town Energy Balance (TEB) Model," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:8), 2020.
- Mezzina, B., Garca-Serrano, J., Bladé, I., Palmeiro, F. M., Batté, L., Ardilouze, C., Benassi, M. and Gualdi, S.: "Multi-model assessment of the late-winter extra-tropical response to El Niño and La Niña," *Climate Dyn.*, 2020.
- Michou, M., Nabat, P., Saint-Martin, D., Bock, J., Decharme, B., Mallet, M., Roehrig, R., Séférian, R., Sénési, S. and Voldoire, A.: "Present-Day and Historical Aerosol and Ozone Characteristics in CNRM CMIP6 Simulations," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:1), 2020.
- Montagnat M., Löwe H., Calonne N., Schneebeli M., Matzl M. and Jaggi M. (2020): "On the Birth of Structural and Crystallographic Fabric Signals in Polar Snow: A Case Study From the EastGRIP Snowpack". *Front. Earth Sci.* 8:365. doi: 10.3389/feart.2020.00365
- Montagnat, M., Chambon, G., Gaume, J., Hagenmuller, P. and Sandells, M.: "Editorial: About the Relevance of Snow Microstructure Study in Cryospheric Sciences," *Front. Earth Sci.* (8), 2020, pp. 571.
- Morales, M. S., Cook, E. R., Barichivich, J., Christie, D. A., Villalba, R., LeQuesne, C., Srur, A. M., Ferrero, M. E., González-Reyes, Á., Couvreur, F., Matskovsky, V., Aravena, J. C., Lara, A., Mundo, I. A., Rojas, F., Prieto, M. R., Smerdon, J. E., Bianchi, L. O., Masiokas, M. H., Urrutia-Jalabert, R., Rodríguez-Catón, M., Muñoz, A. A., Rojas-Badilla, M., Alvarez, C., Lopez, L., Luckman, B. H., Lister, D., Harris, I., Jones, P. D., Williams, A. P., Velazquez, G., Aliste, D., Aguilera-Betti, I., Marcotti, E., Flores, F., Muñoz, T., Cuq, E. and Boninsegna, J. A.: "Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century," *PNAS (Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)*, 2020.
- Morel, X., Hansen, B., Delire, C., Ambus, P., Mastepanov, M. and Decharme, B.: "A new dataset of soil carbon and nitrogen stocks and profiles from an instrumented Greenlandic fen designed to evaluate land-surface models," *Earth Syst. Sci. Data* (12:4), 2020, pp. 2365-2380.
- Morgenstern, O., OConnor, F. M., Johnson, B. T., Zeng, G., Mulcahy, J. P., Williams, J., Teixeira, J., Michou, M., Nabat, P., Horowitz, L. W., Naik, V., Sentman, L. T., Deushi, M., Bauer, S. E., Tsigaridis, K., Shindell, D. T. and Kinnison, D. E.: "Reappraisal of the Climate Impacts of Ozone-Depleting Substances," *Geophys. Res. Lett.* (47:20), 2020.
- Morin, S., Horton, S., Techel, F., Bavay, M., Coléou, C., Fierz, C., Gobiet, A., Hagenmuller, P., Lafaysse, M., Lizar, M., Mitterer, C., Monti, F., Müller, K., Olefs, M., Snook, J. S., van Herwijnen, A. and Vionnet, V.: "Application of physical snowpack models in support of operational avalanche hazard forecasting: A status report on current implementations and prospects for the future," *Cold Reg. Sci. Technol.* (170), 2020, pp. 102910.
- Moseid, K. O., Schulz, M., Storelvmo, T., Julsrud, I. R., Olivé, D., Nabat, P., Wild, M., Cole, J. N. S., Takemura, T., Oshima, N., Bauer, S. E. and Gastineau, G.: "Bias in CMIP6 models as compared to observed regional dimming and brightening," *Atmos. Chem. Phys.* (20:24), 2020, pp. 16023-16040.
- Mucia, A., Bonan, B., Zheng, Y., Albergel, C. and Calvet, J.-C.: "From Monitoring to Forecasting Land Surface Conditions Using a Land Data Assimilation System: Application over the Contiguous United States," *Remote Sensing* (12:12), 2020, pp. 2020.
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., Decharme, B., Drugé, T., Roehrig, R. and Saint-Martin, D.: "Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region," *Atmos. Chem. Phys.* (20:14), 2020, pp. 8315-8349.
- Napoly, A., A. Boone and T. Welfringer, 2020: "ISBA-MEB: model snow evaluation for local-scale forest sites". *Geoscientific Model Development*, 13, 6523-6545, doi:10.5194/gmd-13-6523-2020.
- Navarro, J. C. A., Ortega, P., Batté, L., Smith, D., Bretonnière, P. A., Guemas, V., Massonnet, F., Sicardi, V., Torralba, V., Tourigny, E. and Doblak-Reyes, F. J.: "Link Between Autumnal Arctic Sea Ice and Northern Hemisphere Winter Forecast Skill," *Geophys. Res. Lett.* (47:5), 2020.
- Naveau, P., Hannart, A. and Ribes, A.: "Statistical Methods for Extreme Event Attribution in Climate Science," *Annual Review of Statistics and Its Application* (7:1), 2020, pp. 89-110.
- Nicely, J. M., Duncan, B. N., Hanisco, T. F., Wolfe, G. M., Salawitch, R. J., Deushi, M., Haslerud, A. S., Jöckel, P., Josse, B., Kinnison, D. E., Klekociuk, A., Manyin, M. E., Marécal, V., Morgenstern, O., Murray, L. T., Myhre, G., Oman, L. D., Pitari, G., Pozzer, A., Quaglia, I., Revell, L. E., Rozanov, E., Stenke, A., Stone, K., Strahan, S., Tilmes, S., Tost, H., Westervelt, D. M. and Zeng, G.: "A machine learning examination of hydroxyl radical differences among model simulations for CCM1-1," *Atmos. Chem. Phys.* (20:3), 2020, pp. 1341-1361.
- Niekerk, A., Sandu, I., Zadra, A., Bazile, E., Kanehama, T., Köhler, M., Koo, M.-S., Choi, H.-J., Kuroki, Y., Toy, M. D., Vosper, S. B. and Yudin, V.: "Constraining Orographic Drag Effects (COORDE): A Model Comparison of Resolved and Parametrized Orographic Drag," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:11), 2020.
- Nogueira, M., Albergel, C., Boussetta, S., Johannsen, F., Trigo, I. F., Ermida, S. L., Martins, J. P. A. and Dutra, E.: "Role of vegetation in representing land surface temperature in the CHTESSEL (CY45R1) and SURFEX-ISBA (v8.1) land surface models: a case study over Iberia", 2020.
- Nuissier, O., F. Duffourg, M. Martinet, V. Ducrocq, and C.: "Lac, Hectometric-scale simulations of a Mediterranean heavy-precipitation event during the Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment (HyMeX) first Special Observation Period (SOP1)", *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 14649-14667, 2020.
- Orbe, C., Plummer, D. A., Waugh, D. W., Yang, H., Jöckel, P., Kinnison, D. E., Josse, B., Marecal, V., Deushi, M., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Chipperfield, M. P., Dhomse, S., Feng, W. and Bekki, S.: "Description and Evaluation of the specified-dynamics experiment in the Chemistry-Climate Model Initiative," *Atmos. Chem. Phys.* (20:6), 2020, pp. 3809-3840.
- Oudar, T., Cattiaux, J. and Douville, H.: "Drivers of the Northern Extratropical Eddy-Driven Jet Change in CMIP5 and CMIP6 Models," *Geophys. Res. Lett.* (47:8), 2020.
- Oudar, T., Cattiaux, J., Douville, H., Geoffroy, O., Saint-Martin, D. and Roehrig, R.: "Robustness and drivers of the Northern Hemisphere extratropical atmospheric circulation response to a CO₂-induced warming in CNRM-CM6-1," *Climate Dyn.* (54:3-4), 2020, pp. 2267-2285.
- Padron, R. S., Gudmundsson, L., Decharme, B., Ducharne, A., Lawrence, D. M., Mao, J., Peano, D., Krinner, G., Kim, H. and Seneviratne, S. I.: "Observed changes in dry-season water availability attributed to human-induced climate change," *Nat. Geosci.* (13:7), 2020, pp. 477-481.
- Pagès, R., Baklouti, M., Barrier, N., Ayache, M., Sevault, F., Somot, S. and Moutin, T.: "Projected Effects of Climate-Induced Changes in Hydrodynamics on the Biogeochemistry of the Mediterranean Sea Under the RCP 8.5 Regional Climate Scenario," *Front. Mar. Sci.* (7), 2020.
- Palchetti, L., Brindley, H., Bantges, R., Buehler, S. A., Camy-Peyret, C., Carli, B., Cortesi, U., Bianco, S. D., Natale, G. D., Dinelli, B. M., Feldman, D., Huang, X. L., C.-Labonnote, L., Libois, Q., Maestri, T., Mlynczak, M. G., Murray, J. E., Oetjen, H., Ridolfi,

- M., Riese, M., Russell, J., Saunders, R. and Serio, C.: "FORUM: unique far-infrared satellite observations to better understand how Earth radiates energy to space," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, pp. 1-52.
- Pannekoucke, O. and Fablet, R.: "PDE-NetGen 1.0: from symbolic partial differential equation (PDE) representations of physical processes to trainable neural network representations," *Geosci. Model Dev.* (13:7), 2020, pp. 3373-3382.
- Pedreras R., Idier D, Le Roy S., David A., Schaeffer C., Durand J., Desmazes F.: "Infragravity Waves in a Complex Macro-tidal Environment: High Frequency Hydrodynamic Measurements and Modelling", *Journal of Coastal Research*, Coastal Education and Research Foundation, 2020, 95 (sp1), pp.1235. 10.2112/SI95-239.1
- Peinke, I., Hagenmuller, P., Ando, E., Chambon, G., Flin, F. and Roule, J. "Experimental Study of Cone Penetration in Snow Using X-Ray Tomography," *Front. Earth Sci.* (8), 2020.
- Pellet, V., Aires, F., Papa, F., Munier, S. and Decharme, B.: "Long-term Total Water Storage Change from a Satellite Water Cycle (SAWC) reconstruction over large south Asian basins," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24), 2020, pp. 3033-3055.
- Peng, J., C. Albergel, A. Balenzano, L. Brocca, O. Cartus, M.H. Cosh, W.T. Crow, K. Dabrowska-Zielinska, S. Dadson, M.W.J. Davidson, P. de Rosnay, W. Dorigo, A. Gruber, S. Hagemann, M. Hirschi, Y.H. Kerr, F. Lovergine, M.D. Mahecha, P. Marzahn, F. Mattia, J. Pawel Musial, S. Preuschmann, R.H. Reichle, G. Satalino, M. Silgram, P. M. van Bodegom, N.E.C. Verhoest, W. Wagner, J.P. Walker, U. Wegmüller, A. Loew: "A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements", *Remote Sens. Environ.*, 2020, 112162.
- Phillips V., Formenton M., Kanawade V., Karlsson L., Patade S., et al.: "Multiple Environmental Influences on the Lightning of Cold-Based Continental Cumulonimbus Clouds. Part I: Description and Validation of Model", *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77 (12), pp.3999-4024. 10.1175/JAS-D-19-0200.1
- Picard, G., Dumont, M., Lamare, M., Tuzet, F., Larue, F., Pirazzini, R., and Arnaud, L. : Spectral albedo measurements over snow-covered slopes : theory and slope effect corrections, *The Cryosphere*, 14, 1497–1517, <https://doi.org/10.5194/tc-14-1497-2020>, 2020.
- Pineau-Guillou, L., Bouin, M.-N., Arduin, F., Lyard, F., Bidlot, J.-R. and Chapron, B. "Impact of wave-dependent stress on storm surge simulations in the North Sea: Ocean model evaluation against in situ and satellite observations," *Ocean Modell.* (154), 2020, pp. 101694.
- Planton, Y.Y., Guilyardi, E., Wittenberg, A. T., Lee, J., Gleckler, P.J., Bayr, T., McGregor, S., McPhaden, M. J., Power, S., Roehrig, R., Vialard, J. and Voldoire, A. "Evaluating climate models with the CLIVAR 2020 ENSO metrics package," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020, pp. 1-57.
- Qasmi, S., Sanchez-Gomez, E., Ruprich-Robert, Y., Boé, J. and Cassou, C. "Modulation of the occurrence of heatwaves over the Euro-Mediterranean region by the intensity of the Atlantic Multidecadal Variability," *J. Climate*, 2020, pp. 1-50.
- Quesada-Ruiz, S., Attié, J.-L., Lahoz, W. A., Abida, R., Ricaud, P., Amraoui, L. E., Zbinden, R., Piacentini, A., Joly, M., Eskes, H., Segers, A., Curier, L., de Haan, J., Kujanpää, J., Nijhuis, A. C. P. O., Tamminen, J., Timmermans, R. and Veeckind, P. "Benefit of ozone observations from Sentinel-5P and future Sentinel-4 missions on tropospheric composition," *Atmos. Meas. Tech.* (13:1), 2020, pp. 131-152.
- Reale, M., Salon, S., Somot, S., Solidoro, C., Giorgi, F., Crise, A., Cossarini, G., Lazzari, P. and Sevault, F. "Influence of large-scale atmospheric circulation patterns on nutrient dynamics in the Mediterranean Sea in the extended winter season (October-March) 1961-1999," *Climate Research* (82), 2020, pp. 117-136.
- Redon, E., Lemonsu, A. and Masson, V. "An urban trees parameterization for modeling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0)," *Geosci. Model Dev.* (13:2), 2020, pp. 385-399.
- Revuelto, J., Billecocq, P., Tuzet, F., Cluzet, B., Lamare, M., Larue, F. and Dumont, M.: "Random forests as a tool to understand the snow depth distribution and its evolution in mountain areas," *Hydrol. Processes* (34:26), 2020, pp. 5384-5401.
- Ribes, A., Thao, S. and Cattiaux, J.: "Describing the Relationship between a Weather Event and Climate Change: A New Statistical Approach," *J. Climate* (33:15), 2020, pp. 6297-6314.
- Ricaud, P., Grigioni, P., Roehrig, R., Durand, P. and Veron, D. E.: "Trends in Atmospheric Humidity and Temperature above Dome C, Antarctica Evaluated from Observations and Reanalyses," *Atmosphere* (11:8), 2020, pp. 836.
- Ricaud, P., Guasta, M. D., Bazile, E., Azouz, N., Lupi, A., Durand, P., Attié, J.-L., Veron, D., Guidard, V. and Grigioni, P.: "Supercooled liquid water cloud observed, analysed, and modelled at the top of the planetary boundary layer above Dome C, Antarctica," *Atmos. Chem. Phys.* (20:7), 2020, pp. 4167-4191.
- Riette, S.: "Development of Physical Parameterizations with Python (PPY, version 1.1) and its usage to reduce the time-step dependency in a microphysical scheme," *Geosci. Model Dev.* (13:2), 2020, pp. 443-460.
- Rivière, G., Ricard, D. and Arbogast, P.: "The downward transport of momentum to the surface in idealized sting-jet cyclones," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* (146:729), 2020, pp. 1801-1821.
- Robin, Y. and Ribes, A.: "Nonstationary extreme value analysis for event attribution combining climate models and observations," *Adv. Stat. Climatol. Meteorol. Oceanogr.* (6:2), 2020, pp. 205-221.
- Rocco M., Colomb A., Baray J.-L., Amelynck C., Verreyken B. et al.: "Analysis of Volatile Organic Compounds during the OCTAVE Campaign: Sources and Distributions of Formaldehyde on Reunion Island", *Atmosphere*, 2020, 11 (2), 10.3390/atmos11020140
- Roehrig, R., Beau, I., Saint-Martin, D., Alias, A., Decharme, B., Guérémy, J.-F., Voldoire, A., Abdel-Lathif, A. Y., Bazile, E., Belamari, S., Blein, S., Bouniol, D., Bouteloup, Y., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevallier, M., Colin, J., Douville, H., Marquet, P., Michou, M., Nabat, P., Oudar, T., Peyrillé, P., Piriou, J.-M., y Méliá, D. S., Sférian, R. and Sénési, S. : "The CNRM Global Atmosphere Model ARPEGE-Climate 6.3: Description and Evaluation," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:7), 2020.
- Roux E., Ignotti E., Bègue N., Bencherif H., Catry T., et al.: "Toward an Early Warning System for Health Issues Related to Particulate Matter Exposure in Brazil: The Feasibility of Using Global PM 2.5 Concentration Forecast Products", *Remote Sensing*, 2020, *Remote Sensing for Health: from Fine-Scale Investigations towards Early-Warning Systems*, 12 (24), pp.4074. 10.3390/rs12244074
- Roux, E. L., Evin, G., Eckert, N., Blanchet, J. and Morin, S.: "Non-stationary extreme value analysis of ground snow loads in the French Alps: a comparison with building standards," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* (20:11), 2020, pp. 2961-2977.
- Sabatier, T., Largeron, Y., Paci, A., Lac, C., Rodier, Q., Canut, G. and Masson, V.: "Semi-idealized simulations of wintertime flows and pollutant transport in an alpine valley. Part II : Passive tracer tracking.," *QJR Meteorol Soc.*, 2020.
- Sabatier, T., Paci, A., Lac, C., Canut, G., Largeron, Y. and Masson, V.: "Semi-idealized simulations of wintertime flows and pollutant transport in an Alpine valley : Origins of local circulations (Part I).," *QJR Meteorol Soc.*, 2020.
- Sahlaoui, Z., S. Mordane, E. Wattlelot & J.-F. Mahfouf (2020): "Improving heavy rainfall forecasts by assimilating surface precipitation in the convective scale model AROME : A case study of the Mediterranean event of November 4, 2017." *Meteorological Applications*, 27, e1869. <https://doi.org/10.1002/met.1860>.
- Saint-Martin, D., Geoffroy, O., Voldoire, A., Cattiaux, J., Brient, F., Chauvin, F., Chevallier, M., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Douville, H., Guérémy, J.-F., Joetzier, E., Ribes, A., Roehrig, R., Terray, L. and Valcke, S.: "Tracking changes in climate sensitivity in CNRM climate models," *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2020.
- Saliba, G., Sanchez, K., Russell, L., Twohy, C., Roberts, G., Lewis, S., Dedrick, J., McCluskey, C., Moore, K., DeMott, P. J. and Toohey, D.: "Organic Composition of Three Different Size Ranges of Aerosol Particles over the Southern Ocean," *Aerosol Sci. Technol.*, 2020.
- Sánchez-Zapero, J., F. Camacho, E. Martínez-Sánchez, R. Lacaze, D. Carrer, F. Pinault, I. Benhadj, J. Muñoz-Sabater: "Quality assessment of PROBA-V surface albedo V1 for the continuity of the Copernicus Climate Change service". *Remote Sens.*, 12, 2596, <https://doi.org/10.3390/rs12162596>, 2020.
- Sanchez, K. J., Roberts, G. C., Diao, M. and Russell, L. M.: "Measured Constraints on Cloud-Top Entrainment to Reduce Uncertainty of Stratocumulus Shortwave Radiative Forcing in the Southern Ocean," *Geophys. Res. Lett.*, 2020.
- Sanchez, K. J., Roberts, G. C., Saliba, G., Russell, L. M., Twohy, C., Reeves, M., Humphries, R. S., Keywood, M. D., Ward, J. P. and McRobert, I. M.: "Measurement report: Cloud Processes and the Transport of Biological Emissions Regulate Southern Ocean Particle and Cloud Condensation Nuclei Concentrations," *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, 2020.
- Sauvage, C., Lebeaupin Brossier, C., Bouin, M.-N. and Ducrocq, V.: "Characterization of the air-sea

exchange mechanisms during a Mediterranean heavy precipitation event using realistic sea state modelling," *Atmos. Chem. Phys.* (20), 2020, pp. 1675-1699.

Saux Picart, S., Marsouin, A., Legendre, G., Roquet, H., Péré, S., Nano-Ascione, N. and Gianelli, T.: "A Sea Surface Temperature data record (2004-2012) from Meteosat Second Generation satellites," *Remote Sens. Environ.* (240), 2020, pp. 111687.

Schoetter, R., Hidalgo, J., Jouglu, R., Masson, V., Rega, M. and Pergaud, J.: "A Statistical Dynamical Downscaling for the Urban Heat Island and Building Energy Consumption Analysis of Its Uncertainties," *Journal of Applied Meteorology and Climatology* (59:5), 2020, pp. 859-883.

Schoetter, R., Kwok, Y. T., de Munck, C., Lau, K. K. L., Wong, W. K. and Masson, V.: "Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-V9.0 and Meso-NH-v5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities," *Geosci. Model Dev.* (13), 2020, pp. 5609-5643.

Séférian, R., Berthet, S., Yool, A., Palmiéri, J., Bopp, L., Tagliabue, A., Kwiatkowski, L., Aumont, O., Christian, J., Dunne, J., Gehlen, M., Ilyina, T., John, J. G., Li, H., Long, M., Luo, J. Y., Nakano, H., Romanou, A., Schwinger, J., Stock, C., Santana-Falcón, Y., Takano, Y., Tjiputra, J., Tsujino, H., Watanabe, M., Wu, T., Wu, F. and Yamamoto, A.: "Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6," *Current Climate Change Reports*, 2020.

Ser-Giacomi, E., Jorda-Sanchez, G., Soto-Navarro, J., Thomsen, S., Mignot, J., Sevault, F. and Rossi, V.: "Impact of Climate Change on Surface Stirring and Transport in the Mediterranean Sea," *Geophys. Res. Lett.* (47:22), 2020.

Shaw, T. E., Deschamps-Berger, C., Gascoin, S. and McPhee, J.: "Monitoring Spatial and Temporal Differences in Andean Snow Depth Derived From Satellite Tri-Stereo Photogrammetry," *Front. Earth Sci.* (8), 2020.

Shinozuka, Y., Saide, P. E., Ferrada, G. A., Burton, S. P., Ferrare, R., Doherty, S. J., Gordon, H., Longo, K., Mallet, M., Feng, Y., Wang, Q., Cheng, Y., Dobracki, A., Freitag, S., Howell, S. G., LeBlanc, S., Flynn, C., Segal-Rosenhaimer, M., Pistone, K., Podolske, J. R., Stith, E. J., Bennett, J. R., Carmichael, G. R., da Silva, A., Govindaraju, R., Leung, R., Zhang, Y., Pfister, L., Ryo, J.-M., Redemann, J., Wood, R. and Zuidema, P.: "Modeling the smoky troposphere of the southeast Atlantic: a comparison to ORACLES airborne observations from September of 2016," *Atmos. Chem. Phys.* (20:19), 2020, pp. 11491-11526.

Siebert, H., Szodry, K.-E., Egerer, U., Wehner, B., Henning, S., Chevalier, K., Lückner, J., Welz, O., Weinhold, K., Fialho, P., Roberts, G., Allwayin, N., Schum, S., Shaw, R. A., Mazzoleni, C., Mazzoleni, L., Nowak, J. L., Malinowski, S., Karpinska, K., Kumala, W., Czyzewska, D., Luke, E. P., Kollias, P., Wood, R. and Mellado, J. P.: "Observations of aerosol, cloud, turbulence, and radiation properties at the top of the marine boundary layer over the Eastern North Atlantic Ocean: The ACORES campaign," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020.

Smith, C. J., Kramer, R. J., Myhre, G., Alterskjær, K., Collins, W., Sima, A., Boucher, O., Dufresne, J.-L., Nabat, P., Michou, M., Yukimoto, S., Cole, J., Paynter, D., Shiogama, H., O'Connor, F. M.,

Robertson, E., Wiltshire, A., Andrews, T., Hannay, C., Miller, R., Nazarenko, L., Kirkevåg, A., Olivé, D., Fiedler, S., Lewinschal, A., Mackallah, C., Dix, M., Pincus, R. and Forster, P. M.: "Effective radiative forcing and adjustments in CMIP6 models," *Atmos. Chem. Phys.* (20:16), 2020, pp. 9591-9618.

Sow, M., Diakhaté, M., Dixon, R. D., Guichard, F., Dieng, D. and Gaye, A. T.: "Uncertainties in the Annual Cycle of Rainfall Characteristics over West Africa in CMIP5 Models," *Atmosphere* (11:2), 2020, pp. 216.

Specq, D. and Batté, L.: "Improving sub-seasonal precipitation forecasts through a statistical-dynamical approach : application to the southwest tropical Pacific," *Climate Dyn.*, 2020.

Specq, D., Batté, L., Déqué, M. and Ardilouze, C.: "Multimodel Forecasting of Precipitation at Subseasonal Timescales Over the Southwest Tropical Pacific," *Earth Space Sci.* (7:9), 2020.

Stoffelen, A., Benedetti, A., Borde, R., Dabas, A., Flamant, P., Forsythe, M., Hardesty, M., Isaksen, I., Källén, E., Körnich, H., Reitebuch, O., Rennie, M., Riishøjgaard, L.-P., Schyberg, H., Straume, A. G. and Vaughan, M.: "Wind Profile Satellite Observation Requirements and Capabilities," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2020.

Taillardat, M. and Mestre, O.: "From research to applications – examples of operational ensemble post-processing in France using machine learning," *Nonlin. Processes Geophys.*, 27, 329–347, <https://doi.org/10.5194/npg-27-329-2020>, 2020.

Tato Loua R., Bencherif H., Bègue N., Mbatha N., Portafaix T. et al.: "Surface Temperature Trend Estimation over 12 Sites in Guinea Using 57 Years of Ground-Based Data" *Climate*, 2020, 8 (6), 10.3390/cli8060068

Thomas, G., J.-F. Mahfouf & T. Montmerle (2020): "Toward a variational assimilation of polarimetric radar observations in a convective-scale numerical weather (NWP) model". *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 2279-2298. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2279-2020>

Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., Davidson, E. A., Ciais, P., Jackson, R. B., Janssens-Maenhout, G., Prather, M. J., Regnier, P., Pan, N., Pan, S., Peters, G. P., Shi, H., Tubiello, F. N., Zaehle, S., Zhou, F., Arneeth, A., Battaglia, G., Berthet, S., Bopp, L., Bouwman, A. F., Buitenhuis, E. T., Chang, J., Chipperfield, M. P., Dangal, S. R. S., Dlugokencky, E., Elkins, J. W., Eyre, B. D., Fu, B., Hall, B., Ito, A., Joos, F., Krummel, P. B., Landolfi, A., Laruelle, G. G., Lauerwald, R., Li, W., Lienert, S., Maavara, T., MacLeod, M., Millet, D. B., Olin, S., Patra, P. K., Prinn, R. G., Raymond, P. A., Ruiz, D. J., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wang, J., Weiss, R. F., Wells, K. C., Wilson, C., Yang, J. and Yao, Y.: "A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks," *Nature* (586:7828), 2020, pp. 248-256.

Tokarska, K. B., Arora, V. K., Gillett, N. P., Lehner, F., Rogelj, J., Schleussner, C.-F., Séférian, R. and Knutti, R.: "Uncertainty in carbon budget estimates due to internal climate variability," *Environ. Res. Lett.*, 2020.

Tramblay, Y., A. Koutroulis, L. Samaniego, S. Vicente-Serrano, F. Volaire, A. Boone, M. Le Page,

M. Carmen Llasat, C. Albergel, Z. Selmin Burak, M. Cailleret, K. Cindric Kalin, H. Davi, J.-L. Dupuy, P. Greve, M. Grillakis, L. Hanich, L. Jarlan, N. Martin-StPaul, J. Martinez Vilalta, D. Pulido Velazquez, P. Quintana Segui, D. Renard, M. Turco, M. Turkes, R. Trigo, J.-P. Vidal, A. Vilagrosa, M. Zribi, J. Polcher, 2020: "Future Mediterranean droughts: Current scenarios and research perspectives", *Earth-Science Reviews*, 103348, ISSN 0012-8252, doi:10.1016/j.earscirev.2020.103348

Turnock, S. T., Allen, R. J., Andrews, M., Bauer, S. E., Deushi, M., Emmons, L., Good, P., Horowitz, L., John, J. G., Michou, M., Nabat, P., Naik, V., Neubauer, D., O'Connor, F. M., Olivé, D., Oshima, N., Schulz, M., Sellar, A., Shim, S., Takemura, T., Tilmes, S., Tsigaridis, K., Wu, T. and Zhang, J.: "Historical and future changes in air pollutants from CMIP6 models," *Atmos. Chem. Phys.* (20:23), 2020, pp. 14547-14579.

Tuzet, F., Dumont, M., Picard, G., Lamare, M., Voisin, D., Nabat, P., Lafaysse, M., Larue, F., Revuelto, J. and Arnaud, L.: "Quantification of the radiative impact of light-absorbing particles during two contrasted snow seasons at Col du Lautaret (20580.167emm0.167ema.s.l., French Alps)," *The Cryosphere* (14:12), 2020, pp. 4553-4579.

Udina, M., Bech, J., González, S., Soler, M. R., Paci, A., Miró, J. R., Trapero, L., Donier, J. M., Douffet, T., Codina, B. and Pineda, N.: "Multi-sensor observations of an elevated rotor during a mountain wave event in the Eastern Pyrenees.," *Atmospheric Research*, 2020.

Vanderbecken, P. J., Mahfouf, J.-F. and Millet, C.: "Bayesian selection of atmospheric profiles from an ensemble data assimilation system using infrasonic observations of May 2016 Mount Etna eruptions," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020.

Vautard, R., Kadyrov, N., Iles, C., Boberg, F., Buonomo, E., Bülow, K., Coppola, E., Corre, L., Meijgaard, E., Nogherotto, R., Sandstad, M., Schwingshackl, C., Somot, S., Aalbers, E., Christensen, O. B., Ciarlo, J. M., Demory, M.-E., Giorgi, F., Jacob, D., Jones, R. G., Keuler, K., Kjellström, E., Lenderink, G., Levvasseur, G., Nikulin, G., Sillmann, J., Solidoro, C., Sørland, S. L., Steger, C., Teichmann, C., Warrach-Sagi, K. and Wulfmeyer, V.: "Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020.

Vautard, R., van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Haustein, K., Kreienkamp, F., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E. L., Ribes, A., Robin, Y., Schneider, M., Soubeyrou, J.-M., Stott, P., Seneviratne, S. I., Vogel, M. M. and Wehner, M.: "Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heatwaves in Western Europe," *Environ. Res. Lett.* (15:9), 2020, pp. 094077.

Vergnes, J.-P., Roux, N., Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., Courtois, Q., de Dreuzy, J.-R., Etchevers, P., Gallois, N., Leroux, D., Longuevergne, L., Le Moigne, P., Morel, T., Munier, S., Regimbeau, F., Thiéry, D. and Viennot, P.: "The Aquifer hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France : evaluation over a 60 year period," *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (24), 2020, pp. 633-654.

Verreyken B., Amelynck C., Brioude J., Müller J.-F., Schoon N. et al. : "Characterisation of African biomass burning plumes and impacts on the

atmospheric composition over the south-west Indian Ocean", *Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union*, 2020, 20 (23), pp.14821-14845. 10.5194/acp-20-14821-2020

Viallon-Galinier, L., Hagenmuller, P. and Lafaysse, M.: "Forcing and evaluating detailed snow cover models with stratigraphy observations," *Cold Reg. Sci. Technol.* (180), 2020.

Viguié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G. and Salagnac, J.-L.: "Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris," *Environ. Res. Lett.* (15:7), 2020, pp. 075006.

Volpi, D., Batté, L., Guérémy, J.-F. and Déqué, M.: "Teleconnection-based evaluation of seasonal forecast quality," *Climate Dyn.*, 2020.

Wang J. K., Aouf L., Jia Y. J., Zhang Y.: "Validation and Calibration of Significant Wave Height and wind speed retrievals from HY2B altimeter based on deep learning", *Remote Sensing*, 2020, 12, 2858; doi:10.3390/rs12172858.

Wing, A. A., Stauffer, C. L., Becker, T., Reed, K. A., Ahn, M.-S., Arnold, N. P., Bony, S., Branson, M., Bryan, G. H., Chaboureaud, J.-P., Rood, S. R. D., Gayatri, K., Hohenegger, C., Hu, I.-K., Jansson, F., Jones, T. R., Khairoutdinov, M., Kim, D., Martin, Z. K., Matsugishi, S., Medeiros, B., Miura, H., Moon, Y., Müller, S. K., Ohno, T., Popp, M., Prabhakaran, T., Randall, D., Rios-Berrios, R., Rochetin, N., Roehrig, R., Romps, D. M., Ruppert, J. H., Satoh, M., Silvers, L. G., Singh, M. S., Stevens, B., Tomassini, L., van Heerwaarden, C. C., Wang, S. and Zhao, M.: "Clouds and Convective Self-Aggregation in a Multimodel Ensemble of Radiative-Convective Equilibrium Simulations," *J. Adv. Model. Earth Syst.* (12:9), 2020.

Worou, K., Goosse, H., Fichet, T., Guichard, F. and Diakhaté, M.: "Interannual variability of rainfall in the Guinean Coast region and its links with sea surface temperature changes over the twentieth century for the different seasons," *Climate Dyn.* (55:3-4), 2020, pp. 449-470.

Wright C., Jean Preez D., Martincigh B., Allen M., Millar D. et al.: "A Comparison of Solar Ultraviolet Radiation Exposure in Urban Canyons in Venice, Italy and Johannesburg, South Africa", *Photochemistry and Photobiology*, 2020, 96 (5), pp.1148-1153. 10.1111/php.13291

Yiou, P., Cattiaux, J., Faranda, D., Kadyrov, N., Jézéquel, A., Naveau, P., Ribes, A., Robin, Y., Thao, S., van Oldenborgh, G. J. and Vrac, M.: "Analyses of the Northern European Summer Heatwave of 2018," *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (101:1), 2020, pp. S35-S40.

Zanis, P., Akritidis, D., Georgoulas, A. K., Allen, R. J., Bauer, S. E., Boucher, O., Cole, J., Johnson, B., Deushi, M., Michou, M., Mulcahy, J., Nabat, P., Orlowski, D., Oshima, N., Sima, A., Schulz, M., Takemura, T. and Tsigaridis, K.: "Fast responses on pre-industrial climate from present-day aerosols in a CMIP6 multi-model study," *Atmos. Chem. Phys.* (20:14), 2020, pp. 8381-8404.

Zgheib, T., Giacoma, F., Granet-Abisset, A.-M., Morin, S. and Eckert, N.: "One and a half century of avalanche risk to settlements in the upper Maurienne valley inferred from land cover and socio-environmental changes," *Global Environ. Change* (65), 2020, pp. 102149.

Zheng, Y., Albergel, C., Munier, S., Bonan, B. and Calvet, J.-C.: "An offline framework for high-dimensional ensemble Kalman filters to reduce the time to solution," *Geosci. Model Dev.* (13:8), 2020, pp. 3607-3625.

Zhou M., Wang P., Langerock B., Vigouroux C., Hermans C. et al.: "Ground-based Fourier transform infrared (FTIR) O₃ retrievals from the 3040 cm⁻¹ spectral range at Xianghe, China", *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13, pp.5379 - 5394. 10.5194/amt-13-5379-2020

Zribi, M.; Albergel, C.; Baghdadi, N. Editorial for the Special Issue: "Soil Moisture Retrieval using Radar Remote Sensing Sensors". *Remote Sens.*, 12, 1100, 2020.

Publications scientifiques 2020 hors DESR

Cantet, P., A. Belmadani, F. Chauvin, and P. Palany, 2020: "Projections of tropical cyclone rainfall over land with an Eulerian approach: Case study of three islands in the West Indies". *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.6760.

Chauvin F., Pilon R., Palany P., Belmadani A. (2020): "Future changes in Atlantic hurricanes with the rotated-stretched ARPEGE-Climat at very high resolution". *Clim Dyn* 54:947-972. doi:10.1007/s00382-019-05040-4.

Delrieu, G., Khanal, A. K., Yu, N., Cazenave, F., Boudevillain, B., and Gaussiat, N.: "Preliminary investigation of the relationship between differential phase shift and path-integrated attenuation at the X band frequency in an Alpine environment", *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 3731-3749, <https://doi.org/10.5194/amt-13-3731-2020>, 2020.

Hemri, S., Lerch, S., Taillardat, M., Vannitsem, S., and Wilks, D. S.: "Preface: Advances in post-processing and blending of deterministic and ensemble forecasts", *Nonlin. Processes Geophys.*, 27, 519-521, <https://doi.org/10.5194/npg-27-519-2020>, 2020.

Marzieh H. Derkani, A. Alberello, F. Nelli, L. G. Bennetts, K. G. Hessner, K. MacHutchon, K. Reichert, L. Aouf, S. Saeed Khan, and A. Toffoli : "Wind, waves, and surface currents in the Southern Ocean : Observations from the Antarctic Circumnavigation Expedition". *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2020-255>.

Tourain C., D. Hauser, L. Hermozo, R. Rodriguez Suquet, P. Schippers, L. Aouf, A. Dalphiné, A. Mouche, B. Chapron, F. Collard, C. Dufour, F. Gouillon, A. Ollivier, F. Piras, M. Dalila, G. Guitton, J.-M. Lachiver, C. Tison: "CAL/VAL Phase for the Swim Instrument Onboard cFOSAT", *Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2020 - 2020 IEEE International*, pp. 5678-5681, 2020.

Triquenot A., F. Ruget, F. Souverain (2020) : « Le suivi de la pousse des prairies par le Ministère en charge de l'agriculture : aspects institutionnels et fonctionnels », *Fourrages* 244, 93-100

Viatte C., C. Clerbaux, C. Maes, P. Daniel, R. Garello, S. Safieddine & F. Arduin, 2020: "Air Pollution and Sea Pollution Seen from Space", *Surveys in Geophysics*, June 2020.

Vinet, F., M. Peroche, P. Palany, F. Leone, M. Gherardi, D. Grancher, A. Moatty, and S. Defossez, 2020: « Collecte et gestion des débris post-cycloniques à Saint-Martin (Antilles françaises) après le passage du cyclone Irma (sept. 2017) ». *CyberGeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, 937, doi:10.4000/cybergeo.34154.

Wang J. K., L. Aouf, X. Wang, B. Li, J. J. Wang: "Remotely cross-calibration of wave buoys based on significant wave height of altimeters", *Remote Sensing*, 2020.

Thèses de doctorat

Aleksovska, I. : « Améliorer les prévisions à court et moyen termes des modèles agronomiques en prenant mieux en compte l'incertitude des prévisions météorologiques. » Université de Toulouse, 2020.

Cluzet, B.: "Assimilation of space-borne snowpack shortwave reflectances and in-situ snow depths into spatialised ensemble simulations of the seasonal snow cover". Université de Toulouse, 2020.

Cussac, M. : « La composition chimique de la haute troposphère : étude de l'impact des feux de biomasse et des processus de transports verticaux avec le modèle MOCAGE et les mesures IAGOS. » INPT, Toulouse, 2020.

Destouches, M. : « Prise en compte des hydro-météores dans un schéma d'assimilation variationnel ensembliste appliqué au modèle de prévision AROME. » Université de Toulouse, 2020.

Erdmann, F.: "Preparation for the use of Meteosat Third Generation Lightning Imager observations in short-term numerical weather prediction". Université de Toulouse, 2020.

Guinaldo, T. : « Paramétrisation de la dynamique lacustre dans un modèle de surface couplé pour une application à la prévision hydrologique à l'échelle globale. » INPT, Toulouse, 2020.

Hamidi, Y. : « Détection de la texture des précipitations et des nébulosités avec des méthodes d'apprentissage statistique : application aux prévisions du modèle Arome. » Université de Toulouse, 2020.

Mandement, M. : « Apport des données d'objets connectés pour l'étude de la convection profonde à fine échelle. » INPT, Toulouse, 2020.

Rigal, A. : « Déformation des cycles saisonniers de variables climatiques. » Université de Toulouse, 2020.

Rocher, M. : « Evaluation des pratiques agricoles comme levier d'action contre le réchauffement climatique : apport de la modélisation à l'échelle globale. » INPT, Toulouse, 2020.

Sassi, Z. : « Apport de la synergie des observations satellitaires pour la définition de la température de surface en prévision numérique. » Université de Toulouse, 2020.

Shamambo, D. : « Assimilation de données satellitaires pour le suivi des ressources en eau dans la zone Euro-Méditerranée. » Université de Toulouse, 2020.

Speck, D. : « Prévisibilité des fortes précipitations aux échéances infra-saisonnières sur le Pacifique Sud-Ouest tropical. » INPT, Toulouse, 2020.

Habilitation à diriger des recherches soutenue en 2020

Chambon P., 2020 : « Apport des observations spatiales pour l'estimation et la prévision des précipitations tropicales »

Decharme B., 2020 : « Contribution à la modélisation des surfaces continentales pour l'échelle globale »

Raynaud L., 2020 : « Représentation des incertitudes en Prévision Numérique du Temps : de l'état initial aux applications »

Vidot J., 2020 : « Modélisation du transfert radiatif rapide pour la Prévision Numérique du Temps »

Glossaire

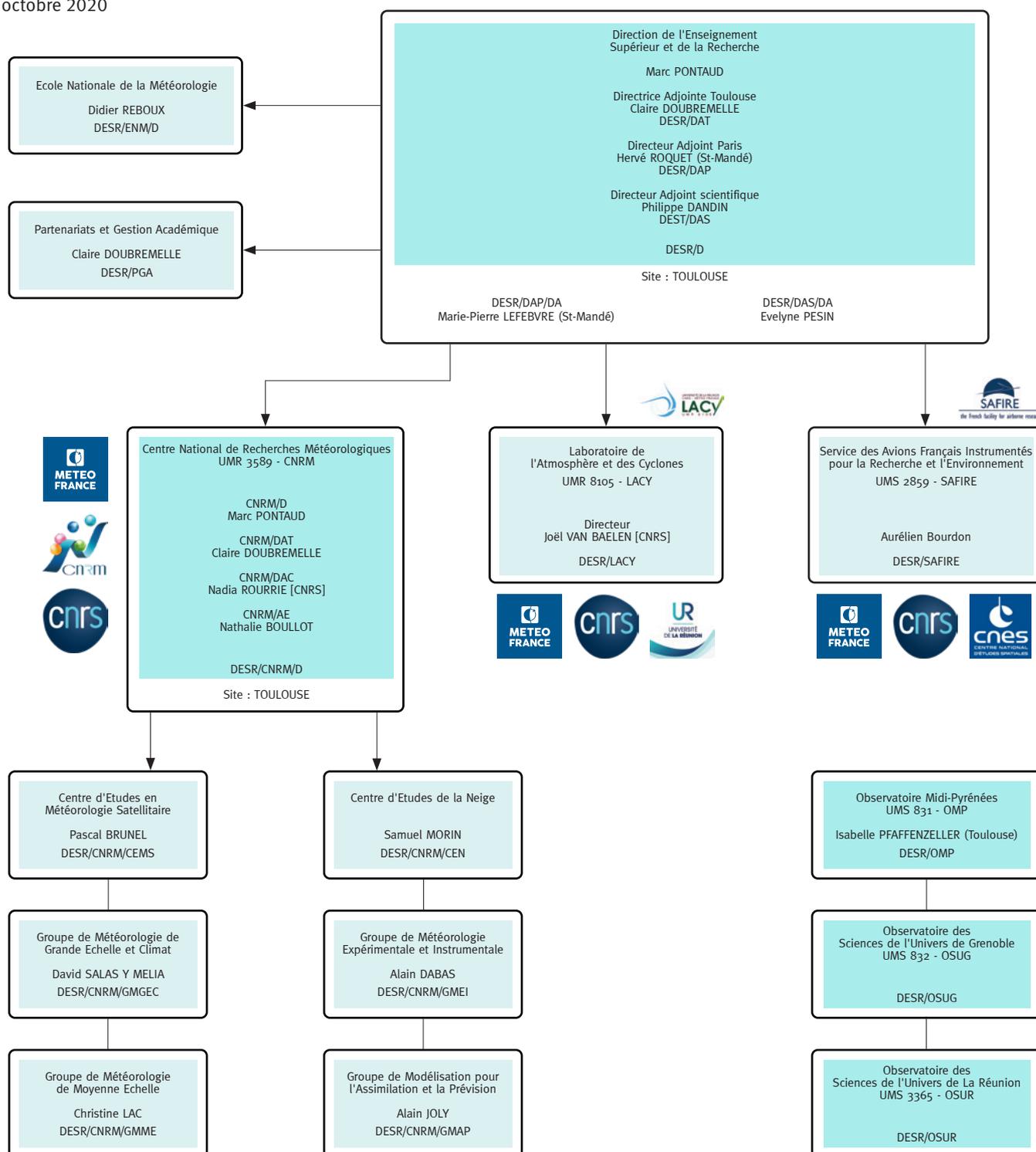
3DnVar	Schéma d'assimilation variationnel ensembliste tridimensionnel	CNRM-ESM2-1	Modèle du système Terre
4DnVar	Schéma associant l'approche variationnelle utilisée traditionnellement à Météo-France aux approches ensemblistes utilisées	CNRM-RCSM6	sixième version du système couplé de modélisation régionale
ADAMONT	Impacts du changement climatique et adaptation en territoire de montagne	CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	CO	Monoxyde de Carbone
ADM	Atmospheric Dynamics Mission	COMSI	Comité scientifique
ADT	suivi autonome de la détresse	COPERNICUS	European Earth observation system http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología (Espagne)	CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
AEOLUS	Atmospheric Explorer Observations with a Lidar UV System	CROCO	modèle d'océan
AERIS-GEO	Aerosol and surface albedo Retrieval Using a directional Splitting method-application to GEOstationary data	CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.
AFAI	Alternative Floating Algae Index	CTRIP	CNRM-Total Routing Integrated Pathway
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational	DACCIWA	Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa
ALPHA	Algorithmes et modèles pour la Production Homogène globale	DCSC	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer	DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
ANR	Agence Nationale de la Recherche	DESR	Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
AOS	Aérosols Organiques Secondaires	DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à MésO-Échelle	DGSCGC	Direction générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise
AROME-PI	Configuration AROME Prévision Immédiate	Dianeige	bureau d'études spécialisé dans l'aménagement touristique de la montagne
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle	DIRAG	Direction Inter-Régionale Antilles Guyane
ASCAT	Advanced SCATterometer	DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	DRE	Effet radiatif direct
BIO Maïdo	Bio-physicochemistry of tropical clouds at Maïdo	DRIAS	Portail d'accès à des données climatiques
BSC	Barcelona Supercomputing Center	DSM	Direction des Services Météorologiques
BSRN	Baseline Surface Radiation Network	DSO	Direction des Systèmes d'Observation
C3S	Copernicus Climate Change Service	DSSF	Downwelling surface short-wave radiation flux
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization	DWD	service météorologique allemand
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
CAMS	projet Européen Copernicus	EcRad	code de transfert radiatif
CART	Classification And Regression Trees	ECUME	ECUME paramétrisation des vagues
CAT	Clear Air Turbulence, Turbulence en Air Clair	EDMF	Eddy-Diffusivity-Mass-Flux
CCM-I	Chemistry-Climate Model Initiative	EDR	Eddy Dissipation Rate
Cedre	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux	ENSO	El Nino Southern Oscillation
CEMS	Centre d'Etude en Météorologie Satellitaire	EOF	Fonction Orthogonale Empirique
CEN	Centre d'Etudes de la Neige	ERA	European Re-Analysis
CENPERM	Center for Permafrost, University of Copenhagen	ESA	European Space Agency
CEPMNT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	ESGF	Earth System Grid Federation,
CFOSAT	Chinese-French SATellite	EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
CLA	Couche Limite Atmosphérique	EUREC4A	Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate
CLIMSNOW	Adaptation au changement climatique et projections de l'évolution de enneigement	EUROCORDEX	Modèle régional de climat
CMCC	Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique (Italie)	EUSPA	l'Agence du programme spatial de l'Union européenne
CMIP	Coupled Model Intercomparaison Project	FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
CMIP6	Climate Models Intercomparison Project n°6	FTP	File Transfert Protocol
CMO	Couche Limite Océanique	GADSS	système global du programme mondial de sécurité aérienne
CNES	Centre National d'Études Spatiales	GCM	Modèle de circulation Générale
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques	GELATO	Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean
CNRM-CM6	Version 6 du Modèle de Climat du CNRM	GEO	Group on Earth Observations
		GEO-rng	ceinture géostationnaire
		GET	laboratoire de Géosciences Environnement Toulouse
		GHER	GeoHydrodynamic and Environmental Research
		GHF	Green House Gases

GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat	MFWAM	Météo-France Wave Model
GIRAFE	capteur Gravimétrique Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarqué	MJO	Madden-Julian Oscillation
GLDB	Global Lake DataBase	Mlake	Modèle de bilan de masse des lacs
GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision	MOCAGE	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale	MODCOU	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.
GNSS	systèmes mondiaux de navigation par satellite	MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)
GOES	Satellites météorologiques géostationnaires américains	MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbure
GPCP	Global Precipitation Climatology Project	MRIR	Medium Resolution Infrared Radiometer
GSMA	association internationale d'opérateurs télécoms	MSG	Météosat Seconde Génération
GSX	partenaire de Météo-France exploitant l'outil PROSNOW	MSU	Microwave Sounder Unit
GTG	Graphical Turbulence Guidance	MSTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
HAMSTRAD	H2O Antarctica Microwave Stratospheric and Tropospheric Radiometer	MTG	Météosat Troisième Génération
HCERES	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	MTG-I	Meteosat Third Generation – Imager
HCL	Hauteur de Couche Limite	MUST	Expérience climat urbain
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	MW	Micro Ondes
HITRAN	High-resolution TRANsmission molecular absorption database	MWR	radiomètre micro-ondes
HOMONIM	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins	NCAR	National Center for Atmospheric Research
HRIR	High Resolution Infrared Radiometer	NEMO	Nucleus for European Modelling of Ocean
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model	NEPHELAE	Network for studying Entrainment and microPHysics of cLOUDs using Adaptive Exploration
HyMeX	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment	NH3	formule de l'ammoniac
IAGOS	In-service Aircraft for Global Observing System	NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge	NWCSAF	Satellite Application Facility for Nowcasting
ICE3	Schéma de nuages	OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
ICICLE	Campagne de mesures	OAD	Outils d'Aide à la Décision
IFPEN	Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles	OASIS-MCT	Coupleur
Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER	OLCI	capteur satellitaire
IFS	Integrated Forecasting System	OMM	Organisation Météorologique Mondiale
IGE	Institut des Géosciences de l'Environnement	ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique	OPAR	Observatoire de Physique de l'Atmosphère de la Réunion
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement	OPG	Orages Points de Grille
IODC	Indian Ocean Data Coverage	OSTIA	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)	PANGAEA	Base de données climat
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace	PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège
IR	Infra Rouge	PI	Prévision Immédiate
IRD	Institut de Recherche pour le Développement	PM10	PM10 (particules aérosols de moins de 10 microns) ca
IRIS	InfraRed Interfometer Spectrometer	PNT	Prévision Numérique du Temps
ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère	PROSNOW	Provision of a prediction for Snow management
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut	RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu
LA	Laboratoire d'Aérodologie	RCM	Modèle de Climat Régional
LACY	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105	RCP	Representative Concentration Pathway
LAMP	Laboratoire de Météorologie Physique	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
LARGE	Laboratoire de recherche en géosciences et énergie	ReNov'Risk	Recherche intégrée et innovante sur les risques naturels : Impact Météorologique et Océanographique des Cyclones Tropicaux sur les territoires du Sud-Ouest de l'Océan Indien
LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales	RGB	Red Green Blue (satellite)
LBLRTM	Line-By-Line Radiative Transfer Model	RHT	Relative Humidity Threshold
LEFE	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »	ROC	Relative Operating Characteristic curve
LIAISE	Land surface Interactions with the Atmosphere over the Iberian Semi-arid Environment	RTTOV	Radiative Transfer for TOVS
LIDAR	light detection and ranging	S2S	Sub-seasonal to Seasonal
LIMA	schémas microphysiques	SAF NW	Satellite Application Facility on support to Nowcasting
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique	SAF OSI	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice
LMI	Lifetime Maximum Intensity	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
LSA	Land Surface Analysis	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	SAR	Synthetic Aperture Radar
MAP-IO	Marion Dufresne Atmospheric Program – Indian Ocean	SBG	Subgrid (phénomènes sous-grille)
MCT	Modèle de Chimie Transport	SBUV-MOD	Solar Backscatter UltraViolet -Merged Ozone Dataset
MEB	Multi-Energy-Balance	SCARBO	Space CARBon Observatory
MEDSCOPE	Mediterranean Services Chain based On climate Predictions	SDI	Sahara Dust Index
Megha-Tropiques	Satellite franco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale	Sentinel-2	satellite optique Sentinel-2
MERCATOR-OCEAN	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle	SEsar	Single European Sky ATM Research
MERIT-DEM	Modèle Numérique de terrain	SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
MERIT/HYDRO	Modèle Numérique de Terrain à haute résolution	Shom	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
MESO-NH	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique	SIRS	Satellite InfraRed Spectrometer
METAR	METEorological Aerodrome Report	SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
METOP	METEorological Operational Polar satellites	SMMR	Scanning Multichannel Microwave Radiometer
		SOFOG3D	SOuth westFOGs 3D (compréhension des processus de petites échelles pour améliorer les prévisions du brouillard)
		SOLOMN	Réseau de données météorologiques
		SOOI	Sud-Ouest Océan Indien
		SROCC	Rapport Spécial sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat Changeant

SRON	Space Research Organisation Netherlands	TIROS	Television InfraRed Operational Sounder
SSM	Special Sensor Microwave	TRIP	Total Runoff Integrating Pathways
SSP	Shared Socio-economic Pathway	TRL	Technology Readiness Level
SURFEX	code de SURFace EXternalisé	TSM	Températures de Surface de la Mer
SURFEX/Flake	Modèle d'évaporation	UERRA	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
SWI	Soil Wetness Index	UK	United Kingdom
SWIM	Surface Wave Investigation and Monitoring	UMR	Unité Mixte de Recherche
SYNOP	Données d'observations issues des messages internationaux d'observation en surface	UTC	Temps universel coordonné,
TACTIC	schéma interactif d'aérosols	UTLS	Haute Troposphère Basse Stratosphère
TAF	Terminal Aerodrome Forecast	VAAC	Volcanic Ash Advisory Centre
TCCON	Total Carbon Column Observing Network	VIIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
TEB	Town Energy Balance	WASP	Wave-Age dependent Stress Parameterization)
TEMSI	TEMps Significatif (aéronautique)	WIRE	Winter Risks for Energy
THIR	Temperature-Humidity Infrared Radiometer	WMO/UNEP	World Meteorological Organization / United Nations Environment Program

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

1^{er} octobre 2020

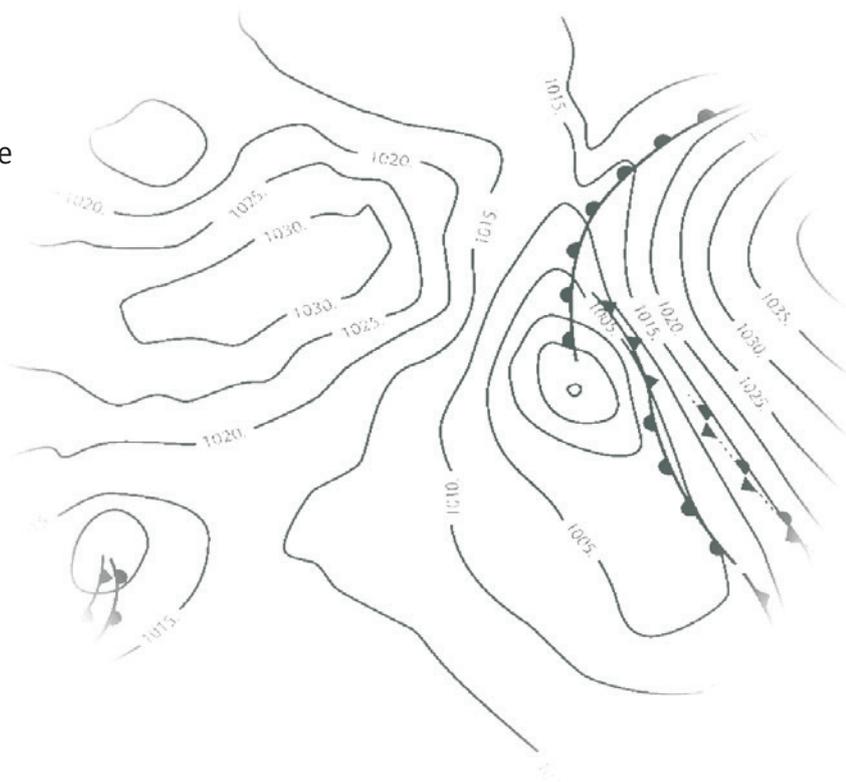


Météo-France

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 2021
Copyright juin 2021
ISSN : 2116-438X