

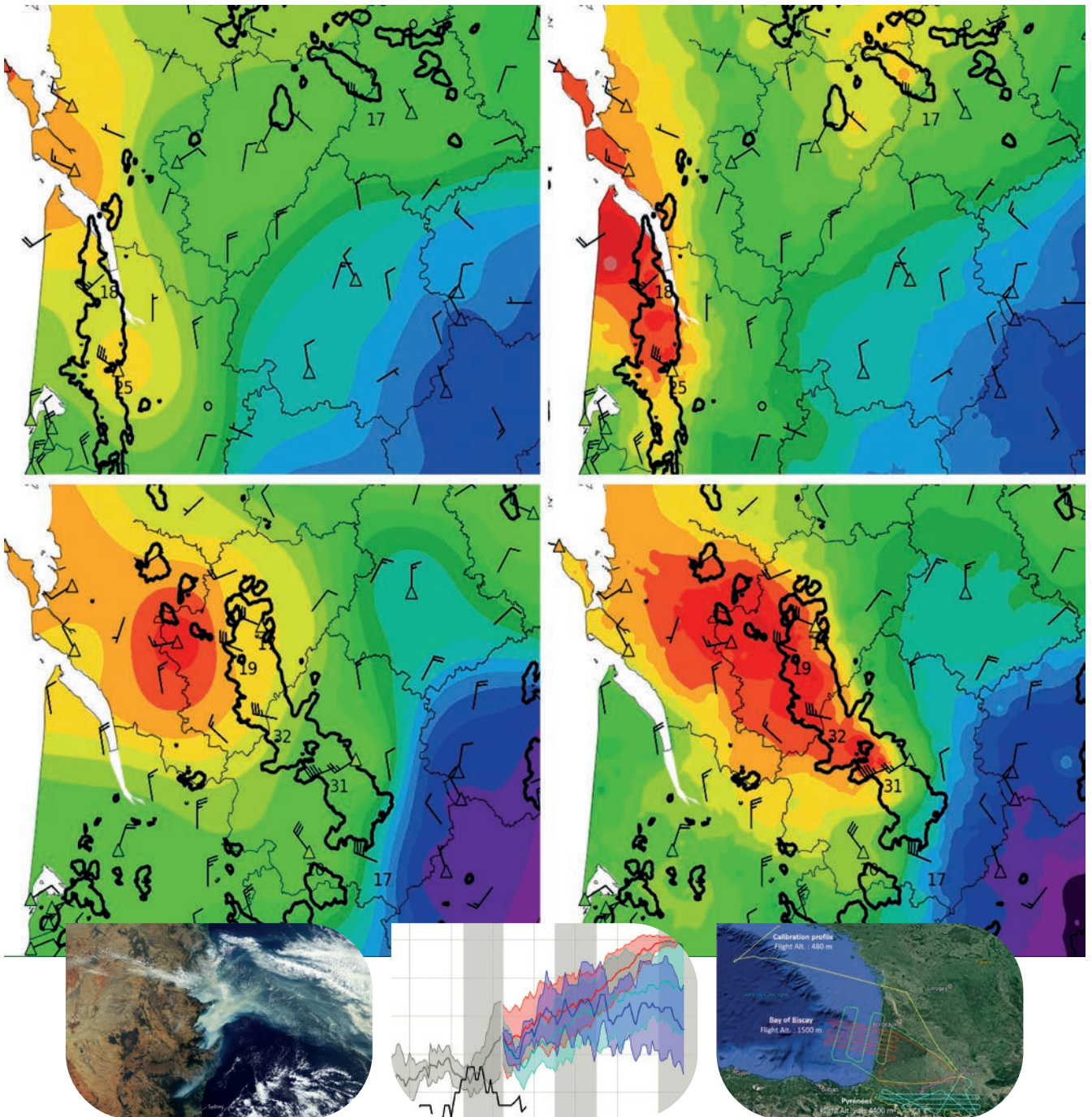


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



METEO
FRANCE



Rapport **Recherche** 2019

Rapport Recherche 2019

Sommaire

Prévision numérique du temps et assimilations 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 34

Océanographie ● page 38

Techniques, campagnes et produits d'observation ● page 42

Techniques et produits d'observation
Campagnes de mesures

Recherche et aéronautique ● page 50

Annexes ● page 54



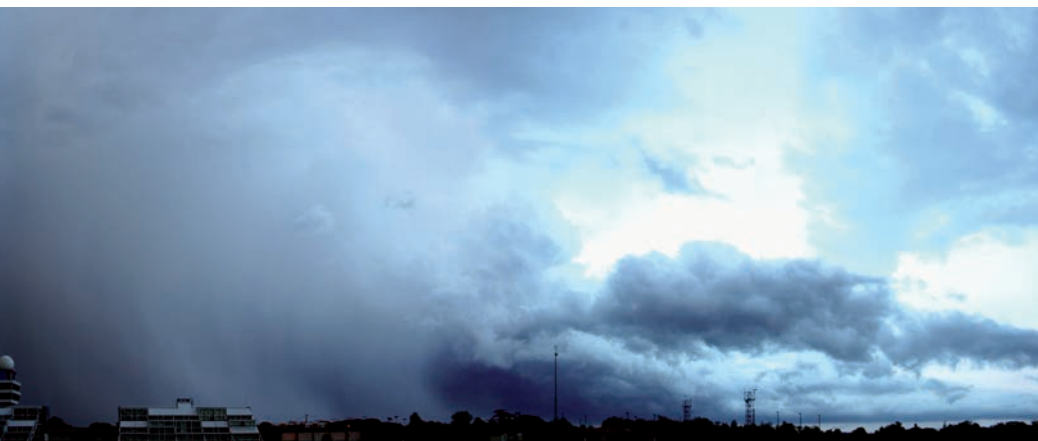
La recherche occupe une place privilégiée au sein de Météo-France tant elle vient en support à l'ensemble des métiers de l'établissement. Elle est la source des progrès qui sont ensuite mis en œuvre en matière d'observation, de prévision numérique du temps et du climat. Elle permet à l'établissement 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.

Elle a été guidée durant toutes ces dernières années par le document « Stratégie Scientifique Météo-France 2013-2020 ». L'année 2019 a donc été celle de la réflexion pour construire les grandes orientations scientifiques de l'Etablissement pour la nouvelle décennie 2020-2030. Cette Stratégie Scientifique 2020-2030 a été discutée au sein du COMSI (Comité Scientifique) 2019 de Météo-France. Les débats très nombreux ont permis d'enrichir une nouvelle version qui sera finalisée courant 2020. L'année 2019 aura été aussi l'année de l'évaluation HCERES de l'Unité Mixte de Recherche CNRM qui est l'entité majeure et essentielle de recherche de Météo-France. Un gros effort a été fourni par les membres du CNRM. L'évaluation très positive du Comité HCERES est un encouragement à poursuivre dans les axes scientifiques proposés et ses précieux conseils devront être pris en compte.

Au niveau international, Météo-France souhaite amplifier sa politique de coopération privilégiée avec le CEPMMT autour du modèle global Arpège/IFS et consolider le rapprochement avec les consortiums Aladin et Hirlam au sein desquels les développements des modèles régionaux à haute résolution sont partagés. Par ailleurs, Météo-France

poursuit sa politique de participation active aux programmes d'Eumetsat et de l'ESA et à la valorisation des différentes missions spatiales. On pense en particulier à la valorisation d'ADM-Aeolus (assimilation des profils de vent dans le modèle global), de CFOSAT (assimilation des observations de vagues dans le modèle d'état de surface de la mer) mais aussi à la préparation des futurs satellites MTG et METOP-SG qui embarqueront de nouveaux instruments à fort potentiel. Météo-France poursuit également sa forte participation aux projets européens dont Copernicus.

Au niveau national, Météo-France maintient 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. Le programme MISTRALS, avec en particulier le chantier HyMeX qu'a soutenu particulièrement Météo-France pour son intérêt pour la prévision des évènements méditerranéens, touche à sa fin. Le succès de ce programme est déjà garanti tant les retours scientifiques sont positifs. L'Etablissement est également 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 à la construction des Infrastructure 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. Météo-France soutiendra également aux côtés des organismes tutelles de SAFIRE, le CNRS et le CNES, les démarches mises en œuvre pour le remplacement de l'avion de recherche haute altitude Falcon 20.



Au niveau de ses priorités internes, Météo-France accentuera l'orientation à long terme de ses différents outils numériques vers un système unique « sans couture » de la méso-échelle au global, intégrant tous les compartiments du Système Terre : atmosphère, vagues, océan, banquise, surfaces continentales incluant l'hydrologie, composition chimique de l'atmosphère, et cycle du carbone pour le climat. La première priorité est de mettre en place un système d'assimilation conjoint « atmosphère – surfaces continentales » afin de tirer pleinement partie de nos savoirs faire sur la surface au bénéfice de la prévision numérique du temps. L'ensemble des principaux travaux conduits dans les deux UMR CNRM et LACy, ainsi que dans les directions thématiques de l'Etablissement est détaillé dans le présent document. On peut néanmoins mentionner les axes majeurs que sont la prévision des événements fortement précipitants, phénomènes à fort impact pour nos régions méditerranéennes, la prévision des cyclones, la prévision du brouillard, phénomène à enjeux pour l'aviation civile et qui a fait l'objet d'une campagne dédiée au cours de l'hiver 2019-2020. A l'autre bout du spectre, sous la houlette du GIEC, le CNRM réalise les simulations de l'exercice CMIP-6 avec une nouvelle version du modèle climatique CNRM-CM6 et un modèle Système Terre incluant le cycle du carbone CNRM-ES. Il s'agit aussi de prendre en compte les perspectives offertes par l'intelligence artificielle, afin de mieux valoriser les prévisions d'ensemble, et de tirer le meilleur parti des nombreuses observations des objets connectés, pour aujourd'hui mieux observer et comprendre les phénomènes d'échelle hectométrique, et demain mieux les prévoir.

Dans la perspective de l'exascale, Météo-France participera à la dynamique européenne pour l'élaboration d'un cadre de modélisation adapté aux futures architectures des supercalculateurs. Pour l'heure, Météo-France, qui a vu une montée en puissance de ses calculateurs en 2016 (2 x 2,5 Pflops), constate, à la fois avec satisfaction mais aussi inquiétude, que la mise en œuvre de toutes les avancées scientifiques amène à une saturation des deux machines. Le projet de renouvellement de nos moyens de calculs en 2020, mais également nos moyens de stockage en 2021 sont des enjeux majeurs, pour continuer à convertir nos travaux de recherche en progrès de nos systèmes numériques, et in fine, pour toujours mieux prévoir et prévenir.

Avant de conclure, il faut encore mentionner que Météo-France a souhaité, après la mise en place d'une Direction de la Recherche en 2018, associer également l'Ecole Nationale de la Météorologie, dans une seule et même Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche (DESR) pour renforcer les synergies entre enseignants et chercheurs.

Cet éditorial ne peut, ni couvrir, ni résumer, l'ensemble des sujets traités dans ce Rapport Recherche 2019. Les articles détaillés qui suivent, sont passionnants et illustrent parfaitement le large spectre de nos activités recherche, toutes essentielles à l'Etablissement et à son devenir.

Bonne lecture.

Marc Pontaud,
directeur de la Recherche

Prévision numérique du temps et assimilations de données

Représentation des corrélations spatiales d'erreur d'observation

Ce travail de recherche vise à augmenter massivement la densité spatiale des observations utilisées dans les systèmes de prévision numérique du temps ARPEGE et AROME. Cela requiert de représenter correctement les corrélations d'erreurs d'observation. Pour ce faire, on emprunte une technique au domaine de l'océanographie, la résolution d'une équation de diffusion, que l'on applique cette fois sur des maillages non structurés.

Une première étude traitant des données scalaires s'appuie sur la méthode des éléments finis. Elle permet de modéliser les corrélations horizontales des erreurs pour les données scalaires, comme les températures de brillance des données satellitaires. Cette

approche a été validée expérimentalement à partir des données de l'imageur infrarouge MSG/SEVIRI, qui sont assimilées à la fois dans ARPEGE et AROME.

On propose d'étendre cette méthode à la représentation des corrélations d'erreur de vents. Ces données sont vectorielles, c'est-à-dire que chaque point de mesure correspond à deux valeurs, zonale et méridienne. On s'intéresse particulièrement aux mesures des diffusiomètres, qui sont disponibles tous les 25km mais assimilées tous les 100km seulement.

Premièrement, on décompose le champ de vent en une composante divergente et une composante rotationnelle. Puis, on applique l'opérateur de corrélation scalaire

à chaque composante. Enfin, on reconstruit le champ de vent en respectant le caractère symétrique et positif de l'opérateur de corrélation. Expérimentalement, les résultats sont compatibles avec le modèle analytique. Dans le futur, on s'intéressera à tous les types de données, conventionnelles ou non, et l'on cherchera à étendre la méthode en trois dimensions pour traiter le cas des radars notamment.

1

Assimilation des radiances micro-ondes en ciel nuageux dans ARPEGE

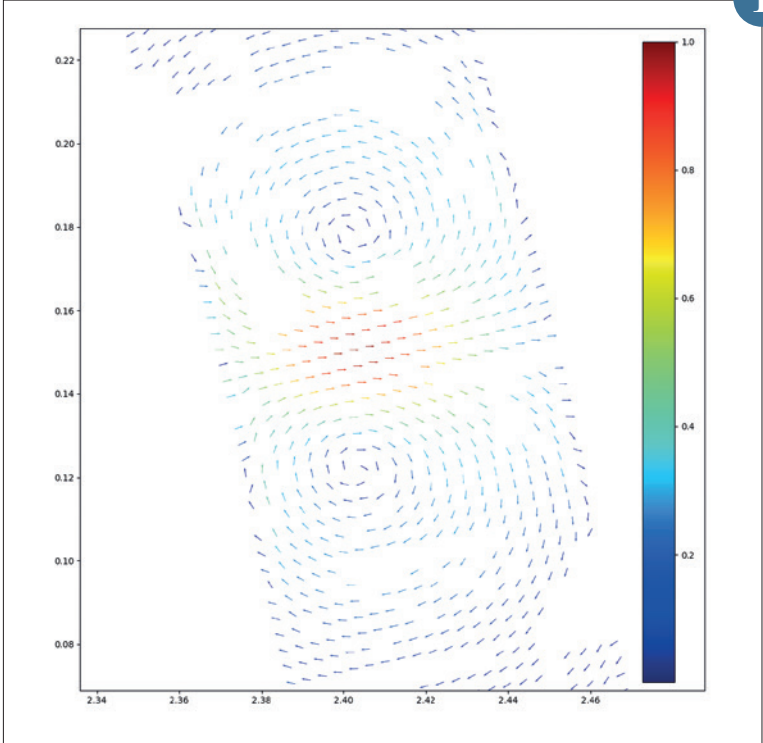
Actuellement, les données de vingt sondeurs et imageurs dans le domaine des micro-ondes à bord de satellites en orbite basse sont assimilées dans les chaînes opérationnelles de prévision numérique du temps de Météo-France. Ces observations (radiances), informatives à la fois sur la température et sur l'humidité dans l'atmosphère, sont très utiles pour contraindre les conditions initiales des modèles. Celles-ci demeurent cependant sous-exploitées car seules les observations en conditions de ciel clair sont actuellement assimilées, laissant de côté un contenu en information d'intérêt pour mieux initialiser les modèles dans les zones nuageuses et précipitantes.

Plusieurs années de travaux ont permis d'aboutir à une méthode d'assimilation pour exploiter pleinement les observations micro-ondes en zones nuageuses et précipitantes. Ces travaux permettent d'une part d'améliorer les scores de grandes échelles des prévisions du modèle global ARPEGE, et d'autre part d'améliorer ses prévisions d'événements extrêmes tels que les cyclones tropicaux. La figure montre un exemple de prévision du Typhon Shanshan dans le bassin Pacifique Ouest dont la prévision à 72 h d'échéance est améliorée d'environ 100 km par l'assimilation des radiances nuageuses du satellite franco-indien Megha-Tropiques.

Pour l'instant, la méthodologie développée a été adaptée à cinq des vingt sondeurs et imageurs disponibles. Après le passage en opérationnel de cette première vague de cinq instruments, une montée en charge progressive vers l'exploitation des vingt instruments sera menée afin de tirer tout le potentiel de la constellation d'instruments micro-ondes spatiaux disponibles.

2

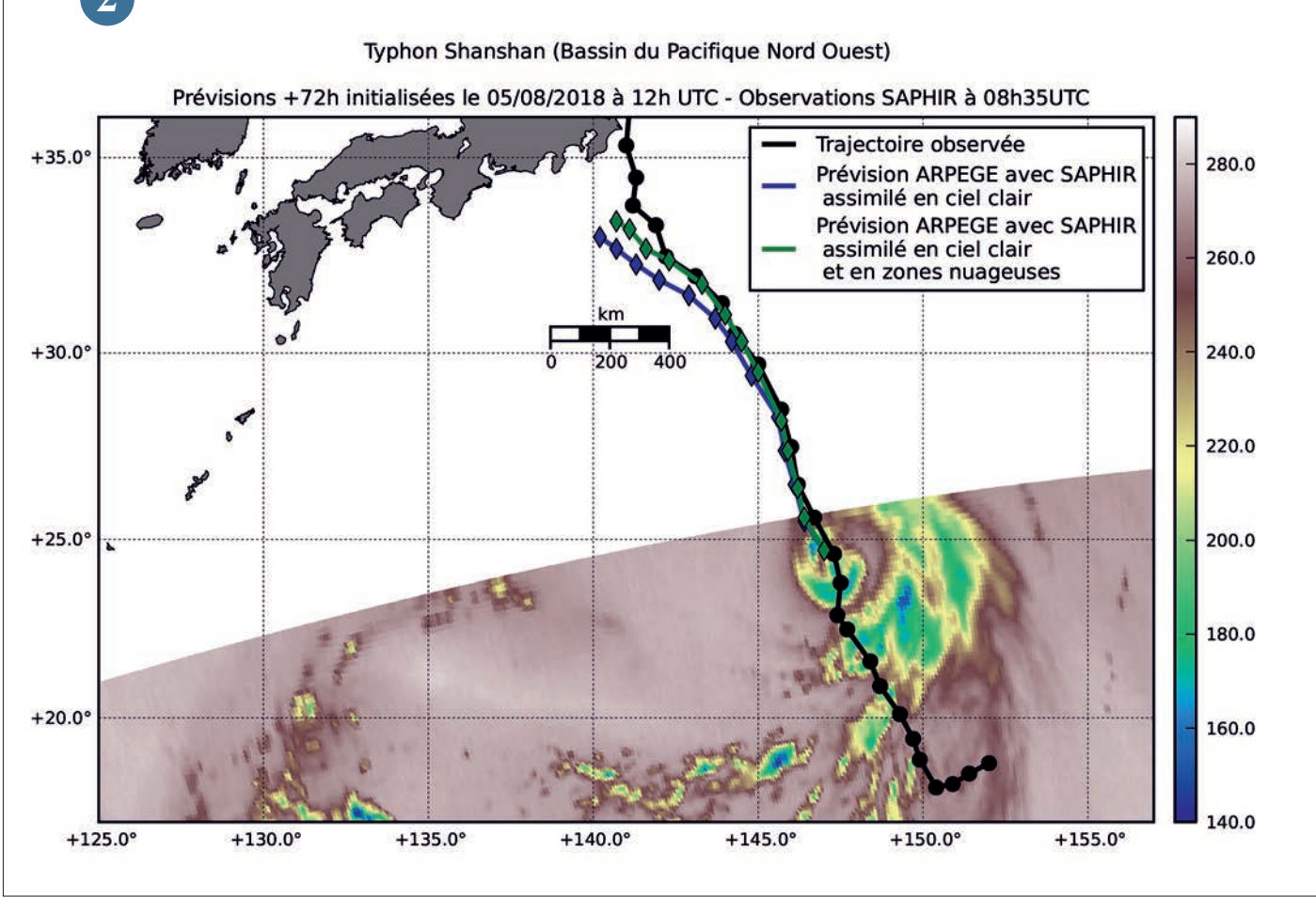
1



◀ Réponse impulsionnelle typique du modèle de corrélation de vents à une sollicitation zonale, dans le cas non divergent.

Trajectoire observée du typhon Shanshan (trait noir). Trajectoires prévues par le modèle global ARPEGE le 5 Août 2018 à 12h UTC à 72 heures d'échéance pour une version assimilant des observations micro-ondes uniquement en ciel clair (trajectoire bleue) et pour une version assimilant en plus les observations micro-ondes nuageuses du satellite Megha-Tropiques (trajectoire verte). Au Sud de la zone représentée, apparaissent les températures de brillance d'un canal de l'instrument SAPHIR à bord du satellite Megha-Tropiques. Les températures de brillance les plus froides correspondent aux zones géographiques caractérisées par de forts contenus en hydrométéores en phase solide (neige et glace).

2



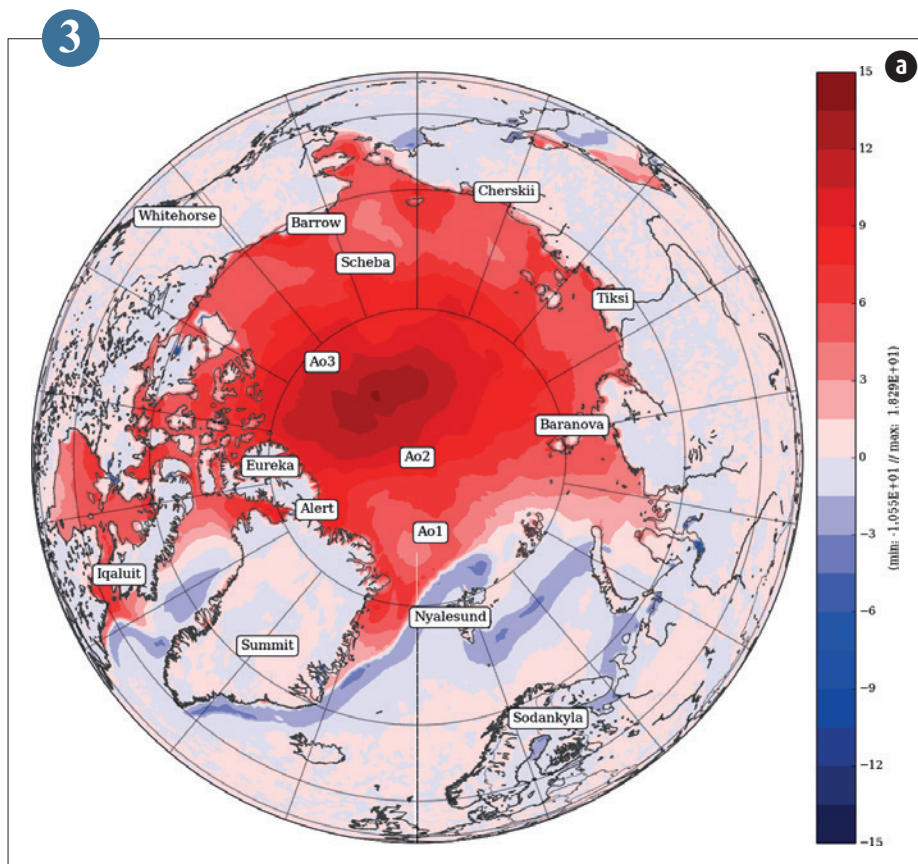
Impact d'un modèle de glace de mer pour la prévision du temps à l'échelle globale

Jusqu'à présent la glace de mer n'est pas modélisée dans les prévisions numériques opérationnelles et les températures de banquise nécessaires aux calculs des flux vers l'atmosphère et aux algorithmes d'assimilation de données atmosphériques sont issues de climatologies anciennes.

L'utilisation d'une climatologie ne permet pas une représentation réaliste de ces températures au cours de la prévision, d'une part car celle-ci peut être fortement biaisée et d'autre part car cela implique une température constante au cours de la prévision, négligeant ainsi l'existence de variations de température.

Des développements récents visent à activer le modèle de glace de mer GELATO, développé par le CNRM et utilisé jusqu'à présent dans les prévisions climatiques. Les résultats montrent un très fort impact du modèle sur les températures de banquise désormais simulées, impactant directement les températures à 2 mètres (Fig.1). De manière générale, l'activation du modèle mène à une augmentation de la température moyenne.

Des comparaisons à des données in-situ et à ERA5 (Fig.2) ont été réalisées et pointent une nette amélioration des simulations de températures à 2 m sur banquise que ce soit en termes de biais ou de variabilité.



(a) Différence de température à 2 mètres entre Arpege-Gelato et Arpege-Oper moyennée sur le mois de mars 2018.

Adaptation du schéma de convection pour la nouvelle résolution d'ARPEGE

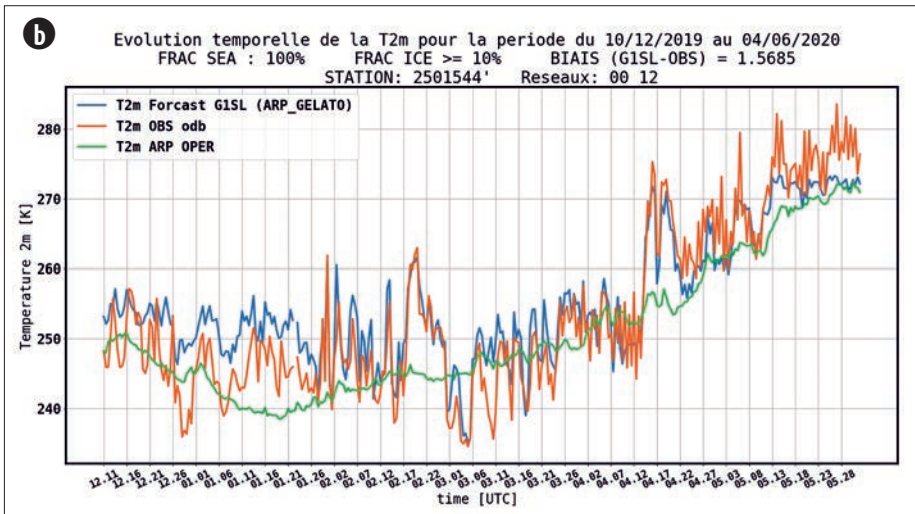
La nouvelle version du modèle de prévision ARPEGE mise en place en 2019 a vu sa résolution horizontale augmentée de 50 %, avec un risque accru des Orages Points de Grille (OPG) qui sont propres à tout système de prévision numérique du temps, par manque de mélange vertical dans le schéma de convection. Il fallait engager une action urgente et obligatoire pour pallier ce risque très gênant au quotidien pour les prévisionnistes.

Le schéma de convection actuel inclut depuis 2012 une action qui permet de limiter le nombre d'OPG. Après de nombreux tests, fausses pistes et tentatives infructueuses, les développements ont finalement concerné une augmentation de l'activité de cette action « anti-OPG », en poursuivant une piste abandonnée en 2013 qui consistait

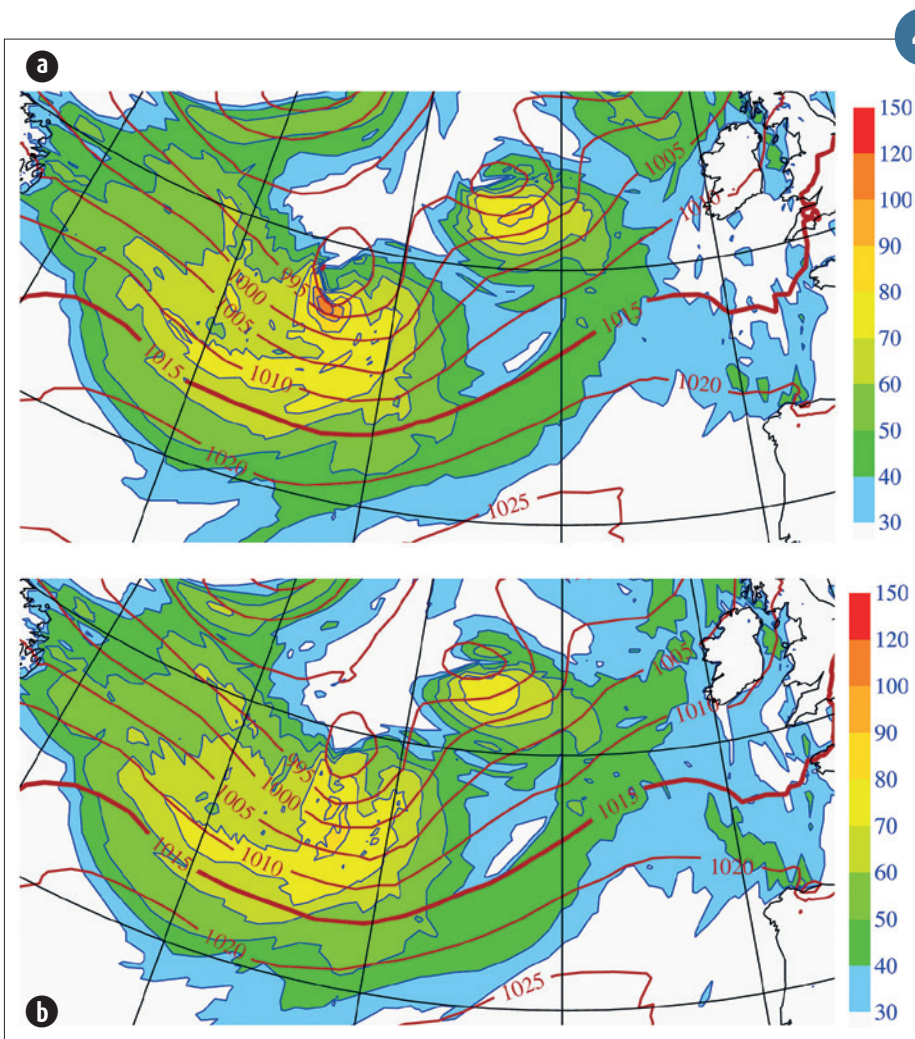
à ajouter temporairement, en entrée du schéma de la convection, l'impact de la convergence d'humidité sur l'équation de l'énergie, alors que cette action porte actuellement sur l'équation pour l'humidité. L'essentiel du travail a consisté à remédier à des oscillations parasites qui apparaissaient sous les tropiques quand on modifie l'équation de l'énergie.

On voit sur la figure « a » au centre de l'Atlantique Nord un OPG qui se traduit par un resserrement marqué des isobares et des vents moyens supérieurs à 100 km/h, devant induire des rafales plus élevées et pouvant atteindre le seuil de vigilance. On voit sur la figure « b » que la nouvelle version de l'anti-OPG permet de supprimer la zone irréaliste de vents forts et de resserrement des isobares.

Pour la suite, il ne s'agira pas de poursuivre l'amélioration de l'action « anti-OPG » pour le schéma de convection actuel, mais plutôt de se diriger vers l'utilisation d'un nouveau schéma qui puisse être de meilleure qualité et induisant moins de risque d'OPG.



◀ (b) Température à 2 mètres de décembre 2019 à mai 2020 pour la bouée 2501544 (pas de temps 6h). Configuration opérationnelle (vert), GELATO (bleu) et observation (orange).



◀ (a) Carte tracée avec le modèle ARPEGE pour la version à haute résolution de la prévision du 8 mars 2017 à 72h. Les isolignes de pression réduite au niveau de la mer (en bistre, tous les 5 hPa) sont superposées au module du vent à 10m (en plages colorées, en km/h).
 (b) La même prévision que sur la figure « a », mais avec la nouvelle version de l'anti OPG

Nouvelle formulation plus stable pour la dynamique non-hydrostatique d'AROME

Bien qu'ayant largement fait ses preuves en prévision numérique du temps aux échelles kilométriques, le schéma de discrétisation temporelle semi-implicite dit à « coefficient-constant », couramment employé dans le modèle de prévision opérationnelle AROME, pourrait souffrir de sérieuses insuffisances à des résolutions sub-kilométriques mettant en jeu de fortes pentes orographiques. En effet, la possible incohérence de traitement de la condition à la limite inférieure entre le modèle non-linéaire explicite et l'opérateur linéaire semi-implicite supposé homogène horizontalement, ainsi que l'absence de traitement implicite de certains termes métriques résultant de la transformation en coordonnée verticale épousant le relief, pourraient mettre en danger la robustesse du schéma à très haute résolution. Une solution permettant d'amoindrir ces effets déstabilisants sans pour autant remettre en question l'hypothèse « coefficient-constant » a été mise au point. Elle consiste tout d'abord en l'utilisation d'une nouvelle variable pronostique assurant automatiquement la cohérence du traitement spatio-temporel de la condition à la limite inférieure, puis à la construction d'un nouvel opérateur linéaire semi-implicite incorporant une information pertinente les pentes du relief en présence. La formulation qui en résulte conduit à un gain substantiel en terme de stabilité pour le schéma d'intégration du modèle AROME.

5

Analyse orientée processus d'AROME-OM Antilles

L'objectif est d'étudier la capacité d'AROME-OM à représenter les différents régimes nuageux (profond, peu profond, précipitant ou pas) et les types de temps (saison sèche / humide, intensité des alizés) ainsi que leurs systèmes d'organisation les mieux représentés dans le modèle.

Depuis février 2016, le modèle AROME-OM a été décliné sur les territoires d'outre-mer en 5 domaines avec une résolution de 2,5 km contre 1,3 km en métropole. Les questions scientifiques qui se posent en zones tropicales sont différentes : i) dans quelle mesure cette nouvelle génération de modèles améliore significativement la prévision en zone Outre-Mer ? ii) ces simulations représentent un immense réservoir de données et donc une opportunité pour étudier les processus majeurs qui gouvernent la convection peu profonde, en termes d'organisation ou de régime précipitant ou pas.

Pour analyser les performances du modèle, nous disposons de différents types d'observations, à savoir : i) 5 radiosondages essaimés sur l'arc Antillais ; ii) un site instrumenté à la Barbade doté d'instruments documentant la stratification nuageuse (<https://barbados.mpimet.mpg.de/>) ; iii) d'observations du satellite géostationnaire GOES-Est.

Le choix de la zone Antilles a aussi été motivé par le fait qu'en janvier-février 2020 se déroulera au large de l'île de la Barbade

(13N, 57W) une campagne de mesures EUREC4A (<http://eurec4a.eu/>). Au sein de notre équipe, l'objectif est de caractériser les liens entre dynamique de grande échelle, forçage en surface et les propriétés macro et microphysiques des nuages de couche limite. Pour faciliter les suivis d'évolution des biais du modèle AROME-OM Antilles, nous avons développé un site intranet (http://intra.cnrm.meteo.fr/moana/AROME_OM/). Une étude menée sur janvier-février 2018 sur le site de la Barbade montre la bonne capacité du modèle AROME-Antilles à représenter le double pic de fraction nuageuse situé respectivement à la base du cumulus et à son sommet (voir figure), associé à la présence de cumulus très peu développés et de cumulus plus épais dont les sommets peuvent attendre 3 km avec souvent la formation d'un nuage de type d'enclume à cette altitude. Ceci constitue une bonne performance pour le modèle puisqu'avec une résolution de 2,5 km, il faut souligner que les processus associés aux cumulus d'alizés restent « paramétrisés ». La base de nuages est cependant plus élevée dans le modèle (900 hPa) que celle estimée par le radar de nuages (920 hPa), ce qui peut en partie être associé à une couche limite trop froide et trop sèche.

6

Assimilation des données de vent de surface SAR (Synthetic Aperture Radar) dans AROME pour la prévision des cyclones tropicaux dans l'Océan Indien

Les capteurs actifs SAR, embarqués sur les satellites Sentinel-1A/B sont capables d'estimer, à partir de la rugosité de la surface de l'océan, l'intensité des vents de surface à haute résolution spatiale (1-3 km) sans aucun effet de seuil, ce qui représente un progrès considérable vis-à-vis des données issues des diffusiomètres ASCAT. Lors de la saison cyclonique 2018-2019, dans le cadre de la campagne ReNov'Risk, quelques dizaines d'images de cyclones tropicaux ont été acquises dans le bassin Sud-Ouest Océan Indien (SOOI) dont plusieurs capturant le mur de l'œil et les vents forts associés.

Dans un bassin où le réseau d'observations in situ est très peu dense, l'assimilation de ces données dans le modèle AROME 3D-Var Indien en mode recherche devrait avoir un impact significatif sur l'analyse et la prévision des cyclones tropicaux en terme de position, intensité et structure.

Sur les tests effectués pour le cyclone tropical IDAI, l'assimilation des données SAR produit des incréments d'analyse en vent, température et humidité en surface mais aussi en basse et moyenne troposphère, notamment dans la zone proche de l'œil du cyclone. La figure montre ainsi que la position et la structure du cyclone tropical dans l'ébauche sont corrigées grâce à l'assimilation des données SAR.

Nous explorons maintenant de nouvelles pistes pour exploiter au mieux l'information fournie par les images SAR, notamment celles pour les vents les plus forts. Une simulation couvrant une large partie de la saison cyclonique 2018-2019 dans le SOOI servira à évaluer si l'assimilation de ces données a statistiquement un impact positif sur l'analyse et la prévision des cyclones tropicaux.

7

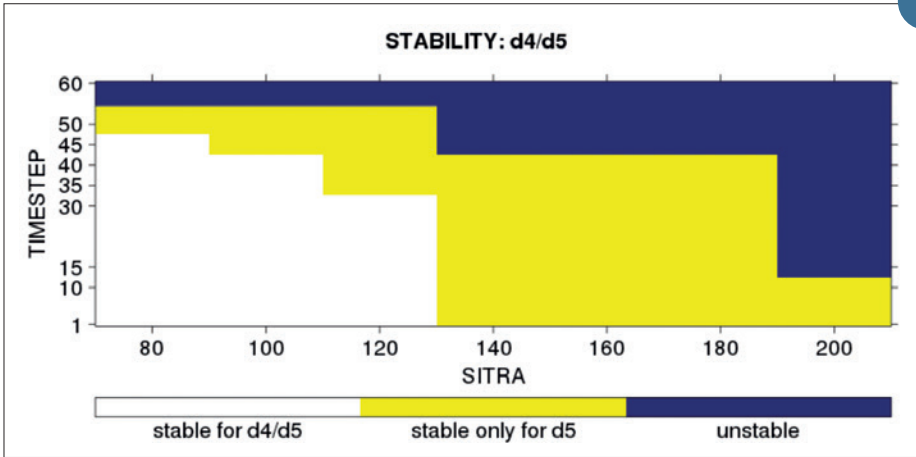
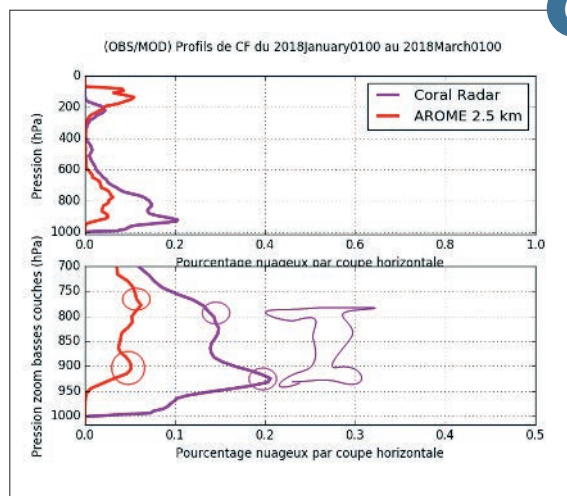
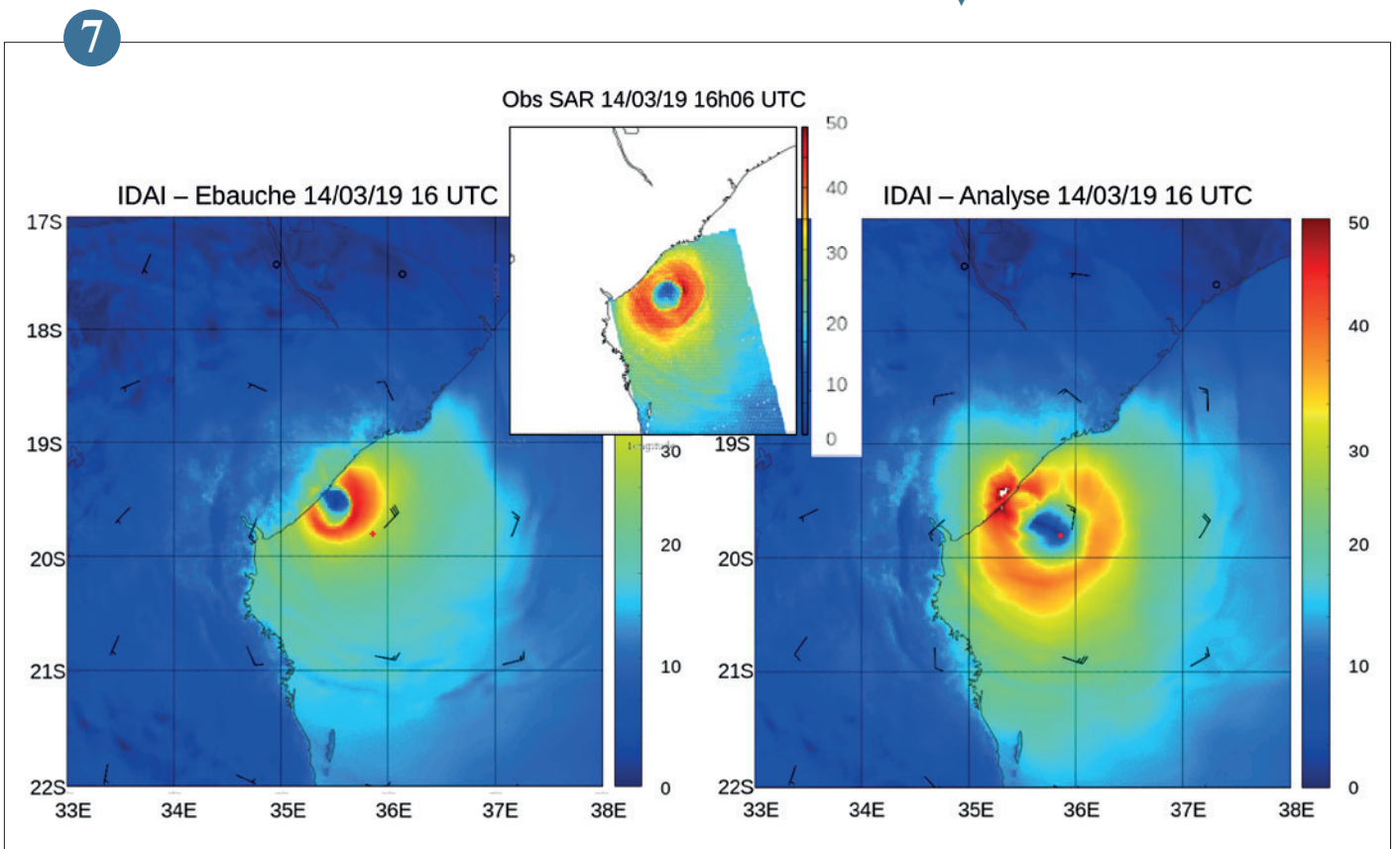


Diagramme de stabilité comparant la formulation actuelle « d4 » à la nouvelle formulation appelée « d5 » sous des paramètres numériques similaires. Ce résultat est issu d'une série d'expériences AROME à 375 m de résolution horizontale sur un domaine comprenant les montagnes des Alpes avec une pente maximale observée de 57 °. Le schéma météorologique choisi correspond à des vents forts traversant les Alpes à la date du 3.10.2015. Les calculs sont réputés stables si le cycle se termine après 24 heures de prévision.



Profil vertical du pourcentage nuageux issu d'AROME-OM (rouge) et des observations radar (violet).

Vents de surface (en m/s) modélisés par AROME 3D-VAR Indien le 14 mars 2019 à 16 UTC à l'ébauche (à gauche) et à l'analyse (à droite) pour le cyclone tropical IDAI. Au milieu, vents de surface issus d'une image SAR acquise le 14 mars 2019 à 16h06 UTC. La position du centre du cyclone estimée par le CMRS La Réunion est repérée par la croix rouge.



Identification des cyclones tropicaux par apprentissage profond

L'identification automatique des cyclones tropicaux dans les sorties des modèles de prévision numérique du temps existe depuis la fin des années 80 ; elle est utile pour apporter de l'information à la fois en temps réel, comme la trajectoire prévue ou l'extension des vents les plus forts, et également après l'évènement à des fins d'évaluation de ces modèles. Ces algorithmes reposent sur l'identification d'un centre, à partir duquel sont déduites d'autres caractéristiques, comme le rayon du vent maximal qui traduit la taille de l'œil du cyclone.

Une nouvelle approche, basée sur un réseau de neurones convolutionnel, est en développement au CNRM. Elle consiste à identifier directement la structure des cyclones prévus, sans connaissance préalable du centre. Actuellement sont traitées la zone des vents maximaux et celle des vents dépassant 120 km/h (force 12).

Une base d'apprentissage de 150 cas de cyclones, présentant des caractéristiques variées, a été créée manuellement à partir des prévisions du modèle Arome-Antilles. Ces

données ont permis d'obtenir une première version d'un réseau capable d'identifier un cyclone à partir de deux champs prévus par AROME : la force du vent à 10 m et le géopotential à 850 hPa. Les structures obtenues sont proches de celles labellisées à la main, y compris lorsque deux cyclones sont présents simultanément (cf. figure, cyclones Irma et Jose). L'application directe de ce réseau sur les sorties AROME-Indien a également fourni des identifications satisfaisantes.

Ces résultats prometteurs vont être étoffés en 2020. Il s'agira notamment de consolider la base d'apprentissage, d'entraîner le réseau pour traiter les prévisions d'autres modèles, et de développer un module de suivi temporel. À terme, cette approche d'identification et de suivi des cyclones pourra être utilisée en opérationnel, avec à la clé un temps de calcul réduit et la possibilité de créer des produits innovants pour la prévision probabiliste des cyclones.

8

Prévisions de zones convectives avec PEARP

Un nouveau diagnostic de présence convection profonde, risque majeur pour le transport aérien, a été mis au point en sortie de la prévision d'ensemble Arpege (PEARP). Ce produit est la synthèse de plusieurs travaux de recherche récents. Il s'appuie en premier lieu sur le diagnostic de pression au sommet des nuages convectifs en sortie des différentes versions d'Arpege. Ce diagnostic est produit de façon opérationnelle depuis le 2 juillet 2019.

L'information donnée par les 35 champs de pression à chaque échéance de la PEARP est ensuite synthétisée à l'aide de la méthode des similarités développée au CNRM. Cette méthode détecte des structures ou des « objets » physiquement cohérents. Cette représentation permet de se détacher de la grille sous-jacente, elle est de plus définie

dès l'origine pour prendre en compte les incertitudes : ainsi, le bord, limite entre « intérieur » et « extérieur » de l'objet, est d'épaisseur variable (ou flou) pour traduire cette incertitude. Elle permet d'obtenir des cartes de probabilité de présence d'un objet convectif de différents niveaux de sévérité. On passe donc de 35 séries de valeurs ponctuelles aux nœuds d'une grille à de petites collections de structures hiérarchisées à la fois par intensité et par probabilité de présence. L'approche présente en effet un grand pouvoir de zonage automatique, comme lorsque l'on dessine une carte TEMSI à la main.

Ces travaux sont conduits dans le cadre de l'initiative européenne SESAR.

10

Extension du modèle de transfert radiatif RTTOV à l'infrarouge lointain pour la mission FORUM

Le modèle de transfert radiatif RTTOV utilisé principalement en assimilation des observations satellitaires dans les gammes spectrales de l'infrarouge (3 - 20 μm) et des micro-ondes (20 - 200 GHz) a été récemment étendu aux longueurs d'ondes de l'infrarouge lointain jusqu'à 100 μm , rapprochant ainsi les deux gammes spectrales de l'infrarouge et des micro-ondes.

Ces travaux ont été développés dans le cadre des études préparatoires à la future mission spatiale FORUM (Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring) qui a été récemment sélectionnée pour être la 9^e mission exploratoire d'observation de la Terre de l'Agence Spatiale Européenne, dont le lancement est prévu en 2026, et qui volera conjointement avec Metop-SG.

L'instrument hyperspectral FORUM mesurera les luminances au sommet de l'atmosphère entre 100 et 1600 cm^{-1} (équivalent à 6.7 et 100 μm) avec un échantillonnage spectral de 0.5 cm^{-1} (voir la figure en température de brillance pour des cas en ciel clair et en ciel nuageux sous trois incidences avec une température de surface de 292 K et une épaisseur optique du nuage de glace de 2 à 10 μm).

Pour simuler ces observations, RTTOV a été adapté dans toutes les composantes du transfert radiatif : absorption gazeuse à l'aide du modèle raie-par-raie LBLRTM, propriétés optiques des nuages et des aérosols à partir des modèles existants et émissivité de surface. Il est intéressant de noter que ces futures observations permettront de valider plusieurs inconnues de la modélisation du transfert radiatif dans l'infrarouge lointain comme par exemple la spectroscopie de la vapeur d'eau, la dépendance en température des propriétés de diffusion des cristaux de glace et les émissivités des surfaces dans les zones polaires.

9

Prévision d'ensemble de scénarios de pluie pour anticiper les crues rapides (projet PICS)

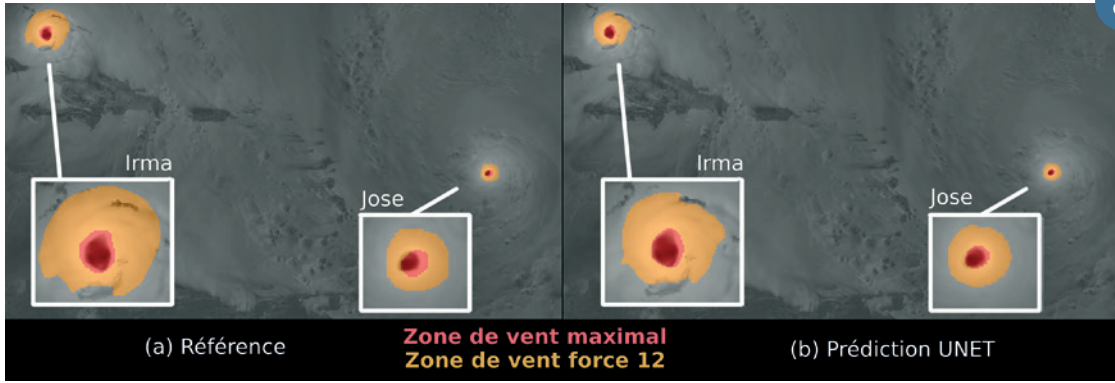
La prévision des crues rapides est aujourd'hui souvent effectuée à l'aide d'observations de précipitations et de hauteurs d'eau. Pour améliorer l'anticipation de ces phénomènes, il faut disposer de scénarios de pluies prévues à haute résolution, sous une forme adaptée au forçage des modèles hydrologiques. Aujourd'hui, ces prévisions sont issues de systèmes d'extrapolation de lames d'eau observées par radar, ou de modèles

numériques de l'atmosphère à résolution kilométrique, qui changent en fonction des échéances. Pour mieux intégrer ces sources d'information, on les combine en scénarios de pluie temporellement cohérents, ce qui est essentiel pour une bonne représentation des pics de cumul de pluie. Ils sont présentés sous forme d'une prévision d'ensemble adaptée à la modélisation des incertitudes tout au long d'une chaîne

de prévision hydrométéorologique, avec un rafraîchissement fréquent par les observations les plus récentes. L'intérêt de cette approche est en cours d'évaluation avec des instituts de modélisation des crues dans le cadre d'un projet ANR, avec la perspective d'en faire un outil opérationnel.

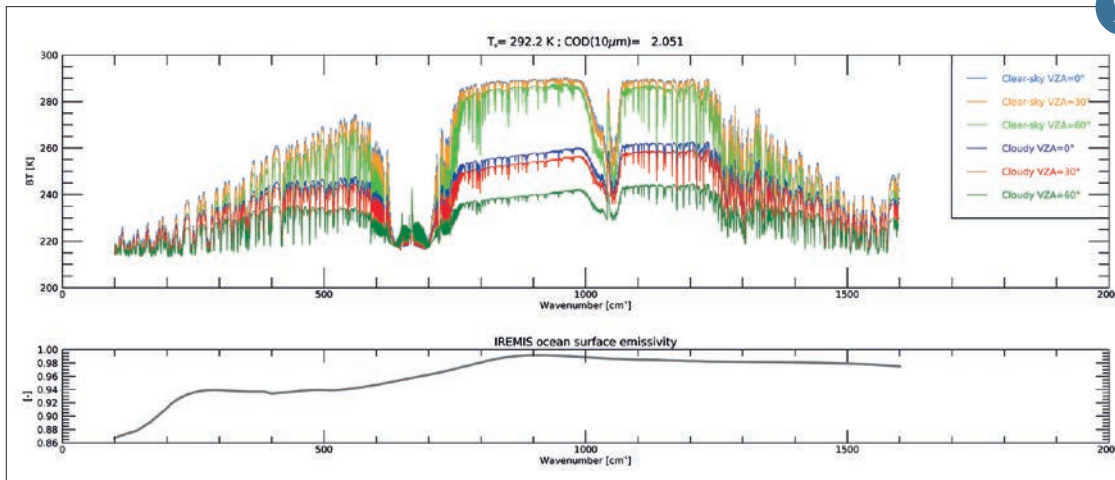
11

8



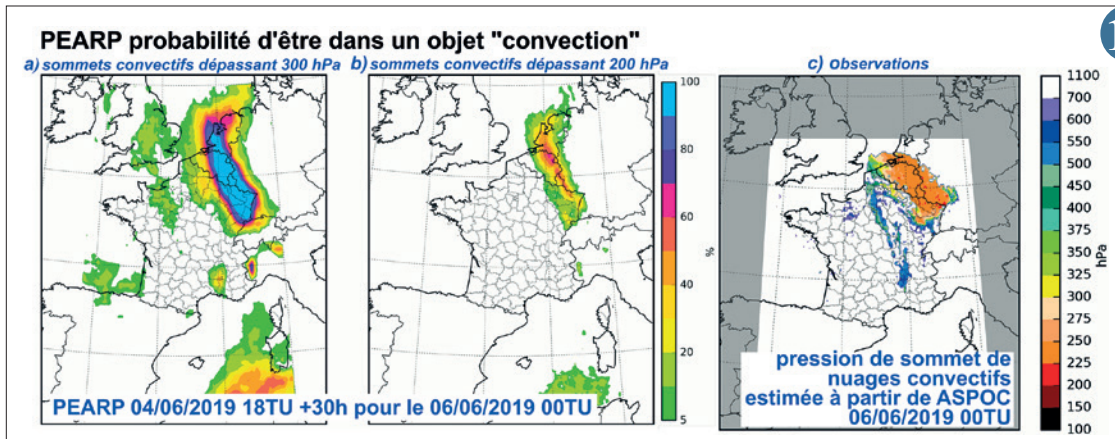
Prévision de la force du vent à 10m d'Arome Antilles pendant la saison cyclonique 2017, avec la présence des deux ouragans Irma et Jose.
À gauche sont représentées les structures cycloniques labellisées à la main, et à droite celles identifiées par le réseau UNET.

9



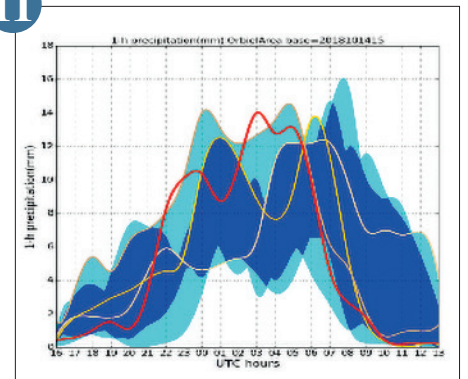
Températures de brillance simulées avec le modèle RTTOV pour l'instrument FORUM pour trois cas de ciel clair avec des angles d'observations différents et trois cas de ciel contenant un nuage composé de cristaux de glace et d'épaisseur optique de 2 à 10 µm.
La température de surface est de 292 K sur une surface océanique dont l'émissivité spectrale est représentée en dessous.

10



À gauche : probabilités d'appartenir à un objet convectif dont la pression de sommet (prise ici comme indicateur de l'intensité) dépasse, de gauche à droite, (a) 300 hPa et (b) 200 hPa. Ces probabilités sont déduites de la réalisation de la prévision d'ensemble Arpege PEARP du 04/06/2019 18TU, à échéance de +30h.
En choisissant un seuil de probabilité, en fonction des enjeux de la prévision, qui peuvent être différents selon le point de vue, espace aérien ou pilote, on peut construire un bord ou contour des objets, une information compacte.
(c) une forme de vérification observée, une pression de sommet de nuages estimée à partir de données de satellites et de foudre, le 06/06/2019 00TU.

11



Exemple de prévision d'ensemble des pluies disponible quelques heures avant un épisode de crues rapides : en rouge, cumuls horaire de pluies observées a posteriori sur la zone ; en bleu, intervalles de pluies prévues par un ensemble de prévisions numériques à haute résolution (système AROME) ; en jaune, quelques-uns des scénarios prévus par cet ensemble, sous une forme adaptée au couplage de modèles hydrologiques.

Étude et modélisation des processus

Les études de processus conduites en recherche visent à améliorer la compréhension des phénomènes et leur représentation dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France, et à développer des services météorologiques ou climatiques et offrir de nouvelles applications.

L'exploitation des observations satellitaires ou issues de campagnes de mesures, ainsi que la modélisation, notamment à haute résolution, constituent des outils privilégiés pour ces travaux, comme l'illustrent les exemples ci-dessous.

Ainsi, le système LDAS-Monde d'assimilation de données satellitaires de surface permet de représenter la phénologie de la végétation et par conséquent d'évaluer l'impact des vagues de chaleur sur les conditions de surface végétative.

Toujours dans le domaine des surfaces continentales, progresser dans la compréhension et la modélisation des processus impose une prise en compte croissante des facteurs anthropiques affectant le cycle de l'eau. Le modèle de routage des cours d'eau CTRIP, qui a affiné sa résolution spatiale sur la France, offre des perspectives de prise en compte des impacts des lacs et des barrages sur le cycle continental de l'eau.

A des latitudes plus extrêmes comme en Antarctique, les mesures au Dôme C ont permis de quantifier l'impact radiatif d'une couche nuageuse d'eau surfondue, soulignant ainsi la sous-estimation des flux radiatifs descendants par les modèles de prévision, pour lesquels la représentation de l'eau nuageuse surfondue est toujours très difficile à bien reproduire.

La prévision de givrage par eau surfondue constitue aussi un phénomène à enjeux pour la prévision aéronautique, tout comme le brouillard. La modélisation du brouillard à des résolutions beaucoup plus fines d'ordre métrique, validée à partir de la campagne de mesures LANFEX sur le Royaume-Uni, permet de mieux comprendre les processus importants de son cycle de vie et d'améliorer la représentation du processus d'activation des aérosols en gouttelettes dans les modèles.

Ce même modèle de recherche à haute résolution Méso-NH a également été couplé à un modèle d'éolienne, ouvrant la voie à des études innovantes d'interactions dynamiques induites par l'effet de sillage des parcs éoliens, par exemple sur domaine off-shore.

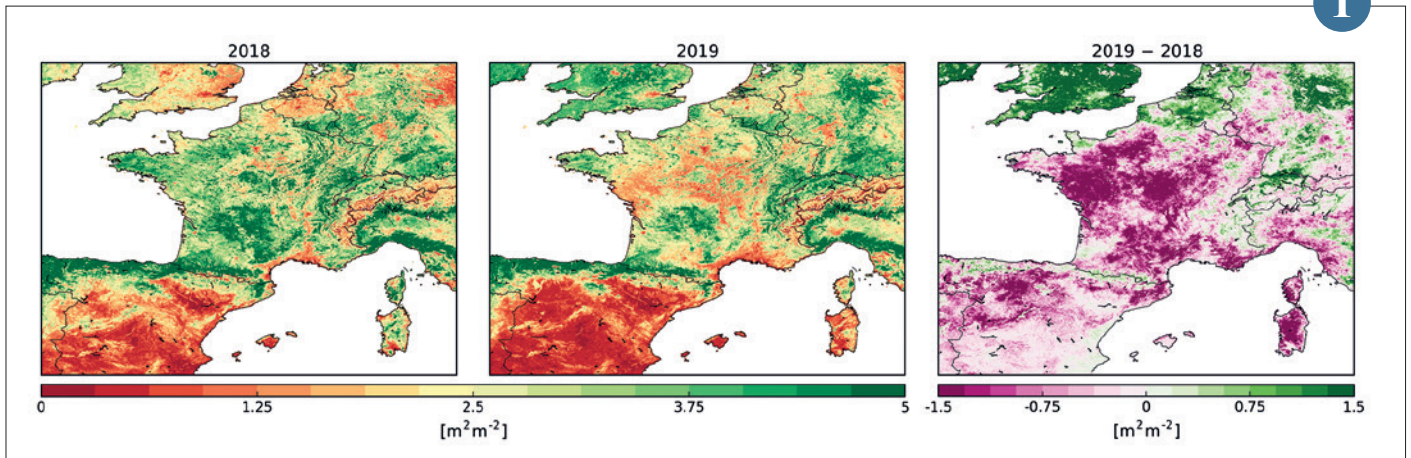
Impact des vagues de chaleur sur les conditions de surface

Le CNRM a développé un système d'assimilation de données pouvant fonctionner à l'échelle mondiale pour tout type de végétation (prairies, cultures, forêts, savanes). Cet outil est appelé LDAS-Monde (www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1022). Il est fondé sur la plateforme de modélisation SURFEX (www.umr-cnrm.fr/surfex/). Il intègre des observations satellitaires de la végétation et de l'humidité des sols dans un modèle du système sol-plante, le modèle ISBA. Contrairement aux données satellitaires, ISBA permet de disposer d'une information continue dans le temps et de produire de nombreuses variables cohérentes entre elles (biomasse de la végétation, déficit ou excès en eau du sol, évapotranspiration, flux de carbone, température de surface). Les

observations satellitaires sont utilisées pour améliorer la qualité des variables simulées. Le modèle est alimenté par des données météorologiques disponibles à basse résolution spatiale à l'échelle mondiale (de 10 à 25 km). LDAS-Monde utilise des données produites par le service Copernicus Global Land : l'indice de surface foliaire et un indice d'humidité du sol. Ces produits étant disponibles depuis plusieurs années, il est possible de calculer des anomalies d'humidité du sol et de la croissance de la végétation. Mis en œuvre à l'échelle mondiale, LDAS-Monde permet de détecter des épisodes de sécheresse. A l'échelle régionale, l'information météorologique est disponible à plus haute résolution spatiale. Par exemple, le système numérique de

prévision du temps AROME-France de Météo-France produit cette information à une résolution de 1,3 km sur une grande partie de l'Europe de l'ouest. Cet ensemble d'outils a été utilisé pour analyser l'impact sur la végétation des vagues de chaleur de 2018 et 2019.

1



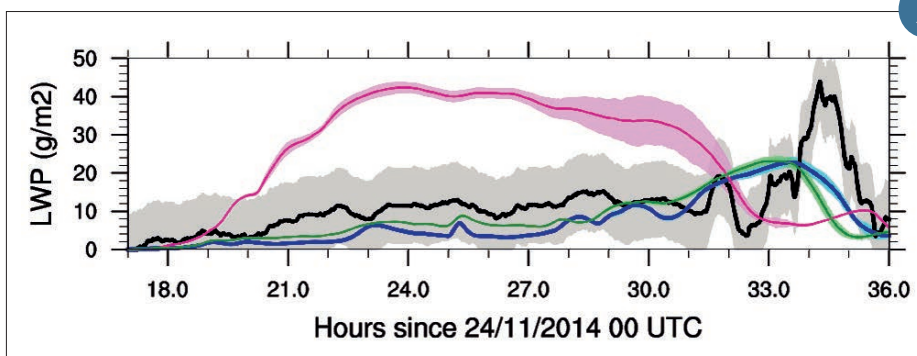
▲ Effet des vagues de chaleur de 2018 et de 2019 sur la végétation. L'indice de surface foliaire de la végétation pour le mois de juillet est présenté pour les années 2018 et 2019. Il s'agit d'une valeur simulée par le modèle ISBA de Météo-France après intégration de données satellitaires du service Copernicus Global Land. La différence entre ces deux cartes illustre les sécheresses très marquées ayant affecté le sud de l'Angleterre, la Belgique, les Pays-Bas et la Basse Saxe en 2018 (en vert), et la quasi-totalité de la France, le nord de l'Espagne et la Sardaigne en 2019 (en violet).

Impact de la microphysique sur la simulation d'un brouillard radiatif

Le brouillard est un phénomène à enjeux pour le secteur des transports, dont la prévision par les modèles reste perfectible. En terrain plat, où les phénomènes non-locaux deviennent négligeables, le cycle de vie du brouillard radiatif est principalement piloté par les processus microphysiques après la phase de formation au sol, notamment la formation des gouttelettes par activation des aérosols. La microphysique du brouillard se distingue des autres types de nuages par une sursaturation très faible, difficile à modéliser, qui détermine le nombre de gouttelettes activées.

Un cas de brouillard de la campagne LANFEX sur le site de Cardington (UK) a donné lieu à des mesures microphysiques. Une simulation avec le modèle Mésos-NH à résolution métrique utilisant le schéma microphysique à 2 moments LIMA, basé sur une représentation pronostique du nombre de gouttelettes, a permis d'étudier le cycle de vie du brouillard. La version standard de LIMA, diagnostiquant une sursaturation maximale, surestimait le nombre de gouttelettes et le contenu en eau liquide intégré, impliquant une transition trop rapide d'un brouillard

optiquement fin vers un brouillard épais. Une approche plus complète considérant une sursaturation pronostique a produit une simulation de référence permettant d'être plus en accord avec les observations. Dès lors, des améliorations ont été apportées dans la paramétrisation de l'activation afin de se rapprocher du cycle de vie du brouillard observé et simulé par la référence. Celles-ci constituent une avancée vers la prévision de brouillard plus réaliste dans AROME.



▲ Contenu en eau liquide intégré (LWP, en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) observé (en noir), simulé par LIMA standard (en rose), avec la sursaturation pronostique (en vert) et avec une amélioration de la paramétrisation de l'activation (en bleu). La zone grisée correspond à l'incertitude des mesures, et les zones colorées à la variabilité sur le domaine de simulation.

Simulations des impacts des parcs éoliens off-shore à ultra-haute résolution

Une collaboration a été engagée depuis 4 ans entre Météo-France et l'IFPEN pour approfondir nos connaissances sur les interactions entre parcs éoliens et la météorologie. Par exemple, pour optimiser le placement des éoliennes, il est nécessaire de simuler précisément l'écoulement du vent au sein d'un parc, en tenant compte des conditions météo réelles.

Lors de la première thèse en collaboration sur le sujet, un modèle d'éoliennes de l'IFPEN a été couplé avec le modèle météorologique méso-échelle Meso-NH développé par Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique. Le modèle détermine le sillage des éoliennes grâce à l'interaction entre les efforts aérodynamiques qu'elles génèrent (traînée, portance) et le vent, lui-même influencé par les processus météorologiques.

Cette étude a aussi permis de mieux comprendre le phénomène de condensation spontanée, générateur de brouillard, tel qu'observé au sein du parc offshore danois Horns Rev 1 (voir photo 1). Du fait de leur rotation, les éoliennes sont une source

de brassage au sein de la couche limite atmosphérique. Dès lors, les conditions météorologiques locales peuvent être modifiées en aval des turbines, et parfois donner lieu dans des conditions très particulières à ces phénomènes. Cette recherche se poursuivra sur l'analyse des impacts de futures grandes éoliennes en couche limite marine, qui peuvent atteindre, et brasser, la couche d'inversion au sommet de celle-ci et impacter l'atmosphère libre, en générant par exemple des ondes de gravité. En s'appuyant sur leurs savoir-faire et expertises complémentaires, IFPEN et Météo-France vont proposer le premier code de simulation open source capable d'expliquer les interactions entre un parc éolien et la météo locale, à une aussi haute résolution (5m).

3

Le modèle de routage CTRIP se dote d'un réseau hydrographique global au 1/12°

Le modèle de système Terre développé au CNRM intègre une composante hydrologique permettant de représenter les transferts d'eau des rivières jusqu'aux océans, et ainsi de fermer le bilan à l'échelle du globe. Le modèle de routage CTRIP couplé à la plateforme SURFEX représente principalement le processus de propagation des débits dans le réseau hydrographique. Il est utilisé depuis plusieurs années au CNRM à l'échelle du globe à la résolution de 0.5°, avec des performances très satisfaisantes quant à sa capacité à simuler les débits à l'exutoire des grands bassins versants. Toutefois, à cette résolution, seules les grandes rivières peuvent être représentées. Avec la montée en résolution des modèles atmosphériques et de surface, la basse résolution de CTRIP peut devenir pénalisante pour la représentation des processus à méso-échelle.

La version CTRIP-12D du modèle a récemment été mise en place à la résolution de 1/12° (environ 6-8 km sur la France). Ce travail repose sur le développement d'un réseau hydrographique global, obtenu à partir du Modèle Numérique de Terrain MERIT-DEM à haute résolution (90 m) corrigé pour l'hydrologie, qui décrit la direction d'écoulement de chaque pixel des surfaces continentales (Figure a). Après une validation détaillée de la qualité du réseau, notamment forme et structure des grands bassins versants du globe, les paramètres de CTRIP-12D tels que longueur des tronçons de rivière, pente, largeur, rugosité, etc., ont été calculés. Les premières simulations à l'échelle globale ont démontré une très bonne capacité du modèle à reproduire les débits sur l'ensemble des continents, avec des performances meilleures que la version basse résolution (Figure b). En outre CTRIP-12D devrait permettre de prendre en compte de nouveaux processus comme l'impact des lacs et des barrages sur le cycle continental de l'eau.

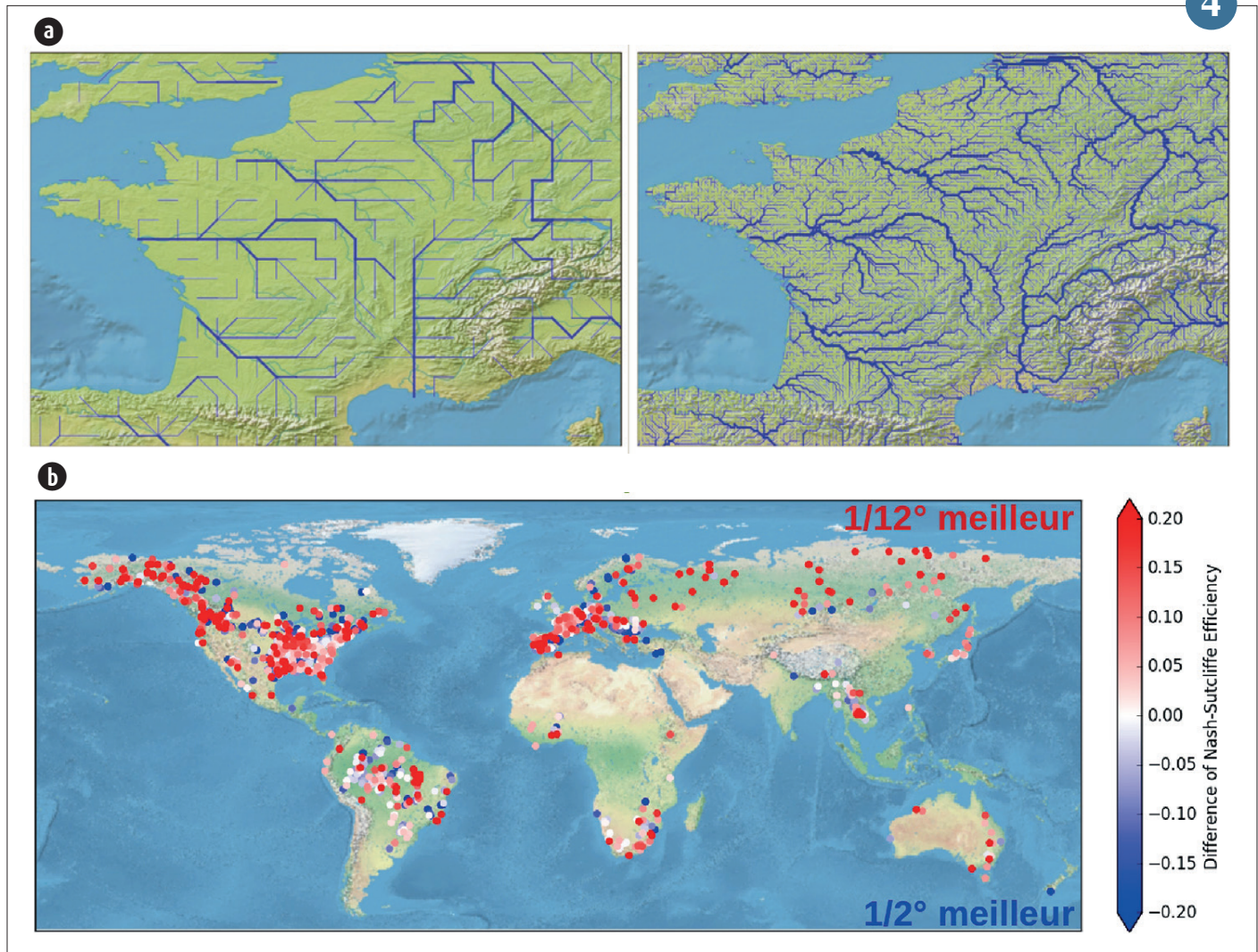
4



3

◀
 (a) Parc offshore de Horns Rev 1 (12/02/2008)
 ©Vattenfall.
 (b) Simulation numérique sur supercalculateur
 avec le modèle atmosphérique ultra-haute résolution
 Méso-NH.

4



▲
 (a) Comparaison des réseaux hydrographiques à 0.5° (gauche) et 1/12° (droite) sur la France métropolitaine.
 (b) Comparaison des performances (débits simulés vs débits observés) entre les simulations CTRIP à 0.5° et 1/12°.

Analyse de nuages d'eau surfondue au-dessus du Dôme C, Antarctique

Les nuages en Antarctique jouent un rôle important dans le système climatique en influençant le bilan radiatif de la Terre, à la fois directement aux latitudes élevées de l'hémisphère sud et, indirectement, au niveau global grâce à des télé-connexions complexes.

Une analyse complète du bilan hydrique de la station du Dôme C (Concordia, Antarctique) a été réalisée durant l'été austral 2018-2019 dans le cadre de la campagne internationale YOPP (Ricaud et al. 2019). De minces (~100 m d'épaisseur) nuages d'eau surfondue (eau liquide présente à des températures inférieures à 0°C) ont été détectés et analysés depuis la station (LIDAR et radiomètre micro-ondes

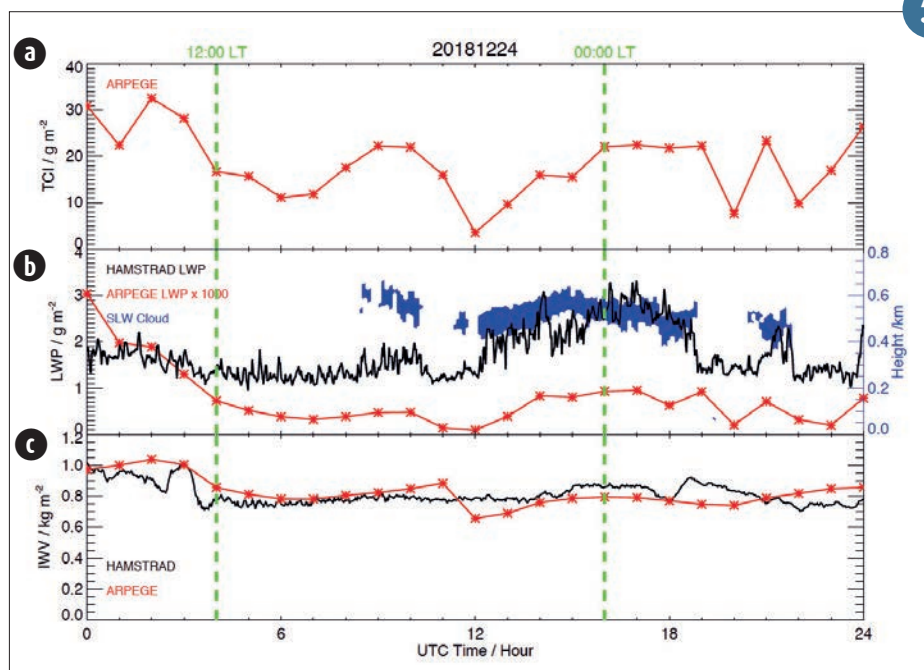
HAMSTRAD, rayonnement de surface BSRN), radiosondages et observations satellites (CALIOP/CALIPSO) combinés aux prévisions météorologiques du modèle ARPEGE (Figure 1).

Le 24 décembre 2018, notre étude a montré que les nuages d'eau surfondue ont été observés au Dôme C dans les zones d'entraînement au sommet de la couche limite atmosphérique. ARPEGE n'a pas été en mesure d'estimer correctement le rapport entre l'eau liquide et l'eau solide dans les nuages. L'absence de nuages d'eau surfondue simulée dans le modèle a eu une incidence sur le rayonnement net de surface de 20 à 30 W m⁻² plus élevé dans les observations que dans les calculs du

modèle. Ceci est principalement attribuable au rayonnement de surface descendant à longues longueurs d'onde provenant des observations BSRN supérieur de 50 W m⁻² à celui du modèle ARPEGE (Figure 2).

L'absence de nuages d'eau surfondue dans les modèles de prévision numérique au-dessus de l'Antarctique peut indiquer une simulation incorrecte du bilan radiatif de l'atmosphère polaire.

5

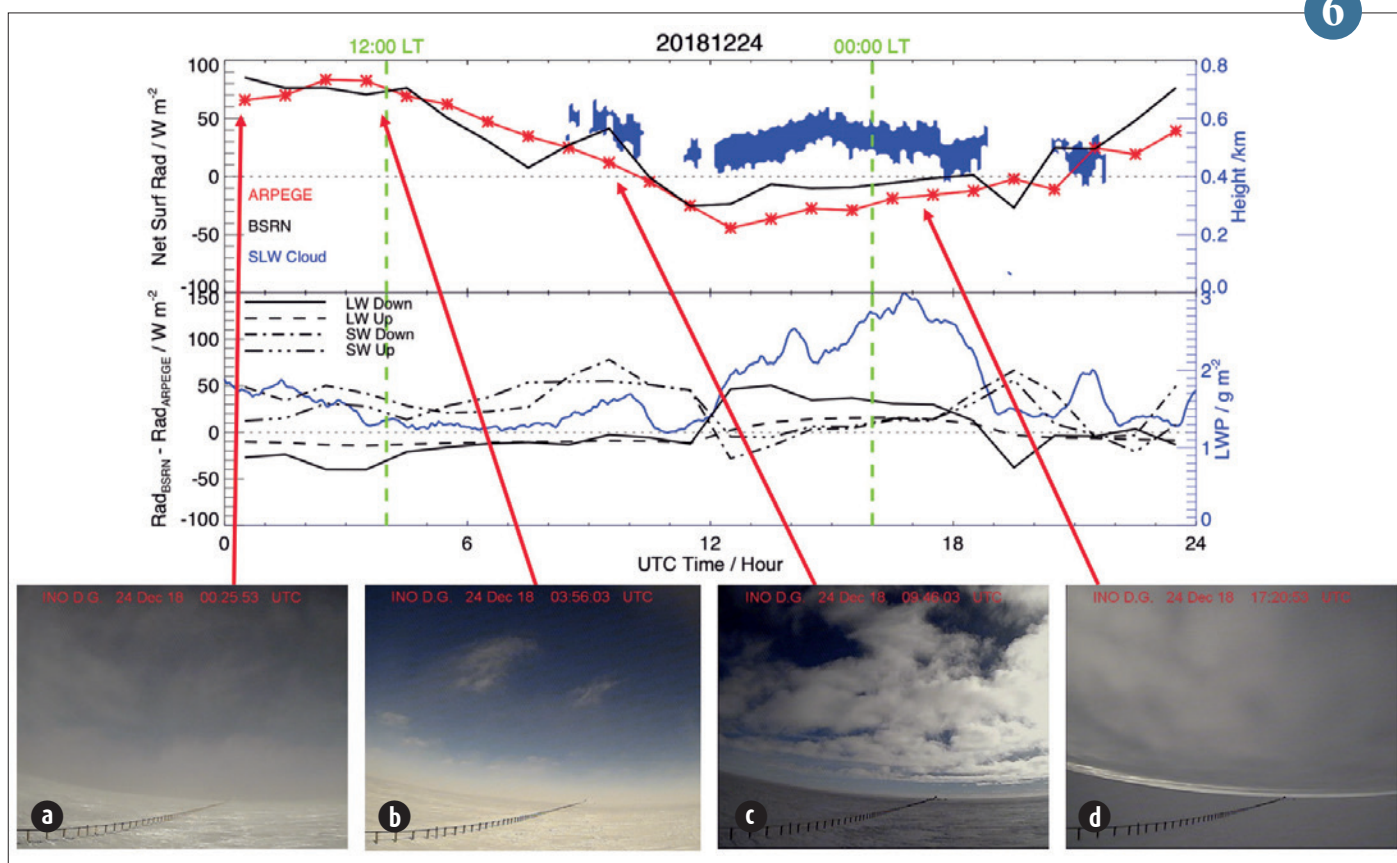


Variation diurne au 24 décembre 2018 (heure UTC) de :

- (a) la colonne totale de glace (TCI) (g m⁻²) calculée par ARPEGE (courbe rouge),
- (b) l'eau liquide intégrée (LWP) mesurée par HAMSTRAD (g m⁻², courbe noire) et calculée par ARPEGE (x1000 g m⁻², courbe rouge) et
- (c) la quantité de vapeur d'eau intégrée (IWW, kg m⁻²) calculée par HAMSTRAD (courbe noire) et par ARPEGE (courbe rouge).

En (b) se superpose l'épaisseur du nuage d'eau surfondue (zone bleue) déduite des observations LIDAR (axe des y et bleu à droite de la figure).

Note : LWP d'ARPEGE a été multiplié par un facteur 1000. Deux lignes verticales en pointillés verts indiquent 12:00 et 00:00 LT (temps local).



(Haut) Variation diurne du rayonnement net de surface ($W m^{-2}$) observé par BSRN (courbe noire) et calculé par ARPEGE (courbe rouge) le 24 décembre 2018 en heure UTC. L'altitude des nuages d'eau surfondue (en bleu) déduite du LIDAR est superposée. (Centre) Variation diurne de la différence entre le rayonnement de surface ($W m^{-2}$) observé par BSRN et calculé par ARPEGE le 24 décembre 2018 pour les longueurs d'onde longues vers le bas (courbe noire), les longueurs d'ondes longues vers le haut (pointillé noir), les longueurs d'onde courtes vers le bas (pointillé noir) et les longueurs d'onde courtes vers le haut (triple pointillé noir). LWP (bleu) mesuré par HAMSTRAD est superposé. (Bas) Quatre images de webcam montrant la couverture nuageuse à : (a) 00:25 UTC et (b) 03:56 UTC (cirrus, pas de nuages d'eau surfondue), (c) 09:46 et (d) 17:20 UTC (nuages d'eau surfondue). Deux lignes verticales en pointillés verts indiquent 12:00 et 00:00 LT (temps local).

Climat

L'année 2019 a été marquée en France par deux canicules exceptionnelles en juin et en juillet. Le 25 juillet, les températures mesurées sur de nombreuses stations météorologiques du nord de la France ont dépassé 40°C pour la première fois depuis le début des relevés, atteignant même localement 43°C. Le lien de ces canicules avec le changement climatique d'origine humaine est clair : des études d'attribution ont montré qu'elles ont désormais au moins 5 à 10 fois plus de chances de se produire qu'en 1900, et pourraient être 4 fois plus fréquentes en 2040 qu'actuellement.

Grâce à ses activités de recherche et d'observation, Météo-France fait partie des rares services météorologiques nationaux disposant en propre de tous les outils et de l'expertise nécessaires pour qualifier de tels événements en temps quasi-réel. Côté observations, il est plus que jamais crucial de disposer de données de qualité sur la période actuelle, mais aussi de poursuivre la récupération de données anciennes, afin d'apprécier les changements de long terme et la variabilité du climat. Côté recherche, en amont du 6^e rapport du GIEC, le CNRM a désormais réalisé l'essentiel du plus grand ensemble de simulations climatiques globales jamais produit sur les supercalculateurs de Météo-France. Or, l'analyse des simulations produites par de nombreux modèles globaux internationaux, dont CNRM-CM a révélé une sensibilité accrue à l'augmentation du contenu de l'atmosphère en CO₂. L'évaluation et la compréhension de cette sensibilité du climat est un enjeu majeur de recherche.

Les modèles climatiques régionaux à échelle fine couvrant la France métropolitaine et les outremer sont alimentés par des sorties de modèles globaux et les complètent, car ils permettent de représenter des reliefs et des phénomènes non-résolus à grande échelle. Ils apportent des informations indispensables à la décision d'acteurs publics et privés sur l'évaluation des impacts, des risques et des mesures d'adaptation associés au changement climatique. Cette année a vu la montée en puissance de l'utilisation d'AROME à la résolution de 2,5 km pour des études de climat. Ce modèle, utilisé au quotidien en prévision du temps a démontré son excellente capacité à simuler des événements tels que les pluies intenses ou les orages. Météo-France apporte également de l'information permettant d'anticiper les variations du climat sur des échelles de temps de quelques semaines à quelques mois. Les systèmes de prévision infrasaisonniers et saisonniers s'appuient sur CNRM-CM. Une fois corrigée et mise en forme, la production de ces systèmes contribue notamment à optimiser la gestion des ressources en eau, les pratiques agricoles ou la production d'énergies météo-sensibles.

1

Modélisation du climat

Stabilisation rapide du climat vers un équilibre perturbé

La détermination de la réponse du système climatique à une perturbation externe est un défi majeur dans la science du climat. La sensibilité climatique à l'équilibre, c'est-à-dire la réponse de la température moyenne globale à un doublement de la concentration en dioxyde de carbone, est couramment utilisée dans les études sur le changement climatique. Cette sensibilité climatique à l'équilibre est rarement connue de manière exacte car elle est très coûteuse d'un point de vue numérique : elle demande des milliers d'années de simulations avec un modèle de climat couplé océan-atmosphère.

Nous avons proposé récemment une méthode pour estimer à moindre coût et avec précision la valeur de la réponse à l'équilibre à partir de modèles climatiques. Avec cette méthode, le modèle de climat du CNRM (CNRM-CM6-1) atteint un état stationnaire après seulement quelques centaines d'années de simulation. Cette méthode d'avance rapide consiste simplement en la réalisation d'un scénario de forçage en deux temps conçu à partir du formalisme du modèle d'équilibre énergétique à deux couches.

Cette méthode peut être facilement appliquée à tous les autres modèles de climat et peut permettre d'améliorer notre capacité à développer la prochaine génération de modèles climatiques.

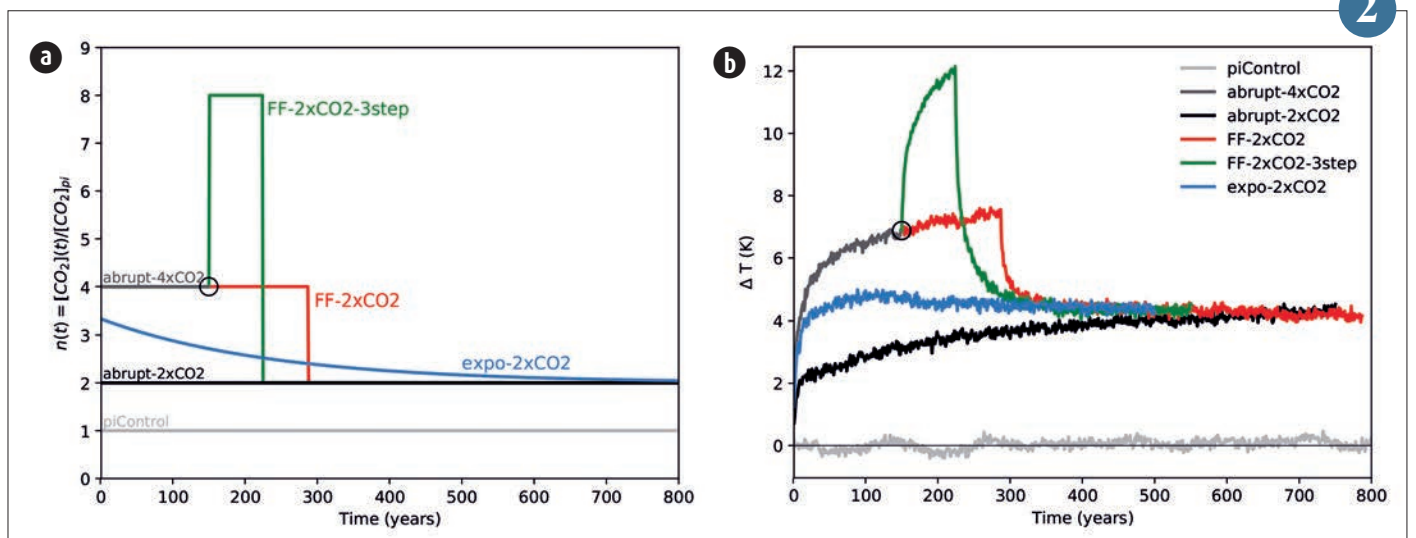
2

1



▲ Le Trocadéro (Paris) par temps de canicule. © Pascal Taburet - Météo-France.

2



▲ Évolution temporelle de (a) la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone dans les simulations d'avance rapide et (b) la réponse correspondante de la température moyenne globale (anomalie par rapport à la moyenne temporelle de la simulation de contrôle). Le cercle noir correspond à l'année 150 de la simulation abrupt-4xCO2. Plus de détails dans Saint-Martin et al. (2019).

ISBA-CTrip : le nouveau système de modélisation des surfaces continentales pour des applications climatiques globales

Ces dernières années nous avons développé une modélisation ambitieuse des surfaces continentales afin de proposer une représentation la plus réaliste possible des cycles de l'eau et du carbone sur tous les continents.

Dans cette modélisation (Fig. a), le modèle de surface ISBA représente l'hydrologie et la thermique du continuum neige-sol de manière détaillée grâce à la résolution explicite des lois de Darcy et de Fourier. ISBA représente aussi l'assimilation du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse, la respiration des plantes, l'évolution de leur biomasse et de leur indice de surface foliaire, les feux de forêt naturels de grande échelle, les changements d'utilisation des sols, l'accumulation de carbone organique dans les sols et sa décomposition par les micro-organismes, et la dissolution d'une partie de ce carbone dans l'eau. Les ruissellements et ce carbone dissous ainsi calculés sont transmis à CTrip pour simuler le débit et la concentration en carbone des fleuves sur tous

les continents. De plus, un véritable couplage « aller-retour » entre ISBA et CTrip a été mis en place. Ce couplage permet l'utilisation d'un schéma d'inondations dynamiques des fleuves qui rend compte de l'interaction entre les plaines inondées, le sol et l'atmosphère via principalement l'évaporation et la ré-infiltration de l'eau libre en surface. La physique des nappes phréatiques et leurs couplages avec le sol superficiel et les rivières sont aussi rendus possible grâce à un schéma d'aquifères diffusif bidimensionnel. In fine, ce nouveau système appelé ISBA-CTrip (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article1092>) démontre des performances bien supérieures à ces prédécesseurs comme, par exemple, pour simuler les débits des grands fleuves du monde ou l'assimilation du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse (Fig. b).

3

Événements méditerranéens et changement climatique : l'apport de CNRM-AROME

Le Sud-Est de la France est souvent affecté par des épisodes de pluies intenses appelés « épisodes méditerranéens » générant des crues éclair à l'origine de dégâts matériels importants et parfois de pertes humaines. Pour ces raisons, les études sur l'évolution de ces épisodes méditerranéens dans un contexte de réchauffement climatique revêtent une importance majeure pour notre société.

Jusqu'à présent, les simulations de projections de changement climatique utilisées pour ce type d'étude dans le Sud-Est de la France étaient réalisées avec des Modèles de Climat Régionaux (RCMs) à convection paramétrée et dont la résolution horizontale n'excédait pas 12,5 km. Avec l'augmentation récente des capacités de calculs, il est à présent possible de réaliser des simulations climatiques à très haute résolution (2-3 km) avec des Modèles de Climat Régionaux à Convection Profonde Explicite tel que CNRM-AROME.

L'utilisation du modèle AROME en mode climat a montré une forte valeur ajoutée sur la représentation des précipitations extrêmes par rapport au RCM ALADIN à convection profonde paramétrée (Fumière et al. 2019). Cette valeur ajoutée est notable sur la représentation des précipitations extrêmes quotidiennes, mais aussi et surtout sur les extrêmes horaires où l'intensité des précipitations des systèmes convectifs est mieux représentée (voir Figure a).

Les premières projections climatiques avec CNRM-AROME sur des périodes de 30 ans ont été réalisées en suivant le scénario d'émission des gaz à effet de serre RCP8.5 de l'IPCC. À l'horizon 2100, les projections montrent une diminution des précipitations moyennes automnales ainsi qu'une intensification des précipitations extrêmes quotidiennes et horaires dans le Sud-Est de la France. À noter que cette intensification est plus marquée sur le Roussillon (voir Figure b).

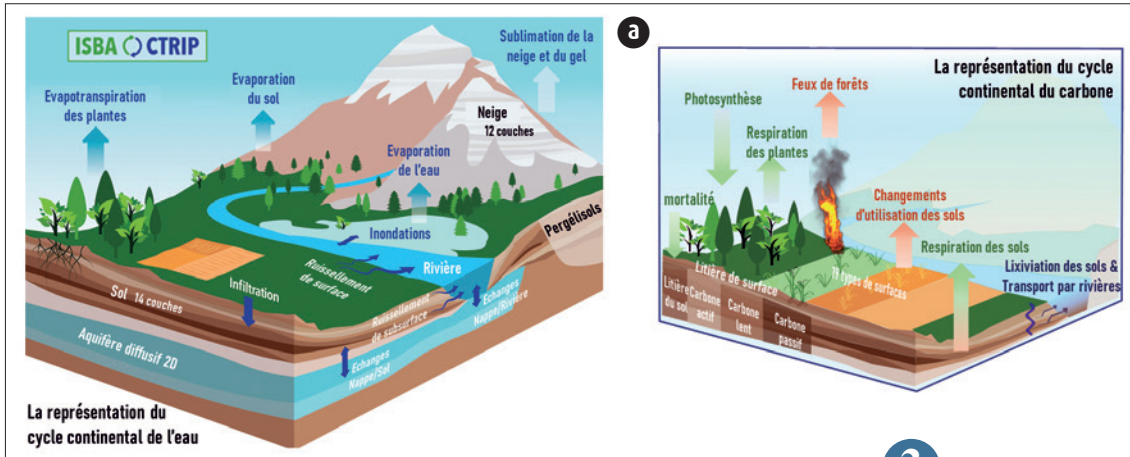
4

Développement des modèles de climat couplés globaux du CNRM et contribution à CMIP6

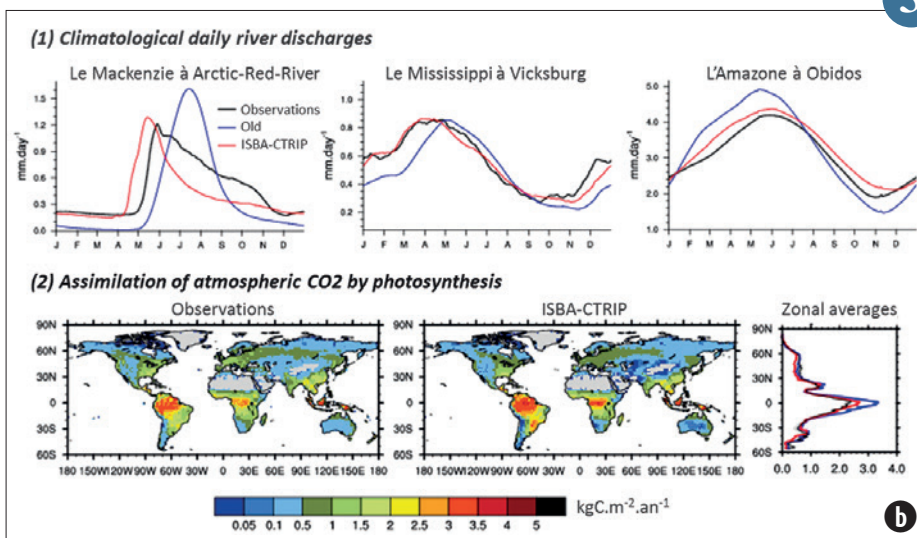
Dans le cadre du 6^e exercice d'inter-comparaison des modèles de climat (CMIP6), le CNRM a développé et produit des simulations avec trois versions de son modèle CNRM-CM : (1) le modèle **standard** à résolution 100 km, (2) le modèle à **haute résolution** (50 km) et (3) le modèle **système Terre** basé sur la version standard avec ajout de la représentation du cycle du carbone complet, de l'utilisation des sols, de la chimie stratosphérique de l'ozone ainsi que l'activation du schéma d'aérosols interactif. Ces trois versions dérivent d'un socle commun et leur calibration est identique. Cet ensemble cohérent permet d'étudier de façon objective l'impact de la complexification versus l'impact de la résolution sur la représentation du climat du XX^e siècle et sur les projections futures. Les projections selon un scénario pessimiste montrent que le modèle standard et le modèle haute-résolution simulent un réchauffement similaire tandis que la version système Terre simule un réchauffement réduit de 10 %. Cette réduction est due à des effets liés aux flux de carbone dans la végétation et aux rétroactions des aérosols.

Nous avons estimé que les configurations système Terre et haute résolution ont un coût numérique respectif 2 et 10 fois plus grand que la configuration standard. Même si ces 2 configurations plus élaborées permettent d'approfondir certaines connaissances sur le climat, leur coût limite la possibilité de réaliser de très longues simulations et/ou des ensembles. Cet ensemble de configurations cohérentes constitue une contribution originale du CNRM à l'exercice CMIP6 et permettra de collecter des informations pertinentes sur leurs usages scientifiques en regard de leur coût numérique.

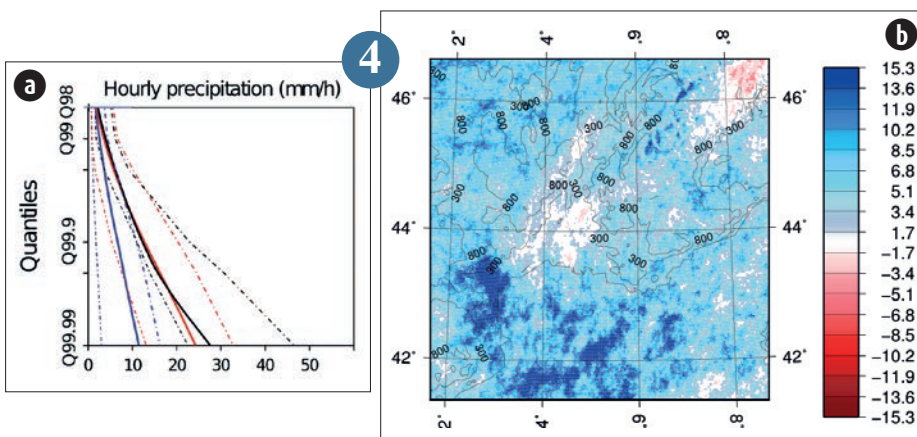
5



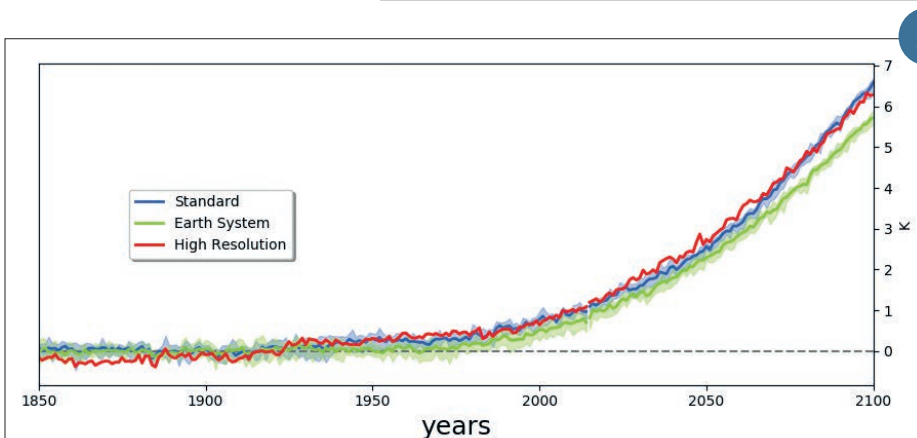
(a) Schéma du système de modélisation des surfaces continentales ISBA-CTRIP utilisé aujourd'hui pour des applications climatiques à l'échelle globale.



(b) Comparaison de débits et de la photosynthèse simulés par ISBA-CTRIP à des observations. (1) En haut sont montrés les cycles annuels saisonniers moyens des débits quotidiens (en mm d'eau par jour) simulés et observés sur la période 1979-2010 aux stations les plus proches de l'embouchure des fleuves Mackenzie, Mississippi et Amazone. Les observations in-situ sont en noir, l'ancienne modélisation de la surface utilisée au début des années 2010 en bleu et ISBA-CTRIP aujourd'hui en rouge. (2) En bas, est montrée la distribution spatiale de l'assimilation du CO₂ par la photosynthèse (en kg de carbone par m² et par an) déduite d'observations in-situ spatialisées (à gauche) et simulée par ISBA-CTRIP (au centre) sur la période 1980-2013. Les moyennes zonales (moyennes des longitudes par bandes de latitudes) correspondantes aux données observées (noir), à la simulation ISBA-CTRIP (rouge), et l'ancienne modélisation de la surface utilisée au début des années 2010 (bleu) sont aussi montrées (à droite).



(a) Cumulative Density Function (CDF) des précipitations horaires sur les Cévennes dans le Sud-Est de la France. La courbe noire représente les observations Comephore, la courbe bleue représente les précipitations simulées par ALADIN et la courbe rouge représente les précipitations simulées par le modèle CNRM-AROME. Les courbes discontinues représentent l'intervalle de confiance à 90% de chaque série de données. (b) Carte de différences des quantiles 99.9 des précipitations horaires sur le Sud-Est de la France entre les périodes historique (1976-2005) et futur (2071-2100) selon le scénario RCP 8.5 des gaz à effet de serre du GIEC. Les différences en pourcentages sont représentées par degré de réchauffement.



Évolution de la température à 2 mètres en moyenne globale en anomalie par rapport au climat préindustriel De 1850 à 2014, les simulations sont contraintes par des forçages naturels et anthropiques observés, de 2015 à 2100, les forçages sont ceux du scénario ssp585, le scenario le plus pessimiste. En bleu le modèle standard, en vert le modèle système Terre et en rouge le modèle haute-résolution, les traits indiquent la moyenne multi-membres, tandis que les plages colorées indiquent la plage d'incertitude inter-membres (6 membres sont considérés ici pour le modèle standard et le modèle système Terre).

Diagnostic, étude et impacts

Le climat de Paris et son agglomération : analyse long-terme à partir d'observations et de modélisation climatique très haute résolution

Le modèle à aire limitée AROME est aujourd'hui utilisé comme modèle régional de climat à convection partiellement résolue, avec une résolution horizontale de 2.5 km. Couplé au modèle de canopée urbaine TEB, il permet de simuler les interactions entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, et les rétroactions potentielles de la ville sur le climat local et régional. La capacité d'AROME à simuler les caractéristiques du climat urbain a été évaluée avec Paris comme cas d'étude.

En amont, une étude climatologique a été menée à partir de longues séries d'observations spatialisées de températures de surface de jour et de nuit issues des produits satellitaires MODIS, de températures quotidiennes minimales et maximales de l'air par spatialisation des données RADOME, et de cumuls journaliers de précipitation dérivés des réanalyses horaires de lames d'eau COMEPHORE. Des indicateurs de climat urbain ont été déduits pour qualifier

l'îlot de chaleur urbain en température de l'air et en surface, et l'effet de la ville sur les précipitations (Fig 1). En particulier, des cumuls journaliers de précipitation plus élevés de 29 % en moyenne en aval de la ville ont été relevés.

Forcé par ERA-Interim et ALADIN sur la période 2000-2015, le modèle AROME reproduit une bonne climatologie de l'îlot de chaleur urbain nocturne qui reste positif toute l'année avec des maxima en été, ainsi que des différences réalistes de cumuls de précipitation en amont et en aval de la ville (Fig 2). Il est désormais appliqué dans des simulations climatiques de 10 ans en milieu et fin de 21^e siècle pour des études d'impacts sur Paris.

6

Evolution de l'activité cyclonique dans le bassin SO de l'Océan Indien : premiers résultats du programme ReNovRisk

L'un des objectifs principaux du programme de recherche « ReNovRisk Cyclones et Changement Climatique » (INTERREG-V Océan Indien 2014-2020) vise à évaluer l'évolution de l'activité cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'océan Indien d'ici la fin du siècle. L'analyse des simulations climatiques (RCP 8.5) globale (Arpege-Climat ; 10-30 km de résolution) et régionale (Aladin-Climat, résolution de 12 km) réalisées spécifiquement dans le cadre de ce programme montre que le réchauffement climatique pourrait avoir d'importantes répercussions sur la fréquence et l'intensité des cyclones tropicaux se développant dans cette région du monde.

Les simulations, réalisées sur la période 2051-2094, suggèrent en premier lieu que la saison cyclonique, qui démarre de nos jours aux alentours de la mi-novembre,

pourrait être décalée d'environ un mois à l'horizon de quelques décennies. Les modèles montrent également une diminution significative du nombre de systèmes dépressionnaires à l'échelle du bassin, néanmoins conjugué à une augmentation des systèmes de type intenses et très intenses. Enfin, on observe également un déplacement marqué de la position vers le sud du maximum d'intensité (LMI) atteint par les cyclones. Ces projections suggèrent dans l'ensemble que le risque cyclonique devrait ainsi augmenter significativement dans la région des Mascareignes (Réunion, Maurice) avec plus de systèmes intenses passant au voisinage de La Réunion concentrés sur une plus courte période.

8

Sauvetage des données météorologiques anciennes des phares en France entre 1881 et 1940

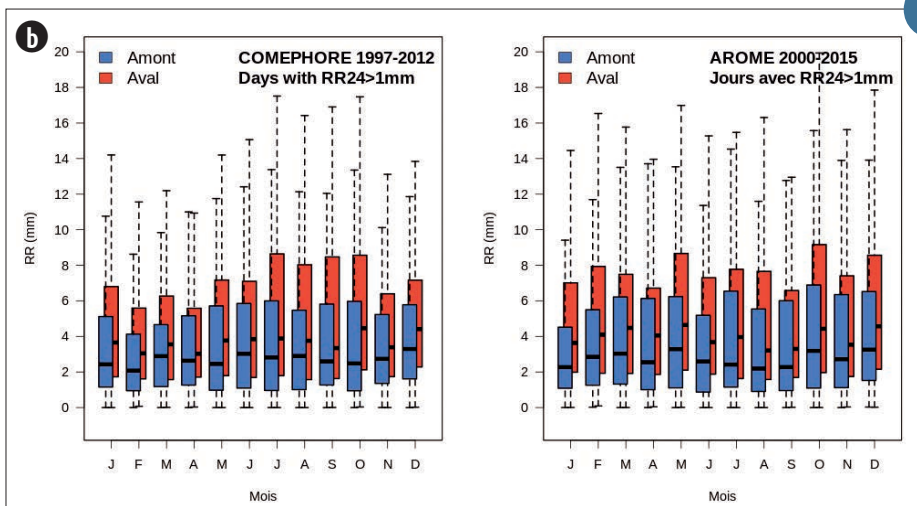
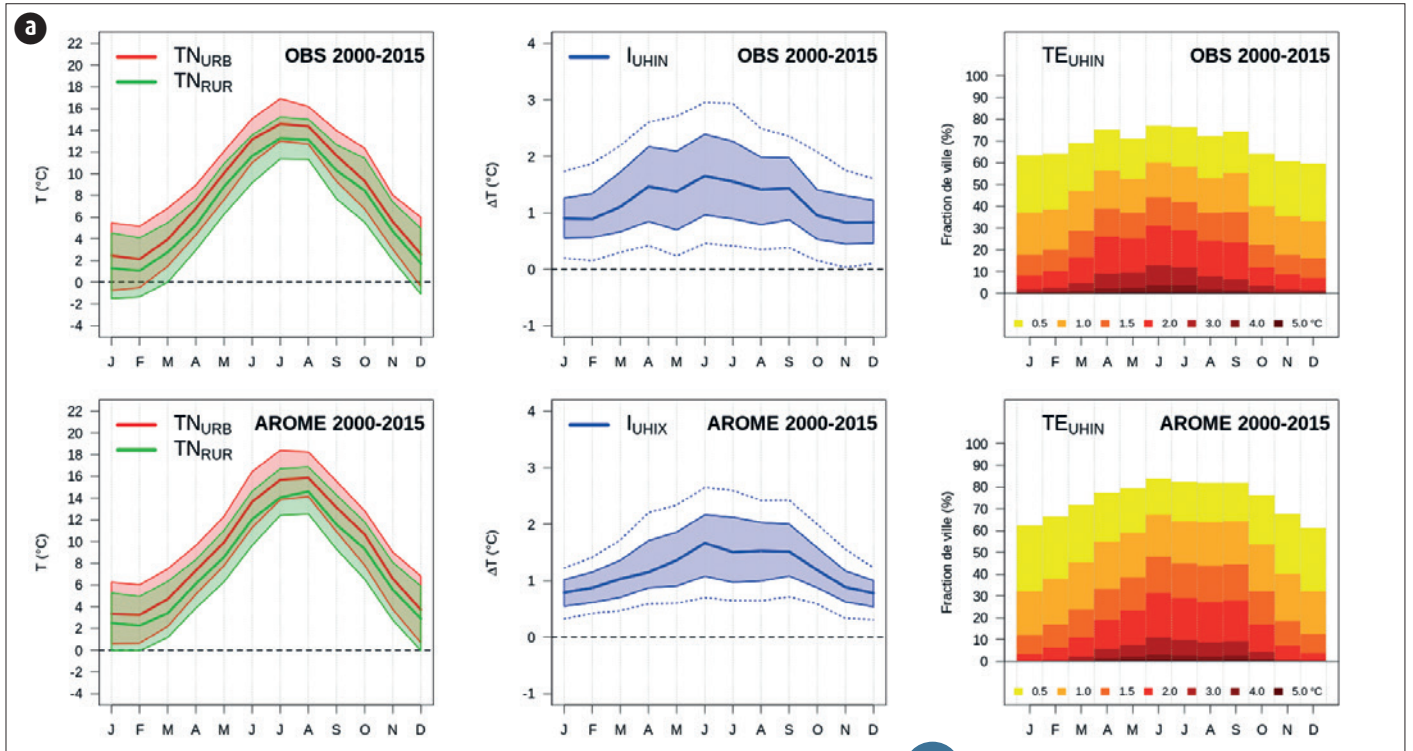
En 1881, le Service météorologique des phares et balises des Ponts-et-Chaussées organisa le réseau climatologique des phares français, constitué de 21 phares. Ces phares contribuèrent au réseau français des stations météorologiques du Bureau central météorologique dès 1882. Les gardiens de phares avaient pour tâche d'effectuer des observations régulières de pression atmosphérique, de vent, de température et de pluie reportées sur un formulaire climatologique, selon des instructions précises. Une copie de ce formulaire mensuel, créé spécialement pour le recueil des observations météorologiques des phares, devait être transmise chaque mois au Bureau central météorologique de France, puis à l'Office national météorologique.

Les recherches dans le fonds de la Météorologie nationale déposé aux Archives nationales ont permis de retrouver les formulaires antérieurs à 1941 pour 25 phares français, dont 12 longues séries sur la période 1881 à 1940.

Les étapes d'inventaire, d'analyse de la valeur climatologique et de numérisation en mode image des relevés, fruits de la collaboration entre les Archives nationales et Météo-France, sont terminées. L'important travail de récupération des données inédites de pression et de vent, observées 3 fois par nuit, au nombre de 2 millions, sera mené par la DCSC au cours des deux prochaines années.

L'avancement de l'action de récupération des données des Phares de 1881 à 1940 peut être suivi sur le portail international pour le sauvetage des données (I-DARE) (<https://www.idare-portal.org/>).

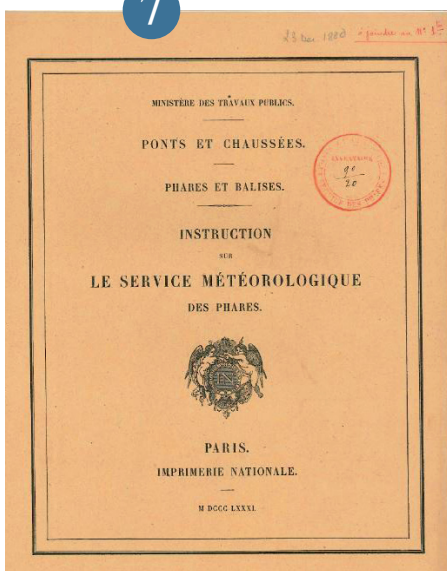
7



6

(a) Comparaison des moyennes mensuelles sur la période 2000-2015 des températures urbaines et rurales observées et simulées par AROME (gauche), de l'îlot de chaleur urbain associé (milieu), et de la fraction de ville impactée par différentes intensités d'îlot de chaleur urbain (droite).
 (b) Comparaison de l'évolution mensuelle des taux quotidiens de précipitation issus de la réanalyse COMEPHORE (à gauche) et de la simulation AROME (à droite) sur les zones amont et aval de la ville par rapport à la direction du vent.

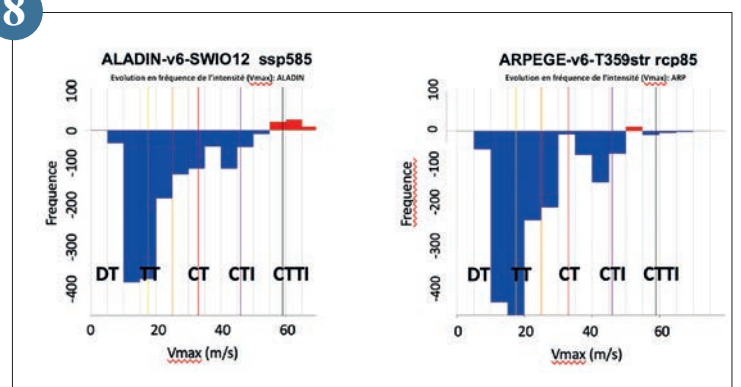
7



Instructions sur le service météorologique des phares, 1881. Archives nationales (France).

Evolution de l'intensité en fréquence des systèmes dépressionnaires tropicaux dans le bassin SO de l'océan Indien à l'horizon (2051-2094), classée par type de système : DT dépression ; TT tempête ; CT cyclone ; CTI Cyclone Intense ; CTTI cyclone très intense.

8



Projections climatiques et impacts sur l'agriculture guadeloupéenne des projections climatiques CMIP6

Le changement climatique exerce une pression sur les milieux et les modes de vie, et son impact sur le secteur agricole se fait déjà ressentir. Les Antilles françaises sont particulièrement vulnérables du fait de leur position insulaire et d'un secteur agricole peu résilient.

Dans ce contexte, le projet EXPLORER piloté par l'INRA, cofinancé par le FEDER et l'ADEME, et dont la DIRAG de Météo-France est partenaire, vise à proposer une approche intégrée de l'agriculture guadeloupéenne pour répondre à la triple problématique d'adaptation au changement climatique, d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'accroissement de la sécurité alimentaire. Des projections climatiques pour la Guadeloupe ont par ailleurs été réalisées dans le cadre du projet FEDER C3AF avec ARPEGE-Climat, et corrigées avec de longues séries des températures et précipitations observées. Ces projections sont valorisées dans le cadre d'EXPLORER, avec en particulier le calcul d'indices climatiques spécifiques au secteur agricole et à la zone d'étude. L'analyse qui porte sur les évolutions à la fois de la climatologie moyenne et des aléas météorologiques a pour finalité l'établissement d'un diagnostic de vulnérabilité de l'agriculture guadeloupéenne.

Les résultats indiquent un fort réchauffement tout au long de l'année ainsi qu'un assèchement significatif de la saison des pluies dès la moitié du siècle. Ils seraient accompagnés de vagues de chaleur et d'épisodes secs plus fréquents, mais d'événements de précipitations extrêmes et de cyclones à proximité de la Guadeloupe au contraire moins fréquents, avec de probables impacts négatifs sur la gestion de la ressource en eau et l'agriculture.

9

Prévision saisonnière

Amélioration des prévisions infra-saisonnières de précipitations en Nouvelle-Calédonie par une approche statistico-dynamique

Les systèmes « S2S » (Sub-seasonal-to-Seasonal) sont des prévisions climatiques d'ensemble globales qui couvrent les échéances de deux semaines à deux mois. Ils peuvent fournir plusieurs semaines à l'avance une information pertinente sur les anomalies de précipitations à venir dans certaines régions (conditions plus sèches ou plus humides que la normale). Cependant, les prévisions brutes de précipitations peuvent être affinées soit par calibration, soit par utilisation de phénomènes de grande échelle qui modulent les pluies et qui sont mieux prévus que ces dernières.

Une approche statistico-dynamique mêlant ces deux aspects a été développée pour améliorer les prévisions infra-saisonnières de précipitations du système S2S de Météo-France, basé sur le modèle couplé CNRM-CM. Elle a été appliquée au Pacifique sud-ouest tropical, où les précipitations présentent une certaine prévisibilité infra-saisonnière, notamment grâce à El Nino Southern Oscillation (ENSO) et l'Oscillation de Madden-Julian (MJO). Un intérêt particulier a été porté à la Nouvelle-Calédonie, territoire à forts enjeux en termes de sécheresse et de pluies extrêmes.

Cette approche bayésienne utilise des prédicteurs fournis par le système S2S *dynamique* (précipitations simulées, indices climatiques liés à l'ENSO et la MJO) pour en déduire des précipitations corrigées grâce à un modèle statistique, construit par apprentissage sur une période de prévisions passées. On obtient ainsi une meilleure capacité de détection et des probabilités d'occurrence plus fiables pour les semaines de fortes pluies, et ce pour des échéances allant jusqu'à quatre semaines.

10

Prévisibilité saisonnière hydrologique sur l'Ebre et le Pô (projet MEDSCOPE)

Le projet MEDSCOPE a pour objet de renforcer l'utilisation des prévisions saisonnières dans la zone Méditerranéenne avec un intérêt particulier pour la gestion saisonnière de la ressource en eau, dans un contexte climatique de plus en plus marqué par les événements de sécheresse.

Dans ce cadre, Météo-France étend sa capacité de prévision saisonnière hydrologique à la partie sud de l'Europe. La nouvelle chaîne est alimentée par un modèle de prévision saisonnière atmosphérique (Météo-France System 6 et ultérieurement d'autres modèles du portail européen C3S) dont les données sont débiaisées par la méthode de descente d'échelle ADAMONT (voir article dédié dans ce rapport) à partir de la nouvelle ré-analyse européenne UERRA à la résolution de 0,05°. La prévision saisonnière est également comparée à des prévisions climatologiques, basées sur un ensemble de simulations historiques. Ces jeux de données alimentent ensuite le

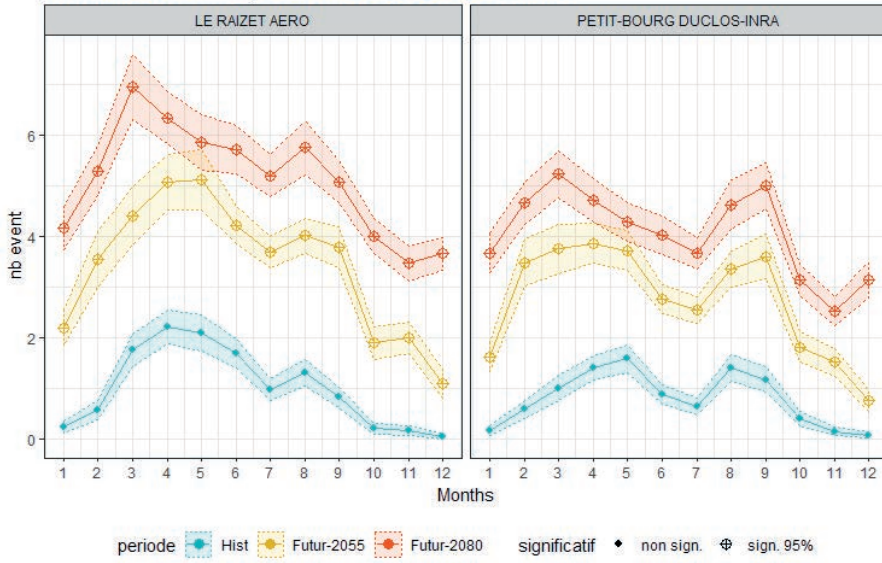
modèle SURFEX-CTRIP, qui calcule à partir de l'état initial de l'année considérée l'évolution à échéance saisonnière des composantes hydrologiques des bassins versants : contenu en eau des sols, équivalent en eau du manteau neigeux, débits, niveau des nappes.

Des études de cas ont été définies avec les partenaires du projet, notamment sur les bassins de l'Ebre en Espagne (avec l'AEMET et la Confédération Hydrologique de l'Ebre) et le bassin du Pô en Italie (avec le CMCC et l'Arpa-Simc). L'objectif est de développer et évaluer des indicateurs de gestion saisonnière de la ressource en eau avec les partenaires locaux et les gestionnaires de ces bassins (voir Figure jointe).

11

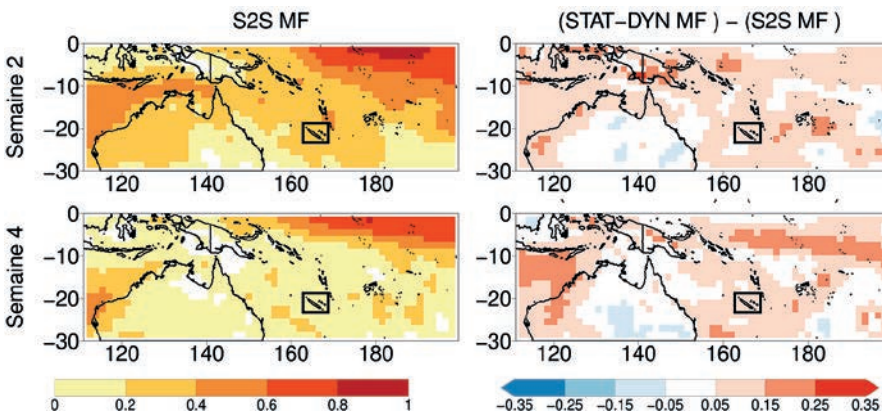
9

Nombre maximum de jours chauds et secs consécutifs



Évolution du nombre maximum de jours chauds et secs consécutifs aux horizons 2055 et 2080 sur deux stations représentatives des plaines de la Grande-Terre (Le Raizet) et des reliefs de la Basse-Terre (Petit-Bourg) en Guadeloupe. Les changements projetés sont robustes (significatifs à 95%) quels que soient le mois de l'année, l'horizon futur (2031-2055 ou 2056-2080), ou la station considérée.

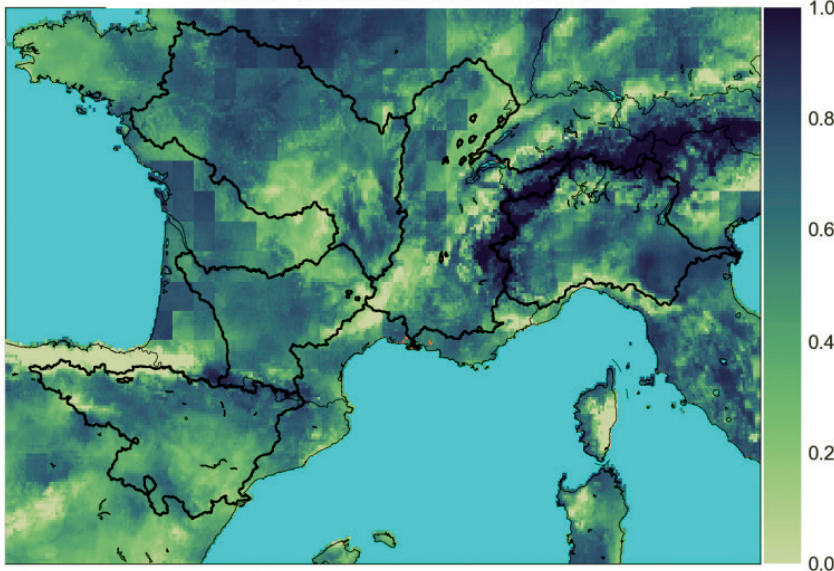
10



Gauche : Score ROC (discrimination de survenue d'un événement) pour l'occurrence du quintile hebdomadaire supérieur des précipitations dans le système S2S de Météo-France avant application de la méthode statistico-dynamique. Droite : Différence de score ROC après et avant application de la méthode statistico-dynamique dans le système S2S de Météo-France. La boîte rectangulaire indique la localisation de la Nouvelle-Calédonie.

11

Corrélation SWI (1993-2015) init Février, ech Avril



Carte de corrélation de l'indice d'humidité des sols (SWI). Prévission climatologique initialisée au 1^{er} février - Echéance 2 mois (Avril) - Période 1993-2015.

Prévision en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnières et infra-saisonnières dans le cadre du projet CREWS-Burkina Faso

Le programme CREWS vise à renforcer les systèmes d'information et d'alerte précoce dans les pays les plus vulnérables. CREWS-Burkina Faso est un projet pilote (2018-2020) pour la zone climatique du Sahel dans lequel Météo-France s'est vu confier le développement de la composante prévision saisonnière à infra-saisonnière.

Météo-France utilise plusieurs modèles européens pour l'échelle saisonnière et la prévision d'ensemble du centre européen (CEPMMT) pour l'échelle infra-saisonnière avec pour objectif de prévoir les événements les plus marquants à ces échelles de temps (période de sécheresse ou événements très précipitants par exemple).

Une série de produits a ainsi été mise au point à Météo-France pour l'ensemble du Sahel visant à documenter les éléments importants de la mousson ainsi qu'à utiliser au mieux des variables ayant une meilleure prévisibilité que la pluie, comme l'eau précipitable. L'agence du Burkina Faso a de son côté contribué à l'évaluation des produits de prévision grâce à un réseau de pluviomètres comptant désormais plus de 150 stations.

Lors de cette première année du projet, des briefings hebdomadaires ont impliqué Météo-France et les services météorologiques du Burkina Faso, du Sénégal, du Niger et du Mali dans l'optique de s'approprier et d'évaluer les produits développés et de partager les expertises de chacun des centres. Cette année la prévision saisonnière montrait un début de saison extrêmement sec sur le Sénégal qui a bien été observé. A l'échelle sub-saisonnière, un événement fortement précipitant sur le Mali ainsi qu'une fin de saison de mousson exceptionnellement tardive et humide ont pu être prévus jusqu'à quatre semaines en avance.

En 2020 le projet se poursuivra avec les différents services partenaires, avec notamment un plan de transfert des expertises développées durant le projet.

12

Sélection du nouveau jeu de simulations régionales débiaisées sur la France pour le portail DRIAS

Le portail DRIAS, ouvert en 2012, a pour but de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées et débiaisées sur la France. Le jeu de référence actuel est principalement basé sur un ensemble EURO-CORDEX défini en 2014 dont la mise à jour a été engagée dans le cadre de la convention services climatiques avec le MTES.

Au cours de ces cinq dernières années, le nombre de simulations disponibles sur EURO-CORDEX a fortement augmenté et permet de mieux évaluer les incertitudes liées aux modèles. Cependant, le nombre de simulations actuellement disponibles, environ 30 couples de GCM / RCM par scénarios climatiques, pose des problèmes de volume et de traitement des données. Par ailleurs, il s'avère que des anomalies ont été détectées sur plus de la moitié des anciennes simulations EURO-CORDEX actuellement disponibles sur le portail.

A partir de ce constat, un ensemble de critères de sélection a été défini pour parvenir à un ensemble robuste : diversité de la représentation des GCMs et RCMs, élimination des GCM/RCM présentant des anomalies, disponibilité d'au moins

deux scénarios RCPs. Le nouvel ensemble a été également défini pour permettre de représenter le plus correctement possible les incertitudes liées aux modèles et leurs répercussions en termes de diagnostic sur les températures et les précipitations en France (Voir Figure).

Ce nouveau jeu de simulations régionales corrigées avec la méthode ADAMONT comprendra 42 simulations, 12 sur la période historique, 12 projections sur le scénario RCP8.5, 10 pour le RCP4.5 et 8 pour le RCP2.6 et sera mis en ligne sur le portail DRIAS mi 2020.

14

Adaptation de la méthode de descente d'échelle ADAMONT en prévision saisonnière

Les services climatiques aux échéances saisonnières sont en plein essor ces dernières années en Europe. La demande est forte dans des secteurs comme l'énergie ou la ressource en eau, mais aussi dans des nouveaux secteurs comme le tourisme.

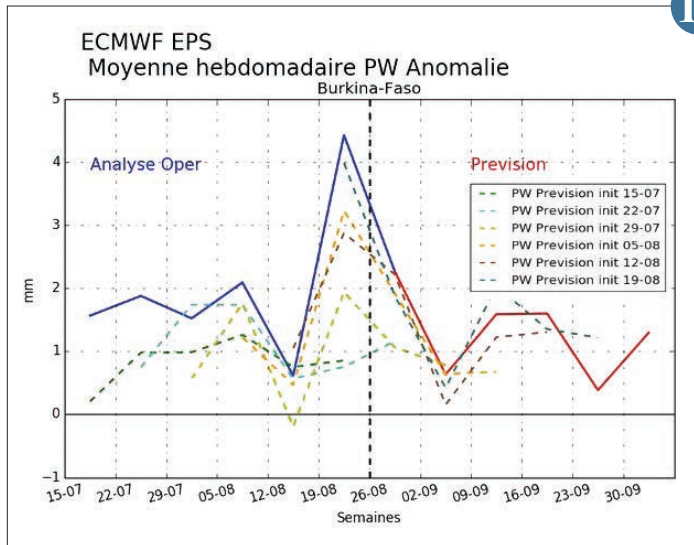
La plupart de ces services s'appuient sur des modèles d'impacts qui permettent de délivrer des prévisions de variables ou d'indicateurs directement utilisables par les différents utilisateurs.

Or pour fournir des prévisions réalistes, ces modèles d'impact ne peuvent pas être « alimentés » par des données brutes de prévisions saisonnières atmosphériques. En effet, ces prévisions présentent des biais parfois importants par rapport à la réalité, et de surcroît n'ont généralement pas des résolutions spatiale et temporelle suffisantes. C'est ici qu'interviennent les outils de correction et de descente d'échelle. Cette problématique s'est posée dans le développement de deux services en particulier : la prévision hydrologique autour du bassin méditerranéen dans le cadre du projet MEDSCOPE, et la prévision de manteau neigeux dans le cadre du projet PROSNOW. Pour ces deux applications, la méthode ADAMONT, développée initialement par le CNRM pour la descente d'échelle des scénarios climatiques sur les zones de montagne, a été adaptée par la DCSC pour traiter des prévisions saisonnières.

La méthode ADAMONT est une adaptation statistique qui s'appuie sur un ajustement des distributions quotidiennes des prévisions de plusieurs variables atmosphériques par une méthode quantile-quantile, par rapport aux distributions d'une référence (issue d'observations ou de réanalyses). Cette correction est différenciée selon des régimes de temps. Les prévisions corrigées sont ensuite désagrégées à un pas de temps fin (horaire par exemple) à l'aide de profils horaires issus de situations passées analogues. Cette dernière étape garantit la cohérence inter-paramètres aux pas de temps fin.

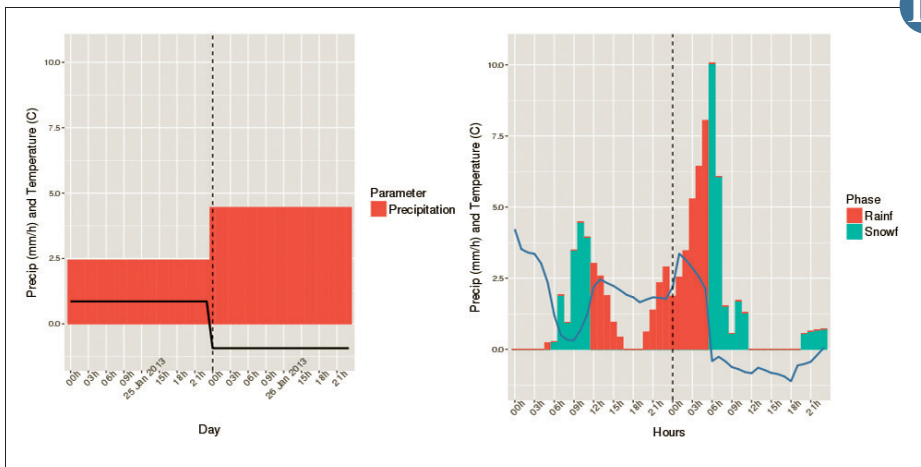
Les jeux de données produits par cette méthode pour le prototype du projet PROSNOW sont prometteurs, les prévisions représentent bien le climat et l'enneigement locaux et restituent correctement la variabilité interannuelle présente dans les prévisions brutes.

13



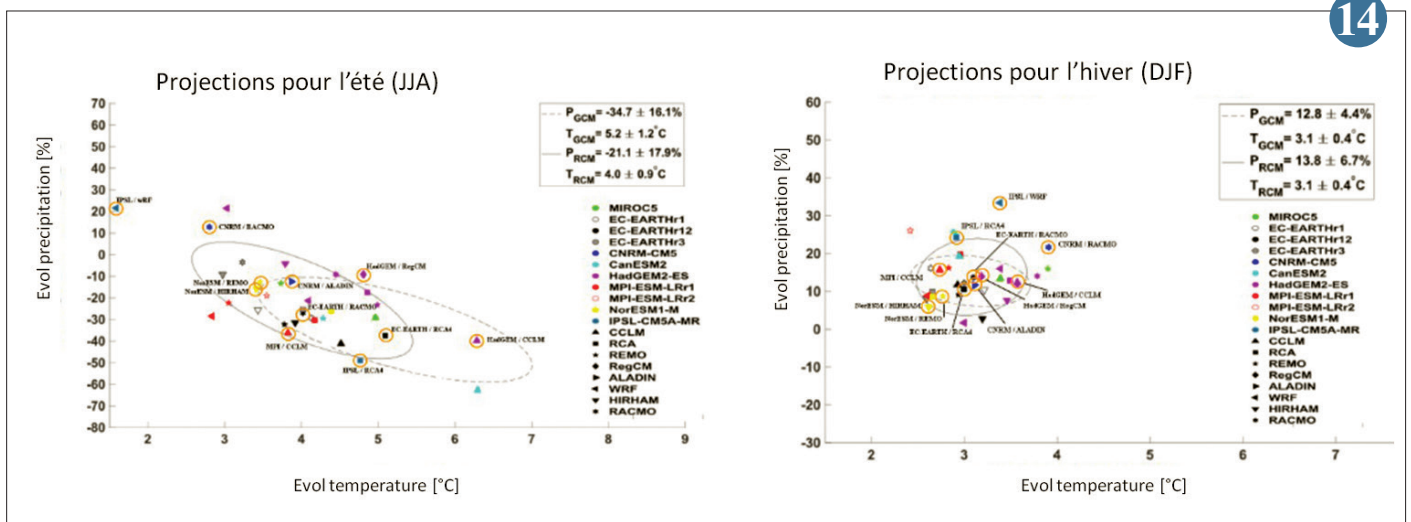
12

Exemple d'évolution de l'eau précipitable sur le Burkina Faso
 En pointillés sont représentés les différents runs successifs, en bleu l'analyse et en rouge la prévision du 26 août.
 Le pic observé en semaine du 19 août a été bien anticipé et a été associé à un regain d'activité pluvieuse.



13

Exemple d'application d'ADAMONT sur deux jours de prévisions pour le projet PROSNOW.
 À gauche, la prévision brute de température et de précipitation, au pas de temps quotidien ; elle correspond à un point de grille du modèle Météo-France système 6, pour un membre de l'ensemble.
 À droite, les données corrigées au pas de temps horaire sur une zone de montagne, avec une répartition des précipitations en pluie et neige.



14

Diagrammes du signal bi-varié du changement climatique en termes de changements projetés des températures et des précipitations (estivales = JJA à gauche et hivernale = DJF à droite) pour 2071-2100 par rapport à 1981-2010 pour le scénario d'émissions RCP8.5.
 Les cercles orange indiquent les RCM sélectionnés pour DRIAS. Les symboles identifient le RCM et les couleurs des GCM forceurs.
 La ligne pointillée (solide) indique l'ellipse de probabilité pour les résultats du GCM (RCM) (intervalle de confiance, recouvrant 68.2 % des données). Les scores de la moyenne et de l'écart-type pour les précipitations (P, %) et la température (T, °C) pour l'ensemble GCM et RCM, respectivement, sont indiqués dans le coin supérieur droit de chaque figure.
 (Source : projet PRINCIPLES).

Chimie, aérosols et qualité de l'air

L'année 2019 a été marquée par plusieurs feux de forêt intenses à travers le monde. Ce fut le cas en Sibérie, Amazonie, Indonésie, Californie, mais ce sont peut-être les feux en Australie, conjugués à une canicule exceptionnelle, qui ont le plus marqué les esprits. Ces derniers ont émis environ 400 millions de tonnes de CO₂ vers l'atmosphère, ce qui est comparable aux émissions humaines de gaz à effet de serre d'un pays comme la France. Ils ont également émis de grandes quantités d'autres gaz comme le CO, mais aussi des particules qui ont été transportées jusqu'en Amérique du Sud, et vers la haute troposphère / basse stratosphère (UTLS). Or dans cette partie de l'atmosphère, qui a une influence importante sur le bilan radiatif de la Terre et le climat, les processus dynamiques, microphysiques et chimiques impliquant notamment la vapeur d'eau, l'ozone, le CO et les aérosols sont complexes, fortement couplés, et souvent mal représentés par les modèles. Comme le montrent deux études présentées dans cette section, les progrès de la modélisation physico-chimique (MOCAGE) et la qualité des observations (IAGOS, avec désormais plus de 20 ans de recul) permettent d'améliorer la compréhension et la représentation de l'impact des feux de biomasse sur la composition en CO et ozone de l'UTLS. Il s'agit d'étapes importantes avant une compréhension plus globale des processus en jeu dans cette partie de l'atmosphère.

D'autres développements achevés en 2019 permettront de mieux anticiper la dispersion des panaches volcaniques, qui peuvent causer des perturbations majeures du trafic aérien. Il a ainsi été montré qu'une meilleure représentation des sources d'émission de particules volcaniques alliée à l'assimilation des épaisseurs optiques d'aérosols mesurées par les lidars sol de Météo-France améliore fortement la prévision de l'évolution du panache lié à l'éruption de 2010 en Islande.

Enfin, des progrès importants ont été réalisés dans la modélisation de l'impact des épandages agricoles sur la qualité de l'air, qui a longtemps été peu ou mal représenté par les modèles. Cela permet désormais de fournir des informations pour réglementer les pratiques d'épandage, en évitant les périodes qui conduiraient à une détérioration de la qualité de l'air dangereuse pour la santé humaine.

1

Climatologie d'ozone dans la haute troposphère vue par les mesures aéroportées IAGOS et par le modèle MOCAGE

Les mesures *in situ* d'ozone et de monoxyde de carbone collectées à bord d'avions de ligne dans le cadre de l'infrastructure de recherche IAGOS, dont Météo-France est partenaire, sont largement utilisées pour évaluer les modèles de composition chimique dans la haute troposphère et basse stratosphère. Maintenant que la base de données IAGOS couvre plus de 20 ans pour l'ozone et plus de 15 ans pour le monoxyde de carbone, elle offre l'opportunité d'évaluer les simulations longues réalisées dans les exercices internationaux d'inter-comparaison de modélisation chimie-climat, tels que CCMI, en support à la préparation des rapports du GIEC.

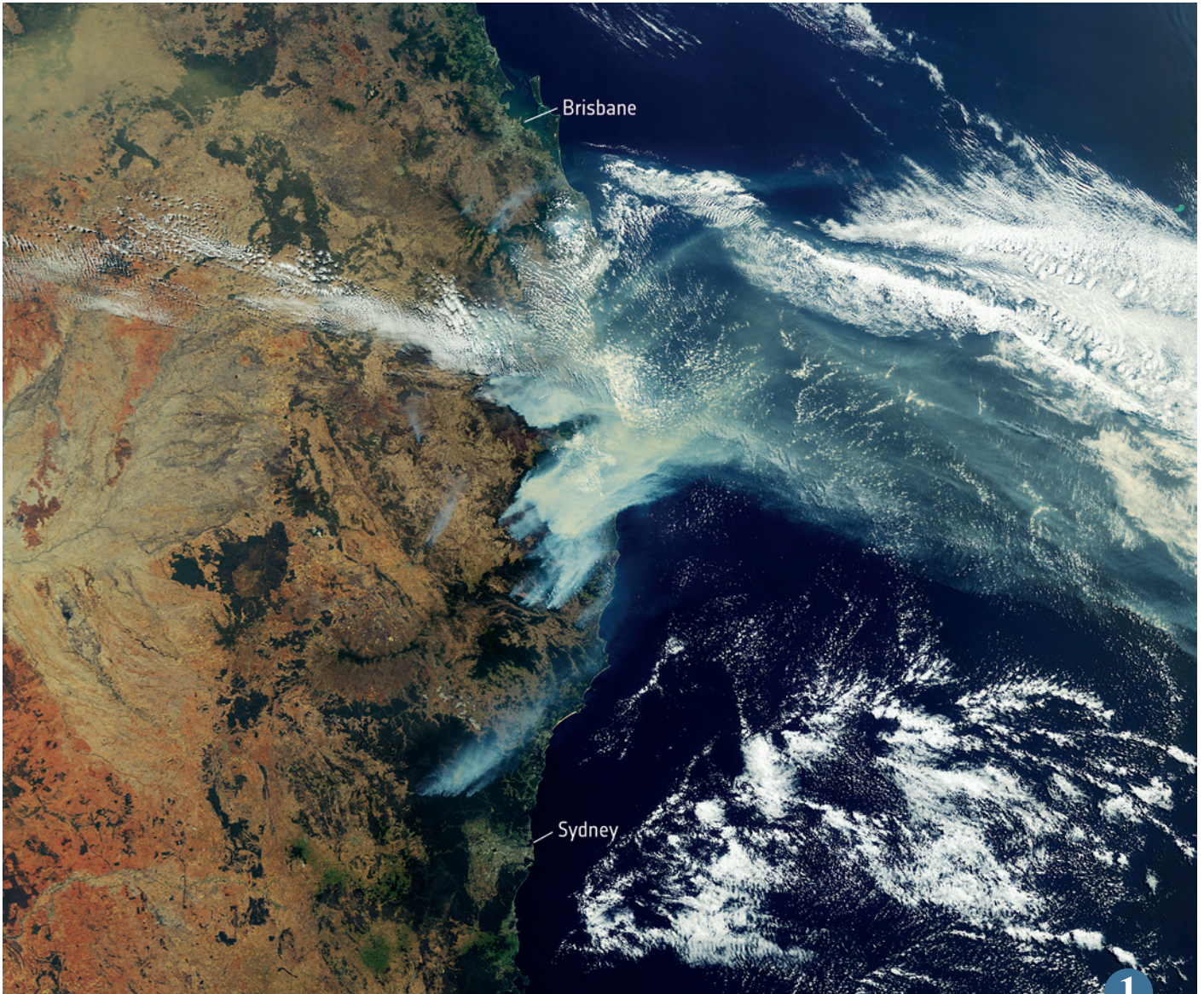
Dans le cas d'une évaluation classique sur une durée relativement courte, on interpole le modèle aux points de mesure. Mais pour la comparaison IAGOS-modèle sur 20 ans en vue de produire des climatologies, une méthode originale a été développée. Le concept est de projeter les mesures IAGOS sur la grille du modèle sur une base mensuelle, les résultats CCMI étant fournis en moyennes mensuelles.

Cette nouvelle méthode a été testée sur la simulation pour le climat récent de MOCAGE produite dans le cadre de CCMI. Les climatologies d'ozone obtenues sur la période 1994-2013 sont illustrées sur le niveau 24 de MOCAGE (~225 hPa soit ~11 km

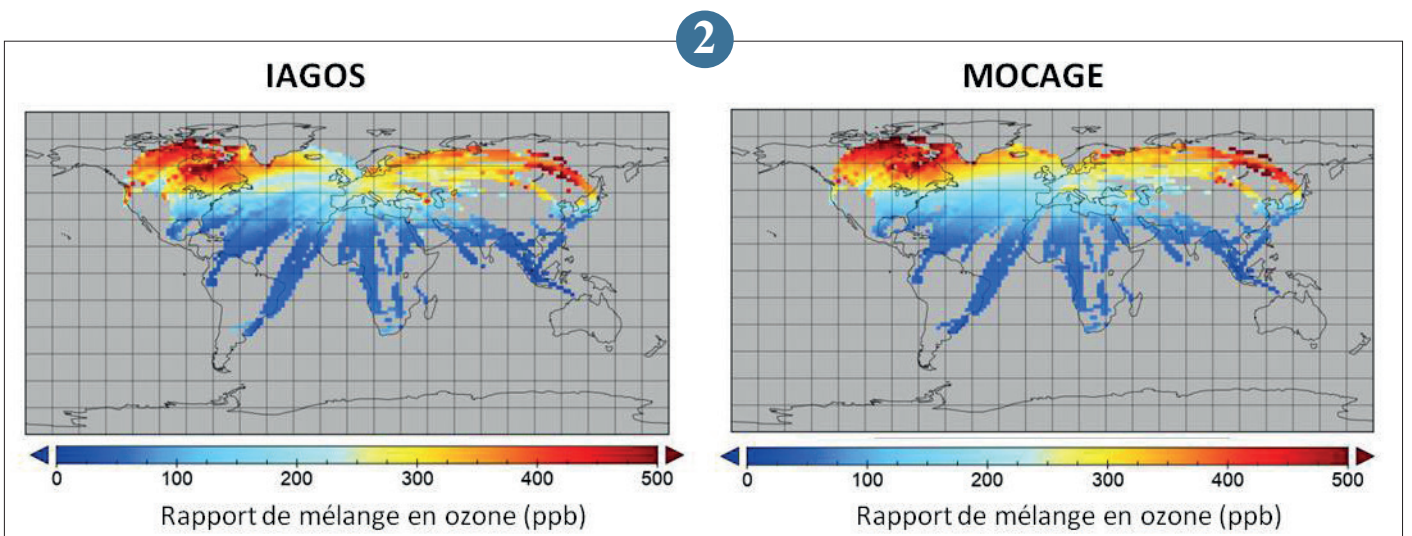
d'altitude). Elles montrent que la simulation CCMI de MOCAGE donne des résultats en très bon accord avec les mesures avion IAGOS. L'application de la méthode peut être élargie à la comparaison avec des simulations CCMI d'autres modèles que MOCAGE ou à d'autres simulations du même type.

2

Carte de climatologie montrant la moyenne de l'ozone sur la période 1994-2013 calculée à partir des mesures IAGOS (à gauche) et issus de la simulation CCMI de MOCAGE (à droite). A noter que la climatologie de MOCAGE n'est montrée que là où les mesures IAGOS sont disponibles, pour faciliter la comparaison.



▲ Cette image satellite du 13 novembre 2019 à 09:15 (heure locale), fournie par la mission satellite Copernicus Sentinel 3 montre que de multiples feux de forêt font rage près des côtes de la Nouvelle-Galles du Sud et du Queensland. Des panaches de fumée s'étendent vers l'est, sur la mer de Tasmanie. © Contient des données modifiées issues de Copernicus Sentinel (2019), traitement effectué par l'ESA.



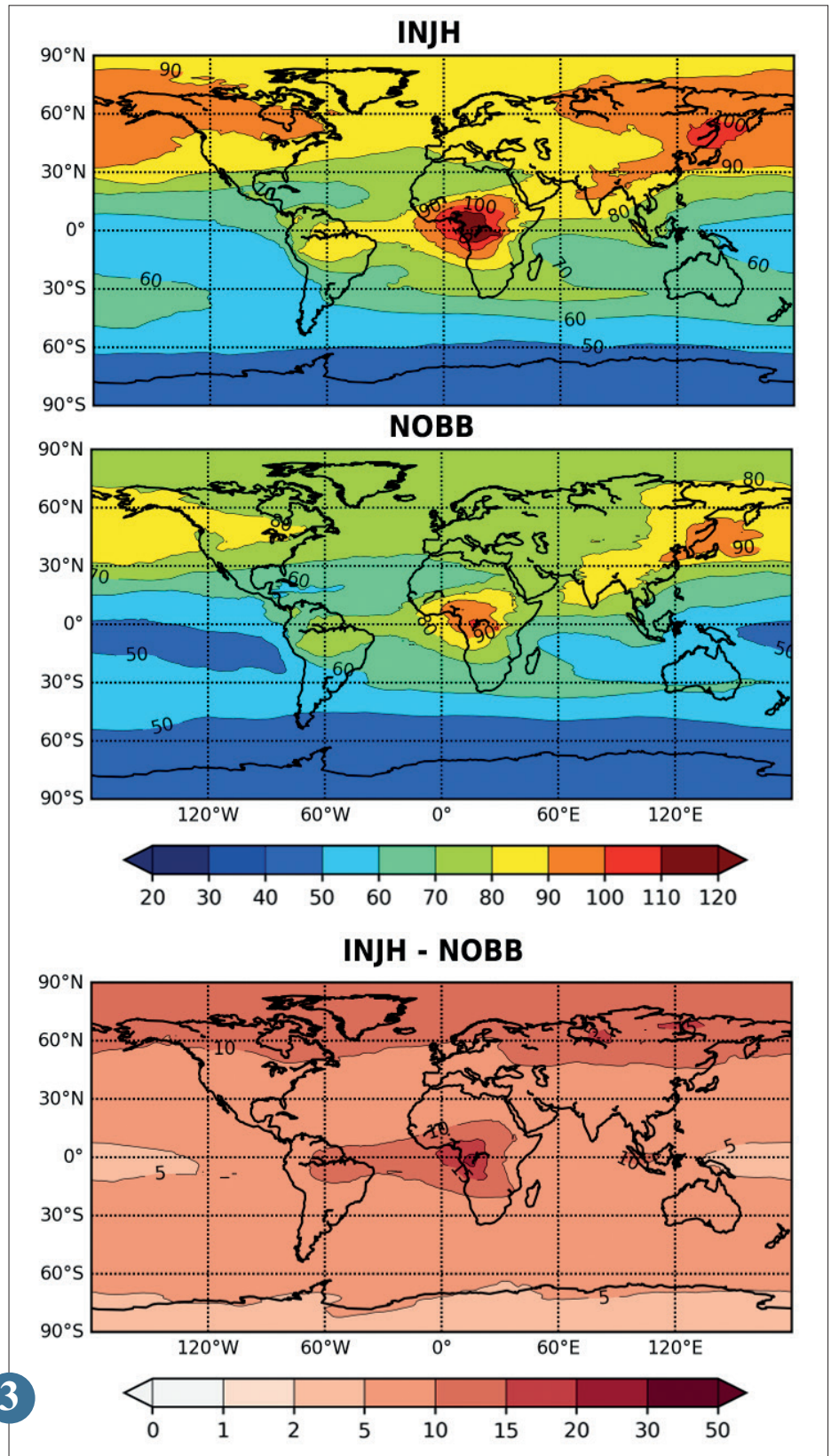
Impact des émissions de feux de biomasse sur la composition chimique de la haute troposphère

Le monoxyde de carbone (CO) est une espèce clé dans la compréhension de la composition de la haute troposphère, notamment car il est précurseur d'ozone à cette altitude (de 8 à 10 km à nos latitudes). Les feux de biomasse sont une source principale de CO, mais leur représentation reste assez imprécise dans les modèles de géoscience, à cause de phénomènes comme la pyro-convection. Le modèle de chimie-transport global MOCAGE est utilisé pour étudier comment ces feux de biomasse jouent sur la composition en CO de la haute troposphère. Pour cela on a réalisé une simulation globale sur l'année 2013, que l'on a validée avec les données issues du programme européen IAGOS qui instrumente des avions de lignes pour mesurer la composition chimique de l'air le long de leur vol. Ensuite, en comparant cette simulation à une autre où l'on coupe les émissions des feux de biomasse, on peut ensuite estimer leur impact sur les concentrations de CO de la haute troposphère (figure). On note que les zones les plus impactées sont au-dessus des forêts boréales ainsi que d'Afrique équatoriale, mais aussi dans une moindre mesure au-dessus de la forêt amazonienne et de l'Asie équatoriale. Les impacts sont plus importants pour les zones les plus émettrices, mais nécessitent aussi un transport rapide vers la haute troposphère : la convection profonde pour les zones tropicales, et la pyro-convection pour les forêts boréales.

Cette étude est la première étape d'un travail plus global sur la composition chimique de la haute troposphère. On souhaite par la suite s'intéresser aux réactions chimiques impliquant le CO, notamment la production d'ozone, car son impact radiatif à cette altitude est grand.

3

3



▲ Carte moyenne du CO (en ppb) dans la haute troposphère en 2013 simulée par MOCAGE : avec les émissions des feux de biomasse (INJH, en haut), sans ces émissions (NOBB, au milieu) ; ainsi que la différence entre ces deux simulations (en bas).

Amélioration de la représentation des émissions agricoles d'ammoniac : un modèle simple pour estimer les dates de fertilisation à partir de contraintes météorologiques

L'ammoniac (NH₃) est un polluant atmosphérique majeur et un précurseur des particules de petite taille (PM10 et PM2.5) qui impacte l'environnement et la santé humaine et qu'il faut donc surveiller et prévoir. L'une des sources majeures de NH₃ est l'utilisation de fertilisants par le monde agricole.

Dans le cadre du projet Amp'Air, financé par PRIMEQUAL, Météo-France développe un modèle simple de prévision des dates de fertilisation basé sur la température, les précipitations et les pratiques agricoles. Ce modèle va permettre de mieux représenter les fenêtres de fertilisation et donc les variations temporelles des émissions de NH₃.

Le modèle détermine d'abord si les conditions météorologiques permettent les activités de semence et d'épandage (sol trop boueux, trop de vent, sol gelé, etc...). Une probabilité de semence à une date donnée

est alors calculée en fonction de paramètres agricoles propres à chaque semence (blé, tournesol, etc...). Enfin, des dates probables de fertilisation sont estimées au regard des dates de semence, de l'évolution des paramètres atmosphériques nécessaires à la plante (i.e. le cumul de température), et les stades de développement habituels nécessitant un apport d'engrais. La figure a décrit le schéma de fonctionnement du modèle. La figure b représente les résultats

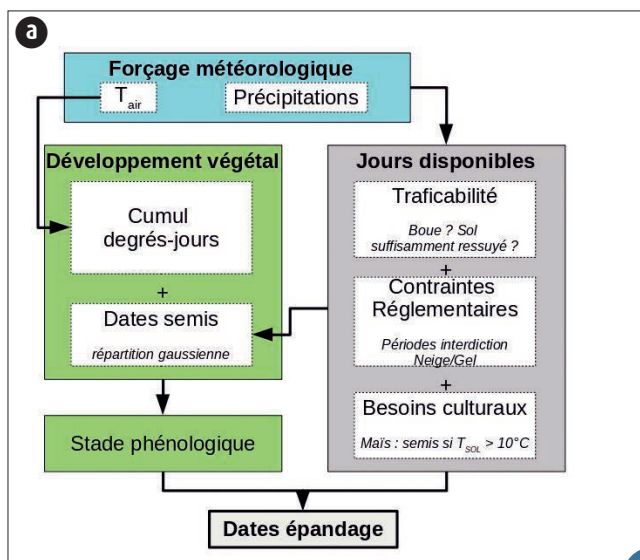
de probabilités pour le maïs sur la région Normandie en 2006. Le panneau en haut montre les jours exclus pour les activités, au milieu les jours de semence et de fertilisation probables, et en bas l'évolution de la somme de température.

Ce modèle va prochainement être couplé à un modèle de calcul des émissions de NH₃ à partir des composés fertilisants épandus.

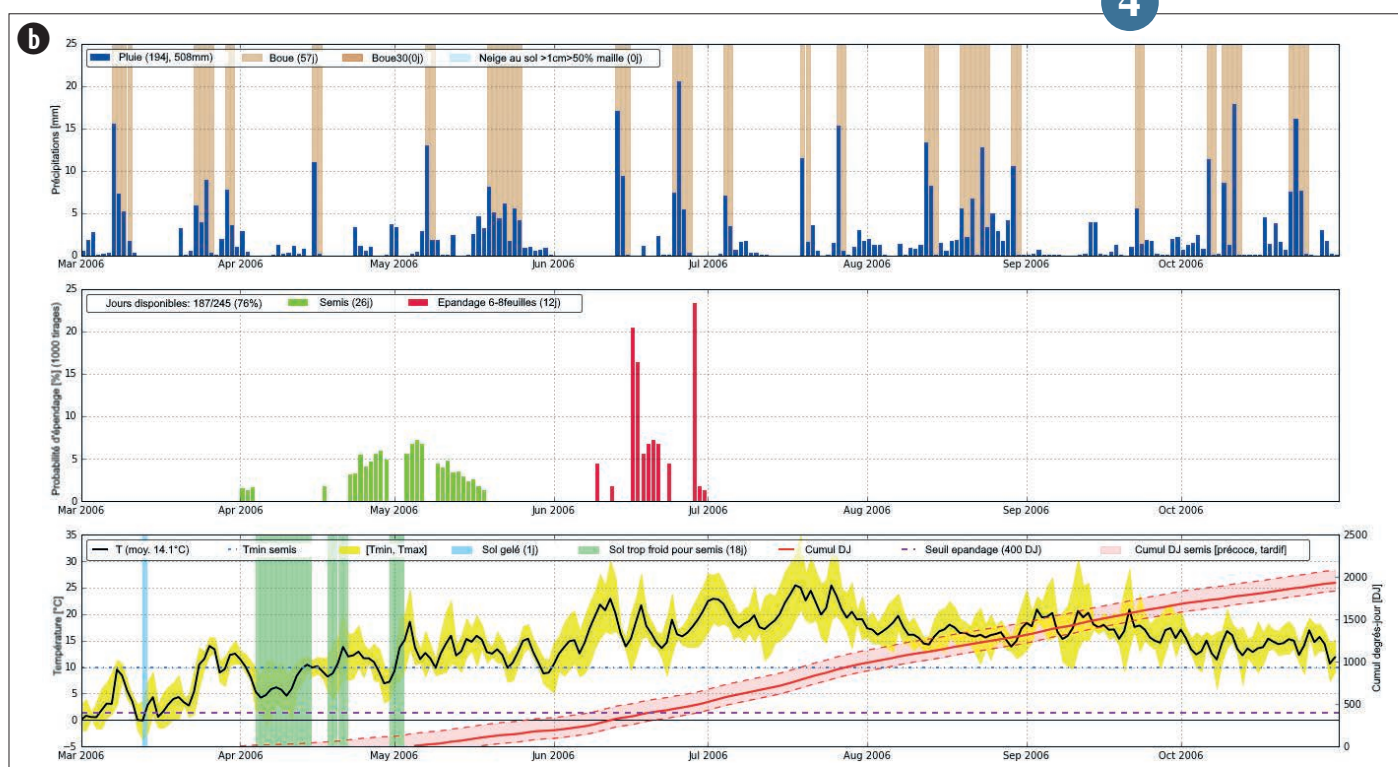
4

(a) Schéma de principe du modèle.

(b) Prévision des dates de semis et de fertilisation pour le Maïs, sur la région Normandie en 2006.



4



Neige

Les recherches menées à Météo-France au sujet de la neige en montagne couvrent les échelles de temps de court terme (suivi et prévision) ainsi que l'évolution climatique (passé et futur) à long terme des conditions atmosphériques et d'enneigement. L'articulation de ces échelles de temps, et le travail croisant aléas et impacts (risques naturels, tourisme, ressources en eaux, écosystèmes) placent les recherches menées au Centre d'Etudes de la Neige (CEN) au coeur des problématiques d'analyse du risque climatique et d'adaptation au changement climatique. De 2017 à 2019, le CEN, par l'entremise de son directeur S. Morin, a pris part à la rédaction du Rapport Spécial du GIEC sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat Changeant (SROCC). Ce rapport SROCC a été produit conjointement par le Groupe 1 du GIEC, qui travaille sur les aspects physiques du changement climatique et le Groupe 2, qui étudie les impacts, les vulnérabilités, l'adaptation. Cette approche permet d'aborder les problématiques de façon intégrée. Le chapitre sur la montagne traite spécifiquement de l'évolution des conditions météorologiques en montagne (température, précipitation), de l'évolution physique de la neige, des glaciers, du permafrost de montagne, et les impacts sur les ressources en eau, les risques naturels (avalanches, glissements de terrain, crues, phénomènes d'origine glaciaire et péri-glaciaires), la faune et la flore de montagne, l'agriculture, l'hydroélectricité, le tourisme, les modes de vie et l'identité culturelle des populations de montagne. Pour en savoir plus : <https://www.ipcc.ch/srocc/>

1

Tomographie et mouvements des poussières dans la neige sèche

Les particules absorbant la lumière dans la neige, comme les poussières minérales ou le carbone suie, constituent un puissant agent de forçage climatique. Leur présence assombrit la surface de la neige et conduit à une plus forte absorption d'énergie solaire. Plusieurs études ont quantifié cet impact radiatif en supposant que ces particules étaient immobiles dans la neige sèche.

Afin d'évaluer la validité de cette hypothèse, nous avons suivi par tomographie aux rayons X des échantillons de neige contaminés par des poussières minérales et évoluant dans des conditions isothermes à -2°C et sous un gradient de température d'environ 20 K/m. Nous avons montré que le métamorphisme de gradient de température a un impact sur

la localisation des particules par rapport à la matrice de glace et dans la couche de neige. Dans l'expérience de gradient de température, nous avons observé une inclusion progressive des particules de poussière dans la glace (Fig. 1a) et un déplacement vers le bas du centre de masse de la poussière de 200 µm en moyenne pendant 200 h (Fig. 1b). Le mouvement de la poussière résulte principalement de la chute des particules de poussière dans les pores (Fig. 1c), tandis que les particules incluses dans la glace ne se déplacent qu'avec le tassement de la matrice de glace. La comparaison avec l'expérience isotherme, dans laquelle aucun mouvement significatif n'a été observé, confirme que le principal

moteur de ce mouvement est la présence de flux de vapeur d'eau intenses liés aux mécanismes de sublimation-déposition.

Ces données sont cruciales pour notre compréhension de l'interaction des poussières avec la neige et de la modification associée de leur impact radiatif. Dans les conditions arctiques et subarctiques typiques, dans lesquelles prévaut un fort métamorphisme à gradient de température, nous avons estimé que le mouvement de la poussière pourrait entraîner une diminution significative de l'énergie solaire absorbée lorsque la poussière est située sur la couche supérieure du manteau neigeux pendant une longue durée.

2

Post-traitement statistique de prévisions d'ensemble de l'épaisseur de neige fraîche

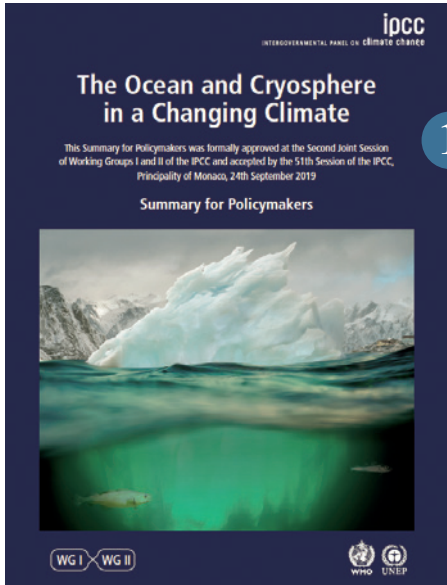
La prévision de l'épaisseur de neige fraîche est cruciale pour le risque d'avalanches, la viabilité routière, la gestion des stations de ski et l'attractivité touristique.

Météo-France opère le système probabiliste PEARP-S2M dans lequel 35 membres de Prévision Numérique du Temps alimentent le modèle SAFRAN-Crocus qui représente les principaux processus physiques dans le manteau neigeux. Il fournit de meilleures prévisions d'épaisseur de neige fraîche que les diagnostics directs de la Prévision Numérique du Temps mais souffre de biais significatifs et de sous-dispersion. Nous avons appliqué un post-traitement statistique

à ces prévisions d'ensemble, inspiré d'une méthode développée par la NOAA pour les précipitations. L'apprentissage s'appuie sur les mesures d'épaisseur de neige en 24 heures dans les Alpes et Pyrénées Françaises. Des améliorations significatives sont obtenues par rapport aux prévisions brutes. Les résultats montrent que le post-traitement peut être appliqué en dehors des points d'observations. L'utilisation de longs « reforecasts » pour l'apprentissage améliore la fiabilité des chutes de neige sévères mais surestime l'incertitude des prévisions en raison de divergences dans les perturbations initiales entre les reforecasts et les prévisions temps réel.

Ainsi, le développement de produits de prévision automatique robustes d'épaisseur de neige fraîche requiert de longs reforecasts aussi homogènes que possible avec les systèmes opérationnels. Néanmoins, une première version de prévisions post-traitées peut être fournie au projet opérationnel de Météo-France Alpha comme une alternative en région de montagne aux prévisions automatiques fortement biaisées disponibles jusqu'ici pour cette variable.

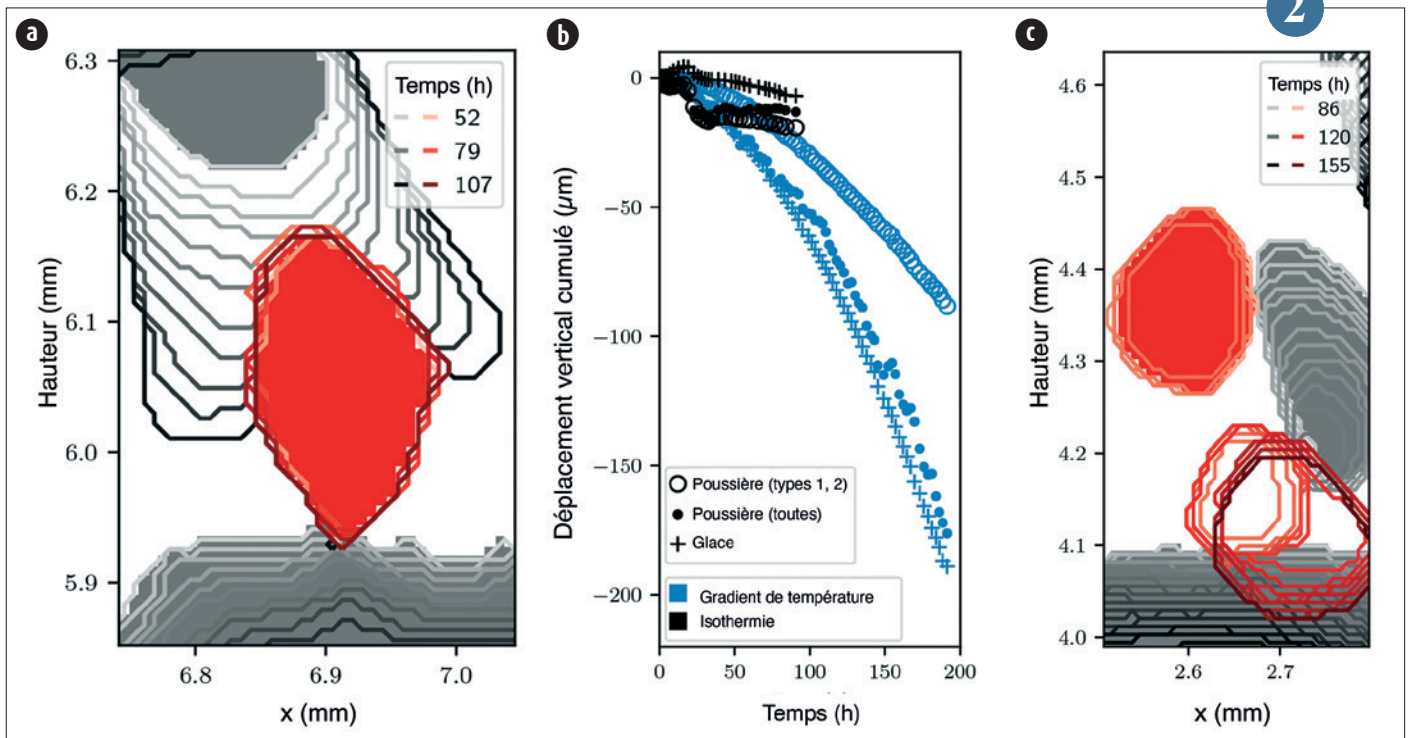
3



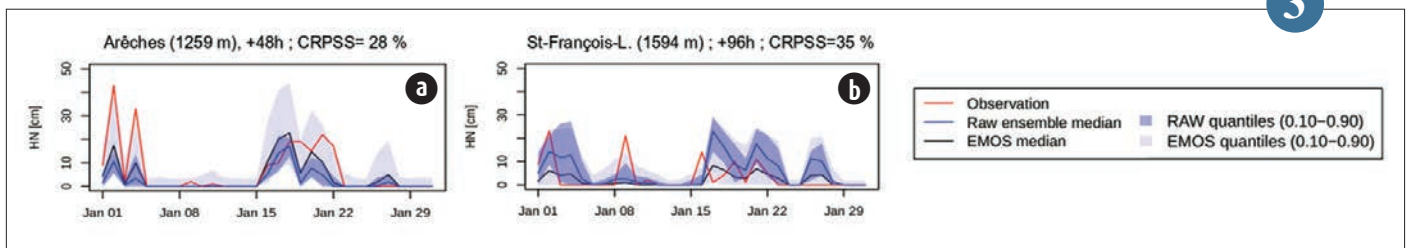
Page de couverture du Rapport Spécial du GIEC sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat Changeant.

1

(a) Exemple d'inclusion progressive d'une particule minérale dans la matrice de glace dans l'expérience de gradient de température. Les positions initiales de la glace et des poussières sont indiquées en gris et rouge, respectivement. Leurs évolutions temporelles sont représentées par les différents contours ;
 (b) Vitesse verticale moyenne de la surface de la glace et des particules calculée avec toutes les particules ou seulement celles ne tombant pas dans les pores (types 1 et 2) ;
 (c) Exemple d'une particule tombant par perte de contact avec la glace puis descente progressive avec la surface de glace qui se sublime.(domaine de 255 km de rayon). Les cumulés observés par les pluviomètres sont indiqués par des disques de couleur.



2



3

Exemples de prévisions d'épaisseur de neige fraîche en 24 heures sur le mois de Janvier 2018 (a) pour la station d'Arèches, avec 48 heures d'anticipation et (b) pour la station de Saint-François-Longchamp, avec 96 heures d'anticipation. L'enveloppe bleue représente la distribution de probabilité des prévisions brutes (courbe indigo pour la médiane), et l'enveloppe grise la distribution de probabilité issue du post-traitement statistique (courbe noire pour la médiane). Les prévisions brutes sous-estiment les chutes de neige dans l'exemple (a) et les surestiment dans l'exemple (b). Dans les deux cas, les prévisions brutes sous-estiment l'incertitude de prévision. Aussi la correction statistique augmente (a) ou diminue (b) la médiane et augmente la dispersion dans les deux cas. Les observations (en rouge) se trouvent ainsi beaucoup plus fréquemment incluses dans la distribution post-traitée que dans la distribution brute.

Projections climatiques de l'enneigement dans les stations de sport d'hiver

Le tourisme de ski est un secteur majeur de l'économie des régions de montagne. La gestion de la neige (damage, neige de culture), est une composante courante de l'exploitation des stations de ski. La question de savoir si la neige de culture est une mesure d'adaptation pertinente vis-à-vis du changement climatique est un sujet largement débattu, avec des implications socio-économiques majeures. Des travaux menés au Centre d'Études de la Neige (Météo-France - CNRS, CNRM), en collaboration avec l'INRAE de Grenoble, montrent comment le changement climatique influence les conditions d'exploitation des stations de ski. Une étude publiée dans Scientific Reports en 2019 a analysé la fiabilité de

l'enneigement dans 129 stations de ski des Alpes françaises, en utilisant un modèle de manteau neigeux prenant explicitement en compte le damage et la neige de culture, utilisant un ensemble de projections climatiques régionales ajustées, et utilisant un modèle spatial de l'organisation des stations de ski. Les résultats indiquent qu'une couverture de 45 % de la surface équipée par de la neige de culture, représentative des infrastructures au début des années 2020, améliore la fiabilité de l'enneigement à l'échelle des Alpes françaises, pendant la période de référence 1986-2005 et en dessous de 2°C de réchauffement planétaire depuis l'ère préindustrielle. Au-delà de 3°C de réchauffement planétaire, les conditions

d'enneigement deviennent souvent peu fiables et entraînent des besoins en eau plus élevés. Météo-France a également contribué à la mise en place d'un service Copernicus Climate Change Service (C3S) pour le tourisme en Europe. Des travaux sont en cours pour fournir aux acteurs locaux et nationaux des services à l'appui des stratégies d'adaptation au changement climatique, prenant en compte la diversité des situations des stations françaises.

4

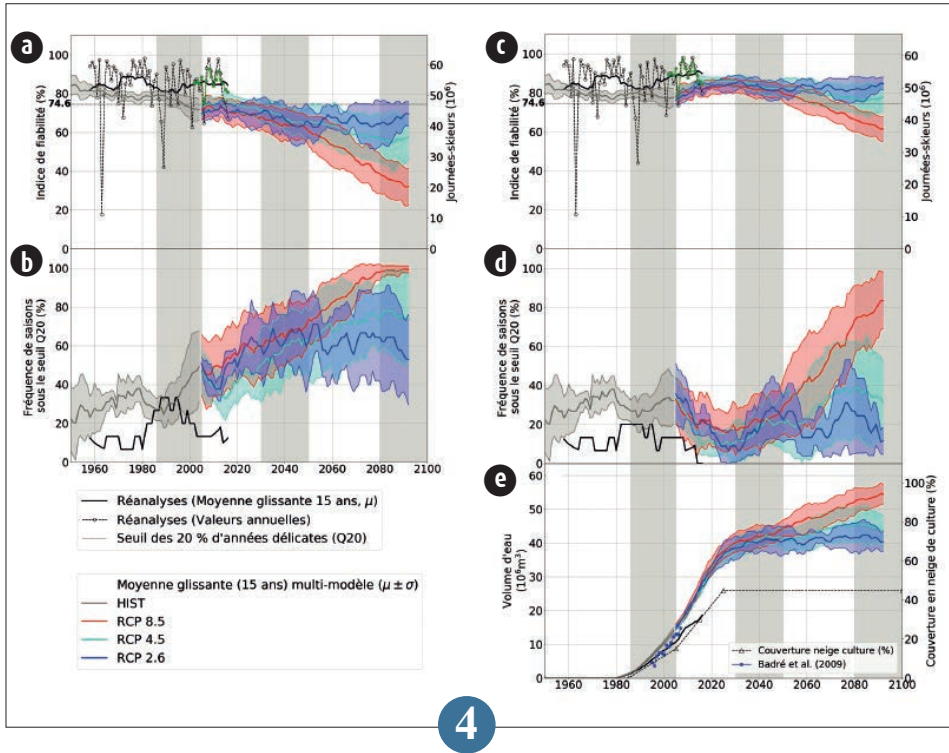
Simuler les observations Sentinel-1 en montagne, un premier pas vers leur assimilation dans un modèle de neige

Les mesures SAR de Sentinel-1 offrent aujourd'hui des possibilités nouvelles pour suivre l'évolution du manteau neigeux. Leur exploitation repose en partie sur la compréhension des interactions entre les différents composants du système Surface-Neige-Atmosphère et le rayonnement électromagnétique. L'assimilation des observations de Sentinel-1 dans le modèle de neige Crocus permettrait de fusionner de façon optimale les modèles existants (état a priori du sol, du manteau neigeux et de l'atmosphère) et les observations. Cependant, pour réaliser cette fusion, la compréhension et la modélisation des interactions ondes/neige, par le biais de simulations de transfert radiatif dans la neige, sont des prérequis indispensables.

Des simulations de coefficients de rétrodiffusion en bande C ont été réalisées en utilisant le modèle de transfert radiatif dans la neige MEMLS3&a alimenté par les sorties du modèle de neige ISBA/Crocus. Les simulations sont sur une période de 3 ans sur une zone de fort relief. L'évaluation de ces simulations a été réalisée par comparaison à 141 scènes d'observations SAR de Sentinel-1. Nous avons montré que la chaîne de modélisation est en mesure de reproduire de manière cohérente le signal radar pour un sol nu ou une neige sèche. En cas de neige humide, un biais négatif entre observations et simulations a été mis en évidence, lors des périodes de fonte notamment. La variabilité temporelle des simulations se compare très bien avec celle des observations ce qui est

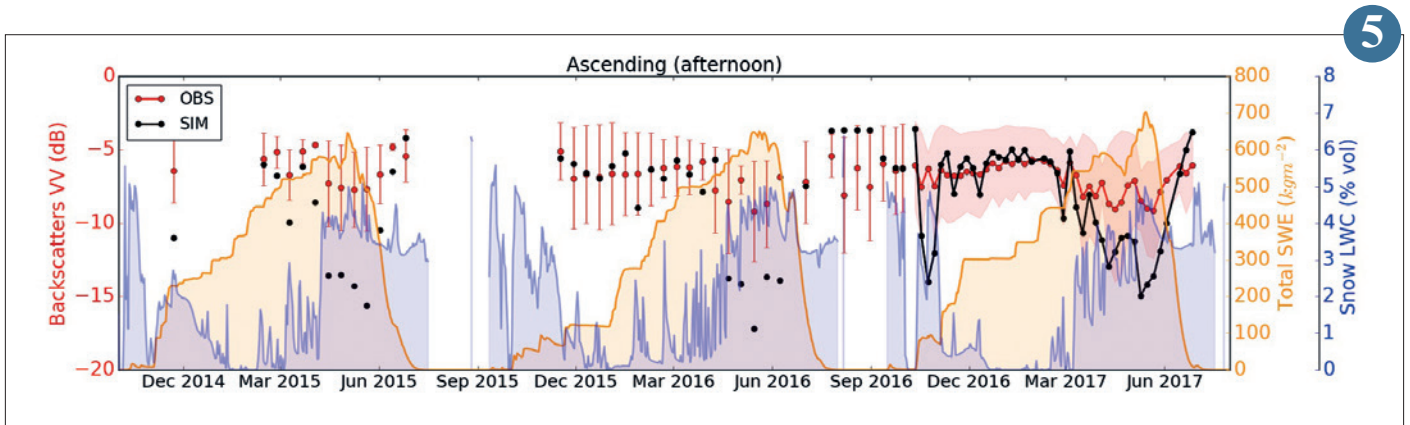
très encourageant pour l'assimilation (voire figure jointe). Le biais constaté peut avoir plusieurs origines qu'il convient de corriger. Il s'agit de la première étude démontrant la pertinence d'une chaîne de modèles permettant d'effectuer des simulations de rétrodiffusion SAR sur une région complexe de montagne en présence de neige, et d'un premier pas vers l'assimilation des mesures Sentinel-1 dans nos modèles.

5



4

Figure (issue de Spandre et al., 2019).
 (a), (c) : simulation de la fiabilité de l'enneigement (a) et de la fréquence des saisons délicates (c) sans neige de culture, à l'échelle de l'ensemble des Alpes, et pour plusieurs scénarios climatiques.
 (b), (d) : idem, mais en tenant compte de l'évolution de la neige de culture atteignant 45 % des surfaces couvertes en 2025.
 (e) : volume d'eau estimé à l'échelle de l'ensemble des Alpes, correspondant à la production de neige calculée pour l'ensemble des Alpes, selon les scénarios climatiques.



5

Série temporelle des coefficients de rétrodiffusion en polarisation VV observée (en rouge) et simulée (en noir) représentative des hautes altitudes (entre 2850 et 3150 du massif de l'Oisans) et d'un manteau neigeux de fin de journée.
 La teneur en eau liquide de la neige est représentée en bleu et son équivalent en eau en orange.

Océanographie

Les travaux de recherche et les activités de développement qui sont présentées dans ce chapitre illustrent les motivations et les moyens que mettent en œuvre les chercheurs et ingénieurs de Météo-France, en lien étroit avec la communauté scientifique, pour faire progresser les activités de météorologie marine. Ils tirent parti des progrès des sciences de l'océan et tout spécialement des recherches qui s'intéressent aux interactions entre les milieux. Ils y contribuent également, tant il est vrai qu'en sciences de la Terre, la recherche se nourrit de la pratique opérationnelle quotidienne pour progresser.

La météorologie marine fournit des services essentiels aux activités humaines, en mer ou à la côte : états de mer, dérives, phénomènes à la côte, propriétés de l'eau, par tous les temps, sous toutes les latitudes. Les algorithmes et modèles représentent plus finement les phénomènes, les interactions complexes aux interfaces de l'air, de la mer, des côtes et des fleuves – là où tout devient complexe... Ils intègrent des observations fournies par les filières spatiales les plus modernes : les Sentinelles du programme Copernicus sont les vigies avancées de séries qui seront opérationnelles demain, dont le bénéfice est prouvé notamment par les travaux présentés ici. Les collaborations avec les laboratoires académiques et les collaborations internationales sont motrices.

Les enjeux sont grands. L'océan dicte le climat. Il contribue à des risques majeurs en s'alliant à l'atmosphère. Les interactions océan-atmosphère, vagues incluses, déterminent les caractéristiques des épisodes extrêmes que sont les cyclones ou les événements méditerranéens. Les navires, les installations maritimes, les ouvrages côtiers, ou simplement les paysages côtiers dans les Outre-mers comme en Métropole subissent les assauts des masses d'eau. L'océanographie, comme les autres sciences qui décrivent les différents compartiments du « système Terre », fait partie de la panoplie obligée des services météorologiques.

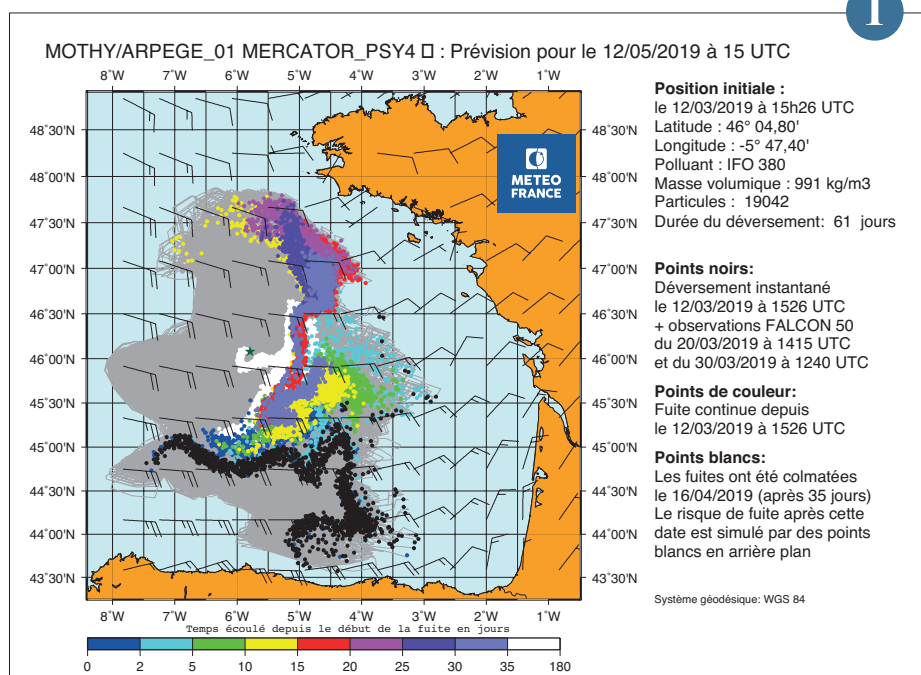
Dérives en mer au profit de la gestion de crise

Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en œuvre le modèle MOTHY de prévision de dérive en mer de nappes d'hydrocarbures ou d'objets flottants. Le système est activé une vingtaine de fois par semaine pour des cas réels de déversement d'hydrocarbures ou d'opérations de recherche et sauvetage. L'accident du Grande America survenu dans le golfe de Gascogne est l'évènement marquant de l'année 2019.

Suite à un incendie, le navire Grande America qui transportait 365 conteneurs et 2 000 véhicules, coule le 12 mars 2019, à 350 km des côtes françaises, avec environ 2 200 tonnes de fioul de propulsion à bord. Une quantité inconnue de fioul est rejetée dans le milieu marin le jour du naufrage, suivi de 35 jours de fuite continue avant que les brèches dans la coque ne soient colmatées par un robot sous-marin.

Dès le 14 mars, le Comité de dérive, réunissant des experts du Cedre, de Météo-France, de l'Ifremer et du Shom, est chargé de fournir quotidiennement au Préfet maritime des informations cohérentes et pertinentes sur la dérive des nappes d'hydrocarbures. Le modèle MOTHY est utilisé quotidiennement pendant la période de surveillance aérienne et de récupération en mer. Il fournit des prévisions de la dérive des nappes d'hydrocarbures et des conteneurs jusqu'à 3 jours en mode déterministe et jusqu'à 10 jours en mode probabiliste. Une modélisation à long terme de la pollution diffuse résiduelle est également réalisée sur plusieurs mois, en particulier pour gérer les fuites continues issues de l'épave.

Les prévisions de dérive qui n'annonçaient pas d'arrivée de pétrole à la côte ont permis aux autorités d'organiser la lutte en mer sans mobiliser de moyens à terre. Effectivement, aucune pollution n'a été observée sur les côtes.



Simulation MOTHY de 2 mois depuis l'accident, sur un scénario de déversement instantané le jour de l'accident combiné à des observations aériennes (points noirs), suivi de fuites continues issues de l'épave (points de couleurs) jusqu'à 35 jours, et de fuites potentielles (points blancs) ensuite.

Les calculs ont été réalisés avec les vents du modèle ARPEGE de Météo-France et les courants du modèle MERCATOR global du Copernicus Marine Environment Monitoring Service. La position de l'épave est repérée par une étoile verte.

Modélisation de l'état de mer : les spécificités de la bande côtière Guyanaise

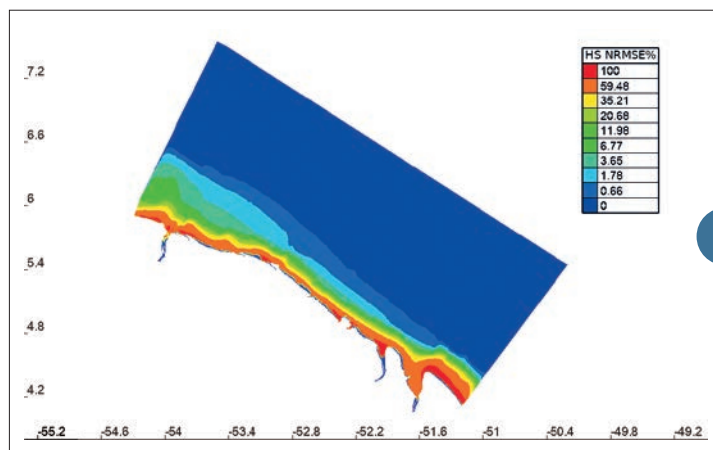
Le projet SEAGUY piloté par la DIRAG et financé par la DEAL de Guyane vise à prendre en compte les spécificités Guyanaises pour une meilleure estimation de l'aléa côtier et une amélioration des vigilances « mer dangereuse à la côte ». Le littoral Guyanais se distingue par une hydrodynamique complexe ainsi qu'une morphologie très changeante. Les bancs de vase colonisés en partie supratidale par des mangroves sont soumis à une forte érosion sous l'action des vagues et des courants côtiers, conduisant à une mobilité importante des dépôts sédimentaires.

Durant la phase 1 de SEAGUY, la stratégie de modélisation s'est basée sur la chaîne opérationnelle de Météo-France comprenant un modèle hauteurier d'état de mer (MFWAM) utilisé pour forcer un domaine côtier non-structuré (WAVEWATCH III). Une climatologie de houle a été réalisée pour estimer les durées de retour des événements extrêmes. L'impact des courants océaniques (fournis par MERCATOR) tels que le Courant Nord Brésilien

s'est révélé important pour la prévision de l'état de mer le long des côtes Guyanaises.

Dans une seconde phase, des études ont été menées sur l'impact de l'emplacement des bancs de vase et celui de la dissipation par frottement. Il en résulte qu'une ancienneté de deux années de la bathymétrie entraîne une erreur de hauteur significative des vagues pouvant atteindre jusqu'à 1,5 m à la côte. Le déplacement des bancs de vase modifie la distribution de l'énergie des vagues à la côte par changement de la réflexion, la réfraction, la diffraction et la dissipation de la houle par déferlement bathymétrique, ou encore par frottement.

Pour accroître la qualité des prévisions de houle sur le littoral Guyanais, il est souhaitable de revoir le mode et la fréquence d'acquisition des bathymétries (satellite ou vidéo) et/ou de coupler un modèle de morphologie au modèle de vagues, ainsi que de considérer explicitement les apports fluviaux.



▲ Erreur quadratique moyenne normalisée de la hauteur significative des vagues pour une simulation de l'année 2013, réalisée avec la prise en compte d'un sédiment uniforme de diamètre 200 µm (sable moyen) au lieu d'un sédiment hétérogène issu des données du Shom.



Modélisation du niveau marin à Mayotte

Dans le cadre du projet HOMONIM, conduit par Météo-France et le Shom, sous la maîtrise d'ouvrage de la DGPR et de la DGSCGC, une version améliorée du modèle hydrodynamique (Hycom2D) de prévision de surcotes pour l'Océan Indien Sud-Ouest a été installée en 2019. Cette version comporte une descente d'échelle conduisant à une résolution de 200 mètres sur le lagon de Mayotte et à une résolution de 800 mètres sur La Réunion. Cela lui permet de reproduire la marée de façon plus précise, notamment à Mayotte où le lagon et ses passes sont mieux représentés. L'illustration jointe montre ainsi le courant finement résolu, associé à une phase de marée montante à Mayotte. On voit que le flux de nord-est est alors intense, surtout au niveau de la passe septentrionale et des passes orientales, ainsi que sur la partie la plus profonde du récif de ces deux secteurs exposés. On remarque aussi l'important effet de canalisation dans le lagon nord du flux rapide entrant par l'importante passe septentrionale, qui ensuite se dilue progressivement vers l'aval. Par ailleurs, la paramétrisation du frottement du vent sur la surface océanique dans cette version du modèle utilise un schéma qui s'est révélé le plus performant lors du rejeu de l'ouragan Irma qui a traversé l'arc antillais en septembre 2017 (observation d'une surcote de 2 m environ).

Enfin, le niveau marin et les courants autour de Mayotte, modélisés par cette nouvelle version, seront utilisés en 2020 comme forçage complémentaire dans le modèle de vagues pour simuler plus correctement les états de mer dans le lagon mahorais. Ces évolutions de la modélisation des surcotes et des vagues permettront de mettre en place une vigilance vagues-submersion prochainement pour La Réunion et de l'étendre ensuite à Mayotte.

▲ Courant barotrope du modèle autour de Mayotte (courant océanique moyen sur la verticale). Les isolignes représentent son intensité, de même que la longueur des flèches.

Assimilation de nouvelles données dans les modèles de vagues

La disponibilité d'observations sur la répartition en fréquences et en directions des vagues représente un enjeu capital pour l'amélioration de la prévision de l'état de la mer en opérationnel. Ainsi l'analyse du climat de vagues dans des zones côtières exige des informations précises sur la direction des trains de vagues dominants. La mission CFOSAT par le biais de son diffusiomètre à vagues SWIM fournit des spectres de vagues décrivant l'énergie et la direction des différents trains de vagues pour des longueurs d'onde variant de 70 à 500 m. La chaîne opérationnelle du modèle de vagues MFWAM utilise depuis 2018 l'assimilation de ces observations directionnelles, en l'occurrence les spectres de vagues fournis par le radar à ouverture synthétique (SAR) de Sentinel-1. Dans la phase de Calibration/Validation de la mission CFOSAT, des tests d'assimilation de spectres de vagues estimés à partir des mesures de SWIM ont été menés afin d'évaluer la qualité de ces données et leur impact sur la prévision opérationnelle des vagues sur tout le globe. Le dernier traitement développé par le CNES permet d'avoir des spectres de vagues SWIM de meilleure qualité avec une réduction significative du bruit de speckle observé auparavant (Hauser et al. 2020). Les résultats de l'assimilation de ces nouveaux spectres SWIM montrent un impact significatif sur les paramètres intégrés des vagues tels que la hauteur significative et la période moyenne des vagues.

Comme l'instrument SWIM détecte des vagues de plus en plus en courtes (70 m de longueur d'onde), nous constatons l'efficacité de l'assimilation sur la croissance rapide de vagues sur un fetch limité (distance d'action du vent). Nous montrons un exemple classique d'épisode méditerranéen où les vagues sont générées par des régimes de vents Mistral et Tramontane. La figure montre l'incrément d'analyse induit par l'assimilation sur la période moyenne des vagues. On constate clairement un impact très étendu qui peut atteindre 1.5 sec, au pic de l'événement. L'impact sur la période moyenne des vagues est propagé sur les côtes ouest de la Corse et la Sardaigne, et atteint le nord-est de l'Algérie. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses sur la compréhension de la physique des vagues.

4

Amélioration des analyses de température de surface de la mer sur les mers Européennes à une résolution de 2 km avec la méthode DINEOF à l'aide des données satellite

La température de la mer (TSM) joue un rôle important dans les échanges océan-atmosphère (initialisation des phénomènes convectifs méditerranéens, des cyclones). Son assimilation à haute résolution sera porteuse d'améliorations dans tous les domaines de la modélisation.

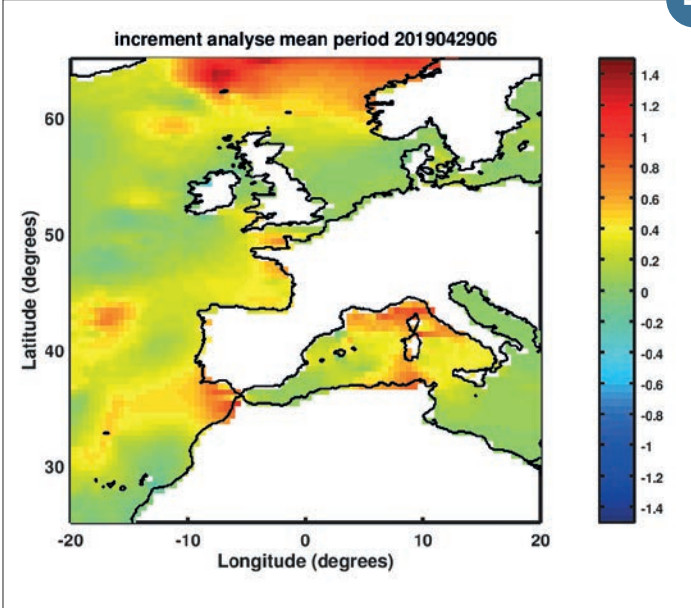
La TSM est calculée à partir de données d'observations de multiples capteurs infrarouge(IR) et micro-onde(MW) (AVHRR, SLSTR, SEVIRI, VIIRS, MODIS, AMSR2) disponibles sur les satellites météorologiques (METOP, MSG, Sentinel 3, NOAA20, AQUA, TERRA, GCOM_W). Malgré la bonne couverture spatiale et temporelle satellitaire du globe, les instruments IR sont aveugles en présence de nuages et peu fiables en présence d'aérosols. Les instruments MW, insensibles aux nuages, sont rares et ont une résolution très faible.

Pour modéliser les phénomènes météorologiques et océanographiques, il est nécessaire d'évaluer, malgré les nuages, la TSM en tout point. De manière historique on utilise des interpolations optimales où le guess est la TSM du jour précédent ; celles-ci s'avèrent problématiques à haute résolution lors notamment de persistance nuageuse locale durant plusieurs jours.

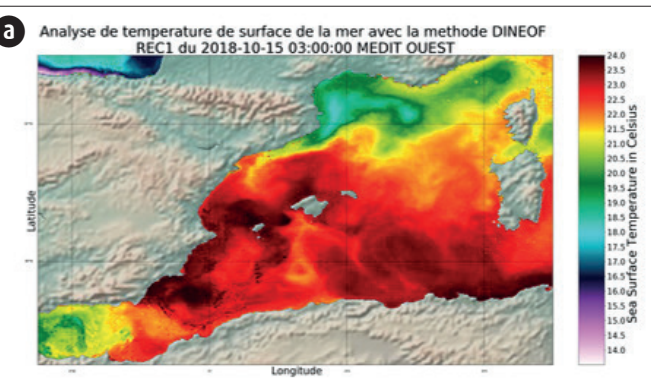
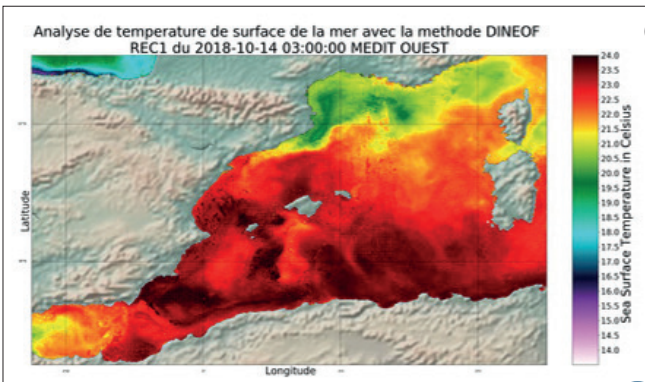
La méthode DINEOF développée par l'Université de Liège GHER permet de combler les données manquantes. Elle a été installée et adaptée au CNRM/CEMS sur des données multi satellites L3S journalières produites au CMS (Copernicus Marine) et tri-horaires expérimentales (CEMS) sur les mers européennes. Elle se base sur des fonctions orthogonales empiriques EOF (valeurs singulières, validation croisée, filtres statistiques sophistiqués, efficaces et robustes). Les analyses journalières et tri-horaires obtenues et validées sont de bien meilleure qualité que celles calculées par interpolation optimale. Elles sont consistantes pour évaluer le cycle diurne difficile à décrire (rareté des bouées). Une étude du cycle diurne sur les mers européennes à l'aide de DINEOF sur les données de TSM à fréquence élevée issues de SEVIRI sera menée.

5

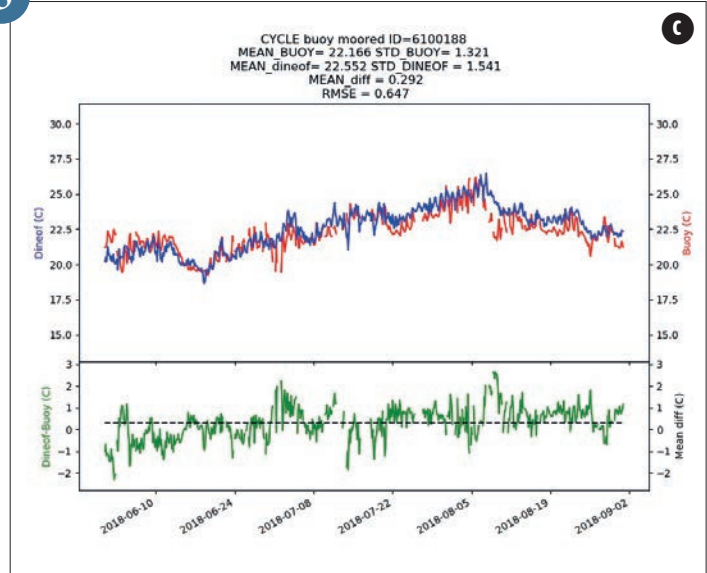
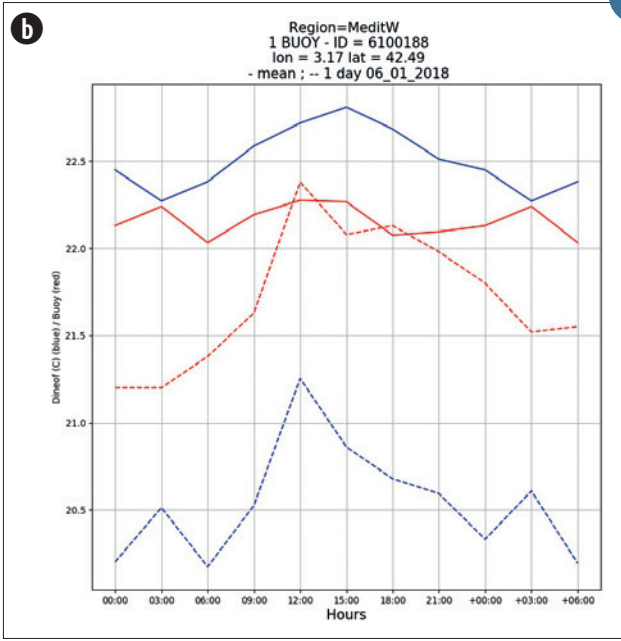
4



▲
 Incrément d'analyse sur la période moyenne des vagues provoqué par l'assimilation des spectres de vagues et de hauteurs de vagues fournis par CFOSAT pendant l'épisode Méditerranéen le 29 avril 2019 à 6:00 (UTC).



5



- ▲ (a) : Exemple d'analyse de température de surface de la mer par satellite trihoraire avec la méthode DINEOF sur l'Ouest de la Méditerranée à une résolution de 2 km. Correspond au cas d'événement Méditerranéen du 15 octobre 2018. A gauche le 14 octobre 2018 à 03H, à droite le 15 octobre 2018 à 03H, où on constate le pompage d'énergie qui a alimenté le processus de convection stationnaire de l'Aude.
- (b) : Cycle diurne d'une bouée fixe (pointillée rouge) et cycle diurne de l'analyse Dineof (pointillée bleue) le 1^{er} juin 2018. Cycle diurne moyen du 1^{er} juin 2018 au 1^{er} septembre 2018 d'une bouée fixe (trait plein rouge) et cycle diurne Dineof (trait plein bleu).
- (c) : Cycle d'une bouée fixe (en rouge) du 1^{er} juin 2018 au 1^{er} septembre 2018 comparé au cycle de l'analyse Dineof (en bleu). Différence entre Dineof et cette bouée fixe sur cette période de 2018 (en vert).

Techniques, campagnes et produits d'observation

L'observation joue un rôle crucial en sciences de la terre. Elle permet de mieux comprendre la manière dont les systèmes fonctionnent, d'évaluer et d'améliorer la capacité des modèles numériques à simuler la réalité, et de mieux définir l'état de l'atmosphère à un instant donné, à des fins climatologiques, pour détecter des événements particuliers, ou pour initialiser les prévisions numériques. L'apport de l'observation spatiale ne cesse de croître avec la mesure du vent sur tout le globe et toute la profondeur de l'atmosphère est désormais accessible avec le lidar spatial AEOLUS. Le transport des aérosols désertiques à des milliers de kilomètres de leurs régions sources est de mieux en mieux caractérisé grâce aux satellites géostationnaires. Le spatial ne peut cependant atteindre les résolutions spatiales ou temporelles requises pour caractériser les phénomènes rapides et de fine échelle censés être représentés par les modèles numériques dont la résolution est maintenant kilométrique, voire hectométrique. Des pistes sont explorées pour utiliser des données d'opportunité mesurées par des capteurs embarqués sur des objets connectés, comme les stations météorologiques grand-public, les téléphones, ou les voitures, ou, de manière plus originale, sur des animaux comme les tortues marines. Des techniques de traitement des données sont développées afin de produire des estimations de la valeur de paramètres météorologiques entre les stations d'un réseau d'observation, ou bien, grâce à des techniques d'intelligence artificielle, des paramètres non directement observés comme la hauteur de la couche limite. Le développement de services répondant à des besoins non satisfaits ou nouveaux passe par la mise au point de modèles dont la qualité doit être validée sur des jeux d'observations, comme ce fut le cas pour la prévision du risque de givrage ou d'accumulation de neige sur les câbles électriques aériens.

Techniques et produits d'observation

Détection des sables en suspension avec les satellites géostationnaires de météorologie

L'équipe nuages du CNRM/CEMS développe un logiciel de traitement des données des satellites géostationnaires météorologiques (SAFNWC-GEO) qui permet de détecter la présence de sables en suspension dans la troposphère. La dernière version du logiciel permet le traitement de plusieurs satellites géostationnaires tels que MSG, Himawari et GOES, ce qui permet une observation des sables en suspension sur l'ensemble du globe terrestre (voir Figure 1). La détection des sables se fait selon trois différents algorithmes appliqués à trois différentes conditions : de jour sur mer, de jour sur terre et de nuit sur mer. Actuellement, il n'y a pas de détection des sables en suspension de nuit sur terre.

De jour, les sables en suspension sont décelés grâce aux canaux infrarouges (IR) et visibles. Les méthodes de détection reposent sur l'homogénéité spatiale de la réflectance visible et sur le fait qu'en présence de sables en suspension, l'absorption dans certains canaux est plus importante que pour d'autres (IR à $\lambda=10,8\mu\text{m}$ et $\lambda=12\mu\text{m}$).

De nuit sur mer, la méthode consiste à effectuer un test thermique et utilise le Sahara Dust Index (SDI ; fourni par l'équipe océan du CNRM/CEMS – SAFOSI) basé sur les différences entre les radiances mesurées à $\lambda=10,8\mu\text{m}$ et $\lambda=12\mu\text{m}$ et les différences entre les radiances mesurées à $\lambda=3,8\mu\text{m}$ et $\lambda=8,7\mu\text{m}$. De manière générale, les seuils

qui permettent la distinction des sables en suspension par rapport aux nuages et aux surfaces sont estimés empiriquement par satellites avec des situations de sable en suspension clairement identifiées.

La détection des sables en suspension avec les données des satellites géostationnaires météorologiques est validée avec les observations du lidar (CALIOP) embarqué à bord du satellite CALIPSO. Les données des deux types d'observations sont co-localisées spatialement et temporellement dans la zone de latitude comprise entre 15° Sud et 45° Nord. Le lidar fournit des profils verticaux de la rétrodiffusion des particules atmosphériques et permet ainsi de détecter les couches de fumées, de sables et d'aérosols (aussi la pollution) de même que les nuages d'épaisseurs optiques faibles. Les couches de sables pouvant être observées par le lidar peuvent atteindre des petites épaisseurs optiques ($<0,25$). Étant donné que la distinction des sables en suspension à l'aide des satellites géostationnaires est basée essentiellement sur des réflectances et des contrastes thermiques, la méthode échoue pour des épaisseurs optiques faibles où les contrastes thermiques ne sont pas assez élevés. Par conséquent, les couches de sables en suspension avec des épaisseurs optiques inférieures à 0,3 ne sont pas retenues pour la validation.

Au-dessus des surfaces maritimes, avec les données des satellites géostationnaires 47 % des sables en suspension sont détectés le jour contre 31 % la nuit, comparé aux observations du lidar CALIOP. Cependant, seulement 5 % des événements observés par le lidar CALIOP sont détectés avec les satellites géostationnaires de jour au-dessus des surfaces continentales. Le nombre de fausses alarmes est très faible pour l'ensemble des trois algorithmes.

Les méthodologies pour détecter les sables en suspension sont actuellement améliorées en vu de la préparation de l'arrivée de MTG. Au-dessus des surfaces continentales, de jour, la détection en début et fin de journée est améliorée avec l'ajout d'un seuil dépendant de l'angle solaire. Sur les surfaces continentales de nuit, il est difficile de s'appuyer uniquement sur les différences de radiances entre les canaux pour définir un algorithme. Ainsi, des simulations de températures de brillances avec le modèle de transfert radiatif RTTOV sur ciel clair sont ajoutées à la méthodologie.

La nouvelle version du masque de sable sera disponible dans la version du logiciel livrée pour MTG courant 2022.

Détection automatique du sommet de la couche limite par classification supervisée et non-supervisée

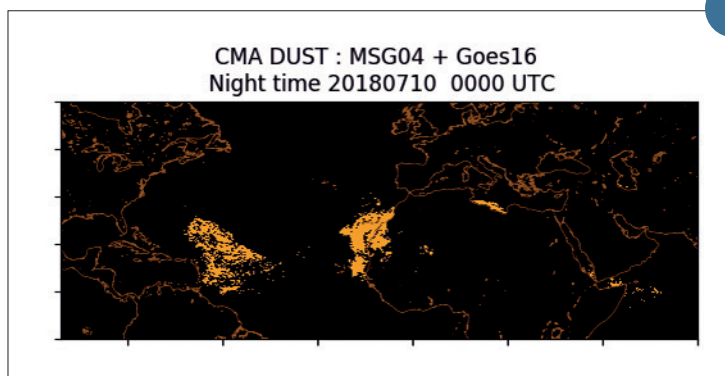
La hauteur de couche limite (HCL) est un paramètre clé dans beaucoup d'applications météo-sensibles, comme par exemple la qualité de l'air. Une méthode courante pour détecter la HCL est d'utiliser des lidars aérosols, car le signal rétrodiffusé présente une très nette décroissance au sommet de la couche limite. Deux méthodes de machine learning ont été testées pour la résolution de ce problème: les K-means (méthode de classification non-supervisée) et AdaBoost (méthode de classification binaire supervisée). Les codes des algorithmes Kmeans for Atmospheric Boundary Layer (KABL) et AdaBoost for Atmospheric Boundary Layer (ADABL) sont

open-source et sous licence libre. Dans les deux cas on va chercher à classer les points de mesures du lidar en catégories. La HCL est alors le sommet de la catégorie 'couche limite' (figure). Ces deux méthodes ont été comparés à l'algorithme fourni par le constructeur du lidar et aux HCL estimées par radiosondage. Les données issues des radiosondes ont servi de référence pour comparer les autres méthodes. La comparaison s'étend sur deux années (2017-2018) et deux sites du réseau opérationnel de Météo-France (Trappes et Brest). Une grande différence de résultats a été observée entre les deux sites. À Trappes, KABL et ADABL font tous les deux mieux que l'algorithme

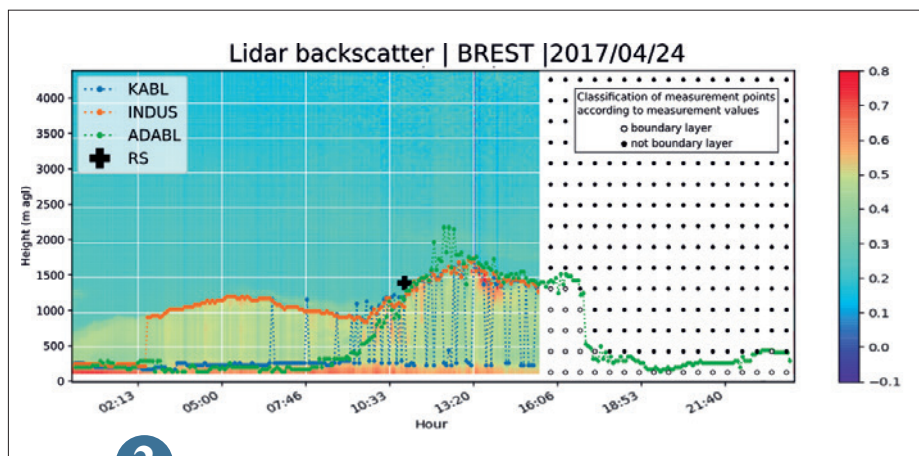
du constructeur, alors que la tendance est nettement inverse à Brest. Nous concluons de ce travail que l'algorithme ADABL a des performances encourageantes, mais a des limitations liées à sa base d'apprentissage pour être généralisé. L'algorithme KABL a de moins bonnes performances mais est bien plus robuste et polyvalent. L'algorithme du constructeur, enfin, fonctionne bien et avec très peu de réglages à faire, mais n'est pas open-source.

2

1



Les sables en suspension apparaissent en jaune. Observations de MSG4 et GOES 16 de nuit pour le slot de 00h avec le nouvel algorithme développé pour MTG.



2

Exemple de détection de couche limite par les trois algorithmes : KABL (bleu), ADABL (vert) et constructeur (orange). En fond, le dégradé de couleur est la mesure de rétrodiffusion issue du lidar (jusqu'à 16h) ; puis (après 16h) une illustration de la classification des points de mesure (blanc pour couche limite, noir hors couche limite). Le tracé de la couche limite passe à la frontière entre noir et blanc.

De nouvelles analyses infra-horaires des paramètres de base (température, humidité, vent, pression)

Afin de disposer d'une information spatialisée produite en temps réel et fournissant la valeur observée au point station, des analyses de paramètres de base ont été développées. Il s'agit de la température et de l'humidité aux niveaux 2, 20, 50, 100 et 250m, des composantes méridienne et zonale du vent à 10m et de la pression au niveau de la mer. Initialement, les analyses étaient réalisées à fréquence horaire et obtenues en corrigeant la prévision la plus récente du modèle AROME par les observations in-situ. La fréquence est désormais passée à 15 minutes et ce principe de correction est maintenu pour l'analyse de H.15.

À H.15, l'analyse du modèle AROME-PI de l'heure ronde est utilisée. Préalablement à tout calcul, les observations sont contrôlées en filtrant celles s'éloignant trop du modèle. Pour la température et l'humidité à 2m, une régression des observations sur le champ modèle et le relief est réalisée. Les résidus de cette régression sont ensuite spatialisés par krigeage ordinaire. L'analyse finale est obtenue en ajoutant le résultat de cette spatialisation au champ modèle initial. Pour les niveaux supérieurs à 2m, la correction effectuée au niveau 2m est répercutée sur le champ modèle en la pondérant d'un facteur exponentiel, décroissant avec la hauteur.

Pour la pression et le vent, les résidus résultent simplement de la différence entre observations et modèle. Ils sont ensuite spatialisés respectivement par l'inverse de la distance et par krigeage ordinaire. Surmer, en raison du manque d'observations, la spatialisation ne peut être réalisée : il s'agit alors du champ modèle brut. Aux quarts d'heure suivants, les méthodes restent identiques mais le champ modèle est remplacé par l'analyse spatialisée produite au quart d'heure précédent.

3

Évaluation de l'apport des données d'objets connectés pour l'observation de la convection profonde à fine échelle

De nombreux réseaux d'objets connectés à Internet et équipés de capteurs météorologiques observent désormais en temps réel les premiers mètres de l'atmosphère à haute résolution spatiale et temporelle. L'apport des observations issues d'un réseau de stations météorologiques personnelles en complément des observations du réseau opérationnel de Météo-France a été évalué pour la caractérisation des phénomènes liés à la convection profonde près de la surface.

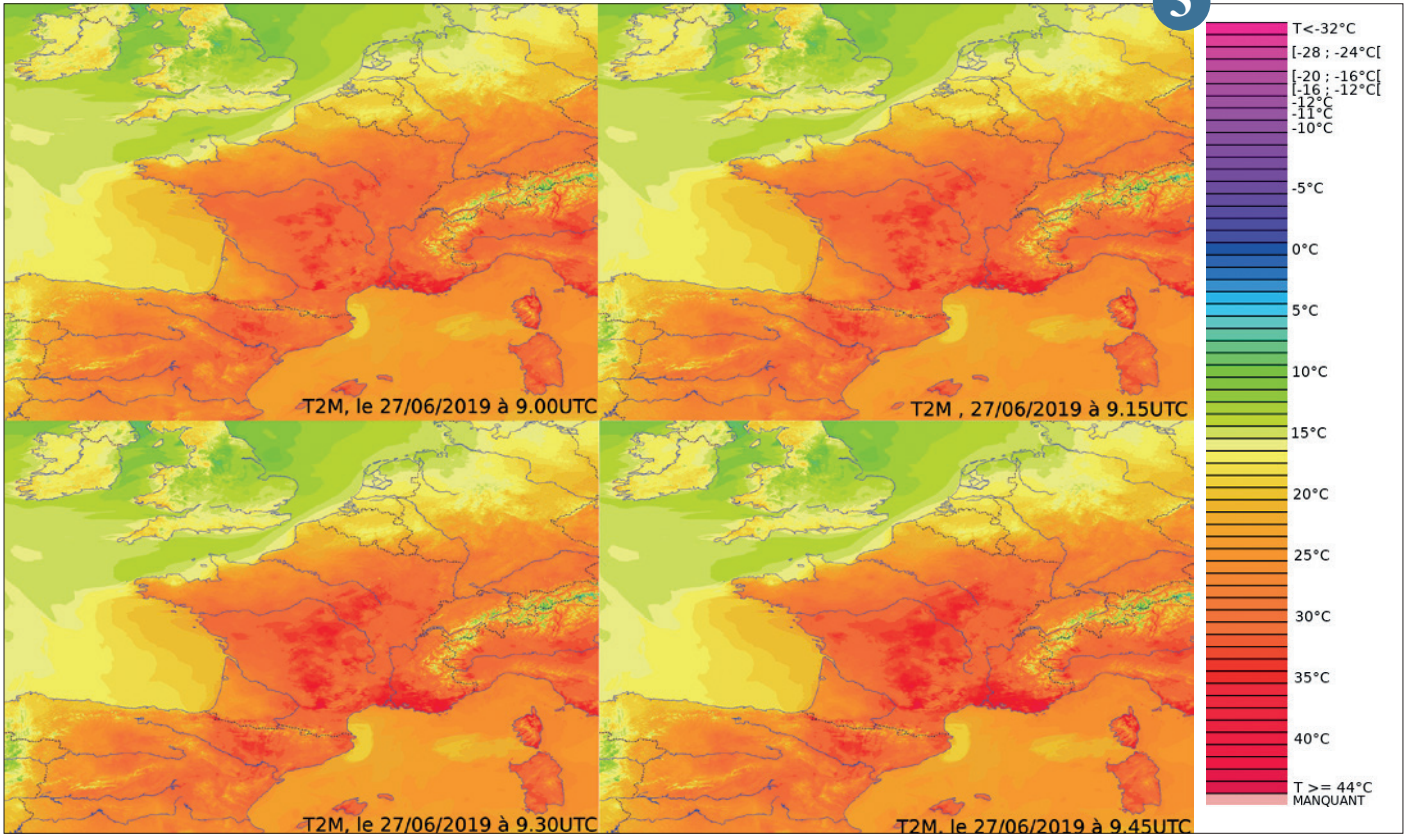
Ces observations personnelles, ne répondant pas aux standards édictés par l'OMM, sont de qualité variable et ont nécessité la conception d'un contrôle de qualité automatique, s'appuyant sur le réseau d'observations de Météo-France.

L'évaluation de la méthode appliquée à la température, l'humidité relative et la pression réduite au niveau de la mer, lors de quatre journées orageuses de l'année 2018, montre qu'elle permet d'améliorer la qualité des observations personnelles tout en conservant un grand nombre d'entre elles. Des analyses combinant les observations personnelles avec celles de Météo-France ont été comparées à des analyses utilisant seulement les observations de Météo-France. L'évaluation par validation croisée montre que les analyses combinées sont les plus proches des observations de référence. De plus, des variations météorologiques de petite échelle invisibles jusqu'alors avec le réseau de Météo-France seul sont détectées (voir figure).

L'utilisation des stations météorologiques personnelles permet donc d'améliorer l'observation près de la surface des phénomènes associés aux orages. Ces résultats ouvrent la voie à l'utilisation de ces observations pour évaluer à plus fine échelle les simulations numériques des phénomènes liés à la convection profonde.

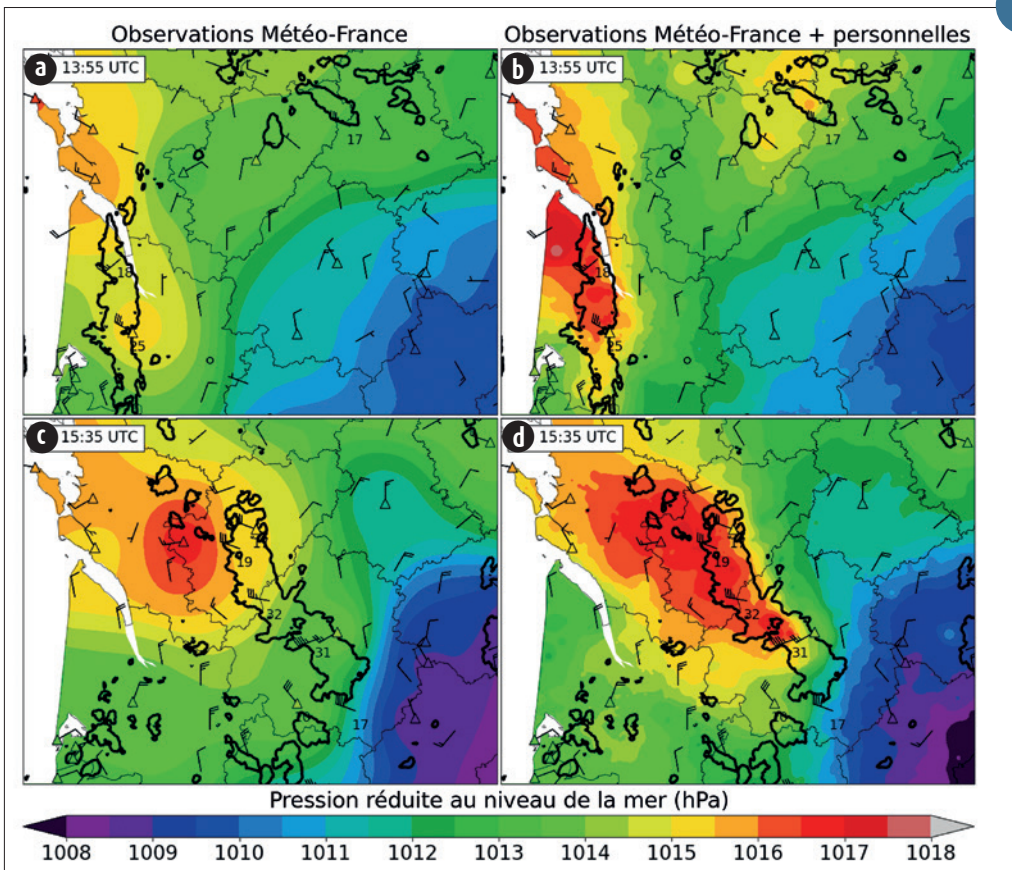
4

3



Exemple d'analyses de température à 2m : évolution de 9.00UTC à 9.45UTC, le 27 juin 2019.

4



Analyses de pression réduite au niveau de la mer issues des (a,c) observations de Météo-France seules et (b,d) combinant observations de Météo-France et personnelles le 4 juillet 2018 à (a,b) 13:55 UTC et (c,d) 15:35 UTC. Les réflectivités radar supérieures à 40 dBZ matérialisant les noyaux convectifs des orages sont indiquées en gras. Les observations de pression réduite au niveau de la mer des stations de Météo-France sont indiquées par des triangles. La vitesse et la direction du vent instantané sont matérialisées par des barbules, la vitesse maximale sur les dix dernières minutes est annotée lorsqu'elle dépasse 17 m s⁻¹.

Campagnes de mesures

AEOLUS et l'impact de ses mesures sur la prévision du temps

Le satellite AEOLUS de l'Agence Spatiale Européenne a été lancé le 22 août 2018 après une longue période de développement. La phase de recette en vol s'est conclue à la fin du mois de janvier 2019. La phase d'exploitation a démarré à cette date. Le CNRM/GMEI est responsable du maintien et de l'amélioration des processeurs de calibration et de restitution des propriétés optiques des aérosols et des nuages, et le CNRM/GMAP mène des études sur l'impact des mesures de vent sur la prévision météorologique globale avec ARPEGE. Cette activité bénéficie d'un soutien financier du CNES.

Les premiers résultats de monitoring et d'impact ont été présentés en septembre 2019 lors d'un atelier international organisé par l'ESA, auquel ont participé de nombreux centres météorologiques effectuant des prévisions numériques globales (Centre Européen, Royaume-Uni, Allemagne, Canada, États-Unis). Les résultats, obtenus par ces centres, convergent : l'impact des mesures de vent d'AEOLUS est neutre dans l'hémisphère Nord où de nombreuses mesures de vent sont déjà disponibles, et sensiblement positif sous les Tropiques et dans l'hémisphère Sud, alors que ces nouvelles observations ne représentent que 0,2% des données assimilées. Les travaux se poursuivent pour améliorer la calibration de l'instrument, diminuer les biais de mesure et renforcer l'impact positif sur les prévisions. Les mesures des propriétés optiques de nuages et des aérosols, dont la qualité est plus difficile à évaluer, font également l'objet d'un intense travail d'amélioration dans la perspective d'une assimilation dans les modèles de qualité de l'air.

La durée de vie nominale de la mission s'achèvera fin 2021. Une extension d'une à deux années est possible. Des discussions ont démarré entre EUMETSAT et l'ESA pour concevoir une future mission spatiale similaire qui devra être moins coûteuse et durer plus longtemps.

5

Première analyse des données collectées pendant le cyclone Kenneth dans le cadre du projet Sea Turtle for Ocean Research and Monitoring (STORM)

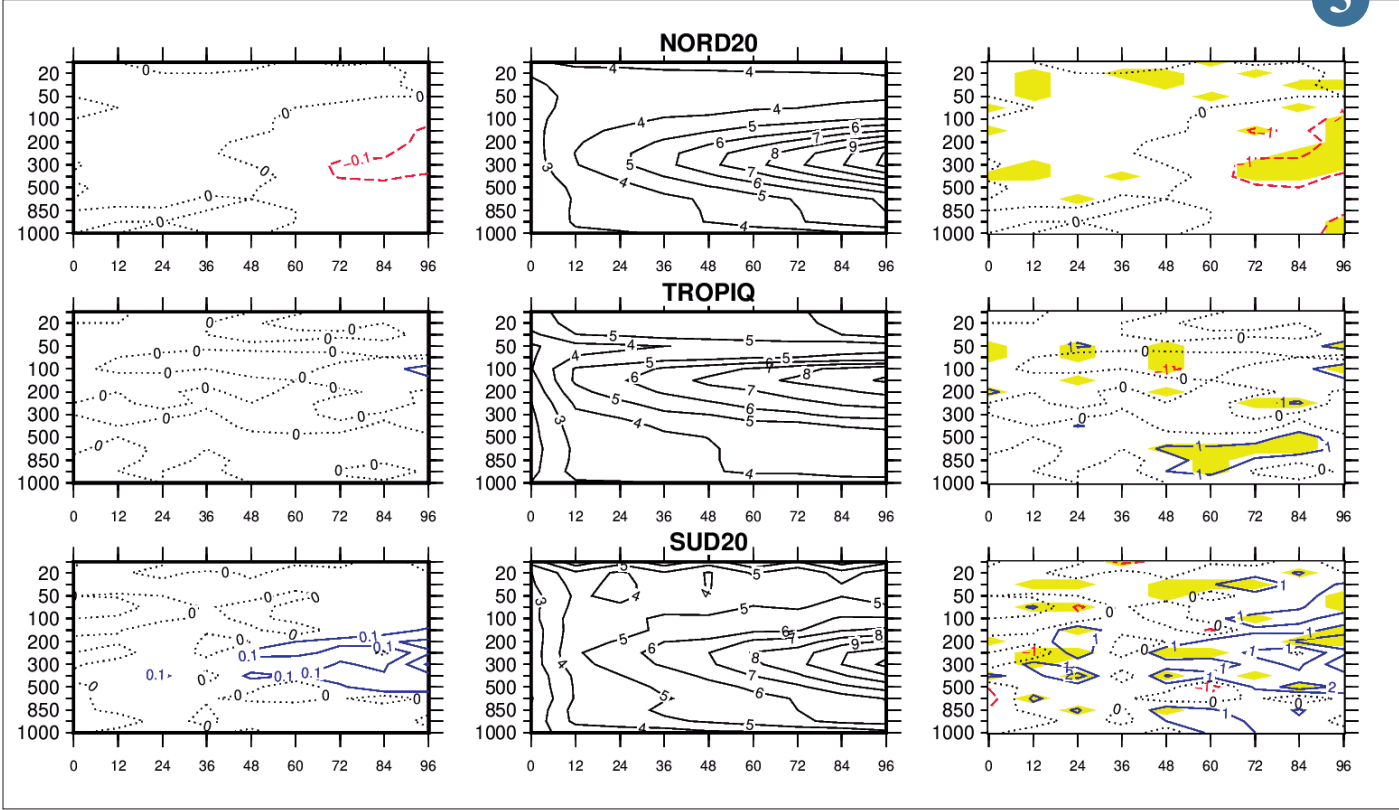
Le programme de recherche STORM (Sea Turtles for Ocean Research Monitoring) vise à étudier les propriétés thermodynamiques de l'océan Indien tropical à haute résolution spatio-temporelle au moyen de mesures collectées par des tortues marines équipées de capteur environnementaux. L'analyse des données collectées pendant la première phase du programme (jan 2019 – avril 2020 ; 11 tortues et près de 120 000 triplets de données position/profondeur/température) a démontré tout l'intérêt d'une telle approche, aussi bien dans les domaines de la climatologie, que de l'observation et de modélisation numérique des océans tropicaux.

La comparaison des mesures de température collectées par tortues marines aux observations in-situ (Argo) et satellites (OSTIA, OSI-SAF) conventionnelles montre un excellent accord, avec un biais moyen (écart type) d'environ 0.1° (0.5°) aussi

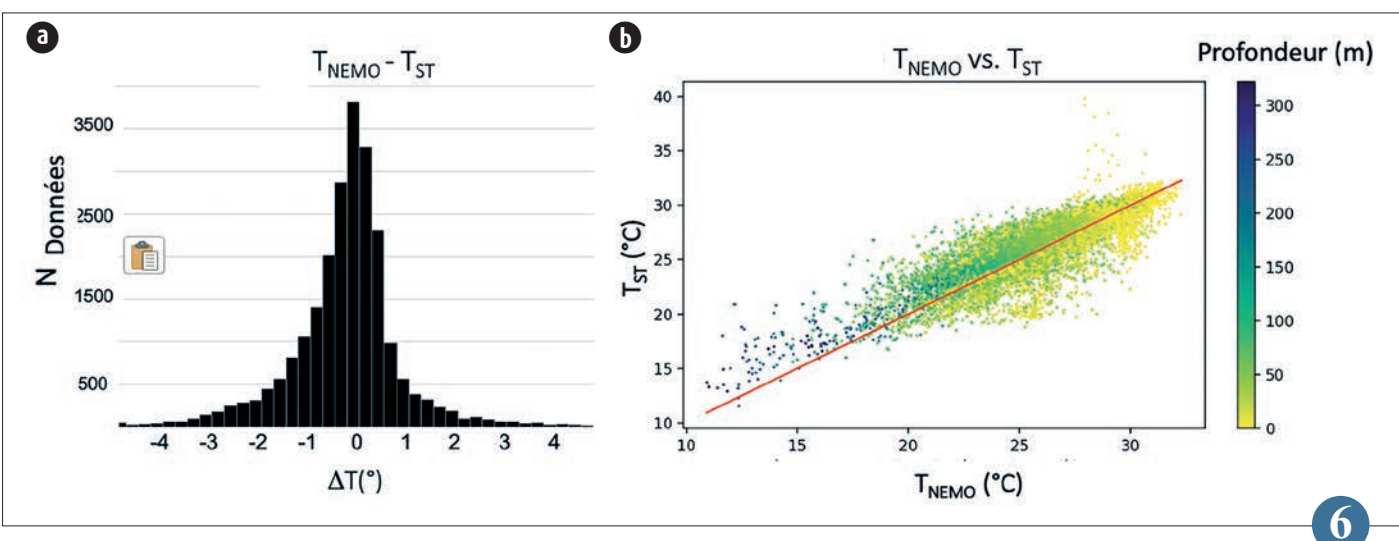
bien à la surface qu'en profondeur. Les comparaisons réalisées avec le modèle opérationnel Glo12 de Mercator Océan (Figure 1) montrent également tout l'intérêt de ce type d'observations pour évaluer et, à terme, améliorer les prévisions océaniques dans cette région fortement sous-équipée en moyens de mesure conventionnels.

Lors de la prochaine étape du programme, qui démarrera en novembre 2020 pendant 2 ans, près de 80 tortues seront relâchées de tout l'océan Indien (Seychelles, Mozambique, Comores, Réunion, Madagascar, Tromelin) en collaboration avec 7 réserves marines de la région. Les mesures collectées seront notamment assimilées dans les modèles Glo12 et NEMO-Océan Indien afin d'évaluer l'apport de ces nouvelles mesures pour la prévision de cyclones tropicaux.

6



▲ Impact relatif sur la prévision du modèle ARPEGE des mesures de vent d'AEOLUS dans l'hémisphère Nord (ligne du haut), les Tropiques (ligne du milieu) et l'hémisphère Sud (ligne du bas). Cet impact a été calculé sur une période d'un mois entre mi-septembre et mi-octobre 2018. Pour chaque région, la colonne de gauche est la variation de l'écart quadratique moyen de l'erreur de prévision du vent mesuré par rapport aux radiosondages aux échéances de 0 à 96 h (abscisse) et en fonction du niveau de pression (ordonnée) par rapport à une expérience de référence sans assimilation d'AEOLUS, la colonne du milieu est l'écart quadratique moyen de la prévision du vent, et la colonne de droite est le rapport entre la colonne de gauche et la colonne du milieu (en pourcentage). Les lignes de niveau en bleu marquent une réduction de l'erreur de prévision, celles en rouge, une dégradation. Le fond jaune indique les zones où les statistiques sont jugées significatives.



▲ Histogramme (panneau de gauche) et scatterplot (panneau de droite) des différences entre les données de température collectées par les tortues marine (TST) et prévues par Glo12 (TNEMO) entre janvier 2019 et mars 2020 dans l'ouest de l'océan Indien tropical (20°S-15°N ; 40-60°E). En (b) les couleurs indiquent la profondeur des observations / prévisions entre 0 et 320m (échelle de droite). Adapté de Bousquet et al. (2020 ; Frontiers in Marine Science).

Campagne expérimentale pour l'observation de l'accrétion de givre et de neige sur les câbles aériens de transport d'électricité

Depuis 2016, une action de R&D est menée à Météo-France pour anticiper au mieux les risques météorologiques auxquels sont soumis les réseaux de transport d'électricité par câbles aériens. Pour répondre à ce besoin, un système de prévision d'accrétion de givre et de neige sur les câbles a été développé. Ce système, nommé WIRE (Winter Risks for Energy), consiste à utiliser les prévisions d'ensemble du modèle AROME pour forcer un modèle de simulation d'accrétion de glace et neige et ainsi élaborer une prévision probabiliste du risque d'accrétion. Afin d'évaluer les capacités du modèle à simuler l'accrétion et afin de l'améliorer, une

campagne expérimentale dédiée a été mise en place en novembre 2018 sur un des sites expérimentaux d'altitude du Centre d'Etudes de la Neige de Météo-France, celui du Col de Porte (1325m, massif de la Chartreuse). Les observations issues de la campagne hivernale 2019 ont été confrontées aux résultats de simulations du modèle WIRE forcées par les analyses du modèle AROME. Cette première saison expérimentale a permis de montrer que le modèle permettait de simuler la grande majorité des épisodes d'accrétion sur les câbles (câbles RTE, ENEDIS et caténaire SNCF). Afin d'aller plus loin dans l'analyse, la campagne de mesures se prolonge cet

hiver 2019-2020 avec une amélioration du dispositif expérimental (réalisée en octobre 2019). Une Webcam supplémentaire a été mise en place. Sa résolution est plus fine et ainsi, les manchons de neige et plus particulièrement ceux de givre, dont les épaisseurs sont souvent faibles, seront mieux documentés. L'exploitation de cette campagne devrait permettre l'amélioration du modèle ainsi que l'évaluation du système de prévision, phase indispensable pour pouvoir envisager une utilisation opérationnelle.

7



(a) Site instrumental d'observation des épisodes d'accrétion de givre et de neige sur les câbles aériens (câbles de transport d'électricité RTE et ENEDIS, caténaire SNCF) situé sur le site du Col de Porte.

(b) Exemple d'un épisode d'accrétion de neige humide (1^{er} février 2019).



Campagne d'observation GIRAFE 2 AIRGRAVI (mesure du champ gravimétrique)

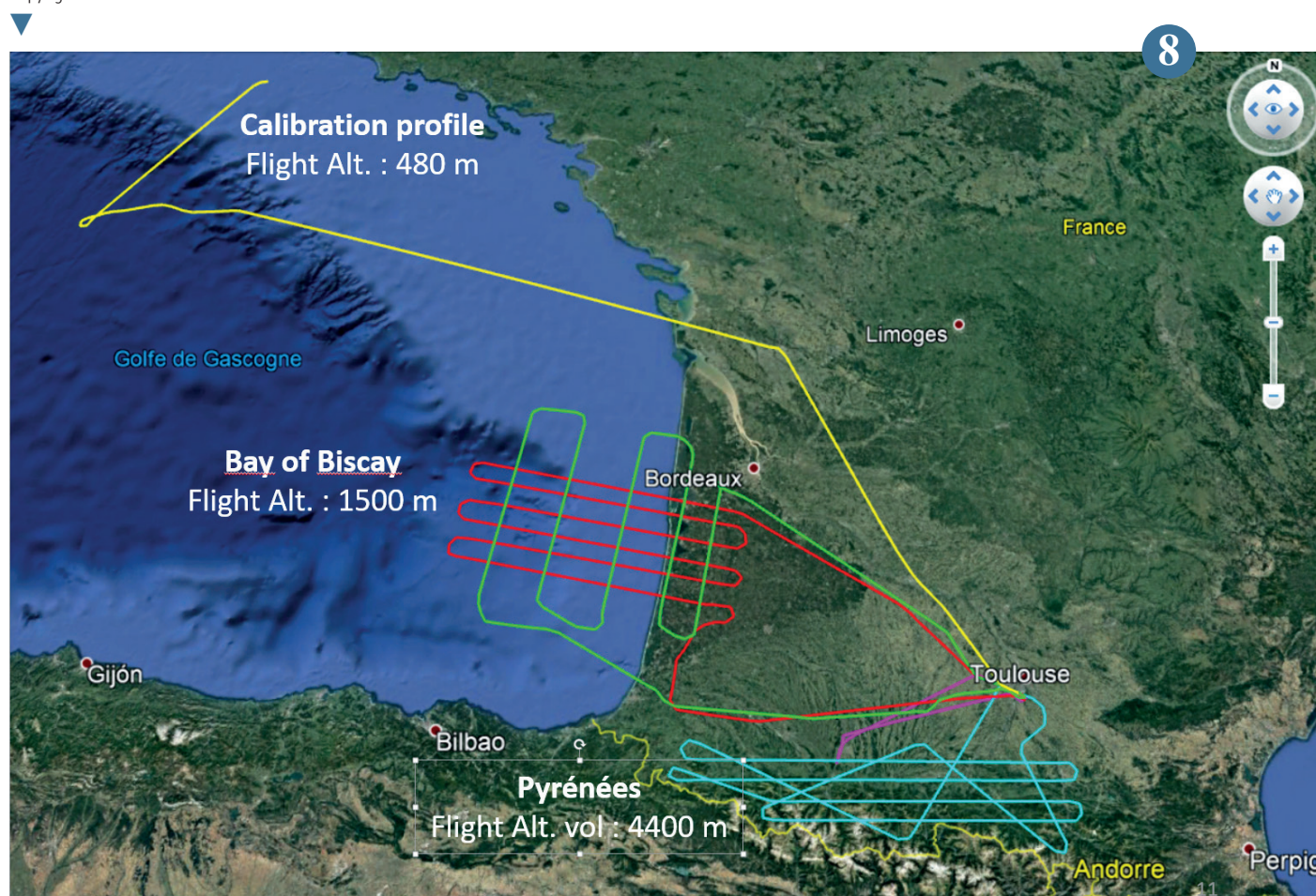
La campagne GIRAFE 2 AIRGRAVI, soutenue par le CNES, cherche à évaluer le potentiel d'un gravimètre interférométrique embarqué en avion pour la géodésie, la géophysique et l'océanographie. Le nouveau capteur « Gravimètre Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarqué » (GIRAFE-2), basé sur une technologie innovante d'interférométrie atomique et développé par l'ONERA a été conçu pour effectuer des mesures gravimétriques absolues à partir d'une plateforme mobile. L'originalité d'une telle instrumentation, unique au monde, est de permettre l'acquisition de mesures absolues en mode dynamique et à des échelles régionales, permettant d'offrir une nouvelle gamme d'observations absolues à la surface du globe, particulièrement des zones peu ou pas accessibles par les moyens actuels (zones montagneuses ou dépourvues de voies d'accès, zones littorales peu profondes, etc.), tout en gagnant en précision et en limitant les coûts de relevés.

L'ATR 42 exploité par le Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement SAFIRE (Infrastructure de Recherche CNRS/Météo-France/CNES) a embarqué l'instrument GIRAFE 2, en complément d'autres instruments de mesure du champ gravitationnel relatif. Basé au départ de Toulouse-Francazal, l'ATR 42 a ainsi effectué au printemps 2019 plus de 20 heures de vols pour réaliser des relevés gravimétriques de différentes zones, notamment dans le Golfe de Gascogne et au-dessus des Pyrénées. Grâce à l'expertise des personnels du laboratoire Geosciences Environnement Toulouse (GET), de l'ONERA, du SHOM, mais aussi de partenaires danois (DTU-Space), de nombreuses données aéroportées ont été collectées, complétées par des données sol. Les retombées attendues de ce projet sont de renforcer la synergie entre concepteurs d'instruments et utilisateurs potentiels pour favoriser le développement de

dispositifs répondant aux problématiques scientifiques et d'assurer le transfert de ces instrumentations innovantes vers la communauté scientifique. Les applications scientifiques de cet instrument intéressent potentiellement de nombreux champs d'applications relevant de l'observation de la Terre, des surfaces continentales et des océans : la géodésie (champ de gravité, géoïde) ; la géologie-géophysique (structure des marges continentales, des chaînes de montagnes ou des bassins sédimentaires, inventaire des ressources du sous-sol, évaluation des risques naturels, etc.) ; l'océanographie (circulation océanique) ; mais aussi toute opération de Cal/Val à venir pour de futures missions spatiales de gravimétrie/altimétrie.

8

Trajectoires de l'ATR 42 instrumenté pour évaluation du capteur GIRAFE : une zone océanique et zone de transition Terre-mer (Golfe de Gascogne / Landes), une zone montagneuse (Pyrénées) et un profil d'étalonnage sur une zone de référence (Talus océanique au large de Brest).
Copyright : GET-ONERA-SHOM-DTU



Recherche et aéronautique

Dans le cadre de la phase de déploiement du programme SESAR dans laquelle Météo-France est fortement impliqué pour les aspects météorologie, la collaboration avec les partenaires homologues européens et les travaux pour la mise en opération de la production de données harmonisées à l'échelle de l'Europe, d'observation et de prévision de la convection, du givrage et de la turbulence se sont intensifiés, pour aboutir en fin d'année à des algorithmes et processus de production prêts au déploiement. En parallèle un premier prototype du futur système d'échange d'information météorologique en conformité avec l'environnement SWIM a été spécifié, développé et rendu disponible pour des premiers tests avec quelques futurs usagers finaux.

En 2019 les principaux axes de recherche sur les phénomènes météorologiques impactant l'aéronautique ont traité de la prévision à courte échéance « sans couture » des hydrométéores, afin de mieux anticiper les épisodes de précipitations convectives sur le créneau 0-3h, stratégique pour la gestion du trafic aérien ; de la prévision de la turbulence à l'échelle globale à partir d'un nouvel indice combinant plusieurs prédicteurs permettant de modéliser les différentes sources de turbulence ; et de la détection des cristaux de glace à forte concentration à haute altitude à partir de l'imagerie satellitaire. Une attention particulière a aussi été mise sur l'assimilation des données issues d'équipements embarqués sur satellite et issues de Lidar aérosols, afin de mieux modéliser la distribution horizontale et verticale des cendres volcaniques. En cas d'éruption, une meilleure représentation du panache émis permettra une prévision améliorée de son mouvement et de sa dispersion.

Enfin, 2019 a vu l'aboutissement du volet aéroporté du projet TERRISCOPE, pour une plateforme de recherche en télédétection aéroportée. Un bel exemple où l'aviation se met au service de la recherche, avec succès !

1

Prévoir la dispersion des cendres de l'Eyjafjallajökull en 2010 : apport de l'assimilation de données

Dans le cadre du projet IniTAF visant à initialiser automatiquement des TAFs (prévisions d'aérodrome), des travaux sur la prévision du plafond nuageux ont été menés. Ces travaux utilisent des méthodes d'apprentissage afin de déterminer la hauteur du plafond nuageux.

Les données de plafond pour l'apprentissage et la validation sont extraites des messages METARs issus du réseau de Météo-France de janvier 2016 à mi-2017 sur 66 aéroports (messages d'observations pour l'aéronautique à fréquence horaire - soit 10^5 enregistrements). Chaque METAR est mis en relation avec les sorties du modèle

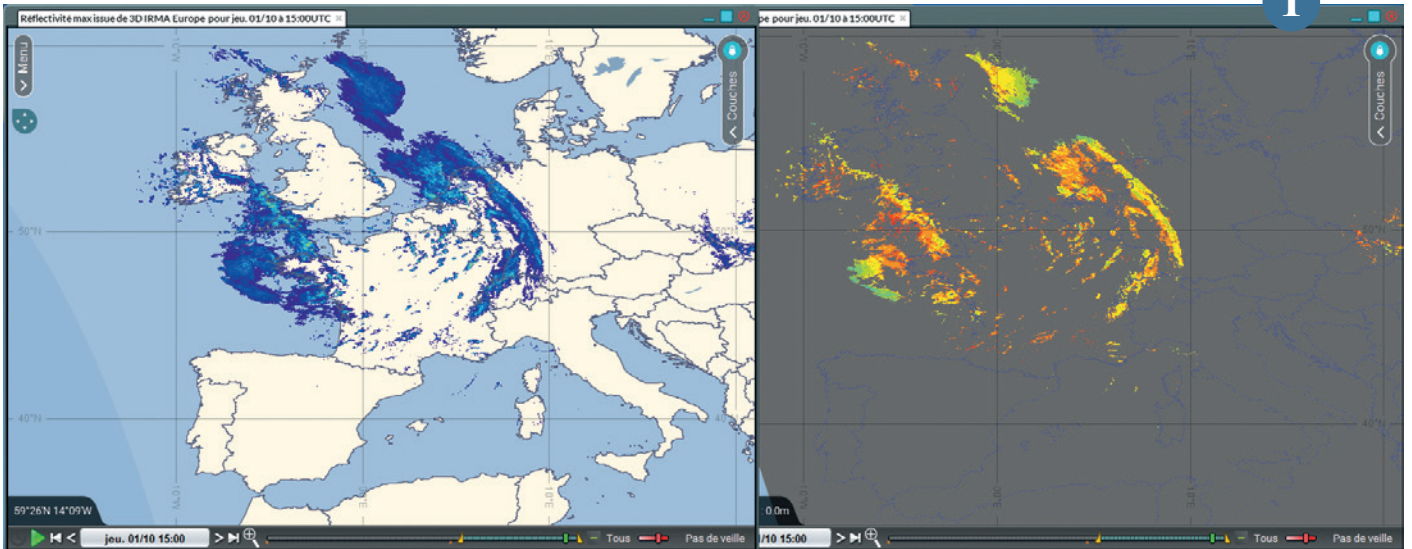
de prévision numérique AROME, sur un domaine de 20 km × 20 km centré sur chaque aéroport. Pour chaque point de la grille horizontale, des profils de plusieurs paramètres météorologiques (température, vent, humidité, contenu en eau liquide, etc...) sont extraits pour 24 niveaux de 10 m à 3000 m.

Des méthodes d'apprentissage sont alors mises en œuvre pour établir des modèles statistiques de prévision de plafond, en utilisant ces profils verticaux comme prédicteurs. Ces modèles sont évalués selon plusieurs critères : détections, fausses alarmes, et capacité à traiter un

grand nombre de prédicteurs. Des scores sont calculés pour chaque modèle. Ils sont ensuite comparés aux scores des prévisions du plafond issues de la persistance et d'un diagnostic directement extrait du champ de nébulosité tridimensionnelle du modèle AROME. Cette validation est complétée par l'analyse de plusieurs études de cas.

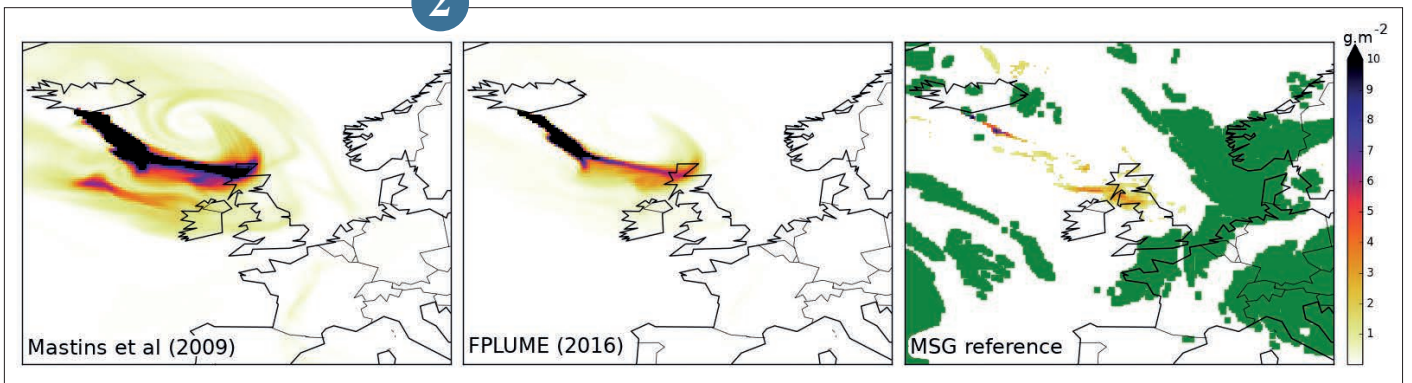
2

1



▲ Réflectivité maximum et Echo Top 18dBZ à très haute résolution issues des données radar 3D sur l'Europe – Projet de déploiement SESAR 2015_067_AF5 pour la détection de la convection basée sur les mosaïques européennes radar 3D.

2



▲ Colonnes totales de concentrations de cendres volcaniques le 16 mai 2010 à 09h TU, pour MOCAPE avec l'émission de Mastins (2009) (à gauche), pour MOCAPE avec FPLUME (au milieu) et pour la référence observée par MSG (à droite). Les points verts sur la figure de droite sont des points où la détection des cendres par le satellite n'a pas pu être faite (en raison principalement de la présence de nuages).

TERRISCOPE 2019

Une longue période de collaboration entre Safire (Infrastructure de Recherche du CNRS, Météo-France et Cnes) et l'Onera vient d'être couronnée de succès. En effet, cet ambitieux projet de « Plateforme de Recherche en Télédétection Aéroportée » vient de terminer son programme de vols de validation technique sur l'ATR42 de Météo-France. Le projet TERRISCOPE, porté par l'Onera, a pour objectif de mutualiser des instruments optiques aéroportés de très haute technicité. Il est soutenu par l'Union Européenne et la Région Occitanie dans le cadre d'un financement FEDER, ainsi que Sofradir, Boreal, M3Systèmes et Leosphere. Dès la première semaine des vols, le Lidar 3D de Riegl pour la première fois intégré sur un « gros avion », la caméra hyperspectrale FENIX également montée pour la première fois sur l'ATR de SAFIRE et les 2 caméras infrarouges TELOPS ont permis d'obtenir une somme de données que les équipes de l'Onera de Toulouse exploitent désormais. La deuxième semaine fut consacrée au premier vol du Lidar Vent ou « LIVE », instrument utilisant un amplificateur laser novateur développé par le Département d'Optique et Techniques Associées (DOTA) de l'Onera. Là aussi les résultats semblent prometteurs.

Un long et minutieux travail en amont a été nécessaire non seulement pour préparer les vols et équiper l'avion, mais aussi pour obtenir la certification d'instruments dont la plupart étaient des prototypes. La météo exceptionnelle du mois de Février a contribué à la réussite de cette campagne qui finalise le volet aéroporté du projet TERRISCOPE, mais le succès des 13,5 heures de vol accomplies met surtout en lumière l'engagement et la coordination exemplaires de tous les participants à ce projet.

Pour le futur, sept configurations de l'ATR sont certifiées et 4 configurations du Piper Aztec permettront de réaliser des campagnes de mesures variées avec les instruments mutualisés de la plateforme Onera. Ainsi, la plateforme Terriscope constitue un moyen unique de télédétection passive et active aéroportée permettant de mener aussi bien des recherches scientifiques (étude de l'environnement naturel ou artificiel entourant une activité anthropique), que des travaux plus appliqués notamment ceux liés à la surveillance, la sécurité et la défense.

3

Une nouvelle prévision globale de la turbulence aéronautique

La turbulence aéronautique est un risque majeur du secteur avec des dizaines de millions de dollars de coûts pour les compagnies, et plus de 7000 heures d'incapacité de travail. La turbulence subie par les avions a de multiples origines dont la CAT qui est particulièrement dangereuse car non détectable par les pilotes. Météo-France, à travers un projet mené conjointement par DSM/AERO et DR/GMAP, a développé un nouvel indice de turbulence.

Ce nouvel indice est une combinaison de prédicteurs suivant la méthode développée au NCAR pour le produit GTG. Chacun de ces prédicteurs cherche à identifier une source différente de CAT, comme le cisaillement vertical, le cisaillement horizontal ou encore l'instabilité thermique sur la verticale. Le choix des meilleurs prédicteurs est effectué par apprentissage en utilisant des données d'EDR observées sur les États-Unis à bord de vols commerciaux. Afin d'obtenir un indice final en EDR (recommandation de l'OACI), chaque prédicteur issu du modèle est converti vers cette unité en faisant l'hypothèse que chacun suit une loi de distribution identique à l'EDR observé.

4

Ce nouvel indice a été construit avec le modèle global ARPEGE et validé sur le premier semestre 2019 avec des scores objectifs utilisant l'EDR observé, ainsi que par des études de cas s'appuyant sur des retours pilotes. Il sera disponible tous les 10 niveaux de vol au pas de temps d'une heure. Les phénomènes conduisant à la turbulence (jet, convection...) étant sensibles aux erreurs de prévision, des travaux futurs vont permettre d'évaluer l'apport de la prévision d'ensemble pour cet indice.

Développement d'une prévision 0-3h sans couture des hydrométéores

Afin d'améliorer les prévisions 0-3 heures, Météo-France a développé une technique de fusion qui calcule toutes les 5 minutes le poids relatif des champs d'extrapolation radar et de sortie du modèle météorologique numérique haute fréquence AROME-PI. La technique est appelée PIAF¹ et repose sur une méthode dite « d'agrégation séquentielle de prédicteurs par poids exponentiels ». La combinaison linéaire qui en découle permet de produire la meilleure prévision de réflectivité aux échéances visées.

Afin de discriminer les différentes classes d'hydrométéores, PIAF-réflectivité est combiné avec le profil de température de thermomètre mouillée prévu par AROME-PI quand et où l'extrapolation a le poids le plus lourd. Les classes équivalentes diagnostiquées en sortie de AROME-PI sont utilisées si AROME-PI a le poids le plus lourd.

5

Cette approche, appelée PIAF-Hydrométéores, permet ainsi, toutes les 5 minutes, de fournir une prévision d'hydrométéores sur un vaste domaine incluant le territoire français. Elle fournit des informations utiles pour différents secteurs, par exemple les opérations aéroportuaires ou le secteur routier.

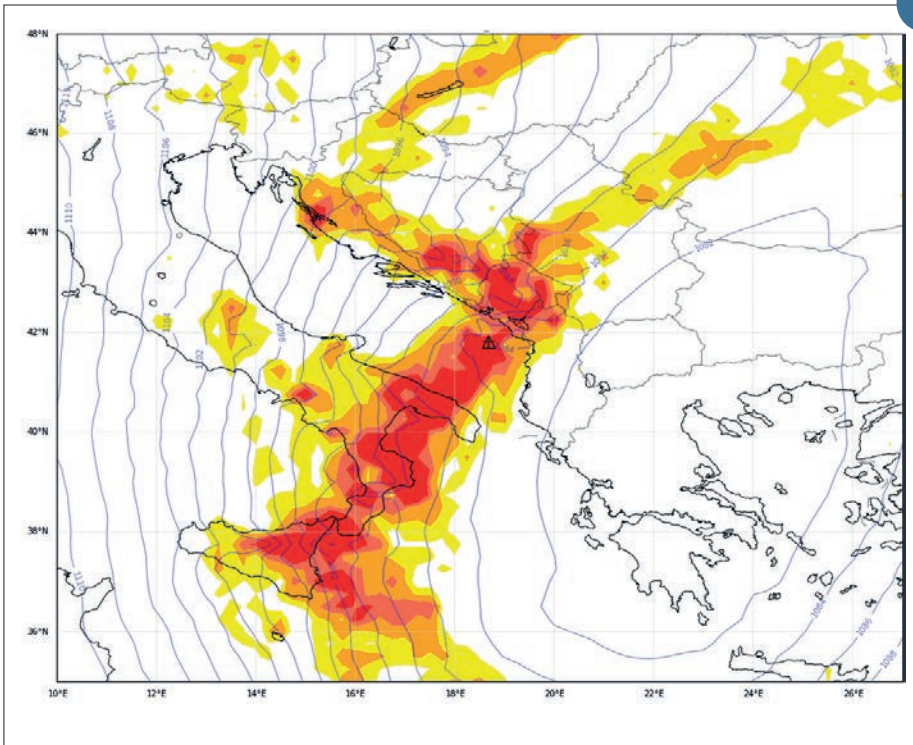
L'évaluation montre une bonne cohérence entre les prévisions et la référence (donnée par le produit HYDRE déduit des radars à double polarisation) pour les différents types de neige, la bruine et les précipitations. Concernant la grêle, la prévisibilité est moins bonne (30 minutes).

3



▲ L'équipe du lidar vent du DOTA de l'Onera et une partie de l'équipe SAFIRE au pied de l'ATR42 de Météo-France. Copyright : SAFIRE.

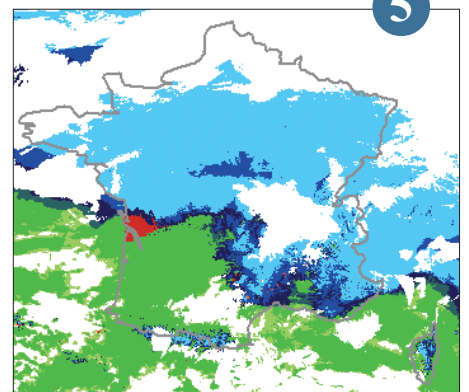
4



Hydrométéores PIAF du 28 février 2018 - prévision 60 minutes valide pour 21:00 UTC. Dans cet exemple, les hydrométéores sont la brume (vert clair), la pluie (vert foncé), la neige plus (bleu foncé) ou moins (bleu clair) humide, la pluie verglaçante (rouge).

▲ Prévion du diagnostic EDR pour le 13/02/2019 12h UTC - Maximum pour la tranche d'altitude FL370/390 en plage de couleur : rouge : sévère, orange : modéré, jaune : léger à modéré. En isolignes bleues le géopotential. Report de turbulences sévères indiqué avec le triangle rouge.

5



Annexes

Liste des publications scientifiques 2019 de la DR

- Abbatt, J. P., Leaitch, W. R., Aliabadi, A. A., Bertram, A. K., Blanchet, J. P., Boivin-Rioux, A., ... & Chaubey, J. P. (2019). Overview paper: New insights into aerosol and climate in the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(4), 2527-2560.
- Ablain M., L. Zawadzki, R. Jugier, B. Meyssignac, A. Ribes, A. Cazenave, N. Picot (2019) : Uncertainty in Satellite estimate of Global Mean Sea Level changes, trend and acceleration, *Earth System Science Data Discuss*, 1-26.
- Albergel, C., Dutra, E., Bonan, B., Zheng, Y., Munier, S., Balsamo, G., de Rosnay, P., Munoz-Sabater, J. and Calvet, J. C. Monitoring and forecasting the impact of the 2018 summer heatwave on vegetation. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(5), 520 <https://doi.org/10.3390/rs11050520>
- Ardilouze, C., Batté, L., Decharme, B. and Déqué, M. On the Link between Summer Dry Bias over the U.S. Great Plains and Seasonal Temperature Prediction Skill in a Dynamical Forecast System. *Weather and Forecasting, American Meteorological Society*, 2019, Vol. 34(4), pp. 1161-1172. <https://doi.org/10.1175/waf-d-19-0023.1>
- Ardilouze, C., Batté, L., Déqué, M., van Meijgaard, E. and van den Hurk, B. Investigating the impact of soil moisture on European summer climate in ensemble numerical experiments. *Climate Dynamics*, 2019, Vol. 52(7-8), pp. 4011-4026. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4358-1>
- Auguste, F., G. Réa, R. Paoli, C. Lac, V. Masson, and D. Cariolle, Implementation of an immersed boundary method in the Meso-NH v5.2 model: applications to an idealized urban environment, *Geosci. Model Dev.*, 12, 2607-2633, 2019.
- Barbary, D., Leroux, M. and Bousquet, O. The orographic effect of Reunion Island on tropical cyclone track and intensity. *Atmospheric Science Letters*, 2019, Vol. 20(2), pp. E882. <https://doi.org/10.1002/asl.882>
- Baumet, J., Déqué, M., Krinner, G., Agosta, C. and Alias, A. Effect of prescribed sea surface conditions on the modern and future Antarctic surface climate simulated by the ARPEGE atmosphere general circulation model. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13(11), pp. 3023-3043. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3023-2019>
- Bergot, T., and R. Lestringant, On the predictability of radiation fog formation in a mesoscale model: A case study in heterogeneous terrain, *Atmosphere*, 10, 165, 2019.
- Berre, L. Simulation and diagnosis of observation, model and background error contributions in data assimilation cycling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(719), pp. 597-608. <https://doi.org/10.1002/qj.3454>
- Berthet, S., Séférian, R., Bricaud, C., Chevallier, M., Voldoire, A. and Ethé, C. Evaluation of an Online Grid-Coarsening Algorithm in a Global Eddy-Admitting Ocean Biogeochemical Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(6), pp. 1759-1783. <https://doi.org/10.1029/2019ms001644>
- Beucher, F, Lafore, J-P, Chapelon, N. Simulation and analysis of the moist vortex associated with the extreme rain event of Ouagadougou in 2009. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 86– 104. <https://doi.org/10.1002/qj.3645>
- Bhowmick, S. A., Cotton, J., Fore, A., Kumar, R., Payan, C., Rodríguez, E., Sharma, A., Stiles, B., Stoffelen, A. and Verhoef, A. An Assessment of the Performance of ISRO's SCATSAT-1 Scatterometer. *Current Science*, 2019, Vol. 117(6), pp. 959. <https://doi.org/10.18520/cs/v117/i6/959-972>
- Bhuiyan, M. A. E., Nikolopoulos E., Anagnostou, E., Albergel, C., Dutra, E., Fink, G., Martinez de la Torre, A., Munier, S. and Polcher, J. : Assessment of Precipitation Error Propagation in Multi-Model Global Water Resources Reanalysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, Vol. 23, pp. 1973-1994 <https://doi.org/10.5194/hess-23-1973-2019>
- 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*, 2019. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8900427>
- Bigeard, G., Sic, B., Amraoui, L. E. and Plu, M. Monitoring Volcanic ASH with the Chemistry-Transport Model Mocale: Improvements of Source Term and Assimilation of Observations. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2019. <https://doi.org/10.1109/igarss.2019.8900396>
- Blunden, J. and Arndt, D. S. State of the Climate in 2018. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, Vol. 100(9), pp. Si-5306. <https://doi.org/10.1175/2019bamsstateoftheclimate.1>
- Blyverket, J.; Hamer, P.D.; Schneider, P.; Albergel, C.; Lahoz, W.A. Monitoring Soil Moisture Drought over Northern High Latitudes from Space. *Remote Sens.* 2019, 11, 1200.
- Blyverket, J.; Hamer, P.D.; Bertino, L.; Albergel, C.; Fairbairn, D.; Lahoz, W.A. An Evaluation of the EnKF vs. EnOI and the Assimilation of SMAP, SMOS and ESA CCI Soil Moisture Data over the Contiguous US. *Remote Sens.* 2019, 11(5), 478; <https://doi.org/10.3390/rs11050478>
- Borderies, M., Caumont, O., Delanoë, J., Ducrocq, V., Fourrié, N. and Marquet, P. Impact of airborne cloud radar reflectivity data assimilation on kilometre-scale numerical weather prediction analyses and forecasts of heavy precipitation events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, Vol. 19(4), pp. 907-926. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-907-2019>
- Borderies, M., O. Caumont, J. Delanoë, V. Ducrocq et N. Fourrié, 2019 : Assimilation of wind data from airborne Doppler cloud-profiling radar in a kilometre-scale NWP system. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(4), 821-835. doi : 10.5194/nhess-19-821-2019
- Bouchard, B., Eeckman, J., Dedieu, J.-P., Delclaux, F., Chevallier, P., Gascoïn, S. and Arnaud, Y. On the Interest of Optical Remote Sensing for Seasonal Snowmelt Parameterization, Applied to the Everest Region (Nepal). *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(22), pp. 2598. <https://doi.org/10.3390/rs11222598>
- Bourras, D., Cambra, R., Marié, L., Bouin, M. N., Baggio, L., Branger, H., ... & Maes, C., 2019 : Air-sea turbulent fluxes from a wave-following platform during six experiments at sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, DOI: 10.1029/2018JC014803,124 (6), 4290-4321.
- Bousquet, O., Barbary, D., Bielli, S., Kebir, S., Raynaud, L., Malardel, S. and 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*, 2019, pp. E950. <https://doi.org/10.1002/asl2.950>
- Bovalo, C., Barthe, C. and Pinty, J. Examining relationships between cloud-resolving model parameters and total flash rates to generate lightning density maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(720), pp. 1250-1266. <https://doi.org/10.1002/qj.3494>
- Brient, F., Roehrig, R. and Voldoire, A. Evaluating Marine Stratocumulus Clouds in the CNRM-CM6-1 Model Using Short-Term Hindcasts. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(1), pp. 127-148. <https://doi.org/10.1029/2018ms001461>
- Brient F., Couvreur F, Villefranque N, Rio C, Honnert R, 2019: Object-oriented identification of coherent structures in large-eddy simulations: importance of downdrafts in stratocumulus. *Geophysical Research Letters*, 46, 1-11, <https://doi.org/10.1029/2018GL081499>
- Bénard, P. Numerical investigation of Rossby waves for nonlinear shallow-water equations on the sphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1002/qj.3504>

- Bénard, P. and Glinton, M. R. Circumventing the pole problem of reduced lat-lon grids with local schemes. Part I: Analysis and model formulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1002/qj.3509>
- Calmer R., G.C. Roberts., K.J. Sanchez, J. Sciare, K. Sellegri, D. Picard, M. Vrekoussis and M. Pidridas. Aerosol–cloud closure study on cloud optical properties using remotely piloted aircraft measurements during a BACCHUS field campaign in Cyprus. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13989-2019>
- Calonne, N., Milliancourt, L., Burr, A., Philip, A., Martin, C. L., Flin, F. and Geindreau, C. Thermal Conductivity of Snow, Firn, and Porous Ice From 3-D Image-Based Computations. *Geophysical Research*, 2019, Vol. 46(22), pp. 13079-13089. <https://doi.org/10.1029/2019gl085228>
- Calvet J-C, de Rosnay P and Penny SG (2019), "Editorial for the Special Issue "Assimilation of Remote Sensing Data into Earth System Models"", *Remote Sensing*, sep, 2019. Vol. 11(18), pp. 2177. MDPI AG.
- Caron, J.-F., Michel, Y., Montmerle, T. and Arbogast, É. Improving Background Error Covariances in a 3D Ensemble-Variational Data Assimilation System for Regional NWP. *Monthly Weather Review*, 2019, Vol. 147(1), pp. 135-151. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-18-0248.1>
- Carrer, D.; Ceamanos, X.; Moparthy, S.; Vincent, C.; C. Freitas, S.; Trigo, I.F. Satellite Retrieval of Downwelling Shortwave Surface Flux and Diffuse Fraction under All Sky Conditions in the Framework of the LSA SAF Program (Part 1: Methodology). *Remote Sens.* 2019, 11, 2532.
- Carrer, D.; Moparthy, S.; Vincent, C.; Ceamanos, X.; C. Freitas, S.; Trigo, I.F. Satellite Retrieval of Downwelling Shortwave Surface Flux and Diffuse Fraction under All Sky Conditions in the Framework of the LSA SAF Program (Part 2: Evaluation). *Remote Sens.* 2019, 11, 2630.
- Carréric, A., Dewitte, B., Cai, W., Capotondi, A., Takahashi, K., Yeh, S.-W., Wang, G. and Guémas, V. Change in strong Eastern Pacific El Niño events dynamics in the warming climate. *Climate Dynamics*, 2019, Vol. 54(1-2), pp. 901-918. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05036-0>
- Ceamanos, X., Moparthy, S., Carrer, D. and Seidel, F. C. Assessing the Potential of Geostationary Satellites for Aerosol Remote Sensing Based on Critical Surface Albedo. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(24), pp. 2958. <https://doi.org/10.3390/rs11242958>
- Chang, K.-L., Cooper, O. R., West, J. J., Serre, M. L., Schultz, M. G., Lin, M., Maréchal, V., Josse, B., Deushi, M., Sudo, K., Liu, J. and Keller, C. A. A new method (M3Fusion v1) for combining observations and multiple model output for an improved estimate of the global surface ozone distribution. *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12(3), pp. 955-978. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-955-2019>
- Chauvin, F., Pilon, R., Palany, P. and Belmadani, A. Future changes in Atlantic hurricanes with the rotated-stretched ARPEGE-Climat at very high resolution. *Climate Dynamics*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05040-4>
- Ching J, Aliaga D, Mills G, Masson V, See L, Neophytou M, Middel A, Baklanov A, Ren C, Ng E, Fung J, Wong M, Huang Y, Martilli A, Brousse O, Stewart I, Zhang X, Shehata A, Miao S, Wang X, Wang W, Yamagata Y, Duarte D, Li Y, Feddema J, Bechtel B, Hidalgo J, Roustan Y, Kim Y, Simon H, Kropp T, Bruse M, Lindberg F, Grimmond S, Demazure M, Chen F, Li C, Gonzales-Cruz J, Bornstein B, He Q, Tzu-Ping, Hanna A, Erell E, Tapper N, Mall R and Niyogi D (2019), "Pathway using WUDAPT's DigitalSynthetic City tool towards generating urban canopy parameters for multi-scale urban atmospheric modeling", *Urban Climate*, jun, 2019. Vol. 28, pp. 100459.
- Cimini, D., Hocking, J., Angelis, F. D., Cersosimo, A., Paola, F. D., Gallucci, D., Gentile, S., Geraldini, E., Larosa, S., Nilo, S., Romano, F., Ricciardelli, E., Ripepi, E., Viggiano, M., Luini, L., Riva, C., Marzano, F. S., Martinet, P., Song, Y., Ahn, M. H. and Rosenkranz, P. RTTOV-gb v1.0 - updates on sensors, absorption models, uncertainty, and availability. *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12(5), pp. 1833-1845. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1833-2019>
- Colin, M., Sherwood, S., Geoffroy, O., Bony, S. and Fuchs, D. Identifying the Sources of Convective Memory in Cloud-Resolving Simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, Vol. 76(3), pp. 947-962. <https://doi.org/10.1175/jas-d-18-0036.1>
- Colombo, R., Garzonio, R., Mauro, B. D., Dumont, M., Tuzet, F., Cogliati, S., Pozzi, G., Maltese, A. and Cremonese, E. Introducing thermal inertia for monitoring snowmelt processes with remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46, pp. 4308-4319. <https://doi.org/10.1029/2019GL082193>
- Conte, L., Szopa, S., Séférian, R. and Bopp, L. The oceanic cycle of carbon monoxide and its emissions to the atmosphere. *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16(4), pp. 881-902. <https://doi.org/10.5194/bg-16-881-2019>
- Cornforth R, Parker DJ, Diop-Kane M, Fink AH, Lafore J-P, Laing A, Afiesimama E, Caughey J, Diongue-Niang A, Kassimou A, Lamb P, Lamptey B, Mumba Z, Nnodu I, Omotosho J, Palmer S, ParrishP, Razafindrakoto L-G, Thiaw W, Thorncroft C and Tompkins A (2019), "The First Forecasters' Handbook for West Africa", *Bulletin of the American Meteorological Society*, nov, 2019. Vol. 100(11), pp. 2343-2351.
- Corona-Lozada, M., Morin, S. and Choler, P. Drought offsets the positive effect of summer heat waves on the canopy greenness of mountain grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, Vol. 276-277, pp. 107617. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107617>
- Daniel M, Lemonsu A, Déqué M, Somot S, Alias A, Masson V (2019) Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modelling to study climate and city interactions. *Climate Dynamics*, 52(5-6):2745-2764.
- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F. and Nabat, P. Past Variability of Mediterranean Sea Marine Heatwaves. *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46(16), pp. 9813-9823. <https://doi.org/10.1029/2019GL082933>
- Darmaraki, S., Somot, S., Sevault, F., Nabat, P., Narvaez, W. D. C., Cavicchia, L., Djurdjevic, V., Li, L., Sannino, G. and Sein, D. V. Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea. *Climate Dynamics*, 2019, Vol. 53(3-4), pp. 1371-1392. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>
- DeVries, T., Quéré, C. L., Andrews, O., Berthet, S., Hauck, J., Ilyina, T., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Nowicki, M., Schwinger, J. and Séférian, R. Decadal trends in the ocean carbon sink. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, pp. 201900371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900371116>
- Decharme, B., Delire, C., Minvielle, M., Colin, J., Vergnes, J.-P., Alias, A., Saint-Martin, D., Séférian, R., Sénési, S. and Voldoire, A. Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(5), pp. 1207-1252. <https://doi.org/10.1029/2018ms001545>
- Deroubaix, A., Menut, L., Flamant, C., Brito, J., Denjean, C., Dreiling, V., Fink, A., Jambert, C., Kalthoff, N., Knippertz, P., Ladkin, R., Mailler, S., Maranay, M., Pacífico, F., Pigué, B., Siour, G. and Turquet, S. Diurnal cycle of coastal anthropogenic pollutant transport over southern West Africa during the DACCIIWA campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(1), pp. 473-497. <https://doi.org/10.5194/acp-19-473-2019>
- Descheemaeker, M., Plu, M., Maréchal, V., Claeysman, M., Olivier, F., Aoun, Y., Blanc, P., Wald, L., Guth, J., Sic, B., Vidot, J., Piacentini, A. and Josse, B. Monitoring aerosols over Europe: an assessment of the potential benefit of assimilating the VIS04 measurements from the future MTG/FCI geostationary imager. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, Vol. 12(2), pp. 1251-1275. <https://doi.org/10.5194/amt-12-1251-2019>
- Di Mauro, B., Garzonio, R., Rossini, M., Filipa, G., Pogliotti, P., Galvagno, M., di Cella, U. M., Migliavacca, M., Baccolo, G., Clemenza, M., Delmonte, B., Maggi, V., Dumont, M., Tuzet, F., Lafaysse, M., Morin, S., Cremonese, E. and Colombo, R. Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13, pp. 1147-1164. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1147-2019>
- Dion, I.-A., Ricaud, P., Haynes, P., Carminati, F. and Dauhut, T. Ice injected into the tropopause by deep convection – Part 1: In the austral convective tropics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(9), pp. 6459-6479. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6459-2019>
- Dixon R. D., P. Peyrillé and F. Guichard, 2019: Sahelian precipitation change induced by SST increase: the contrasting roles of regional and larger-scale drivers. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 11378-11387. doi:10.1029/2019GL084872
- Doerenbecher, A. and Mahfouf, J.-F. Impact of additional AMDAR data in the AROME-France model during May 2017. *Advances in Science and Research*, 2019, Vol. 16, pp. 215-222. <https://doi.org/10.5194/asr-16-215-2019>
- Domine, F., Picard, G., Morin, S., Barrere, M., Madore, J.-B. and Langlois, A. Major issues in simulating some Arctic snowpack properties using current detailed snow physics models: Consequences for the thermal regime and water budget of permafrost. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11, pp. 34-44. <https://doi.org/10.1029/2018MS001445>
- Douville H., A. Ribes (2019) Breakdown of NAO reproducibility into internal versus externally forced components : a pilot study, *Climate Dynamics*, 52 (1-2), 29-48, doi:10.1007/s00382-018-4141-3.

- Drugé, T., Nabat, P., Mallet, M. and Somot, S. Model simulation of ammonium and nitrate aerosols distribution in the Euro-Mediterranean region and their radiative and climatic effects over 1979–2016. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(6), pp. 3707–3731. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3707-2019>
- Dunic, N., Vilibic, I., Sepic, J., Mihanovic, H., Sevault, F., Somot, S., Waldman, R., Nabat, P., Arsouze, T., Pennel, R., Jordà, G. and Precali, R. Performance of multi-decadal ocean simulations in the Adriatic Sea. *Ocean Modelling*, 2019, Vol. 134, pp. 84–109. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.01.006>
- Duflot, V., Tulet, P., Flores, O., Barthe, C., Colomb, A., Deguillaume, L., Vaïtilingom, 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.*, 19, 10591–10618, <https://doi.org/10.5194/acp-19-10591-2019>, 2019
- Duruiseau, F., Chambon, P., Wattrelot, E., Barreyat, M. and Mahfouf, J.-F. Assimilating cloudy and rainy microwave observations from SAPHIR on board Megha Tropiques within the ARPEGE global model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(719), pp. 620–641. <https://doi.org/10.1002/qj.3456>
- Eeckman J, Nepal S, Chevallier P, Camensuli G, Delclaux F, Boone A and Rouw AD (2019), "Comparing the ISBA and J2000 approaches for surface flows modelling at the local scale in the Everest region", *Journal of Hydrology*, feb, 2019. Vol. 569, pp. 705–719. Elsevier BV.
- Ehsan Bhuiyan, M. A., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Polcher, J., Albergel, C., Dutra, E., Fink, G., Martínez-de la Torre, A., and Munier, S.: Assessment of precipitation error propagation in multi-model global water resource reanalysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 1973–1994, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1973-2019>, 2019
- El Hajj, M.; Baghdadi, N.; Wigneron, J.-P.; Zribi, M.; Albergel, C.; Calvet, J.-C.; Fayad, I. First Vegetation Optical Depth Mapping from Sentinel-1 C-band SAR Data over Crop Fields. *Remote Sens.* 2019, 11(23), 2769; <https://doi.org/10.3390/rs11232769>
- Evin, G., Hingray, B., Blanchet, J., Eckert, N., Morin, S. and Verfaillie, D. Partitioning uncertainty components of an incomplete ensemble of climate projections using data augmentation. *Journal of Climate*, 2019, Vol. 32, pp. 2423–2440. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0606.1>
- Farouk, I., Fourrié, N. and Guidard, V. Homogeneity criteria from AVHRR information within IASI pixels in a numerical weather prediction context. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, Vol. 12(6), pp. 3001–3017. <https://doi.org/10.5194/amt-12-3001-2019>
- Federico, S., R. C. Torcasio, E. Avolio, O. Caumont, M. Montopoli, L. Baldini, G. Vulpiani et S. Dietrich, 2019 : The impact of lightning and radar data assimilation on the performance of very short term rainfall forecast for two case studies in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(8), 1839–1864. doi : 10.5194/nhess-19-1839-2019
- Flores-Rojas J, Pereira-Filho A, Karam H, Vemado F, Masson V and Silva-Vidal F (2019), "Modeling the Effects of Explicit Urban Canopy Representation on the Development of Thunderstorms above a Tropical Mega City", *Atmosphere*, jun, 2019. Vol. 10(7), pp. 356
- Formenti, P., D'Anna, B., Flamant, C., Mallet, M., Piketh, S. J., Schepanski, K., Waquet, F., Auriol, F., Brogniez, G., Burnet, F., Chaboureau, J.-P., Chauvigné, A., Chazette, P., Denjean, C., Desboeufs, K., Doussin, J.-F., Elguindi, N., Feuerstein, S., Gaetani, M., Giorio, C., Klopfer, D., Mallet, M. D., Nabat, P., Monod, A., Solmon, F., Namwoonde, A., Chikwilliwa, C., Mushi, R., Welton, E. J. and Holben, B. The Aerosols, Radiation and Clouds in southern Africa (AEROCLO-SA) field campaign in Namibia: overview, illustrative observations and way forward. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1175/bams-d-17-0278.1>
- Fourrié, N., M. Nuret, P. Brousseau, O. Caumont, A. Doerenbecher, E. Wattrelot, P. Moll, H. Bénichou, D. Puech, O. Bock, P. Bossier, P. Chazette, C. Flamant, P. Di Girolamo, E. Richard et F. Saïd, 2019: The AROME-WMED reanalyses of the first special observation period of the hydro-logical cycle in the mediterranean experiment (HyMeX). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2657–2678. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2657-2019>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitth, S., Quéré, C. L., Bakker, D. C. E., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Currie, K. I., Feely, R. A., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D. S., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R. A., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kaplan, J. O., Kato, E., Goldewijk, K. K., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lausset, S. K., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozi, D., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Metz, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Omar, A. M., Ono, T., Peregon, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Werf, G. R., Wiltshire, A. J. and Zaehle, S. Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11(4), pp. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- 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. *Clim. Dyn.*, 1–15, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04898-8>
- Geoffroy, O. and Saint-Martin, D. Equilibrium- and transient-state dependencies of climate sensitivity: are they important for climate projections? *Journal of Climate*, 2019. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0248.1>
- Giffard, P., Llovel, W., Jouanno, J., Morvan, G. and Decharme, B. Contribution of the Amazon River Discharge to Regional Sea Level in the Tropical Atlantic Ocean. *Water*, 2019, Vol. 11(11), pp. 2348. <https://doi.org/10.3390/w11112348>
- Glinton, M. R. and Bénard, P. Circumventing the pole problem of reduced lat-lon grids with local schemes. Part II: Validation experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1002/qj.3495>
- Gonzalez, S., Bech, J., Udina, M., Codina, B., Paci, A. and Trapero, L. Decoupling between Precipitation Processes and Mountain Wave Induced Circulations Observed with a Vertically Pointing K-Band Doppler Radar. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(9), pp. 1034. <https://doi.org/10.3390/rs11091034>
- Goret, M., Masson, V., Schoetter, R. and Moine, M.-P. Inclusion of a CO2 flux modelling in an urban canopy layer model and evaluation over an old European city centre. *Atmospheric Environment*, 2019, Vol. 3, (100042), pp. 1–21 <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100042>
- Granados-Muñoz, M. J., Sicard, M., Román, R., Benavent-Oltra, J. A., Barragán, R., Brogniez, G., Denjean, C., Mallet, M., Formenti, P., Torres, B. and Alados-Arboledas, L. Impact of mineral dust on shortwave and longwave radiation: evaluation of different vertically resolved parameterizations in 1-D radiative transfer computations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(1), pp. 523–542. <https://doi.org/10.5194/acp-19-523-2019>
- Guillet, O., Weaver, A. T., Vasseur, X., Michel, Y., Gratton, S. and Gürol, S. Modelling spatially correlated observation errors in variational data assimilation using a diffusion operator on an unstructured mesh. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1002/qj.3537>
- Guyomarc'h, G., Bellot, H., Vionnet, V., Naaim-Bouvet, F., Deliot, Y., Fontaine, F., Pugliese, P., Nishimura, K., Durand, Y. and Naaim, M. A meteorological and blowing snow data set (2000–2016) from a high-elevation alpine site (Col du Lac Blanc, France, 2720m a.s.l.). *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, pp. 57–69. <https://doi.org/10.5194/essd-11-57-2019>
- Hagenmuller, P., Flin, F., Dumont, M., Tuzet, F., Peinke, I., Lapalus, P., Dufour, A., Roule, J., Pézard, L., Voisin, D., Ando, E., Rolland du Roscoat, S. and Charrier, P. Motion of dust particles in dry snow under temperature gradient metamorphism. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13, pp. 2345–2359. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2345-2019>
- Hajj ME, Baghdadi N, Wigneron J-P, Zribi M, Albergel C, Calvet J-C and Fayad I (2019), "First Vegetation Optical Depth Mapping from Sentinel-1 C-band SAR Data over Crop Fields", *Remote Sensing*, nov, 2019. Vol. 11(23), pp. 2769
- Haslett, S. L., Taylor, J. W., Evans, M., Morris, E., Vogel, B., Dajuma, A., Brito, J., Batenburg, A. M., Borrmann, S., Schneider, J., Schulz, C., Denjean, C., Bourriane, T., Knippertz, P., Dupuy, R., Schwarzenböck, A., Sauer, D., Flamant, C., Dorsey, J., Crawford, I. and Coe, H. Remote biomass burning dominates southern West African air pollution during the monsoon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(24), pp. 15217–15234. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15217-2019>
- Hermozo, L., L. Eymard, F. Karbou, B. Picard, M. Pardé, A 1D-Var approach to retrieve clear sky wet tropospheric correction from current and future altimetry missions, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-17-0133.1>, 2019
- Hidalgo J, Lemonsu A, Masson V (2019) Between progress and obstacles on urban climate interdisciplinary studies and knowledge transfer to society. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1):5-18

- Hidalgo, J., Dumas, G., Masson, V., Petit, G., Bechtel, B., Bocher, E., Foley, M., Schoetter, R. and Mills, G. Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, 2019, Vol. 27, pp. 64-89 <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.004>
- Hogan RJ, Fielding MD, Barker HW, Villefranque N and Schäfer SAK (2019), "Entrapment: An Important Mechanism to Explain the Shortwave 3D Radiative Effect of Clouds", *Journal of the Atmospheric Sciences.*, jul, 2019. Vol. 2019(1), pp. 48-66
- Hourdin F, Jam A, Rio C, Couvreur F, Sandu I, Lefebvre M.P., Brient F., Idelkadi A, 2019: Unified parameterization of convective boundary layer transport and clouds with the thermal plume model, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 9, 2910-2933, <https://doi.org/10.1029/2019MS001666>
- Huijnen, V., Pozzer, A., Arteta, J., Brasseur, G., Bouarar, I., Chabrilat, S., Christophe, Y., Dombia, T., Flemming, J., Guth, J., Josse, B., Karydis, V. A., Marécal, V. and Pelletier, S. Quantifying uncertainties due to chemistry modelling – evaluation of tropospheric composition simulations in the CAMS model (cycle 43R1). *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12(4), pp. 1725-1752. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1725-2019>
- Illingworth, A. J., Cimini, D., Haefele, A., Haefelin, M., Hervo, M., Kotthaus, S., U. L., Martinet, P., Mattis, I., O'Connor, E. J. and Potthast, R. How can Existing Ground-Based Profiling Instruments Improve European Weather Forecasts?, *BAMS*, 2019. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2019. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0231.1>
- Jones, C. D., Frölicher, T. L., Koven, C., MacDougall, A. H., Matthews, H. D., Zickfeld, K., Rogelj, J., Tokarska, K. B., Gillett, N. P., Ilyina, T., Meinshausen, M., Mengis, N., Séférian, R., Eby, M. and Burger, F. A. The Zero Emissions Commitment Model Intercomparison Project (ZECMIP) contribution to C4MIP: quantifying committed climate changes following zero carbon emissions. *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12(10), pp. 4375-4385. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4375-2019>
- Kim, R. S., Durand, M., Li, D., Baldo, E., Margulis, S. A., Dumont, M. and Morin, S. Estimating alpine snow depth by combining multifrequency passive radiance observations with ensemble snowpack modeling. *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 226, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.016>
- Kokhanovsky A., Lamare M., Danne O., Brockmann C., Dumont M., Picard G., Arnaud L., Favier V., Jourdain B., Le Meur E., Di Mauro B., Aoki T., Niwano M., Rozanov V., Korkin S., Kipfstuhl S., Freitag J., Hoerhold M., Zühr A., Vladimirova D., Faber A., Steen-Larsen H.-C., Wahl S., Andersen J., Vandecrux B., Van As D., Mankoff K., Kern M., Zege E. and Box J. Retrieval of Snow Properties from the Sentinel-3 Ocean and Land Colour Instrument. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, pp. 2280. <https://doi.org/10.3390/rs11192280>
- Køltzow, M., Casati, B., Bazile, E., Haiden, T. and Valkonen, T. A NWP model inter-comparison of surface weather parameters in the European Arctic during the Year of Polar Prediction Special Observing Period Northern Hemisphere 1. *Weather and Forecasting*, 2019. <https://doi.org/10.1175/waf-d-19-0003.1>
- Kwok, Y.T., Schoetter, R., Lau, K.K.L., Hidalgo, J., Ren, C., Pigeon, G. and Masson, V. How well does the Local Climate Zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France) ? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology*, 2019, Vol. 39(14), pp. 5292-5315, <https://doi.org/10.1002/joc.6140>
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M. I., Jöckel, P., Kirner, O., Liley, B., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., Zeng, G., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Butchart, N., Chipperfield, M. P., Genova, G. D., Deushi, M., Dhomse, S. S., Hu, R.-M., Kinnison, D., Kotkamp, M., McKenzie, R., Michou, M., O'Connor, F. M., Oman, L. D., Pitari, G., Plummer, D. A., Pyle, J. A., Rozanov, E., Saint-Martin, D., Sudo, K., Tanaka, T. Y., Visioni, D. and Yoshida, K. Clear-sky ultraviolet radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(15), pp. 10087-10110. <https://doi.org/10.5194/acp-19-10087-2019>
- LeBastard, T., O. Caumont, N. Gaussiat et F. Karbou, 2019 : Combined use of volume radar observations and high-resolution numerical weather predictions to estimate precipitation at the ground: methodology and proof of concept. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5669-5684. [doi : 10.5194/amt-12-5669-2019](https://doi.org/10.5194/amt-12-5669-2019)
- Le Cozannet, G., Bulteau, T., Castelle, B., Ranasinghe, R., Wöppelmann, G., Rohmer, J., Bernon, N., Idier, D., Louisor, J. and Salas-y-Méllia, D. (2019). Quantifying uncertainties of sandy shoreline change projections as sea level rises. *Scientific Reports*. 9. [10.1038/s41598-018-37017-4](https://doi.org/10.1038/s41598-018-37017-4)
- Leger, J., Lafore, J.-P., Piriou, J.-M. and Guérémy, J.-F. A Simple Model of Convective Drafts Accounting for the Perturbation Pressure Term. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, Vol. 76(10), pp. 3129-3149. <https://doi.org/10.1175/jas-d-18-0281.1>
- Lejeune, Y., Dumont, M., Panel, J.-M., Lafaysse, M., Lapalus, P., Gac, E. L., Lesaffre, B. and Morin, S. 57 years (1960–2017) of snow and meteorological observations from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325m of altitude). *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, pp. 71-88. <https://doi.org/10.5194/essd-11-71-2019>
- Lemonsu A, Amossé A, Gaudio N, Haouès-Jouve S, Hidalgo J, Le Bras J, Legain D, Marchandise S (2019) Comparison of microclimate measurements and perceptions as part of a global evaluation of environmental quality at neighbourhood scale. *International Journal of Biometeorology*, 10.1007/s00484-019-01686-1, in-line first
- Le Roy B, Lemonsu A, Kounkou-Arnaud R, Brion D, Masson V (2019) Long time series spatialized data for urban climatological studies : a case study of Paris, France. *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.6414>
- Leroux, M.-D., Davidson, N. E., Hankinson, C. M., Reeder, M. J., Wain, A. G. and Xinmei, H. Environmental Interactions During the Extreme Rain Event associated with ex-Tropical Cyclone Oswald (2013). *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 2019, Vol. 69(1), pp. 216. <https://doi.org/10.1071/ES19016>
- Libois, Q., Lévesque-Desrosiers, F., Lambert-Girard, S., Thibault, S., & Domine, F. (2019). Optical porosimetry of weakly absorbing porous materials. *Optics express*, 27(16), 22983-22993
- Lievens, H., Demuzere, M., Marshall, H.-P., Reichle, R. H., Brucker, L., Brangers, I., de Rosnay, P., Dumont, M., Giroto, M., Immerzeel, W. W., Jonas, T., Kim, E. J., Koch, I., Marty, C., Saloranta, T., Schöber, J. and De Lannoy, G. J. M. Snow depth variability in the Northern Hemisphere mountains observed from space. *Nature Communications*, 2019, Vol. 10, pp. 4629. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12566-y>
- Lovat A, Vincendon B and Ducrocq V (2019), "Assessing the impact of resolution and soil datasets on flash-flood modelling", *Hydrology and Earth System Sciences.*, apr, 2019. Vol. 23(3), pp. 1801-1818
- Malardel, S. and Bechtold, P. The coupling of deep convection with the resolved flow via the divergence of mass flux in the IFS. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(722), pp. 1832-1845. <https://doi.org/10.1002/qj.3528>
- Mallet, M., Nabat, P., Zuidema, P., Redemann, J., Sayer, A. M., Stengel, M., Schmidt, S., Cochrane, S., Burton, S., Ferrare, R., Meyer, K., Saide, P., Jethva, H., Torres, O., Wood, R., Martin, D. S., Roehrig, R., Hsu, C. and Formenti, P. Simulation of the transport, vertical distribution, optical properties and radiative impact of smoke aerosols with the ALADIN regional climate model during the ORACLES-2016 and LASIC experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(7), pp. 4963-4990. <https://doi.org/10.5194/acp-19-4963-2019>
- Masson, T., M. D. Mura, M. Dumont and J. Chanussot, Snow Cover Estimation From Image Time Series Based on Spectral Unmixing, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16(3), 337-341, <https://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2018.2873836>, 2019
- 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, Zeidler J (2019) City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100536>.
- Mattioli, V., Accadia, C., Prigent, C., Crewell, S., Geer, A., Eriksson, P., Fox, S., Pardo, J. R., Mlawer, E. J., Cadeddu, M., Bremer, M., Breuck, C. D., Smette, A., Cimini, D., Turner, E., Mech, M., Marzano, F. S., Brunel, P., Vidot, J., Bennartz, R., Wehr, T., Michele, S. D. and John, V. O. Atmospheric Gas Absorption Knowledge in the Submillimeter: Modeling, Field Measurements, and Uncertainty Quantification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, Vol. 100(12), pp. ES291-ES295. <https://doi.org/10.1175/bams-d-19-0074.1>
- Mazoyer, M., Burnet, F., Denjean, C., Roberts, G. C., Haefelin, M., Dupont, J.-C. and Elias, T. Experimental study of the aerosol impact on fog microphysics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(7), pp. 4323-4344. <https://doi.org/10.5194/acp-19-4323-2019>
- McCoy, D. T., Field, P. R., Elsaesser, G. S., Bodas-Salcedo, A., Kahn, B. H., Zelinka, M. D., Kodama, C., Mauritsen, T., Vanniere, B., Roberts, M., Vidale, P. L., Saint-Martin, D., Voldoire, A., Haarsma, R., Hill, A., Shipway, B. and Wilkinson, J. Cloud feedbacks in extratropical cyclones: insight from long-term satellite data and high-resolution global simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(2), pp. 1147-1172. <https://doi.org/10.5194/acp-19-1147-2019>

- Mercier, F., Michel, Y., Montmerle, T., Jolivet, P. and Gürol, S. Speeding up the ensemble data assimilation system of the limited-area model of Météo-France using a block Krylov algorithm. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(720), pp. 910-929. <https://doi.org/10.1002/qj.3428>
- Mhedhbi Z, Masson V, Hidalgo J and Haouès-Jouve S (2019), "Collection of refined architectural parameters by crowdsourcing using Facebook social network: Case of Greater Tunis", *Urban Climate*, sep, 2019. Vol. 29, pp. 100499
- Minnett, P., Alvera-Azcárate, A., Chin, T., Corlett, G., Gentemann, C., Karagali, I., Li, X., Marsouin, A., Marullo, S., Maturi, E., Santoleri, R., Picart, S. S., Steele, M. and Vazquez-Cuervo, J. Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 233, pp. 111366. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111366>
- Moparthy, S.; Carrer, D.; Ceamanos, X. Can We Detect the Brownness or Greenness of the Congo Rainforest Using Satellite-Derived Surface Albedo? A Study on the Role of Aerosol Uncertainties. *Sustainability* 2019, 11, 1410
- Morel, X., Decharme, B., Delire, C., Krinner, G., Lund, M., Hansen, B. U. and Mastepanov, M. A New Process-Based Soil Methane Scheme: Evaluation Over Arctic Field Sites With the ISBA Land Surface Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(1), pp. 293-326. <https://doi.org/10.1029/2018ms001329>
- Moullec, F., Barrier, N., Drira, S., Guilhaumon, F., Marsaleix, P., Somot, S., Ulses, C., Velez, L. and Shin, Y.-J. An End-to-End Model Reveals Losers and Winners in a Warming Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00345>
- Ménard, C. B., Essery, R., Barr, A., Bartlett, P., Derry, J., Dumont, M., Fierz, C., Kim, H., Kontu, A., Lejeune, Y., Marks, D., Niwano, M., Raleigh, M., Wang, L. and Wever, N. Meteorological and evaluation datasets for snow modelling at 10 reference sites: description of in situ and bias-corrected reanalysis data. *Earth System Science Data*, 2019, Vol. 11, pp. 865-880. <https://doi.org/10.5194/essd-11-865-2019>
- Müller, A., Deconinck, W., Kühnlein, C., Mengaldo, G., Lange, M., Wedi, N., Bauer, P., Smolarkiewicz, P. K., Diamantakis, M., Lock, S.-J., Hamrud, M., Saarinen, S., Mozdzyński, G., Thiemert, D., Ginton, M., Bénard, P., Voitus, F., Colavolpe, C., Marguinaud, P., Zheng, Y., Bever, J. V., Degrauwe, D., Smet, G., Termonia, P., Nielsen, K. P., Sassi, B. H., Poulsen, J. W., Berg, P., Osuna, C., Fuhrer, O., Clement, V., Baldauf, M., Gillard, M., Szmelter, J., O'Brien, E., McKinstry, A., Robinson, O., Shukla, P., Lysaght, M., Kulczewski, M., Ciznicki, M., Pia, tek, W., Ciesielski, S., Blazewicz, M., Kurowski, K., Procyk, M., Sychala, P., Bosak, B., Piotrowski, Z., Wyszogrodzki, A., Raffin, E., Mazauric, C., Guilbert, D., Douriez, L., Vigouroux, X., Gray, A., Messmer, P., Macfaden, A. J. and New, N. The ESCAPE project: Energy-efficient Scalable Algorithms for Weather Prediction at Exascale. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2019, pp. 1-50. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-304>
- Muñoz-Sabater, J., Lawrence, H., Albergel, C., Rosnay, P., Isaksen, I., Mecklenburg, S., Kerr, Y. and Drusch, M. Assimilation of SMOS brightness temperatures in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(723), pp. 2524-2548. <https://doi.org/10.1002/qj.3577>
- Nahmani S., O. Bock and F. Guichard, 2019: Sensitivity of GPS tropospheric estimates to mesoscale convective systems in West Africa. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 9541–9561. doi:10.5194/acp-19-9541-2019
- Nicolet, G., Eckert, N., Morin, S. and Blanchet, J. Inférence et modélisation de la dépendance spatiale des extrêmes neigeux dans les Alpes françaises par processus max-stables La Houille Blanche, 2019(5-6), pp. 150-158. <https://doi.org/10.1051/lhb/2019047>
- Nousu, J.-P., Lafaysse, M., Vernay, M., Bellier, J., Evin, G. and Joly, B. Statistical post-processing of ensemble forecasts of the height of new snow. *Nonlinear Processes of Geophysics*, 2019, Vol. 26, pp. 339-357. <https://doi.org/10.5194/npg-26-339-2019>
- O'Carroll, A. G., Armstrong, E. M., Beggs, H. M., Bouali, M., Casey, K. S., Corlett, G. K., Dash, P., Donlon, C. J., Gentemann, C. L., Høyer, J. L., Ignatov, A., Kabobah, K., Kachi, M., Kurihara, Y., Karagali, I., Maturi, E., Merchant, C. J., Marullo, S., Minnett, P. J., Pennybacker, M., Ramakrishnan, B., Ramsankaran, R., Santoleri, R., Sunder, S., Picart, S. S., Vázquez-Cuervo, J. and Wimmer, W. Observational Needs of Sea Surface Temperature. *Frontiers in Marine Science*, 2019, Vol. 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00420>
- Peings, Y., J. Cattiaux and G. Magnusdottir (2019), The polar stratosphere as an arbiter of the projected tropical versus polar tug-of-war, *Geophysical Research Letters*, 46 (15), 9261–9270. doi:10.1029/2019GL082463
- Peinke, I., P. Hagenmuller, G. Chambon, J. Roulle, Investigation of snow sintering at microstructural scale from micro-penetration tests, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 162, 43-55, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.018>, 2019
- Pellet, V., Aires, F., Munier, S., Fernández Prieto, D., Jordá, G., Dorigo, W. A., Polcher, J., and Brocca, L.: Integrating multiple satellite observations into a coherent dataset to monitor the full water cycle – application to the Mediterranean region, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 465–491, <https://doi.org/10.5194/hess-23-465-2019>, 2019
- Plazzotta, M., Séférian, R. and Douville, H. Impact of Solar Radiation Modification on Allowable CO₂ Emissions: What Can We Learn From Multimodel Simulations? *Earth's Future*, *American Geophysical Union (AGU)*, 2019, Vol. 7(6), pp. 664-676. <https://doi.org/10.1029/2019ef001165>
- Prodhomme, C., Voldoire, A., Exarchou, E., Deppenmeier, A.-L., García-Serrano, J. and Guemas, V. How Does the Seasonal Cycle Control Equatorial Atlantic Interannual Variability? *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46(2), pp. 916-922. <https://doi.org/10.1029/2018GL080837>
- Quast, R.; Albergel, C.; Calvet, J.-C.; Wagner, W. A Generic First-Order Radiative Transfer Modelling Approach for the Inversion of Soil and Vegetation Parameters from Scatterometer Observations. *Remote Sens.* 2019, 11(3), 285; <https://doi.org/10.3390/rs11030285>
- Rahaman, H., Srinivasu, U., Panickal, S., Durgadoo, J., Griffies, S., Ravichandran, M., Bozec, A., Cherchi, A., Voldoire, A., Sidorenko, D. ..., Chassignet, E., Danabasoglu, G., Tsujino, H., Getzlaff, K., Ilicak, M., Bentsen, M., Long, M., Fogli, P., Farneti, R., Danilov, S., Marsland, S., Valcke, S., Yeager, S. and Wang, Q. An assessment of the Indian Ocean mean state and seasonal cycle in a suite of interannual CORE-II simulations. *Ocean Modelling*, 2019, Vol. 145, pp. 101503. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2019.101503>
- Raynaud, L., Pechin, I., Arbogast, P., Rottner, L. and Destouches, M. Object-based verification metrics applied to the evaluation and weighting of convective-scale precipitation forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019. <https://doi.org/10.1002/qj.3540>
- Réchou, A., Flores, O., Jumaux, G., Dufloy, V., Bousquet, O., Poupeville, C. and Bonnardot, F. Spatio-temporal variability of rainfall in a high tropical island: Patterns and large-scale drivers in Réunion Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(720), pp. 893-909. <https://doi.org/10.1002/qj.3485>
- Redelsperger, J. L., Bouin, M. N., Pianezze, J., Garnier, V., & Marié, L., 2019 : Impact of a sharp, small-scale SST front on the marine atmospheric boundary layer on the Iroise Sea: Analysis from a hectometric simulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, DOI: 10.1002/qj.3650,145 (725), 3692-3714
- Redon E, Lemonsu A, Masson V (2019) An urban trees parameterization for modelling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0). *Geoscientific Model Development*, <https://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2019-77/>
- Rémy, S., Kipling, Z., Flemming, J., Boucher, O., Nabat, P., Michou, M., Bozzo, A., Ades, M., Huijnen, V., Benedetti, A., Engelen, R., Peuch, V.-H. and Morcrette, J.-J. Description and evaluation of the tropospheric aerosol scheme in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Integrated Forecasting System (IFS-AER, cycle 45R1). *Geoscientific Model Development*, 2019, Vol. 12(11), pp. 4627-4659. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4627-2019>
- Ribes A., S. Thao, R. Vautard, B. Dubuisson, S. Somot, J. Colin, S. Planton, J.-M. Soubeyroux (2018) : Observed increase of extreme daily rainfall in the French Mediterranean, *Climate Dynamics*, 52(1-2), 1095-1114, doi:10.1007/s00382-018-4179-2
- Richon, C., Dutay, J.-C., Bopp, L., Vu, B. L., Orr, J. C., Somot, S. and Dulac, F. Biogeochemical response of the Mediterranean Sea to the transient SRES-A2 climate change scenario. *Biogeosciences*, 2019, Vol. 16(1), pp. 135-165. <https://doi.org/10.5194/bg-16-135-2019>
- Rigal A., J.-M. Azaïs, A. Ribes (2019) : Estimating daily climatological normals in a changing climate, soumis à *Climate Dynamics*, 53(1-2), 275-286, doi:10.1007/s00382-018-4584-6
- Risi C, Galewsky J, Reverdin G and Briert F (2019), "Controls on the water vapor isotopic composition near the surface of tropical oceans and role of boundary layer mixing processes", *Atmospheric Chemistry and Physics*, oct, 2019. Vol. 19(19), pp. 12235-12260
- Rodríguez-Fernández, N.; de Rosnay, P.; Albergel, C.; Richaume, P.; Aires, F.; Prigent, C.; Kerr, Y. SMOS Neural Network Soil Moisture Data Assimilation in a Land Surface Model and Atmospheric Impact. *Remote Sens.* 2019, 11, 1334

- Rogelj, J., Forster, P. M., Kriegler, E., Smith, C. J. and Séférian, R. Estimating and tracking the remaining carbon budget for stringent climate targets. *Nature*, 2019, Vol. 571(7765), pp. 335-342. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1368-z>
- Roode, S. R., Frederikse, T., Siebesma, A. P., Ackerman, A. S., Chylik, J., Field, P. R., Fricke, J., Gryscha, M., Hill, A., Honnert, R., Krueger, S. K., Lac, C., Lesage, A. T. and Tomassini, L. Turbulent Transport in the Gray Zone: A Large Eddy Model Intercomparison Study of the CONSTRAIN Cold Air Outbreak Case. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(3), pp. 597-623. <https://doi.org/10.1029/2018ms001443>
- Rottner, L., Arbogast, P., Destouches, M., Hamidi, Y. and Raynaud, L. The similarity-based method: a new object detection method for deterministic and ensemble weather forecasts. *Advances in Science and Research*, 2019, Vol. 16, pp. 209-213. <https://doi.org/10.5194/asr-16-209-2019>
- Sahlaoui, Z., Mordane, S., Wattrelot, E. and Mahfouf, J.-F. 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*, 2019. <https://doi.org/10.1002/met.1860>
- Saint-Martin, D., Geoffroy, O., Watson, L., Douville, H., Bellon, G., Voltaire, A., Cattiaux, J., Decharme, B. and Ribes, A. Fast-Forward to Perturbed Equilibrium Climate. *Geophysical Research Letters*, 2019, Vol. 46(15), pp. 8969-8975. <https://doi.org/10.1029/2019gl083031>
- Saltikoff, E., Haase, G., Delobbe, L., Gaussiat, N., Martet, M., Idziorek, D., Leijnse, H., Novák, P., Lukach, M. and Stephan, K. OPERA the Radar Project. *Atmosphere*, 2019, Vol. 10(6), pp. 320. <https://doi.org/10.3390/atmos10060320>
- Sassi, M. Z., Fourrié, N., Guidard, V. and Birman, C. Use of Infrared Satellite Observations for the Surface Temperature Retrieval over Land in a NWP Context. *Remote Sensing*, MDPI AG, 2019, Vol. 11(20), pp. 2371. <https://doi.org/10.3390/rs11202371>
- Sauvage C, Brossier CL, Bouin M-N and Ducrocq V (2019), "Characterization of the air-sea exchanges mechanisms during a Mediterranean heavy precipitation event using realistic sea state modelling", *Atmospheric Chemistry and Physics*, sep, 2019
- Séférian, R., Nabat, P., Michou, M., Saint-Martin, D., Voltaire, A., Colin, J., Decharme, B., Delire, C., Berthet, S., Chevallier, M., Sénési, S., Franchistéguy, L., Vial, J., Mallet, M., Joetzjer, E., Geoffroy, O., Guérémy, J.-F., Moine, M.-P., Msadek, R., Ribes, A., Rocher, M., Roehrig, R., y-Mélia, D. S., Sanchez, E., Terray, L., Valcke, S., Waldman, R., Aumont, O., Bopp, L., Deshayes, J., Éthé, C. and Madec, G. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(12), pp. 4182-4227. <https://doi.org/10.1029/2019ms001791>
- Shamambo, D.C.; Bonan, B.; Calvet, J.-C.; Albergel, C.; Hahn, S. Interpretation of ASCAT Radar Scatterometer Observations Over Land: A Case Study Over Southwestern France. *Remote Sens.* 2019, 11(23), 2842; <https://doi.org/10.3390/rs1123284>
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., George, E. and Morin, S. Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts. *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, pp. 8043. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E. and Morin, S. Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13, pp. 1325-1347. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>
- Specq, D., Bellon, G., Peltier, A., Lefèvre, J. and Menkes, C. Influence of Subseasonal Variability on the Diurnal Cycle of Precipitation on a Mountainous Island: The Case of New Caledonia. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, 2019, Vol. 148(1), pp. 333-351. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-19-0177.1>
- Strauss, C., D. Ricard, C. Lac, and A. Verrelle, Evaluation of turbulence parameterizations in convective clouds and their environment based on a large-eddy simulation, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 3195-3217, 2019
- Tall M., C. Albergel, B. Bonan, Y. Zheng, F. Guichard, M. S. Dramé, A.T. Gaye, L. O. Sintondji, F. C. Hountondji, P. M. Nikiema and J.-C. Calvet, 2019: Towards a Long-Term Reanalysis of Land Surface Variables over Western Africa: LDAS-Monde Applied over Burkina Faso from 2001 to 2018. *Remote Sens.*, 11(6), 735. doi: 10.3390/rs11060735
- Taylor J. W., Haslett S. L., Bower K., Flynn M., Crawford I., Dorsey J., Choularton T., Connolly P. J., Hahn V., Voigt C., Sauer D., Dupuy R., Brito J., Schwarzenboeck A., Bourriane T., Denjean C., Rosenberg P., Flamant C., Lee J. D., Vaughan A. R., Hill P. G., Brooks B., Catoire V., Knippertz P. and Coe, H. Aerosol influences on low-level clouds in the West African monsoon. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8503-2019>
- Teich, M., Giunta, A. D., Hagenmuller, P., Bebi, P., Schneebeli, M. and Jenkins, M. J. Effects of bark beetle attacks on forest snowpack and avalanche formation – Implications for protection forest management. *Forest Ecology and Management*, 2019, Vol. 438, pp. 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.052>
- Timmermans, R., Segers, A., Curier, L., Abida, R., Attié, J.-L., Amraoui, L. E., Eskes, H., de Haan, J., Kujanpää, J., Lahoz, W., Nijhuis, A. O., Quesada-Ruiz, S., Ricaud, P., Veeffkind, P. and Schaap, M. Impact of synthetic space-borne NO2 observations from the Sentinel-4 and Sentinel-5P missions on tropospheric NO2 analyses. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(19), pp. 12811-12833. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12811-2019>
- Tokarska K., G. Hegerl, A. Schurer, A. Ribes, J. Fasullo (2019) Quantifying human contributions to past and future ocean warming and thermohaline sea level rise. *Environmental Research Letters*, 14 (7), 074020, doi:10.1088/1748-9326/ab23c1
- Trimmel H, Weihs P, Faroux S, Formayer H, Hamer P, Hasel K, Laimighofer J, Leidingger D, Masson V, Nadeem I, Oswald SM, Revesz M and Schoetter R (2019), "Thermal conditions during heat waves of a mid-European metropolis under consideration of climate change, urban development scenarios and resilience measures for the mid-21st century", *Meteorologische Zeitschrift.*, jan, 2019. Schweizerbart
- Tuzet, F., Dumont, M., Arnaud, L., Voisin, D., Lamare, M., Larue, F., Revuelto, J. and Picard, G. Influence of light-absorbing particles on snow spectral irradiance Profiles. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13, pp. 2169-2187. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2169-2019>
- van Dalum, C. T., van de Berg, W. J., Libois, Q., Picard, G., and van den Broeke, M. R.: A module to convert spectral to narrowband snow albedo for use in climate models: SNOWBAL v1.2, *Geosci. Model Dev.*, 12, 5157–5175, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-5157-2019>, 2019
- Vereecken, H., Weihermüller, L., Assouline, S., Šim nek, J., Verhoef, A., Herbst, M., Archer, N., Mohanty, B., Montzka, C., Vanderborght, J., Balsamo, G., Bechtold, M., Boone, A., Chaddburn, S., Cuntz, M., Decharme, B., Ducharme, A., Ek, M., Garrigues, S., Goergen, K., Ingwersen, J., Kollet, S., Lawrence, D. M., Li, Q., Or, D., Swenson, S., de Vrese, P., Walko, R., Wu, Y. and Xue, Y. Infiltration from the Pedon to Global Grid Scales: An Overview and Outlook for Land Surface Modeling. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society of America, 2019, Vol. 18(1), pp. 0. <https://doi.org/10.2136/vzj2018.10.0191>
- Veysiere, G., Karbou, F., Morin, S., Lafaysse, M. and Vionnet, V. Evaluation of Sub-Kilometric Numerical Simulations of C-Band Radar Backscatter over the French Alps against Sentinel-1 Observations. *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, pp. 8. <https://doi.org/10.3390/rs11010008>
- Villefranche N, Fournier R, Couvreur F, Blanco S, Eymet V, Forest V, Tregan J.M., 2019: A path-tracing Monte Carlo Library for 3-D radiative transfer in highly resolved cloudy atmospheres, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 8, 2449–2473. <https://doi.org/10.1029/2018MS001602>
- Vionnet, V., Six, D., Auger, L., Dumont, M., Lafaysse, M., Quéno, L., Réveillet, M., Dombrowski-Etchevers, I., Thibert, E. and Vincent, C. Sub-kilometer precipitation datasets for snowpack and glacier modeling in alpine terrain. *Frontiers in Earth Science : Cryospheric Sciences*, 2019, Vol. 7, pp. 182. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00182>
- T. Vischel, G. Panthou, P. Peyrillé, R. Roehrig, G. Quantin, T. Lebel, C. Wilcox, F. Beucher, M. Buidarti, Chapter 4- Precipitation Extremes in the West African Sahel: Recent Evolution and Physical Mechanisms, Editor(s): V. Venugopal, Jai Sukhatme, Raghu Murtugudde, Rémy Roca, *Tropical Extremes*, 2019, Pages 95-138, ISBN 9780128092484, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809248-4.00004-2>
- Voltaire, A., Exarchou, E., Sanchez-Gomez, E., Demissie, T., Deppenmeier, A.-L., Frauen, C., Goubanova, K., Hazeleger, W., Keenlyside, N., Koseki, S., Prodhomme, C., Shonk, J., Toniazzo, T. and Traoré, A.-K. Role of wind stress in driving SST biases in the Tropical Atlantic. *Climate Dynamics*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04717-0>
- Voltaire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., Colin, J., Guérémy, J.-F., Michou, M., Moine, M.-P., Nabat, P., Roehrig, R., y Méliá, D. S., Séférian, R., Valcke, S., Beau, I., Belamari, S., Berthet, S., Cassou, C., Cattiaux, J., Deshayes, J., Douville, H., Ethé, C., Franchistéguy, L., Geoffroy, O., Lévy, C., Madec, G., Meurdesoif, Y., Msadek, R., Ribes, A., Sanchez-Gomez, E., Terray, L. and Waldman, R. Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, Vol. 11(7), pp. 2177-2213. <https://doi.org/10.1029/2019MS001683>

Xian, P., Reid, J. S., Hyer, E. J., Sampson, C. R., Rubin, J. I., Ades, M., Asencio, N., Basart, S., Benedetti, A., Bhattacharjee, P. S., Brooks, M. E., Colarco, P. R., da Silva, A. M., Eck, T. F., Guth, J., Jorba, O., Kouznetsov, R., Kipling, Z., Sofiev, M., Garcia-Pando, C. P., Pradhan, Y., Tanaka, T., Wang, J., Westphal, D. L., Yumimoto, K. and Zhang, J. Current state of the global operational aerosol multi-model ensemble: An update from the International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145(S1), pp. 176-209. <https://doi.org/10.1002/qj.3497>

Xu, Y. Estimates of changes in surface wind and temperature extremes in southwestern Norway using dynamical downscaling method under future climate. *Weather and Climate Extremes*, 2019, Vol. 26, pp. 100234. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100234>

Yamaguchi, S., Ishizaka, M., Motoyoshi, H., Nakai, S., Vionnet, V., Aoki, T., Yamashita, K., Hashimoto,

A. and Hachikubo, A. Measurement of specific surface area of fresh solid precipitation particles in heavy snowfall regions of Japan. *The Cryosphere*, 2019, Vol. 13(10), pp. 2713-2732. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2713-2019>

Yiou, P., J. Cattiaux, L. Corre, D. Faranda, N. Kadyrov, A. Jézéquel, S. Mittelberger, P. Naveau, A. Ribes, Y. Robin, S. Thao, G.J. van Oldenborgh, R. Vautard, M. Vrac (2020) Analyses of the European summer heatwave of 2018, *BAMS*, 101 (1), S35–S40

Zhang, W., M. Brandt, J. Penuelas, F. Guichard, X. Tong, F. Tian and R. Fensholt, 2019: Ecosystem structural changes controlled by altered rainfall climatology in tropical savannas. *Nature Communications*, 10, 671. doi:10.1038/s41467-019-08602-6

Zhang S, Meurey C and Calvet J-C (2019), "Identification of soil-cooling rains in southern France from soil temperature and soil moisture

observations", *Atmospheric Chemistry and Physics*, apr, 2019. Vol. 19(7), pp. 5005-5020

Zhao, Y., Saunio, M., Bousquet, P., Lin, X., Berchet, A., Hegglin, M. I., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Hauglustaine, D. A., Szopa, S., Stavert, A. R., Abraham, N. L., Archibald, A. T., Bekki, S., Deushi, M., Jöckel, P., Josse, B., Kinnison, D., Kirner, O., Marécal, V., O'Connor, F. M., Plummer, D. A., Revell, L. E., Rozanov, E., Stenke, A., Strode, S., Tilmes, S., Dlugokencky, E. J. and Zheng, B. Inter-model comparison of global hydroxyl radical (OH) distributions and their impact on atmospheric methane over the 2000-2016 period. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19(21), pp. 13701-13723. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13701-2019>

Zheng Y, Albergel C, Munier S, Bonan B and Calvet J-C (2019), "An Offline Framework for High-dimensional Ensemble Kalman Filters to Reduce the Time-to-solution", *GMDA Bulletin*, jun, 2019

Publications scientifiques 2019 hors DR

Barbary, D, Leroux, M-D, Bousquet, O. The orographic effect of Reunion Island on tropical cyclone track and intensity. *Atmos Sci Lett*. 2019; 20:e882.<https://doi.org/10.1002/asl.882>.

Beaufort, A.; Gibier, F. & Palany, P. (2019), 'Assessment and correction of three satellite rainfall estimate products for improving flood prevention in French Guiana', *International Journal of Remote Sensing* 40(1), 171-196. doi: 10.1080/01431161.2018.1511934

Bonnardot, F, Quetelard, H, Jumaux, G, Leroux, M-D, Bessafi, M. Probabilistic forecasts of tropical cyclone tracks and intensities in the southwest Indian Ocean basin. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 145, 675– 686. <https://doi.org/10.1002/qj.3459>

Centurioni, L. R., J. D. Turton, R. Lumpkin, L. Braasch, G. Brassington, Y. Chao, E. Charpentier, Z. Chen, G. Corlett, K. Dohan, C. Donlon, C. Gallage, V. Hormann, A. Ignatov, B. Ingleby, R. Jensen, B. A Kelly-Gerrey, I. M Koszalka, X. Lin, E. Lindstrom, N. Maximenko, C. J Merchant, P. Minnett, A. G. O'Carroll, T. Paluszkiwicz, P. Poli, P. Poulain, G. Reverdin, X. Sun, V. Swail, S. Thurston, L. Wu, L. Yu, B. Wang, and D. Zhang, 2019: Global in situ Observations of Essential Climate and Ocean Variables at the Air-Sea Interface. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00419.

Colomb, A., T. Kriat, and M. Leroux, 2019: On the Rapid Weakening of Very Intense Tropical Cyclone Hellen (2014). *Mon. Wea. Rev.*, 147, 2717–2737, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0309.1>

Foltz, G. R., P. Brandt, I. Richter, B. Rodriguez-Fonseca, F. Hernandez, M. Dengler, R. R. Rodrigues, J. Oliver Schmidt, L. Yu, N. Lefevre, L. Cotrim Da Cunha, M. James McPhaden, M. Cunha de Araujo Filho, J. Karstensen, J. Hahn, M. Martín-Rey, C. M. Patricola, P. Poli, P. Zuidema, R. Hummels, R. C. Perez, V. Hatje, J. Luebbecke, I. Polo, R. Lumpkin, B. Bourlès, F. E. Asuquo, P. Lehodey, A. Conchon, P. Chang, P. Dandin, C. Schmid, A. J Sutton, H. Giordani, Y. Xue, S. Illig, T. Losada, S. Grodsky, F. Gasparin, T. Lee, E. Mohino, P. Nobre, R. Wanninkhof, N. S. Keenlyside, V. Garçon, E. Sanchez-Gomez, H. C. Nnamchi, M. Drevillon, A. Storto, E. Remy, A. Lazar, S. Speich, M. Pereira

Goes, T. Dorrington, W. E. Johns, J. N. Moum, C. Robinson, C. Perruche, R. Buss de Souza, A. Gaye, J. Lopez-Parages, P.-A. Monerie, P. Castellanos, N. U. Benson, M. N. Hounkonnou, and J. Trotte Duha, 2019: The Tropical Atlantic Observing System. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00206.

Gommenginger, Christine; et al ; 2019 SEASTAR: A mission to study ocean submesoscale dynamics and small-scale atmosphere-ocean processes in coastal, shelf and polar seas. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00457>

Haggerty, J., Defer, E., de Laat, A., Bedka, K., Moisselin, J.-M. Potts, R., Delanoë, J., Parol, F., Grandin, A., 2019, Detecting Clouds Associated with Jet Engine Ice Crystal Icing, <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/BAMS-D-17-0252.1>

Le Bastard, T., Caumont, O., Gaussiat, N., & Karbou, F. (2019). Combined use of volume radar observations and high-resolution numerical weather predictions to estimate precipitation at the ground: Methodology and proof of concept. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(10), 5669-5684.

Le Menn, M., P. Poli, A. David, J. Sagot, M. Lucas, A. O'Carroll, M. Belbeoch, and K. Herklotz, 2019: Development of surface drifting buoys for fiducial reference measurements of sea-surface temperature. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00578.

Leroux, M.-D., M. C. Nguyen-Hankinson, N. E. Davidson, J. Callaghan, K. Tory, A. Wain and X. Huang, 2019 : Environmental interactions during the extreme rain event associated with ex-tropical cyclone Oswald (2013), *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 69, 216–238, <https://doi.org/10.1017/ES19016>

Le Traon, P. Y., Reppucci, A., Alvarez Fanjul, E., Aouf, L., Behrens, A., Belmonte, M., ... & Benkiran, M. (2019). From observation to information and users: the Copernicus Marine Service perspective. *Frontiers in Marine Sciences*, 6, 234, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00234>.

Moltmann, T., H.-M. Zhang, J. D. Turton, G. Nolan, C. C. Gouldman, L. Griesbauer, Z. Willis, A. Muñoz Piniella, E. Charpentier, P. Poli, E. Francis Burger, R. Lumpkin, C. Meinig, K. M. O'Brien, A. J Sutton, D. Zhang, and Y. Zhang, 2019: A Global Ocean Observing System (GOOS), delivered through enhanced collaboration across regions, communities, and new technologies. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00291.

Penny, S. G., Akella, S., Balmaseda, M. A., Browne, P., Carton, J. A., Chevallier, M., ... & Hogan, P. (2019). Observational Needs for improving Ocean and Coupled Reanalysis, S2S Prediction, and Decadal Prediction. *Frontiers in Marine Science*, 6, 391.

Pinardi, N., J. Stander, D. Legler, K. O'Brien, T. Boyer, T. Cuff, H. Garcia, E. Freeman, C. Sun, L. Gates, Z. Gong, A. Iona, Y. Xinyang, P. Bahurel, M. Belbouch, S. Belov, S. Lynne Brunner, E. Francis Burger, T. Carval, D. Chang-Seng, E. Charpentier, G. Coppini, A. S. Fischer, C. Gallage, J. Hermes, E. Heslop, S. Grimes, K. Louise Hill, K. James Horsburgh, S. Mancini, N. Moodie, M. Ouellet, P. Poli, P. Pissierssens, R. Proctor, N. Smith, V. Swail, and J. D. Turton, 2019: The Joint IOC (of UNESCO) and WMO Collaborative Effort for Met-Ocean Services. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00410.

Poli, P., M. Lucas, A. O'Carroll, M. Le Menn, A. David, G. K. Corlett, P. Blouch, D. Meldrum, C. J. Merchant, M. Belbeoch, and K. Herklotz, 2019: The Copernicus Surface Velocity Platform drifter with Barometer and Reference Sensor for Temperature (SVP-BRST): genesis, design, and initial results. *Ocean Science*, 15, 199-214, doi:10.5194/os-15-199-2019.

Rey, T.; Leone, F.; Candela, T.; Belmadani, A.; Palany, P.; Krien, Y.; Cécé, R.; Gherardi, M.; Péroche, M. & Zahibo, N. (2019), 'Coastal processes and influence on damage to urban structures during Hurricane Irma (St-Martin & St-Barthélemy, French West Indies)', *Journal of Marine Science and Engineering* 7(215). doi:10.3390/jmse7070215.

Smith, G. C., Allard, R., Babin, M., Bertino, L., Chevallier, M., Corlett, G. K., ... & Hebert, D. (2019). Polar Ocean Observations: A Critical Gap in the Observing System and Its Effect on Environmental Predictions From Hours to a Season. *Frontiers in Marine Science*, 6, 429.

Smith, S. R., G. Alory, A. Andersson, W. Asher, A. Baker, D. I. Berry, K. Drushka, D. Figurskey, E. Freeman, P. Holthus, T. Jickells, H. Kleta, E. C. Kent, N. Kolodziejczyk, M. Kramp, Z. Loh, P. Poli, U. Schuster, E. Steventon, S. Swart, O. Tarasova, L. Petit De La Villéon, and N. Vinogradova Shiffer, 2019: Ship-Based Contributions to Global Ocean, Weather, and Climate Observing Systems. *Frontiers in Marine Science*, doi:10.3389/fmars.2019.00434.

Stein, J. and F. Stoop, 2019: Neighborhood-Based Contingency Tables Including Errors Compensation. *Mon. Wea. Rev.*, 147, 329-344, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0288.1>

Storto, A., Alvera-Azcárate, A., Balmaseda, M. A., Barth, A., Chevallier, M., Counillon, F., ... & Garric, G. (2019). Ocean reanalyses: Recent advances and unsolved challenges. *Frontiers in Marine Science*, 6, 418.

Taillardat, M., Fougères, A. L., Naveau, P., & Mestre, O. (2019). Forest-based and semiparametric methods for the postprocessing of rainfall ensemble forecasting. *Weather and Forecasting*, 34(3), 617-634.

Étienne Vignon(1), Olivier Traullé(2), and Alexis Berne(1). ·8 April 2019. On the fine vertical structure of the low troposphere over the coastal margins of East Antarctica. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(7):4659-4683 (1) Environmental Remote Sensing Laboratory (LTE), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland (2) DSO/DOA, Météo-France, Toulouse, France Étienne Vignon (etienne.vignon@epfl.ch)

Vincendon B., Edouard S., Ducrocq V. (2019). De l'incertitude dans un système de prévision d'ensemble des crues rapides méditerranéennes. *LHB*, 3-4 (2019) 22-30. DOI : 10.1051/lhb/2019051.

Jouglà, R., Hidalgo, J., Pouponneau, B., 2019 : Identification des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises. *La Météorologie*, 106, 59-68 (<http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/70370>)

Peltier H., Dabin W., Dars C., Demaret F., Doremus G., VanCanneyt O., Laran S., Mendez-Fernandez P., Spitz J., Authier M., Daniel P., Ridoux V., 2019: Can modelling the drift of bycaught dolphin stranded carcasses help identify involved fisheries? An exploratory study, *Global Ecology and Conservation*, November 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00843>

Thèses de doctorat

Ardilouze, C. Impact de l'humidité du sol sur la prévisibilité du climat estival aux moyennes latitudes. Université de Toulouse, 2019

Coopmann, Olivier. Vers une meilleure assimilation des observations satellitaires infrarouges par le couplage des modèles météorologique et chimique. Université de Toulouse, 2019

Darmaraki, S. Canicules océaniques en Méditerranée : détection, variabilité passée et évolution future. Université de Toulouse, 2019

Dion, I.-A. Glace injectée dans la Tropopause Tropicale par Convection Profonde. Université de Toulouse, 2019

Drugé, T. Contribution des aérosols aux scénarios climatiques en Méditerranée pour le 21ème siècle à l'échelle régionale. Université de Toulouse, 2019

Ducongé, L., Etude du cycle de vie du brouillard durant la campagne LANFEX : impact de la dynamique en terrain vallonné et des processus microphysiques, Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2019

Fumière, Q. Impact du changement climatique sur les précipitations du Sud-Est de la France : apport des modèles résolvant la convection profonde. Université de Toulouse, 2019

Goret, M., Etude des interactions entre le climat urbain et le CO₂ : modélisation des flux de CO₂ et application à l'échelle d'une ville, Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2019

Guillet O., Modélisation des corrélations spatiales d'erreurs d'observation en assimilation de données variationnelle. Etude sur des maillages non structurés. INPT, Toulouse, 2019

Joulin, Pierre-Antoine. Modélisation à fine échelle des interactions entre parcs éoliens et météorologie locale. PhD, Océan, atmosphère, climat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2019. <https://oatao.univ-toulouse.fr/25551/>

Le Bastard, Tony. Utilisation des données radar volumiques et d'un modèle de PNT à haute résolution pour une meilleure estimation quantitative des précipitations en plaine et sur les massifs montagneux. INPT, Toulouse, 2019

Lovat, Alexane. Prévision à très courte échéance des crues rapides méditerranéennes. INPT, Toulouse, 2019

Mede, T., Étude numérique du comportement mécanique de la neige: une perspective microstructurale, Université Grenoble Alpes, 2019

Peinke I., Étude à micro-échelle du test de pénétration dans la neige. Université de Toulouse, 2019

Ponzano, Matteo. Prévisibilité des épisodes méditerranéens de pluies intenses à l'aide d'un jeu de données de 30 ans de prévisions rétrospectives. Université de Toulouse, 2019

Sauvage, César. Prévision couplée océan-atmosphère des épisodes méditerranéens : Impact d'une meilleure prise en compte des débits des fleuves et de l'état de mer. Université de Toulouse, 2019.

Vasconcelos, A. Mécanismes contrôlant les anomalies de température de surface de la mer et précipitation au cours des deux années contrastées 2010 et 2012 dans l'océan atlantique tropical. Université de Toulouse, 2019

Veyssièrre, G. Apport des mesures du radar à synthèse d'ouverture de Sentinel-1 pour l'étude des propriétés du manteau neigeux, Institut Polytechnique de Toulouse, 2019

Villefranque, N., Les effets radiatifs des nuages de couche limite : de leur simulation explicite à leur paramétrisation, Ph.D. thesis, Université de Toulouse, 2019

Habilitation à diriger des recherches soutenue en 2019

Séférian, Roland. Cycle du carbone global - Variabilité, Rétroactions et Couplages aux interfaces.

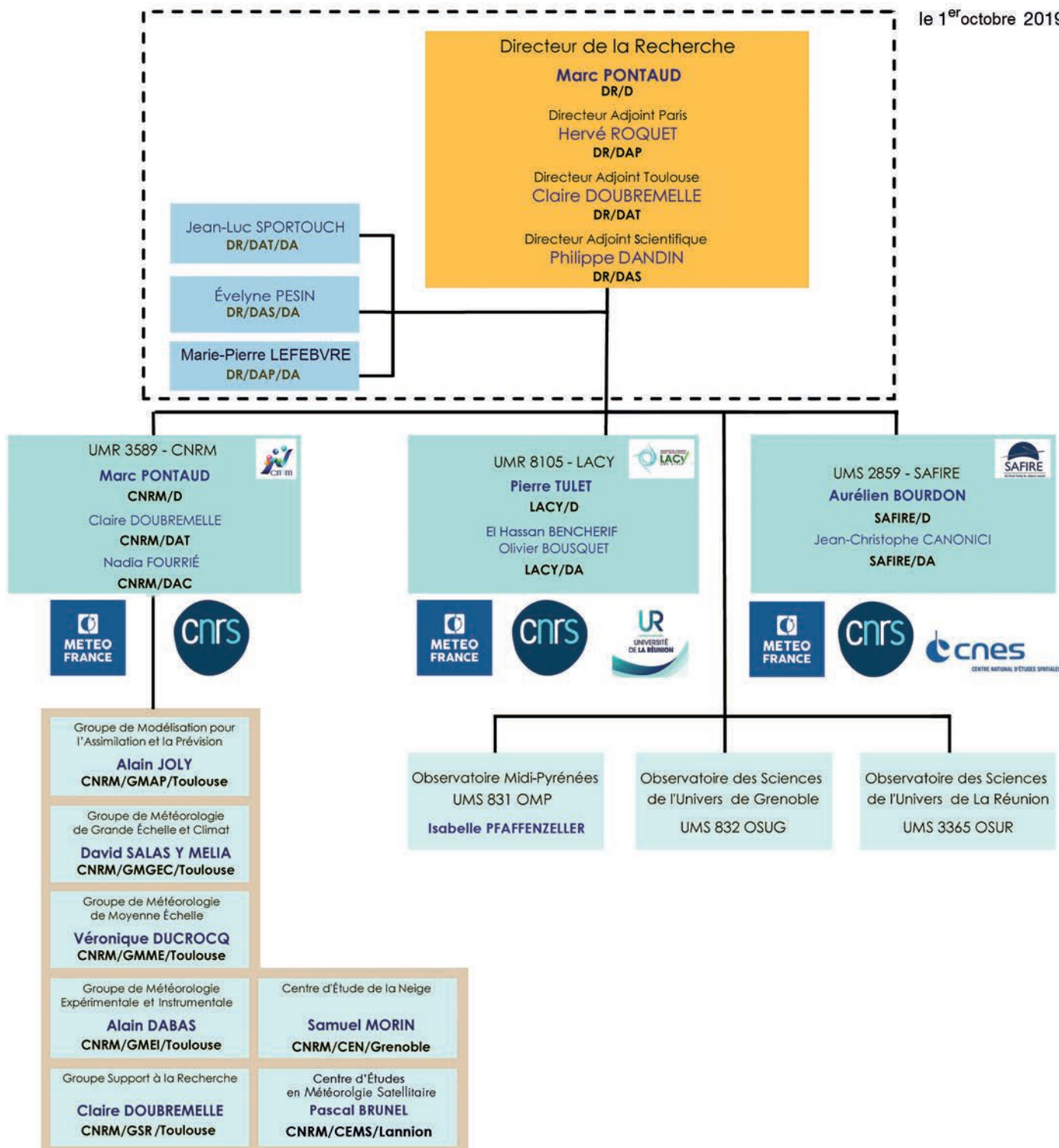
Glossaire

ACTRIS-FR	Infrastructure de recherche distribuée, en support des recherches sur le climat et la qualité de l'air.	DGSCGC	Direction générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise
ADAMONT	Méthode de descente d'échelle sur les zones de montagne	DINEOF	Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions
ADBL	AdaBoost for Atmospheric Boundary Layer	DIRAG	Direction Inter-Régionale Antilles Guyane
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	DSM	Direction des Services Météorologiques
ADM	Atmospheric Dynamics Mission	ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
ADM-Aeolus	Atmospheric Dynamics Mission - Éole	EDR	Eddy Dissipation Rate
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología (Espagne)	ENM	Ecole Nationale de la Météorologie
AEOLUS	Atmospheric Explorer Observations with a Lidar UV System	ENSO	El Nino Southern Oscillation
AERIS	Données et services pour l'atmosphère	EOF	Fonction Orthogonale Empirique
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational	ERA	European Re-Analysis
ALLENVI	ALLiance nationale de recherche pour l'ENVironnement	ESA	European Space Agency
ALPHA	Algorithmes et modèLes pour la Production Homogène globale	EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer	EXPLORER	Projections climatiques et impacts sur l'agriculture
ANR	Agence Nationale de la Recherche	FEDER	Fonds Européen de Développement Régional
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle	FORUM	Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring
AROME-OM	AROME – Outre Mer	GCM	Modèle de circulation Générale
AROME-PI	Configuration AROME Prévision Immédiate	GELATO	Global Experimental Leads and ice for Atmosphere and Ocean
ARPAE-SIMC	Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia - Servizio Idro Meteo Clima	GET	laboratoire de Géosciences Environnement Toulouse
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle	GHER	GeoHydrodynamic and Environmental Research
ASCAT	Advanced SCATterometer	GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	GIRAFE	capteur Gravimétrique Interférométrique de Recherche à Atomes Froids Embarqué
BSRN	Baseline Surface Radiation Network	GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision
C3S	Copernicus Climate Change Service	GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization	GOES	Satellites météorologiques géostationnaires américains
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations	GOES 16/17	Satellites météorologiques géostationnaires américains
CAT	Clear Air Turbulence, Turbulence en Air Clair	GTG	Graphical Turbulence Guidance
CCMI	Chemistry-Climate Model Initiative	HAMSTRAD	H2O Antarctica Microwave Stratospheric and Tropospheric Radiometer
Cedre	Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux	HCERES	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur
CEMS	Centre d'Etude en Météorologie Satellitaire	HCL	Hauteur de Couche Limite
CEN	Centre d'Etudes de la Neige	HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
CEPMET	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	HOMONIM	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins
CFOSAT	Chinoise-French SATellite	HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
CLIMERI-France	Infrastructure nationale de modélisation du système climatique de la Terre	HyMeX	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment
CMCC	Centre euro-Méditerranéen sur le Changement Climatique (Italie)	IAGOS	In-service Aircraft for Global Observing System
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project	IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge
CMIP6	6 ^e phase du Coupled Model Intercomparison Project	IFPEN	Institut Français du Pétrole Energies Nouvelles
CMRS	Centre Météorologique Régional Spécialisé	Ifremer	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
CNES	Centre National d'Études Spatiales	IFS	Integrated Forecasting System
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques	INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
CNRM-CM6	Version 6 du Modèle de Climat du CNRM	INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
CNRM-ES	Modèle Système Terre incluant le cycle du carbone	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques	IR	Infra Rouge
CO	Monoxyde de Carbone	ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
COMEPHORE	Fusion des données radar et des pluviomètres disponibles	IWV	Quantité de vapeur d'eau intégrée
COMSI	COMité Scientifique	KABL	(K-means for Atmospheric Boundary Layer
COPAL	COmmunity heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences	KALIDEOS-Alpes	Dispositif du CNES visant à promouvoir et à démontrer l'usage de la donnée spatiale
COPERNICUS	European Earth observation system http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/	LACY	Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones – UMR 8105
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment	LANFEX	Local and Nonlocal Fog Experiment
CREWS	Climate Risk and Early Warning Systems	LAURE	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.	LBLRTM	modèle de transfert radiatif raie-par-raie
CTrip	CNRM-Total Routing Integrated Pathway	LEFE	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
DCSC	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques	LIDAR	light detection and ranging
DEAL	Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement	LIMA	Liquid Ice Multiple Aerosols
DESR	Direction de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche	LISA	Lidar SATellite
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques	LMI	Lifetime Maximum Intensity
		LWP	Eau liquide intégrée

MEDSCOPE	Mediterranean Services Chain based On climate Predictions	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 21 st century compared to preindustrial climate
Megha-Tropiques	Satellite franco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale	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
MERCATOR-OCEAN	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle	ROC	Relative Operating Characteristic curve
MERIT-DEM	Multi-Error-Removed Improved-Terrain	RTTOV	Radiative Transfer for TOVS
MESO-NH	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatistique	S2S	Sub-seasonal to Seasonal
METAR	MEteorological Aerodrome Report	SAF NWC	Satellite Application Facility on support to Nowcasting
METOP	MEteorological Operational Polar satellites	SAF OSI	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice
METOP – SG	MEteorological Operational Polar satellites – Seconde Génération	SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
MFWAM	Météo-France WAve Model	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige
MISTRALS	Mediterranean Integrated STudies at Regional And Local Scales	SAR	Synthetic Aperture Radar
MJO	Madden-Julian Oscillation	SDI	Sahara Dust Index
MOCAGE	MODélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)	SESAR	Single European Sky ATM Research
MODCOU	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.	SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)	Shom	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
MoMa	Méthodes Mathématiques pour le couplage modèles et données dans les systèmes non-linéaires stochastiques à grand nombre de degrés de liberté	SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer
MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbure	SOOI	Sud-Ouest Océan Indien
MSG	Météosat Seconde Génération	SROCC	Rapport Spécial sur l'Océan et la Cryosphère dans un Climat Changeant
MTES	Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire	SURFEX	code de SURFace EXternalisé
MTG	Météosat Troisième Génération	SWI	Soil Wetness Index
MW	Micro Ondes	SWIM	Surface Wave Investigation and Monitoring
NCAR	National Center for Atmospheric Research	TAF	Terminal Aerodrome Forecast
NEMO	Nucleus for European Modelling of Ocean	TEB	Town Energy Balance
NH₃	formule de l'ammoniac	TEMSI	TEMps Significatif
NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration	THEIA	Pôle de données et de services surfaces continentales
NWCSAF	Satellite Application Facility for Nowcasting	TRIP	Total Runoff Integrating Pathways
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale	TRL	Technology Readiness Level
OMM	Organisation Météorologique Mondiale	TSM	Températures de Surface de la Mer
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales	UERRA	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
OPG	Orages Points de Grille	UK	United Kingdom
OSTIA	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis	UMR	Unité Mixte de Recherche
PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège	UTC	Temps Universel Coordonné
PI	Prévision Immédiate	UTLS	Haute Troposphère Basse Stratosphère
PIAF	Prévision Immédiate Agrégée Fusionnée	VIIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite
PICS	Prévision Immédiate intégrée des Impacts des Crues Soudaines	WIRE	Winter Risks for Energy
PNT	Prévision Numérique du Temps	YOPP	Year Of Polar Prediction
PRIMEQUAL	PRogramme de Recherche Interorganisme pour une MEilleure QUALité de l'air		
PROSNOW	Provision of a prediction for Snow management		
RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu		
RCM	Modèle de Climat Régional		
RCP	Representative Concentration Pathway		

Organigramme de la Direction de la Recherche (DR)

le 1^{er} octobre 2019



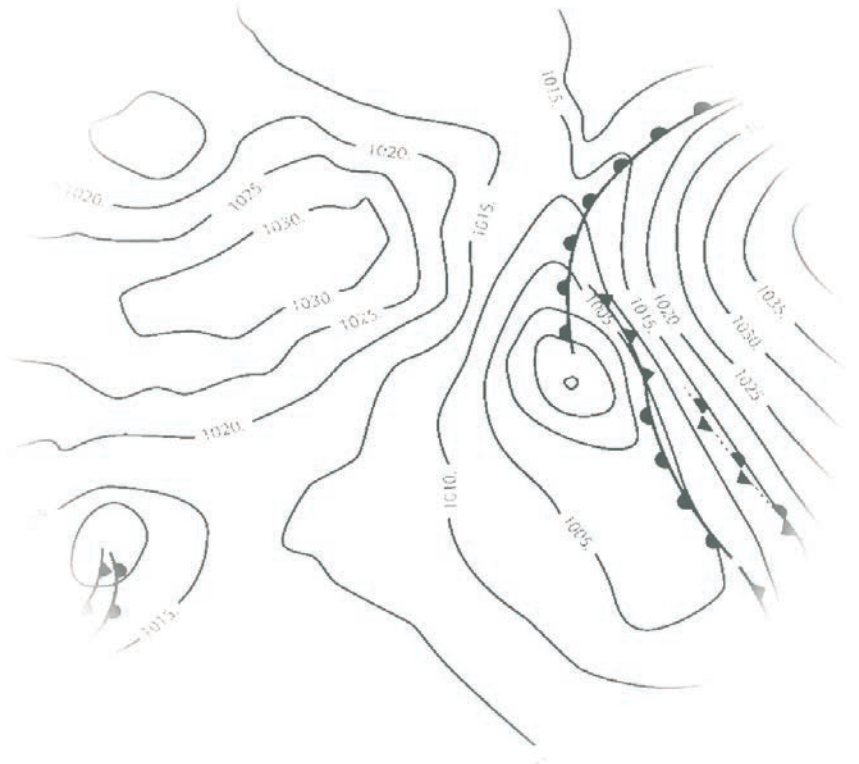
UMR : Unité Mixte de Recherche
UMS : Unité Mixte de Service

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 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.urm-cnrm.fr>
Courriel : contact@cnrm.meteo.fr



Création DIRCOM

Météo-France est certifié ISO 9001
par AFNOR Certification
© Météo-France 2020
Copyright décembre 2020
ISSN : 2116-438X