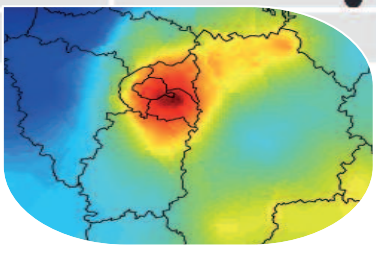
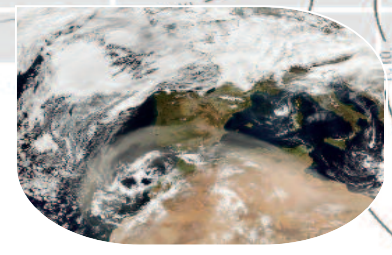
METEO FRANCE





Rapport **Recherche**

2017

Rapport
Recherche 2017

Sommaire

Prévision numérique du temps ● page 6

Étude et modélisation des processus ● page 16

Composition atmosphérique : aérosols, microphysique et chimie ● page 24

Climat ● page 29
Étude du climat
Évolution climatique
Prévision saisonnière

Cryosphère et Hydrologie ● page 38

Océanographie ● page 44

Campagnes, techniques et produits d'observation ● page 49
Campagnes
Techniques et produits d'observation

Recherche et aéronautique ● page 56

Annexes ● page 62

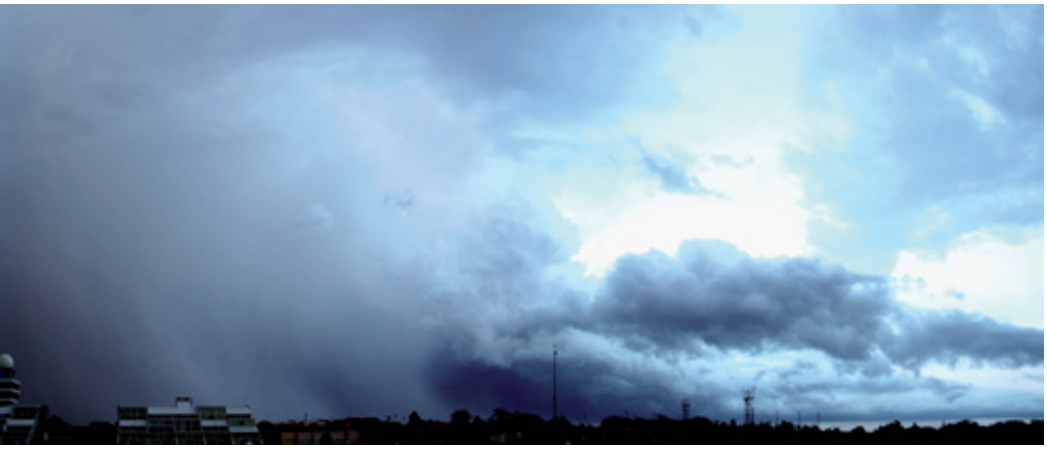
Le nouveau Contrat d'Objectif et de Performance (COP) de Météo-France pour la période 2017-2021 est lancé. La recherche y occupe une place privilégiée tant elle vient en support à l'ensemble des métiers de l'Établissement. Elle est la source des innovations mises en œuvre ultérieurement en matière d'observation, 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.

Mais un autre élément amène à réfléchir encore à notre stratégie scientifique. A la fin de l'année 2017, le Gouvernement a lancé son programme « Action Publique 2022 » qui vise à la transformation des services publics pour en améliorer la qualité, en moderniser l'environnement de travail et accompagner la baisse des dépenses publiques. Inclus dans cette réflexion, Météo-France construit un nouveau projet pour l'Établissement, en intégrant la diminution demandée des effectifs sur la période, mais en maintenant ses ambitions, celles figurant dans le COP et en particulier celles en lien avec la recherche.

Au niveau international, il s'agira d'amplifier notre politique de coopération privilégiée avec le CEPMMT autour du modèle global ARPEGE/IFS et de 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 poursuivra sa politique de participation active aux programmes d'EUMETSAT et de l'ESA. On pense en particulier à la mise en opération prochaine d'ADM-Aeolus mais aussi à la préparation des futurs satellites MTG et EPS-SG qui embarqueront de nouveaux instruments à fort potentiel. Météo-France poursuivra également sa forte participation aux projets européens dont Copernicus.

Au niveau national, Météo-France confirme 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 sa participation à AllEnvi. L'Établissement est partie prenante des Pôles de Données AERIS et THEIA, du Pôle Système Terre, de Kalideos-Alpes sous l'égide du CNES, et participe à la construction de l'IR ACTRIS-FR et de CLIMERI-France. En particulier, le pôle de données AERIS est une opportunité et un vecteur pour faciliter l'accès aux données opérationnelles de l'Établissement au monde de la recherche. Et plus localement, Météo-France réaffirme son soutien au monde académique toulousain, dans un contexte difficile suite à l'échec de l'Idex.

Au niveau de ses priorités internes, Météo-France accentuera son orientation de long terme « sans couture » de ses différents systèmes numériques avec pour cible un unique système 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 dans le cas du climat, le cycle du carbone. L'ensemble des principaux travaux conduits dans les deux UMR CNRM et LACy, ainsi que dans les directions thématiques de



© Camille Luxen

l'Établissement est détaillé dans le présent document. On peut néanmoins mentionner les axes majeurs que sont la prévision des évènements fortement précipitants, phénomènes à fort impact pour nos côtes méditerranéennes, la prévision des cyclones qui ont frappé douloureusement, voire tragiquement, nos territoires d'outre-mer, ou du brouillard, phénomène à enjeux pour l'aviation civile et qui fait l'objet d'un point particulier dans le nouveau COP. A l'autre bout du spectre, sous la houlette du GIEC, le CNRM a démarré les simulations de l'exercice CMIP-6 avec une nouvelle version du système climatique CNRM-CM6 et un Système Terre incluant le cycle du carbone CNRM-ES. Il s'agit aussi de mieux prendre en compte les perspectives offertes par l'intelligence artificielle, afin de mieux valoriser les prévisions d'ensemble, les nombreuses observations et de faire le lien avec les impacts. Dans ce contexte en forte évolution, la problématique du transfert vers les directions opérationnelles redevient un enjeu qui sera au centre de notre réflexion.

En lien avec les cœurs dynamiques et la perspective de l'exascale, Météo-France participe au projet de Flagship « Extrem Earth », en étant le représentant de tous les pays européens pour la modélisation numérique du temps. La cible est l'élaboration d'un modèle global océan-atmosphère à l'échelle convective en vue des calculateurs de capacité exascale. Si ce Flagship devait aboutir, il sera un défi majeur et structurant pour toute la communauté météo-climatique européenne. 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, qu'aujourd'hui 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 est donc un enjeu majeur, pour convertir continuellement les travaux de recherche, en amélioration 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, en 2017, clarifier l'organisation de sa recherche, en créant une Direction de la Recherche au 1er janvier 2018. Il s'agissait d'affirmer l'existence une direction spécifique en lien avec les acteurs de la recherche et de reconnaitre formellement dans nos Documents d'Organisation internes, les diverses Unités Mixtes dont Météo-France partage la tutelle et qui matérialisent nos plus forts partenariats. Ces entités sont l'UMR CNRM, l'UMR LACy et l'UMS SAFIRE mais également les UMS de trois Observatoires des Sciences de l'Univers : l'UMS de l'OMP à Toulouse, de l'OSUG à Grenoble et, depuis le 1er janvier 2018, de l'OSU-R à La Réunion.

Cet éditorial ne peut, ni couvrir, ni résumer, l'ensemble des sujets traités dans ce Rapport Recherche 2017. Les articles détaillés qui suivent, sont passionnants et illustrent parfaitement le large spectre de nos activités recherche, toutes essentielles à l'Établissement et à son devenir.

Bonne lecture.

Marc Pontaud
Directeur de la Recherche de Météo-France

Prévision numérique du temps

Le résultat le plus remarquable dans le domaine de la prévision numérique du temps est d'avoir étendu l'utilisation du modèle de surface SURFEX à toutes les chaînes opérationnelles. SURFEX matérialise les investissements de long terme de la recherche de Météo-France sur les processus turbulents et les interactions surface-atmosphère. Il s'agit d'un modèle de type mosaïque, qui propose aujourd'hui de nombreux types de surfaces et de couches avec la possibilité de représenter leurs interactions. SURFEX est le modèle de surface d'AROME depuis le début de ce système de prévision de l'échelle convective, il a aussi été la composante de surface de CNRM-CM, le modèle couplé de climat de Météo-France, par exemple dans l'inter-comparaison CMIP5 et donc la contribution au cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Il a aussi été introduit dans les versions d'ALADIN outre-mer, récemment remplacées par des configurations d'AROME spécifiques. En bref, disposer de SURFEX dans les systèmes de prévisions mondiales à courte échéance basés sur ARPEGE est un objectif de longue date : son ensemble d'assimilation, sa prévision d'ensemble, son assimilation de données 4DVar et la configuration à haute résolution. Par « de longue date », on veut dire que certains plans sont vieux de près de 15 ans, ce qui est une manière de dire que ce changement est connu depuis longtemps pour être un défi technique immense. Il y a toujours eu des choses plus urgentes à faire, plus critiques. Le nœud de la difficulté était de permettre une mise à jour des paramètres de surface régulière et efficace au fil du cycle d'assimilation mondial. La chaîne ARPEGE a été l'un des premiers systèmes de prévisions mondiales à bénéficier d'une telle capacité, où on réalise une analyse de la température et de l'humidité sous abri par interpolation optimale, dont on déduit des corrections des températures du sol et des contenus en eau. Grâce à un effort spécifique à la hauteur de cet enjeu, les nombreux problèmes techniques liés au couplage dans les deux sens avec SURFEX avec cette composante du 4DVar ainsi que dans l'assimilation d'ensemble ont été résolus. Tout n'est pas encore parfait, mais ce résultat ouvre une ère nouvelle, compte tenu des nombreuses possibilités offertes par SURFEX : il s'agit d'un véritable investissement qui donnera des bénéfices au long des années à venir. Il s'agit, par exemple, d'un pas significatif en direction de systèmes d'assimilation et de modélisation « sans coutures », puisque désormais, SURFEX est d'une utilisation universelle, de l'échelle convective aux projections climatiques. De nombreux collègues ont contribué à ce résultat, non seulement les scientifiques du Groupe de recherches sur la méso-échelle qui ont développé le concept initial mais aussi nos collègues des services opérationnels de Météo-France ainsi que du Groupe de recherches en prévision numérique lui-même. Toutefois, la difficile étape franchie cette année ne peut qu'être dédiée à notre collègue et amie Françoise Taillefer, disparue accidentellement le matin du 7 avril 2017, venant à peine de terminer le plus gros de ce travail.

Les pages qui suivent évoquent d'autres aspects des recherches en cours qui, en définitive, visent à améliorer les prévisions numériques fournies par Météo-France, à la fois de façon directe auprès de nos concitoyens à travers sa politique de données publiques et de façon indirecte à travers ses prévisionnistes experts. Il convient de rappeler ici, une fois de plus, que le code informatique à l'arrière-plan de ces outils numériques est développé dans le cadre d'une étroite, forte, coopération avec le CEPMMT ainsi qu'avec plus de 25 services hydrométéorologiques nationaux d'Europe et d'Afrique du Nord, ce qui est une situation unique. Ce code bénéficie ainsi de l'ajout d'innovations scientifiques au fil du temps mais, en même temps, il est adapté en permanence pour tirer le meilleur parti des architectures de calcul intensif actuelles ou celles d'un proche futur. Cette activité requiert en soi, elle aussi, une implication profonde, durable, d'une grande partie du groupe de recherches en prévision numérique. Les pages qui suivent ne mentionnent pas tous les thèmes qui ont progressé. En même temps que l'insertion du modèle de surface SURFEX, beaucoup d'autres évolutions sont devenues opérationnelles en décembre 2017 : une nouvelle augmentation du nombre et de la diversité des observations assimilées à la fois par AROME et par ARPEGE, de meilleures conditions initiales pour plusieurs des configurations AROME, un accroissement considérable des sorties semi-élaborées destinées aux prévisionnistes et aux utilisateurs de services, une première étape dans le couplage océan atmosphère à courte échéance, etc. L'un des faits marquants les plus significatifs de l'utilité et de la qualité des chaînes opérationnelles qui résultent de tout ce travail est, peut-être, la séquence de prévisions de cyclones tropicaux par les configurations d'AROME pour l'outre-mer, en particulier les prévisions des cyclones qui ont touché plusieurs des îles antillaises au cours des premiers jours de septembre 2017, nommés Irma et Maria. Ces prévisions figuraient, par exemple, des rafales de vent prévues de dépasser 200 km/h, le modèle confronté à de telles amplitudes restant stable et cohérent, fournissant de nombreuses autres variables extrêmes au sein de ces structures. Beaucoup ont été en effet observées, qui plus est le long de la bonne trajectoire et à peu près au bon moment.

1

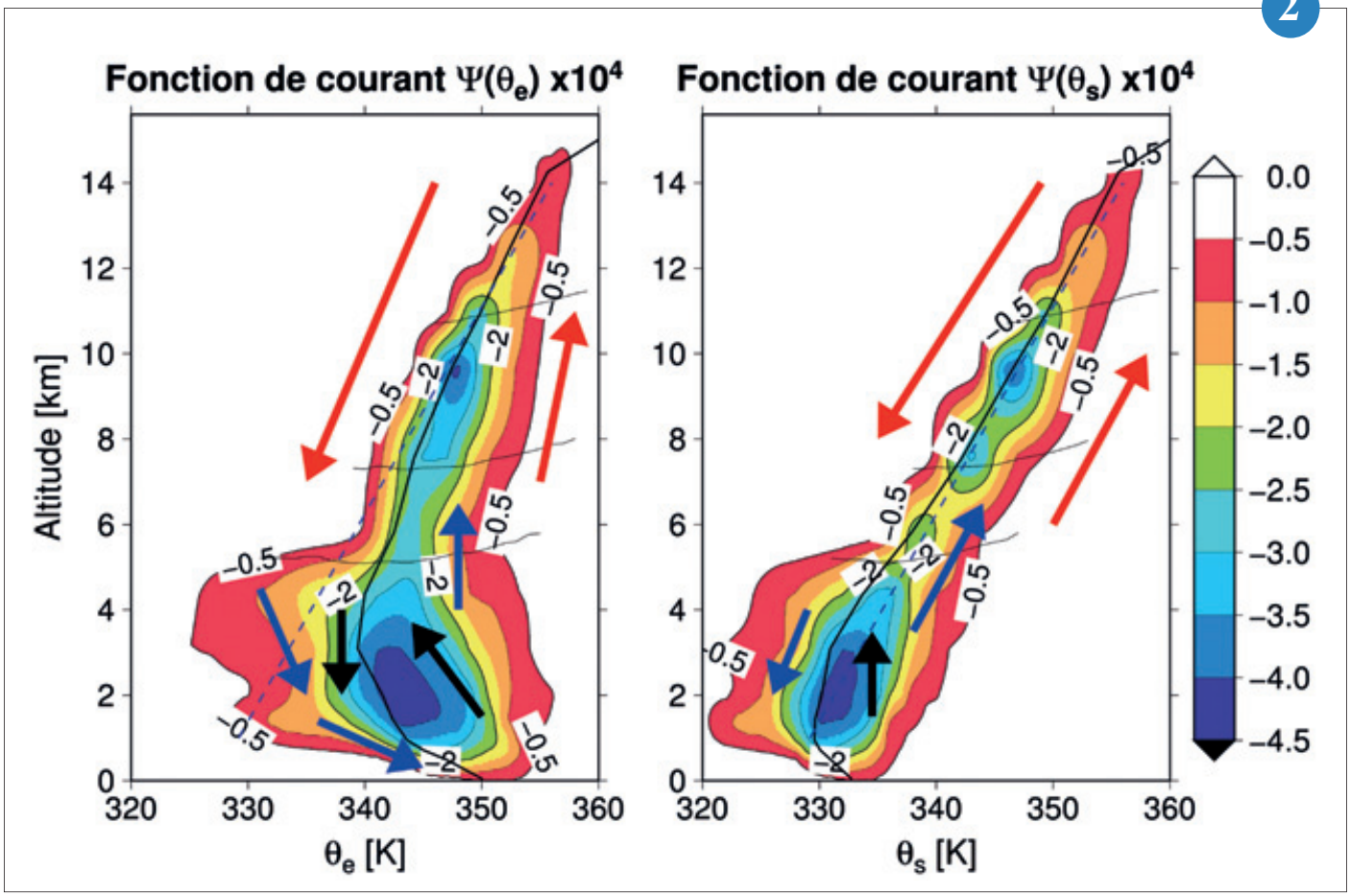
Représentation des processus isentropes pour l'air humide

On considère en météorologie que l'entropie de l'air humide peut être représentée par la quantité notée θ_e et qui est appelée température potentielle équivalente. Une étude récente publiée dans le Journal of Atmospheric Science (octobre 2017, pages 3451-3471) invalide cette hypothèse, en montrant des comparaisons entre les propriétés de θ_e et celles de la température potentielle notée θ_s, qui est basée sur la formulation de l'entropie de l'air humide et qui vérifie le troisième principe de la thermodynamique.

Les deux figures représentent les fonctions de courant isentropes calculées avec θ_e à gauche et θ_s à droite. Ces figures ont été tracées à partir d'une prévision faite avec le modèle ALADIN du cyclone Dumilé situé en janvier 2013 au large de la Réunion. Ces fonctions de courant permettent de décrire l'impact des processus humides mis en œuvre au sein de ces machines thermiques que constituent les cyclones.

On voit que les ascendances (flèches noires vers le haut) correspondent à une diminution de θ_e entre 1 et 4 km, alors que θ_s est constante ou augmente avec l'altitude. Ces deux propriétés sont incompatibles, car l'en-

Françoise Taillefer, scientifique engagée dans sa spécialité, la prévision numérique opérationnelle du temps, de 1991 à 2017.



Les fonctions de courant isentropes Ψ calculées avec θ_e (à gauche) ou θ_s (à droite).
Les flèches indiquent les circulations moyennes simulées par le modèle ALADIN pour le cyclone Dumilé.
Les lignes continues quasi-horizontales représentent les altitudes moyennes de givrage (vers 5 km) ainsi que les iso -12 C (vers 8 km) et -38 C (vers 11 km).
Unités en 10^4 kg/m^2/s.

tropie est une fonction d'état et ses variations entre deux points donnés de l'atmosphère ne peuvent pas correspondre à la fois à une augmentation et à une diminution, selon les formulations choisies pour la représenter.
Ainsi, il faut faire confiance à θ_s pour représenter l'entropie de l'air humide, car elle seule est en accord avec le troisième principe de la thermodynamique qui a été découvert par Nernst puis précisé par Einstein et Planck au début du vingtième siècle. L'étude montre d'autres aspects pour lesquels le troisième principe semble devoir s'appliquer : le calcul du travail ou du rendement des cycles de Carnot, etc...

Les opérateurs de dérivées locaux permettant une utilisation de la grille A réduite sur la sphère

Cette recherche vise à remplacer la technique spectrale utilisée dans les modèles de PNT à Météo-France, peu adaptée aux futures machines de calcul d'architecture massivement parallèles, en raison des communications de données entre processeurs qu'elle requiert à chaque pas de temps.
La méthode examinée ici envisage de conserver l'actuelle grille latitude-longitude réduite (de résolution spatiale quasi-uniforme, voir Figure a) en exploitant son aspect semi-structuré pour construire des opérateurs spatiaux (dérivées et interpolations) à la fois locaux (nécessitant peu de communications) et d'ordre de précision élevé.
Moyennant un soin particulier près des pôles de la grille, nous avons montré qu'il est possible de définir des opérateurs spatiaux permettant d'assurer une précision aussi élevée aux pôles qu'ailleurs sur la sphère. Il faut donc démontrer maintenant que ces opérateurs assurent une stabilité suffisante dans toute la plage des régimes hydrodynamiques présents dans les conditions atmosphériques réelles. Ce travail est en cours actuellement, en examinant le comportement des prévisions sur des cas bidimensionnels idéalisés présentant des régimes sévères tout d'abord hors des pôles (voir Figure b), puis aux pôles eux-mêmes (travaux en cours).
Resteront alors à examiner des écoulements tridimensionnels avec des conditions sévères aux pôles de la grille de calcul, et vérifier la compatibilité de ces algorithmes avec les nouvelles discrétisations temporelles envisagées par ailleurs.

3

Apport du couplage Océan-Vagues-Atmosphère à haute résolution pour la prévision des cyclones tropicaux

Les échanges Océan-Vagues-Atmosphère (OVA) ne sont pas bien représentés dans les systèmes actuels de prévision numérique du temps, ce qui peut par exemple, engendrer de grandes incertitudes dans les prévisions de la trajectoire et de l'intensité des cyclones tropicaux. Afin de mieux comprendre l'influence des interactions OVA sur la modélisation des cyclones tropicaux, un système entièrement couplé basé sur le modèle atmosphérique Méso-NH/SurfEx, le modèle de vagues WaveWatch3 et le modèle océanique CROCO (et alternativement NEMO-Indien) a été développé et appliqué au cas du cyclone tropical Bejisa, qui est passé à proximité de La Réunion en janvier 2014.
La simulation entièrement couplée montre une bonne concordance avec la littérature et les observations disponibles. Deux figures présentent une illustration de plusieurs paramètres représentatifs des 3 composantes simulées par le système couplé. Une résolution horizontale de 2 km est utilisée pour chaque modèle. La figure « a » (couleurs) présente le module de la vitesse du vent à 10 m sur laquelle on retrouve les caractéristiques bien connues d'un cyclone à savoir l'œil, le mur de l'œil et les bandes externes. La hauteur significative des vagues (figure « a » : contour) atteint plus de 8 m à l'avant du cyclone, au niveau du mur de l'œil, là où l'effet du déplacement du cyclone se cumule avec l'augmentation du fetch des vagues. La figure « b » présente quant à elle la réponse de la surface de l'océan au passage du cyclone. Un refroidissement d'environ 2°C est attribué à un mélange vertical intense produit essentiellement par les courants (figure « b » : vecteurs) qui sont maximums au niveau des quadrants gauche du cyclone, là où les vents le sont aussi.
Des expériences de sensibilité, utilisées pour mettre en évidence l'impact du couplage avec un modèle de vagues, montrent un effet limité sur la trajectoire, l'évolution de l'intensité et les flux de surface turbulents du cyclone tropical. Par ailleurs, il est montré que l'utilisation d'un système entièrement couplé OVA est essentielle pour obtenir des émissions cohérentes de sels marins et pour reproduire ainsi correctement leur impact sur les flux turbulents de chaleur et de quantité de mouvement.

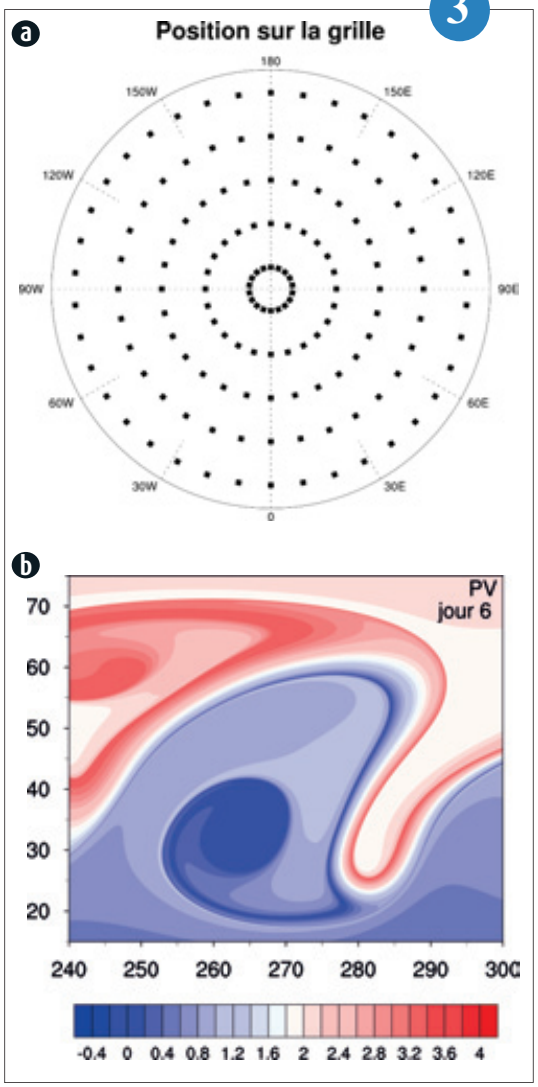
4

Utilisation des observations de radars à nuages pour la Prévision Numérique du Temps (PNT)

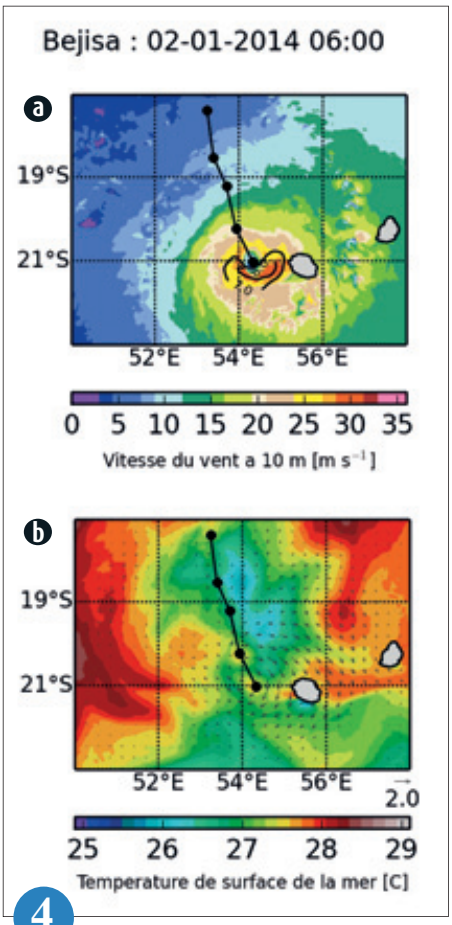
De par leur forte sensibilité aux hydrométéores non ou faiblement précipitants, les radars « nuages » opérant en bande W sont très complémentaires des instruments actifs couramment utilisés en météorologie (lidars et radars de précipitation au sol). Pourtant, les données issues de ces radars ne sont toujours pas utilisées pour l'initialisation de modèles régionaux de type AROME. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un opérateur d'observation, capable de convertir les champs physiques prévus par AROME en réflectivité radar.
Un opérateur d'observation a donc été conçu en cohérence avec AROME, et est adaptable pour des radars à visée verticale au sol ou aéroportés. Afin de dissocier les erreurs de positionnement des nuages prévus par AROME de celles présentes dans l'opérateur d'observation, une nouvelle méthode de validation, appelée « la méthode de la colonne la plus ressemblante » (CPR), a été conçue. Elle permet de comparer chaque profil vertical de réflectivité observé avec le profil simulé qui lui est le plus semblable dans un voisinage donné.
L'opérateur d'observation a ainsi été validé en utilisant les profils collectés par le radar aéroporté RASTA dans des conditions variées durant la première période d'observation de HyMeX. Enfin, la méthode de la CPR a été utilisée afin de restituer les « formes équivalentes optimales » des hydrométéores glacés, ce qui a mis en évidence que l'utilisation de forme sphéroïdale, plutôt que sphérique, pour la neige et le graupel, permet d'ajuster le biais observé entre les simulations et les observations.
Cet opérateur va servir à assimiler les données RASTA dans AROME. Il pourra aussi être utilisé pour la validation de modèles régionaux, par exemple pour étudier le bénéfice apporté par le nouveau schéma microphysique LIMA.

5

3



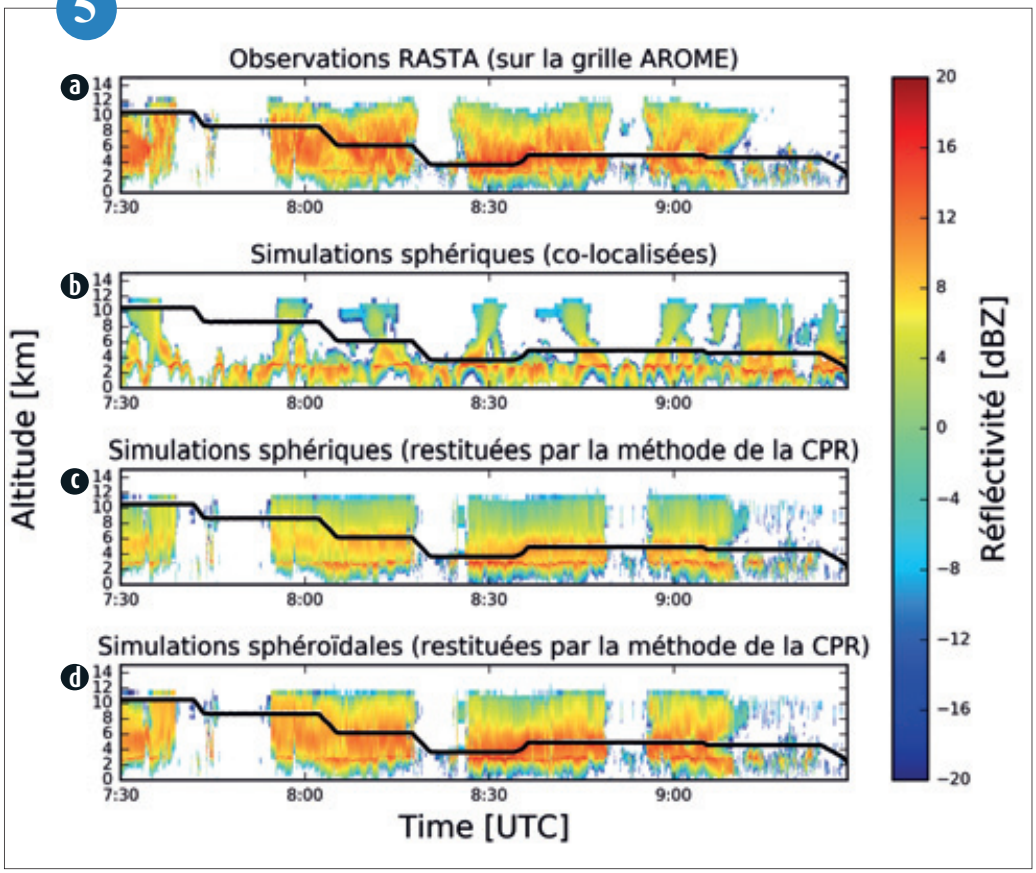
a : Configuration de la grille réduite près d'un pôle. Le nombre de points de grille sur le premier cercle de latitude est de 18 et augmente progressivement en s'éloignant du pôle.
b : Zoom du champ de tourbillon potentiel sur une partie du domaine (abscisse : longitude, ordonnée : latitude, en degrés) pour une prévision d'écoulement idéalisé sévère d'instabilité barotrope, après 6 jours de simulation. La structure du champ est exactement conforme à celle donnée en référence dans la littérature.



4

Configuration de la grille réduite près d'un Champs instantanés issus de la simulation couplée OVA durant l'approche du cyclone tropical Bejisa de La Réunion.
a : en couleurs, le module du vent à 10m simulé par Méso-NH, et en contour, la hauteur significative des vagues simulée par WW3.
b : en couleurs, la température de surface de la mer, et en vecteurs, les courants de surface simulées par CROCO.

5



Profils de réflectivité observés le 10 octobre 2012 par RASTA (a) en fonction du temps (en heure UTC). La figure (b) représente les profils de réflectivité simulés en considérant les hydrométéores glacés sphériques qui sont co-localisés avec le radar RASTA. Les profils restitués par la méthode de la CPR sont représentés figure (c) pour des particules sphériques et figure (d) pour des particules sphéroïdales.

Exploitation du radar nuage Basta of Bourbon (BOB) pour la climatologie et l'évaluation des performances du modèle AROME-Océan Indien

Le LACy a fait l'acquisition en 2016 d'un radar nuage BASTA (95 GHz). Ce radar, déployé sur le nouveau site d'observation de l'OPAR (Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion), situé sur le campus de l'Université de La Réunion, est exploité en synergie avec le radar aérosol MARLEY (Mobile Aerosol Raman Lidar for troposphEre surveY) ainsi qu'un ensemble de capteurs (2DVD, station météorologique, caméra all-sky, radiomètre, ...) visant à documenter les propriétés des nuages et des précipitations en milieu tropical. Ce nouveau site expérimental, qui vise à compléter les observations effectuées à la station atmosphérique du Maïdo – cette dernière étant plus particulièrement dédiée à l'observation de la haute troposphère – à pour vocation de devenir l'un des principaux sites de référence de l'hémisphère sud pour l'observation des nuages.

L'analyse des observations collectées pendant la première année d'exploitation du radar (Nov. 2016 – Oct. 2017) a permis de réaliser une climatologie des nuages dans la région nord de La Réunion. Cette climatologie a été confrontée aux prévisions du modèle AROME-Océan Indien sur la même période afin d'évaluer la capacité de ce modèle à reproduire correctement l'occurrence et la distribution verticale des nuages observées par le radar. Les observations mettent en évidence l'existence d'un cycle saisonnier très marqué relativement bien capturé par le modèle. Ce dernier semble néanmoins sous-estimer l'épaisseur des nuages bas observés en été et en hiver (austral) et surestimer l'épaisseur de la couche de cirrus se développant au cours de l'été.

6

Impact du renforcement des données d'avions dans l'assimilation AROME

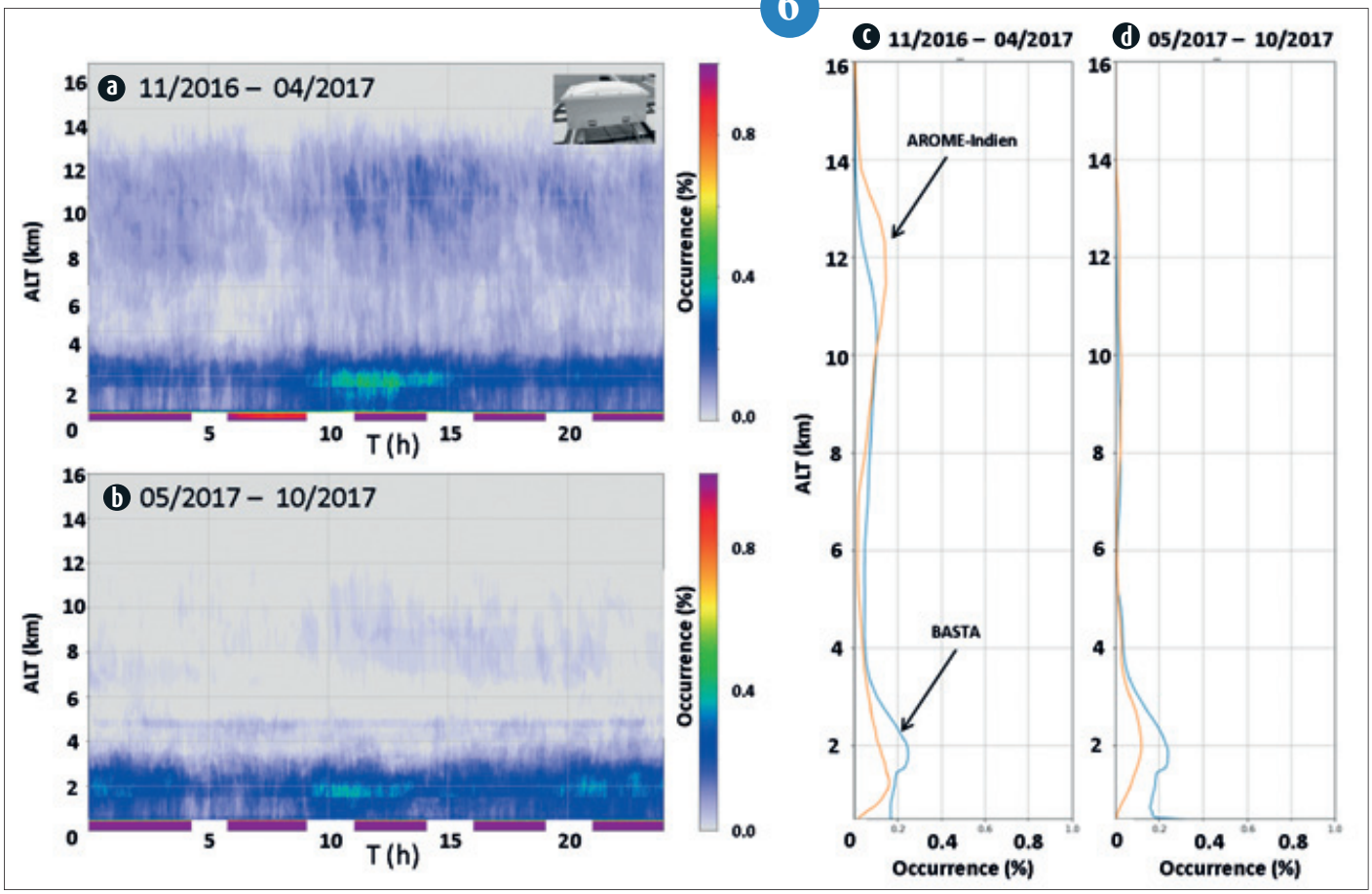
En Europe, c'est le service E-AMDAR de EUMETNET qui gère la collecte et la redistribution des données effectuées par les avions de ligne. À la demande de Météo-France, le nombre de ces observations a été augmenté sur la France de début mai à mi-juin 2017. Davantage de données ont été achetées, distribuées puis assimilées par les modèles de PNT. C'était une opportunité de vérifier que l'assimilation de données supplémentaires d'avion apporte un gain de qualité aux prévisions AROME-France. Les données en sus sont organisées en profils verticaux (montées et descentes d'avion) sur des aéroports français mais pas étiquetées. Tout le travail a donc consisté à identifier les observations supplémentaires. Il a fallu associer chaque profil à un aéroport (français ou non) et supprimer ses données le cas échéant (profil qualifié supplémentaire en France). Des périodes « normales » comme avril 2017 ou mai 2016 ont servi de référence. Cette opération revient à enlever environ 15 % des données d'avion dans la catégorie « profils européens », 12 % de toutes les données d'avion dans les fichiers servant à AROME-France (voir Figure a). L'impact sur la qualité du modèle AROME sur le mois de mai 2017 ne se détecte qu'aux réseaux de 12 et 18h et son amplitude est très limitée. Il est rarement significatif. On vérifie ainsi une légère amélioration de la prévision de vent à 24h d'échéance sur un domaine cernant étroitement le territoire métropolitain (voir Figure b).

7

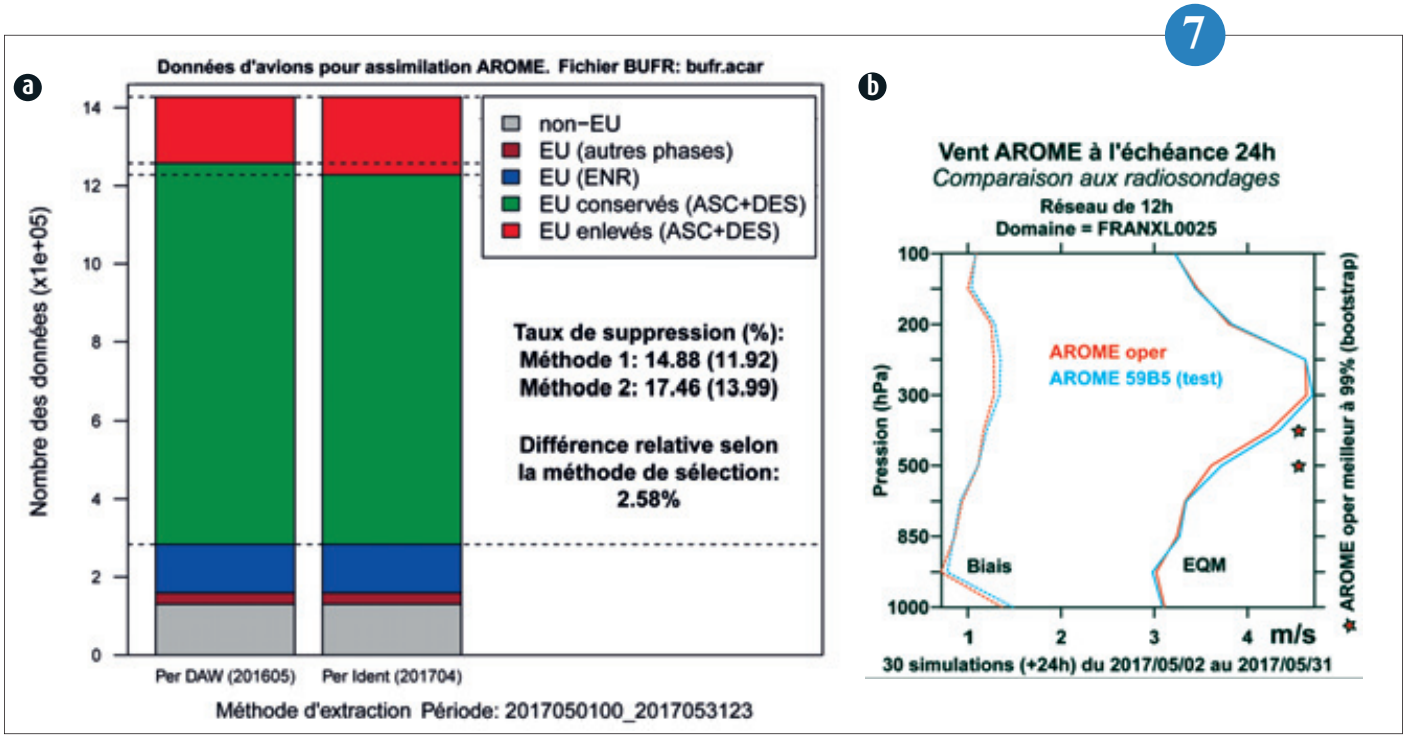
a : On compare ici l'impact de 2 méthodes pour identifier les profils de données d'avion E-AMDAR sur les aéroports français et leur associer un caractère exceptionnel (en rouge) ou routinier (en vert). La partie en rouge montre la quantité de données enlevées dans l'expérience. Les autres données E-AMDAR (en bleu et brun) ne sont pas concernées par cet étiquetage, tout comme les données en provenance des USA : elles ne sont pas modifiées dans l'expérience de test.
b : Mesure de l'impact du retrait des observations E-AMDAR supplémentaires par rapport à AROME-France opérationnel en comparaison aux radiosondages. On montre ici l'écart-quadratique moyen (EQM) et le biais des prévisions à 24h par rapport aux radiosondages pour le réseau de 12h. C'est à ce réseau que l'impact est le plus fort. On voit que l'opérationnel est légèrement meilleur que le test (EQM et biais plus faibles) entre 850 et 250 hPa. L'impact n'est significatif que pour 2 niveaux (étoiles).

Climatologie de la distribution verticale de la fraction nuageuse observée par le radar BASTA de Saint-Denis de La Réunion au cours d'une journée d'été (a) et d'hiver (b).
Distribution verticale de la fraction nuageuse observée par BASTA et prévue par le modèle AROME-Océan Indien en été (c) et en hiver (d).
Analyses réalisées à partir d'une année complète d'observation / prévisions.

6



7



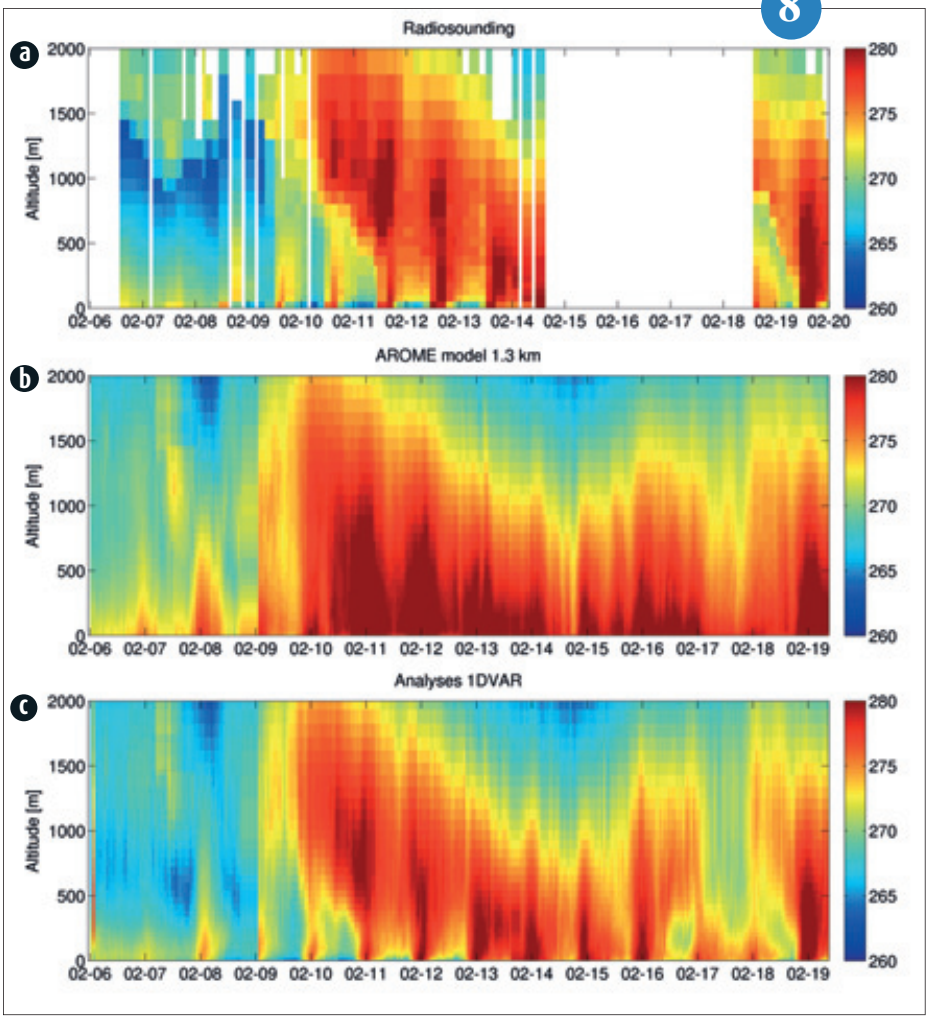
Vers l'assimilation des données de radiomètres micro-ondes dans le modèle AROME : cas d'étude en vallée Alpine

Les radiomètres micro-ondes au sol (MWR) permettent d'accéder à des mesures en continu de température, d'humidité sur la verticale et d'eau liquide intégrée à la fois en ciel clair et nuageux. Leur contenu en information est maximal dans la couche limite atmosphérique connue pour son sous-échantillonnage dans les réseaux opérationnels actuels. Une action de recherche est en cours au CNRM pour évaluer le potentiel de ces observations de manière à mieux initialiser les prévisions du modèle AROME, notamment en condition de couche limite stable.

Lors de la campagne Passy-2015, un radiomètre micro-onde a été déployé au centre d'une vallée alpine et co-localisé avec des radiosondages à haute fréquence (toutes les 3 heures). Les difficultés du modèle AROME à 1.3 km de résolution horizontale à bien représenter ces conditions (couches stables, relief) ont entrainé une importante sous-estimation du refroidissement proche de la surface. Des expériences d'assimilation unidimensionnelle (1DVAR) similaires aux méthodes opérationnelles ont été menées en combinant les observations du radiomètre micro-onde et les prévisions 1h du modèle AROME. L'erreur de prévision modèle est fortement réduite, principalement dans la couche limite grâce à l'assimilation 1D des observations passant de 8 K à 0.5 K proche de la surface en ciel clair. Lors de conditions de nuages bas, l'erreur commise par le modèle sur l'inversion de température à la base du nuage est aussi divisée par deux. Grâce à la haute fréquence de ces observations (quelques minutes), l'évolution temporelle de la couche limite est nettement mieux représentée dans le modèle. Ces résultats montrent le bénéfice attendu de l'assimilation de ces nouvelles observations dans le modèle AROME.

8

8



◀ Série temporelle de profils de température observés par radiosondage (a) issus des prévisions 1 h du modèle AROME ; (b) obtenus après assimilation 1D des observations de radiomètre micro-onde ; (c) lors de la campagne Passy-2015 du 06 au 20 février 2015.

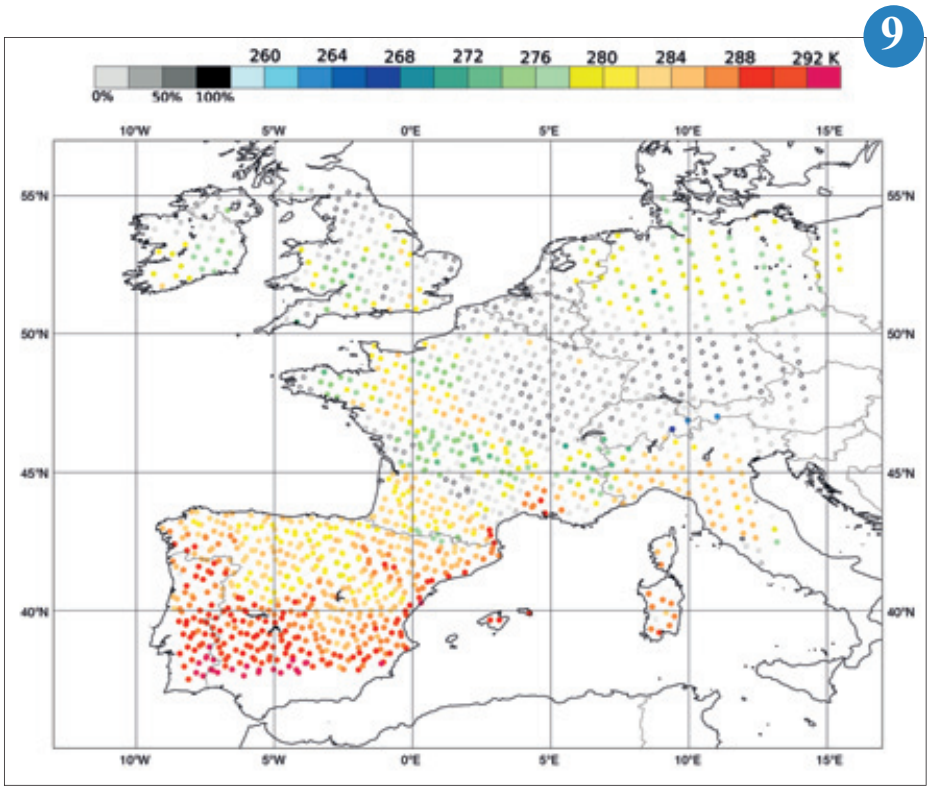
Assimilation des radiances IASI sur terre dans AROME

L'instrument Français IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage dans l'Infrarouge) est embarqué à bord des satellites défilants Européens MetOp et fournit 8461 mesures par point de sondage. IASI apporte des informations notamment sur les profils atmosphériques de température et d'humidité, ainsi que sur la température et l'émissivité de la surface.

En suivant l'approche développée au CNRM pour les instruments micro-ondes et imageurs, a pu être opérée la restitution des températures des surfaces continentales à partir de IASI en s'appuyant sur des atlas d'émissivité de surface élaborés par l'Université du Wisconsin. La mesure dans l'infrarouge est sensible à la présence de nuage dans le pixel sondé. Ainsi, en condition de ciel clair, la température de la surface dans le pixel sondé peut être déduite des mesures faites dans certaines longueurs d'onde sélectionnées, sensibles à la surface. Cette méthodologie est maintenant disponible dans le modèle global ARPEGE et le modèle à fine échelle AROME. La figure illustre la température de surface déduite de IASI dans AROME-France en cas de ciel clair, et la couverture nuageuse sinon. Grâce à ces paramètres de surface plus réalistes, l'assimilation de IASI est améliorée, permettant de mieux décrire les basses couches de la troposphère au-dessus des continents.

La synergie des températures des surfaces continentales restituées à partir de différents instruments sera évaluée pour que ces températures soient ensuite utilisées dans le schéma d'analyse de la surface, apportant une information plus réaliste sur la température de surface pour l'assimilation des observations satellitaires et pour le modèle de prévision.

9



Températures des surfaces continentales déduites de IASI en cas ciel clair (plage de couleurs, température exprimée en Kelvin) et couverture nuageuse dans le pixel IASI (nuances de gris, exprimée en pourcentage) dans le modèle AROME-France pour le 8 octobre 2017 à 21 UTC.

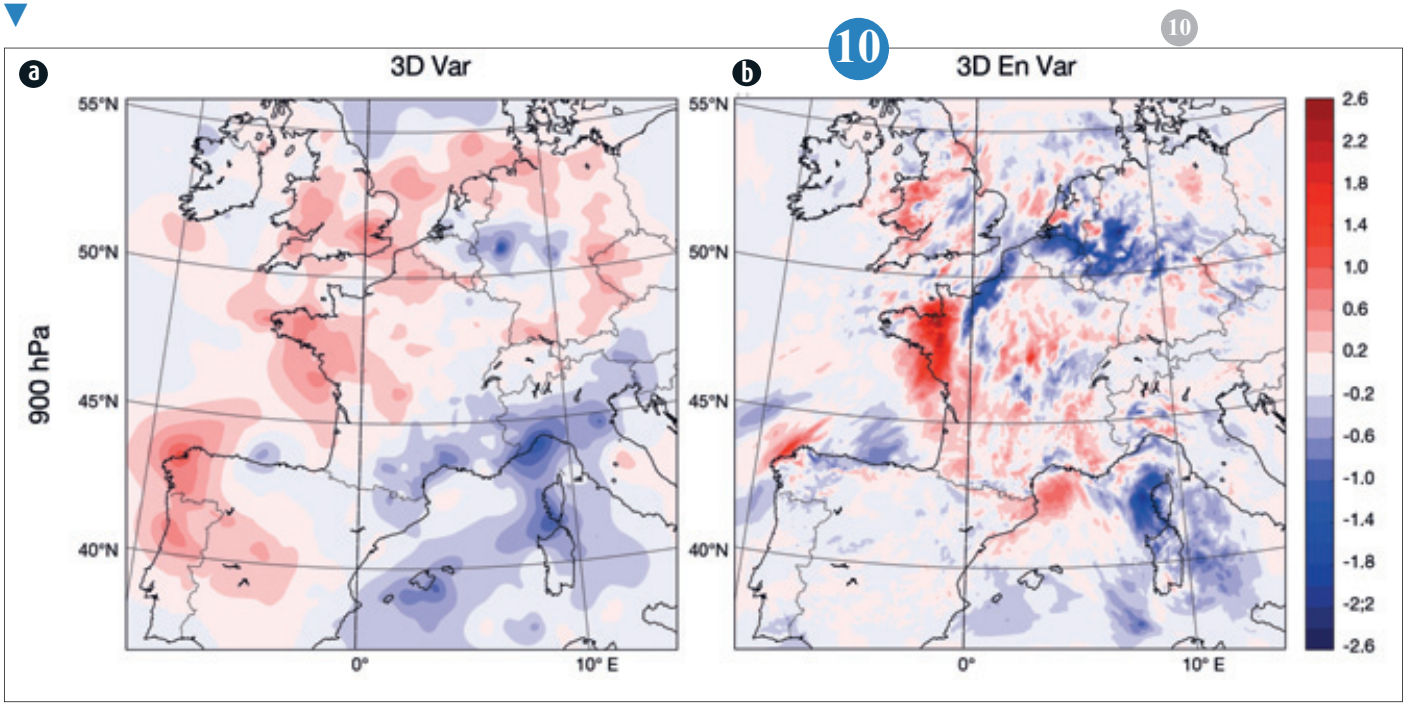
Prototype de schéma d'assimilation 3DEnVar pour AROME

La chaîne opérationnelle AROME utilise des cycles d'assimilation/prévision de 1h basés sur un schéma de type 3DVar. Une des faiblesses de ce schéma est que les covariances des erreurs de prévisions sont modélisées et calibrées de manière climatologique : les corrélations sont homogènes sur le domaine, et les variances statiques. Les incréments d'analyse résultants (différence entre le nouvel état analysé et la prévision ayant servi d'ébauche), obtenus après assimilation de nombreuses observations diverses, ne dépendent donc pas de l'écoulement météorologique.

Les schémas de type 3DEnVar visent à remplacer ces covariances climatologiques, soit par des covariances directement déduites d'un ensemble de prévision, soit par une combinaison linéaire des deux dans une version hybride. Une localisation des covariances échantillonnées, qui annule progressivement les corrélations spatiales avec la distance, est nécessaire pour filtrer une partie du bruit d'échantillonnage. La figure montre que les incréments obtenus, bien que plus bruités que ceux issus du 3DVar, possèdent clairement des structures liées au flux. Les scores aux prévisions calculés après 5 semaines d'assimilations cyclées montrent un apport significatif de cette approche pour un AROME à 3,8 km de résolution.

Les recherches se poursuivent sur l'implémentation de différents schémas de localisation et sur l'utilisation de l'EnVar en mode 4D. Une assimilation d'ensemble AROME sera mise en opérationnel en parallèle, ce qui permettra de fournir des covariances échantillonnées en temps réel. Le but final est d'améliorer les prévisions opérationnelles à 1,3 km de résolution.

Coupes horizontales à 900 hPa d'incréments d'analyse de température (en K) obtenues par (a) le 3DVar, (b) le 3DEnVar, le 6 février 2016 à 0h. La même ébauche (prévision 3h AROME à 3,8 km) est utilisée dans les 2 cas.



PEARO, sensibilité à la résolution et à la taille

Un aspect essentiel lors du développement d'un système de prévision d'ensemble concerne le choix de la taille de l'ensemble et de sa résolution spatiale. Afin d'exploiter au mieux l'augmentation prévue des ressources de calcul, il est donc important d'évaluer objectivement les impacts respectifs d'une augmentation de la taille et de la résolution des ensembles.

Dans cette perspective, la prévision d'ensemble AROME (AROME-PE), qui comprend actuellement 12 membres perturbés à 2,5 km de résolution, a été comparée à deux configurations expérimentales, qui utilisent des résolutions de 2,5 km et 1,3 km avec 34 et 12 membres respectivement.

Les résultats indiquent qu'une augmentation de la résolution à l'impact le plus fort à très courte échéance, alors qu'une augmentation de la taille de l'ensemble conduit à de meilleures performances à plus longue échéance, lorsque la prévisibilité diminue. La combinaison de trois productions successives d'AROME-PE s'avère également être une approche compétitive pour augmenter la taille de l'ensemble à moindre coût : les performances de cet ensemble de 36 membres sont généralement proches voire meilleures qu'une production unique de 34 membres, à toutes les échéances et pour différents paramètres.

Étant donnés les coûts et les scores des différentes configurations, il est suggéré d'utiliser les futures ressources de calcul afin d'augmenter en priorité la taille d'AROME-PE, en ajoutant des membres et en combinant plusieurs productions rapprochées. Néanmoins, des expériences à plus haute résolution doivent se poursuivre, notamment pour les cas d'évènement extrême.

11

EFI AROME

La prévision des phénomènes météorologiques extrêmes est un enjeu important, en raison des dégâts matériels et humains qu'ils occasionnent. La prévision d'ensemble AROME (AROME-PE), avec une résolution de 2,5km sur la France, présente un fort potentiel pour la prévision de ces évènements.

L'indice de prévision extrême (EFI), introduit par Lalaurette (2003), fournit notamment une indication de la sévérité des évènements prévus, en comparant la distribution de probabilité donnée par une prévision d'ensemble au climat du modèle.

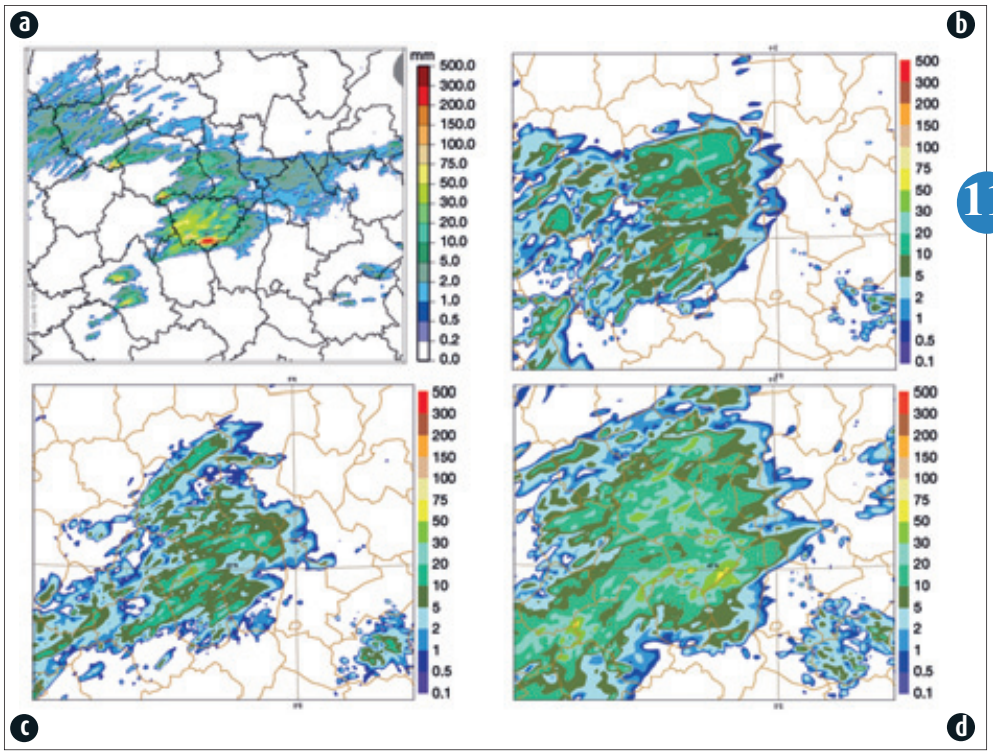
L'étude réalisée a examiné la faisabilité et la pertinence d'un calcul d'EFI à partir d'AROME-PE, avec comme principale difficulté le calcul du climat du modèle, échantillonné à partir d'une archive de seulement deux ans (disponible depuis août 2015). Afin d'exploiter au mieux cet échantillon réduit, des méthodes de tolérances spatiale et temporelle ont été proposées et ont permis d'améliorer la robustesse du climat obtenu.

Des études de cas indiquent que ces premiers EFI sont capables de détecter des zones de risque cohérentes avec les observations et la vigilance météorologique, notamment pour des épisodes de tempêtes hivernales et de fortes pluies.

Une étude objective a également permis d'évaluer les EFI par rapport à la vigilance. D'une part, on montre que les vigilances orange et rouge sont généralement associées à des fortes valeurs d'EFI. D'autre part, les EFI permettent de correctement discriminer les fausses alarmes et les non-détections, ce qui pourrait en faire un outil pertinent pour l'ébauche d'alerte.

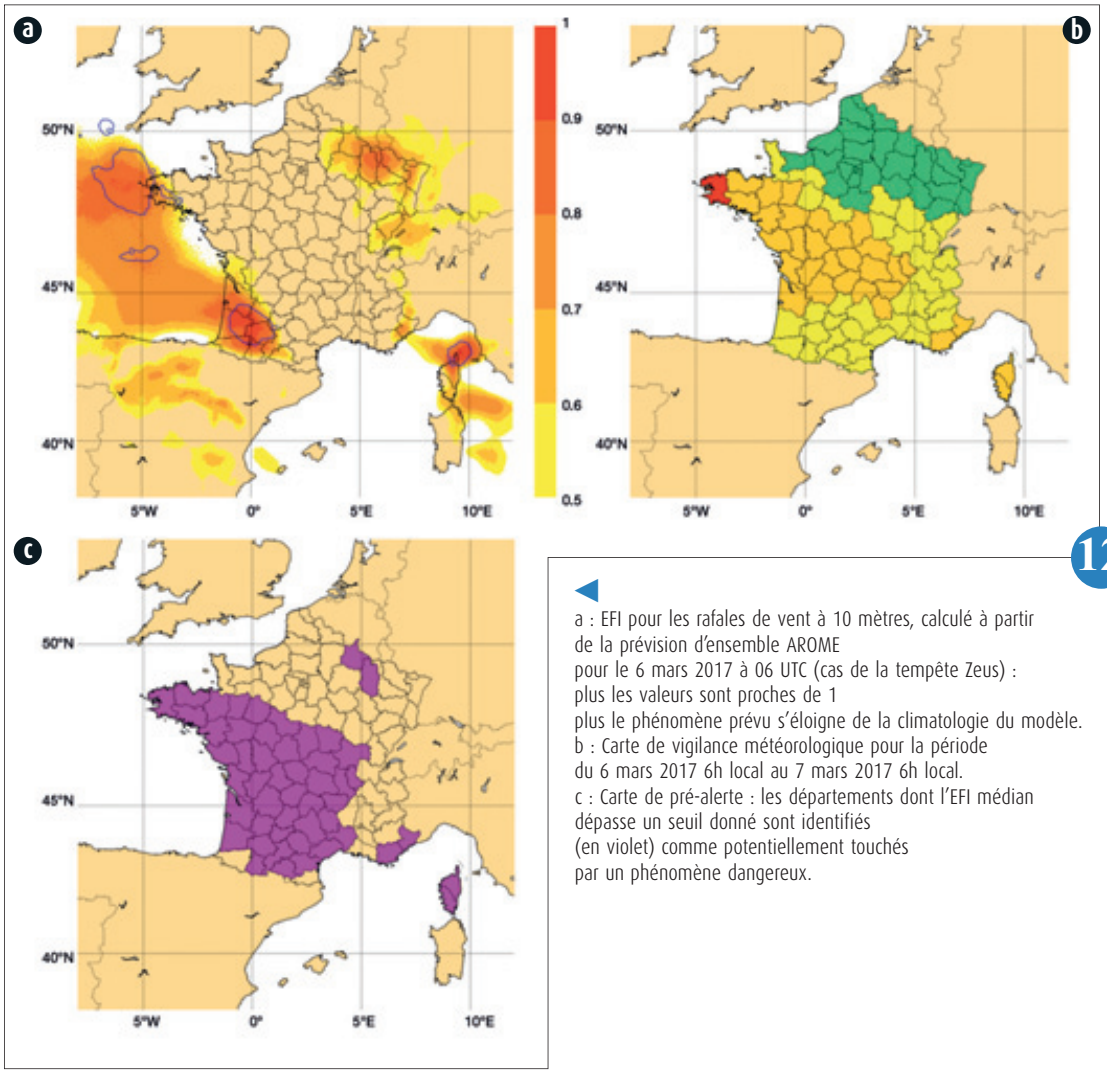
A court terme, un contrôle régulier des EFI par les prévisionnistes pourra être proposé. Une archive plus profonde permettra également d'améliorer leur précision.

12



11

Précipitations cumulées en 6h,
valides le 13 juin 2017 à 21 TU :
a : Lame d'eau Antilope ;
b : Quantile maximal de la prévision d'ensemble AROME opérationnelle ;
c : Quantile maximal de la prévision d'ensemble AROME
à 1,3 km de résolution (12 membres) ;
d : Quantile maximal de la prévision d'ensemble AROME à 34 membres (résolution 2,5 km).
Toutes les prévisions sont issues du réseau du 12 juin à 21 TU.



12

a : EFI pour les rafales de vent à 10 mètres, calculé à partir de la prévision d'ensemble AROME
pour le 6 mars 2017 à 06 UTC (cas de la tempête Zeus) :
plus les valeurs sont proches de 1
plus le phénomène prévu s'éloigne de la climatologie du modèle.
b : Carte de vigilance météorologique pour la période
du 6 mars 2017 6h local au 7 mars 2017 6h local.
c : Carte de pré-alerte : les départements dont l'EFI médian dépasse un seuil donné sont identifiés
(en violet) comme potentiellement touchés
par un phénomène dangereux.

Étude et modélisation des processus

Les articles constituant ce chapitre sont des exemples des recherches conduites à Météo-France en 2017 sur la compréhension et modélisation des phénomènes météorologiques à enjeux et de leurs interactions avec la surface. Ces travaux ont pour finalité l'amélioration de la représentation des processus dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France, et le développement de services météorologiques ou climatiques performants.

L'étude présentée ci-après sur l'intensification des précipitations extrêmes au Sahel au cours des 35 dernières, publiée dans la revue Nature, illustre comment la compréhension des processus permet d'interpréter les tendances constatées dans les séries d'observations satellitaires et d'en retrouver les signaux dans les projections climatiques. Ce type de démarche est appliqué à d'autres extrêmes, comme illustré ci-après sur les vagues de chaleur.

Pour ces études de processus et l'amélioration de leur représentation par les modèles, la modélisation à très haute résolution constitue un outil privilégié. Les articles sur la modélisation de la turbulence et le développement d'indicateurs de turbulence pour l'éolien offshore sont des illustrations aux deux extrémités de la gamme de résolution utilisée (0,5 m et 2,5 km). Ces simulations à très haute résolution, comme celle présentée ici (cf. figure), servent aussi à préparer et évaluer l'apport de la résolution hectométrique envisagée pour la prochaine génération de systèmes de prévision numérique à aire limitée. Cette haute résolution nécessite d'améliorer la description des surfaces et des interactions aux interfaces avec l'atmosphère, comme illustré ici pour différents types de surface (surfaces urbanisées, surfaces naturelles, océan).

1

Intensification de la convection profonde et des précipitations extrêmes au Sahel au cours des 35 dernières années

Au Sahel, l'essentiel des précipitations provient de systèmes de méso-échelle (MCS) tels que les lignes de grains. Ces MCS sont parmi les plus intenses du globe et constituent une cause majeure d'inondations récurrentes et dévastatrices.

De nombreuses études indiquent une augmentation des précipitations extrêmes en lien avec le réchauffement climatique. Cependant, au Sahel comme généralement dans les Tropiques, les observations in-situ sont rares. De plus, les modèles peinent à simuler les MCS ; les projections climatiques de l'intensité des précipitations sont donc très incertaines. En revanche, l'archive satellitaire METEOSAT a permis d'identifier une forte intensification au Sahel, avec un triplement du nombre de MCS dont la température est inférieure à -70°C en 35 ans (voir figure).

Cette tendance n'est que partiellement reliée à la reprise des pluies qui a suivi les sècheresses des années 80. Elle ne fait pas non plus intervenir un réchauffement local puisqu'au Sahel, pendant la mousson, on observe un refroidissement (associé à la reprise des pluies). Cette tendance est cependant corrélée au réchauffement global, qui, à l'échelle régionale de l'Afrique de l'ouest, affecte principalement le Sahara. Ce gradient méridional (refroidissement au Sahel, réchauffement au Sahara) induit une intensification du cisaillement de vent, laquelle favorise le développement de MCS intenses qui génèrent de fortes convergences d'humidité et des pluies violentes. Ces changements régionaux sont cohérents avec la tendance observée et susceptibles de les expliquer.

Les projections climatiques futures indiquent une augmentation de ce gradient entre Sahel et Sahara, suggérant que l'augmentation de la fréquence des pluies extrêmes au Sahel pourrait se poursuivre.

2

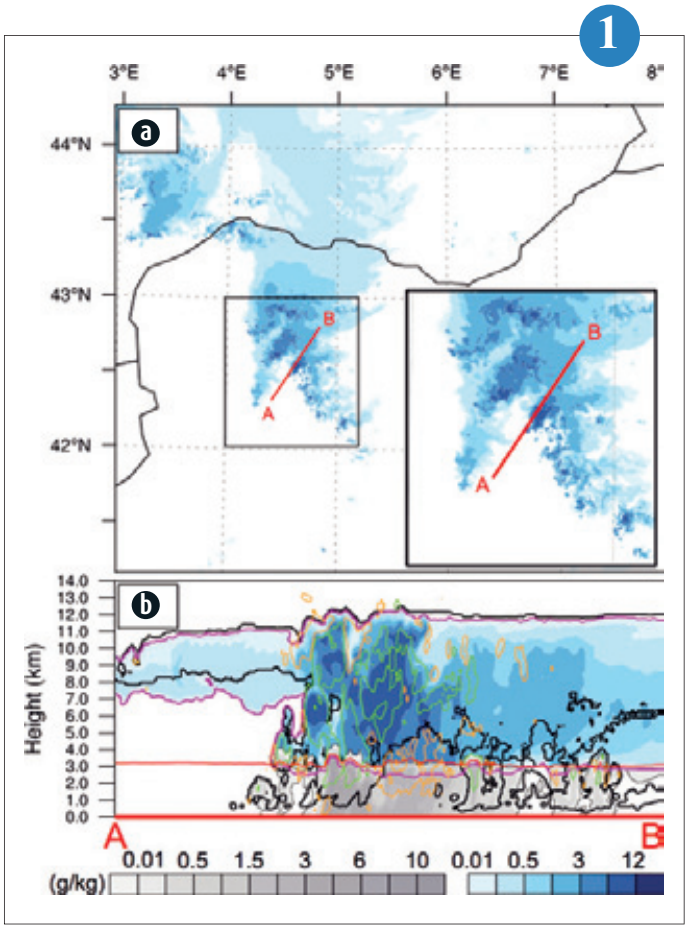
Le système couplé AROME-NEMO pour la prévision des événements fortement précipitants en Méditerranée

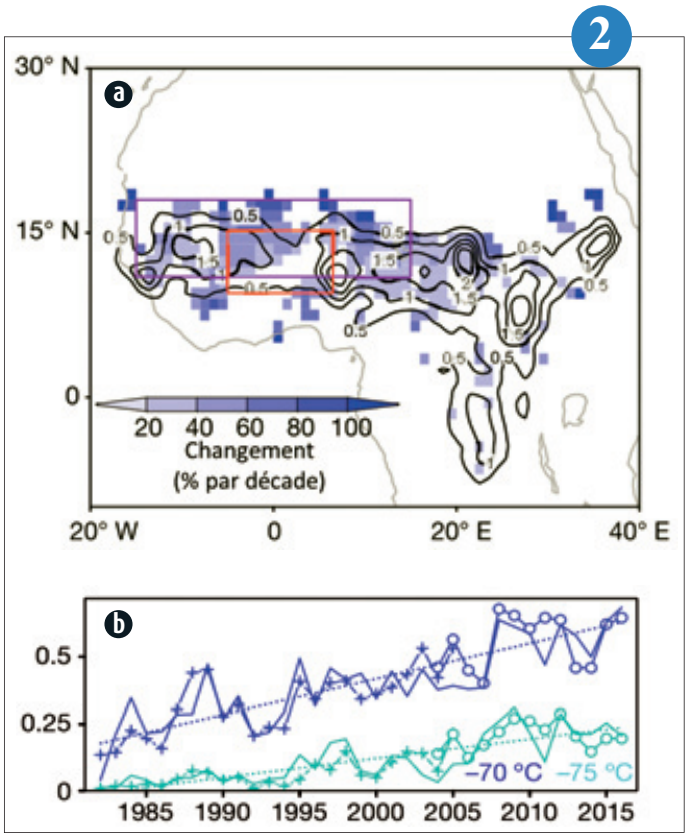
La mer Méditerranée est une source importante de chaleur et d'humidité pour les systèmes convectifs à l'origine des événements fortement précipitants qui affectent fréquemment le bassin.

Afin de mieux représenter les interactions air-mer qui interviennent à fine-échelle, le couplage entre le système de prévision AROME et le modèle océanique NEMO a été développé. Les deux modèles échangent de l'information (température de surface de la mer, courants de surface - flux de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement) de manière interactive via l'interface de couplage SURFEX-OASIS, avec une fréquence d'une heure. Le système couplé a été appliqué sur un domaine couvrant la Méditerranée occidentale et avec une résolution d'environ 2.5 km dans les deux compartiments, sur deux épisodes méditerranéens ayant touchés le Sud-Est de la France pendant la première campagne de mesure (SOP1) du programme HyMeX : la POI 13 (12-15 octobre 2012) et la POI 16a/b (26-28 octobre 2012).

Les résultats de la simulation couplée comparés à ceux de la simulation atmosphérique forcée utilisant une température de surface de la mer constante et égale au champ initial, montrent la sensibilité de la prévision de l'épisode méditerranéen au couplage avec l'océan, aussi bien en termes d'intensité que de localisation des précipitations intenses. Des bilans d'eau ont notamment permis de quantifier l'effet du couplage sur l'évaporation à la surface marine qui alimente les systèmes convectifs, avec par exemple une diminution de 10 % de l'évaporation sur la POI 13 due au refroidissement de la surface et au mélange vertical océanique.

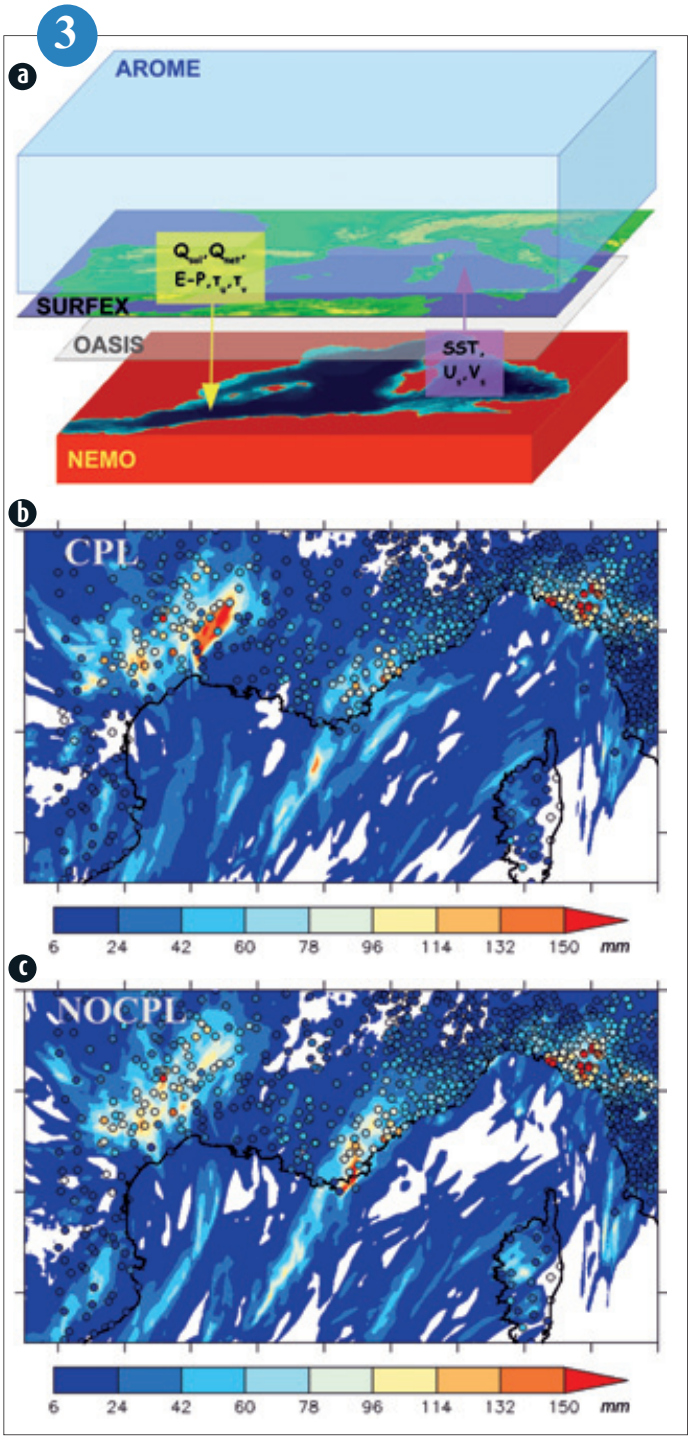
3





▲ a : Carte des tendances significatives de la couverture nuageuse des MCS les plus intenses (température infrarouge de sommet de nuage inférieure à -70°C et taille supérieure à 25000 km^2) à 18h (UTC), en moyenne sur les mois de juin à septembre, exprimées en pourcentage de changement par décade ; les contours correspondent à la moyenne sur la période 1982-2016.
b : série temporelle du nombre (par jour) de ces MCS intenses sur le domaine sahélien, délimité par le rectangle violet sur la figure (a).

◀ Simulation Méso-NH à 150 m de résolution de l'épisode méditerranéen de pluie intense du 26 octobre 2012 observé pendant la campagne de mesures SOP1 d'HyMeX, initialisé à partir de l'analyse du modèle de prévision AROME :
a : Contenu en hydrométéores précipitants glacés à 6km d'altitude ;
b : Coupe verticale le long du segment AB présentant le contenu en précipitations liquides (échelle de gris), en hydrométéores précipitants solides (plages bleues et isoligne magenta), en hydrométéores nuageux (isoligne noire) avec l'isotherme 0°C (isoligne rouge), et les zones de vitesses verticales ascendantes (supérieures à 5 m/s, isolignes vertes) et subsidentes (inférieures à -2m/s, isolignes oranges). La résolution de 150 m permet de représenter les cellules convectives formant le système convectif de méso-échelle, à différents stades de maturité, incluant des cellules au stade de cumulus, des tours convectives bien développées atteignant 12 km d'altitude et générant de très fortes pluies, et une vaste partie stratiforme s'étendant en aval du flux d'altitude.



▲ a : Architecture du système couplé AROME-NEMO et domaine sur la Méditerranée occidentale.
b et c : Cumuls de précipitation prévus entre le 26 octobre 2012 à 00UTC et le 27 octobre 2012 à 00UTC (POI 16a) dans la simulation couplée (CPL) et la simulation AROME-WMED forcée (NOCPL) avec une température de surface de la mer constante, toutes deux débutant le 25 octobre 2012 à 00UTC. Les observations sont indiquées par les cercles.

Estimation d'indicateurs de turbulence pour l'éolien offshore à partir du re-jeu AROME

En appui des projets de fermes éoliennes offshore, Météo-France a calculé des indicateurs de turbulence atmosphérique pour la couche atmosphérique comprise entre 40 et 160 m, sur les zones littorales de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique.
L'intensité de la turbulence, les rafales à 100 m ainsi que l'exposant du cisaillement vertical de la force du vent, ont été identifiés comme les indicateurs les plus adaptés dans ce contexte.
La production des indicateurs d'intensité de la turbulence et de rafales à 100 m a nécessité une phase d'étude. Ces deux indicateurs ne sont pas des sorties du modèle météorologique AROME.
Leur mode de calcul a été choisi de façon à ce que les valeurs restituées soient conformes à leur définition courante dans les projets éoliens et que leur qualité puisse être évaluée par comparaison aux calculs réalisés sur la base d'observations. Les connaissances scientifiques sur la turbulence atmosphérique et sa représentation dans AROME sont ainsi exploitées au mieux.
Plusieurs indicateurs, répondant potentiellement aux critères énoncés ci-dessus, ont été calculés à partir de données horaires AROME à la résolution horizontale de 0,025° sur la période 2000-2015. Les indicateurs retenus sont ceux qui ont été jugés les plus proches des indicateurs calculés à partir des mesures de vent à disposition. Une des difficultés et limite de l'approche réside dans la faible disponibilité d'observations de vent en altitude et qui plus est sur mer.
Des statistiques de ces différents indicateurs de turbulence ont ensuite été établies pour restituer une climatologie de la turbulence atmosphérique entre 40 à 160 m sur les côtes occidentales de la métropole.

4

Amélioration de la turbulence en couches limites stables

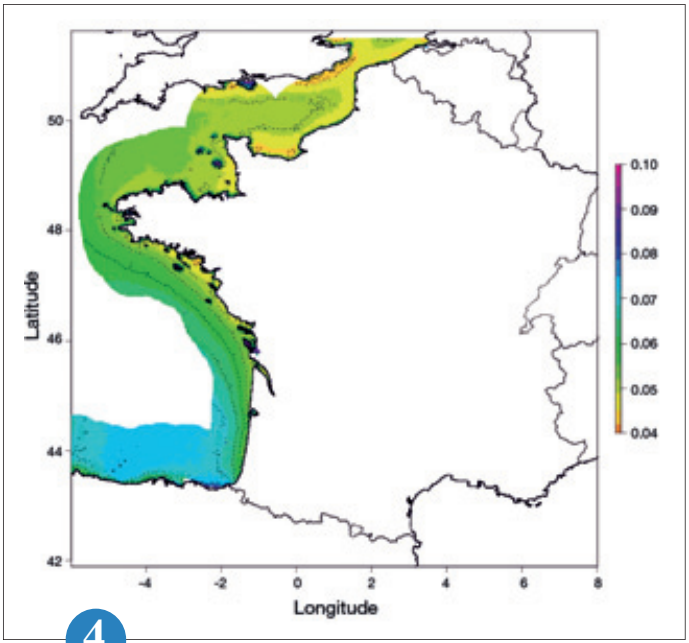
Améliorer la représentation de la turbulence dans la couche limite stable nocturne est un point clé pour la prévision du brouillard, du gel des surfaces, des inversions de température et des épisodes de pollution notamment en hiver.
La paramétrisation de la turbulence actuellement utilisée dans les modèles Méso-NH et AROME fait intervenir la longueur de mélange, un paramètre important qui caractérise la taille des tourbillons atmosphériques. Une nouvelle expression pour la longueur de mélange a été formulée. Elle associe un terme de cisaillement vertical du vent horizontal à une formulation existante qui repose sur la flottabilité. Ces deux processus physiques contraignent la taille des tourbillons quand l'atmosphère est stable.
La nouvelle longueur de mélange a été évaluée par rapport à des simulations LES à haute résolution (50 cm) sur des cas issus de la littérature. Sur le cas d'inter-comparaison de modèles GABLS1, la simulation Méso-NH avec l'ancienne longueur de mélange surestime l'intensité du mélange turbulent, ce qui conduit à une couche limite trop haute comme on peut le constater sur le profil de température (Figure a) et le profil du vent (Figure b) par rapport à la LES de référence. Inclure le cisaillement du vent dans la longueur de mélange permet de réduire ces biais.
Ces travaux de recherche permettront d'améliorer l'intensité du mélange prévue dans les modèles opérationnels de prévision du temps.

5

Simulation des comportements énergétiques et des flux de CO_2 en ville

Les villes regroupent la moitié de la population mondiale, des consommations énergétiques et des émissions de CO_2. La paramétrisation de ville TEB calcule les échanges d'énergie entre les villes et l'atmosphère. Elle contient un module de la thermique du bâtiment qui simule la demande d'énergie pour le chauffage et la climatisation en fonction des conditions météorologiques, des caractéristiques du bâtiment (matériaux porteurs, isolants, vitrage), ainsi que des comportements énergétiques des habitants (consigne de chauffage). Une base de données urbaines a été construite en coopération avec des géomaticiens, architectes et sociologues pour alimenter TEB (mapuce.orbisgis.org). Les informations sur les comportements énergétiques proviennent du croisement de questionnaires et du recensement de la population.
A l'échelle d'un quartier, et plus particulièrement dans les centres villes français et européens, la mixité d'usages (résidentiel, bureau, commercial) peut être importante. TEB a été amélioré afin de représenter cette mixité d'usages et des comportements énergétiques associés. Ces travaux ont permis de simuler les consommations énergétiques (Figure a). Les émissions de CO_2 en milieu urbain dues au chauffage, au trafic, à la végétation urbaine ont aussi été introduites. Elles ont été évaluées avec les observations de la campagne de mesures CAPITOUL au centre de Toulouse. Par rapport à une température de chauffage à 19 °C partout et tout le temps, la prise en compte de la diversité des usages et comportements permet de bien mieux représenter l'évolution au cours de la journée des émissions de CO_2 (Figure b).
Ces travaux de recherche permettront d'évaluer des stratégies d'adaptation des villes au changement climatique.

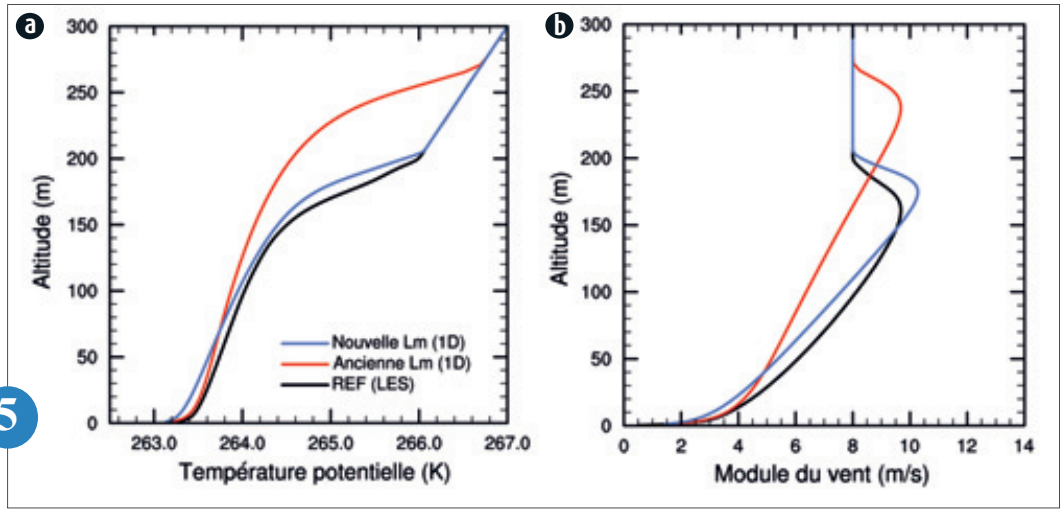
6



4

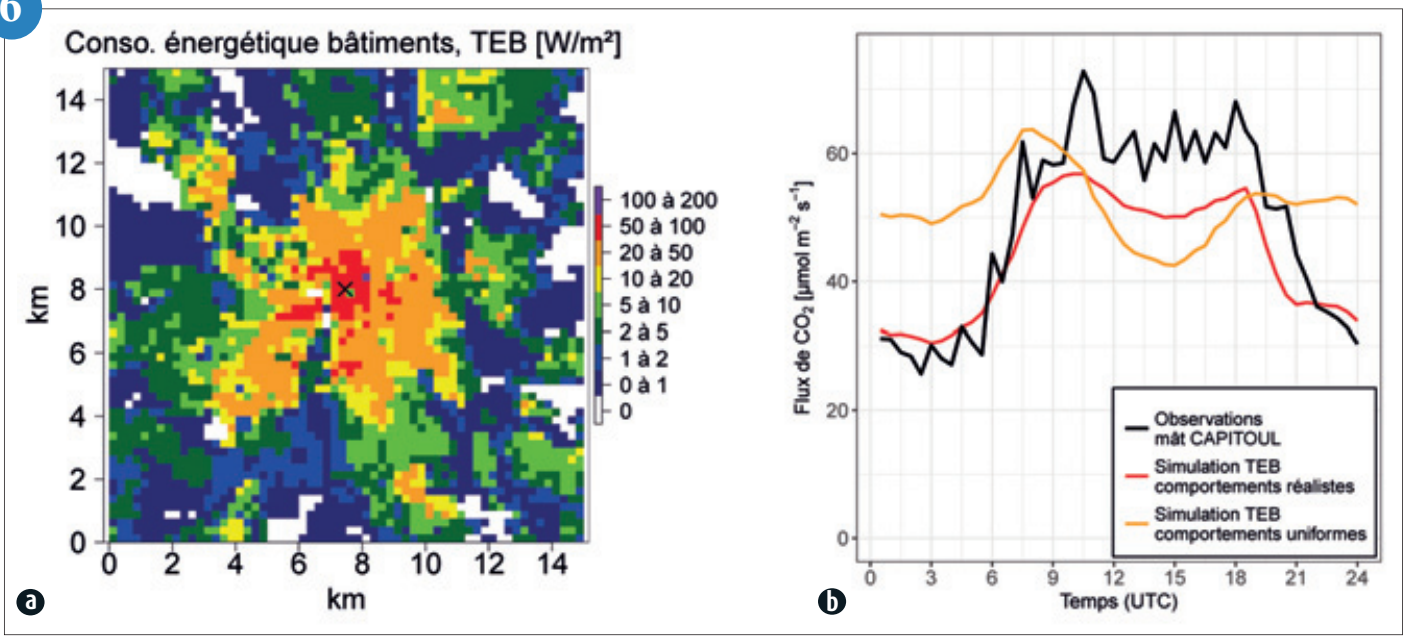
Carte de la moyenne de l'intensité de turbulence au niveau 160 m sur la bande littorale, calculée à partir des données AROME (2000-2015).

Profils verticaux de la température potentielle (a) et du module du vent (b), moyennés sur une heure, obtenus par une simulation LES tridimensionnelle (référence) et deux simulations uni-colonnes avec l'ancienne et la nouvelle longueur de mélange sur le cas d'inter-comparaison de modèles GABLS1.



5

a : Répartition spatiale du flux de chaleur lié aux consommations énergétiques des bâtiments simulé par TEB à Toulouse. Les flux sont moyennés sur la saison d'hiver 2004/2005 qui fait partie de la campagne d'observations CAPITOUL.
b : Cycle journalier moyen du flux de CO2 pour la même période à l'endroit du mât de mesures qui est marqué avec une croix dans (a).



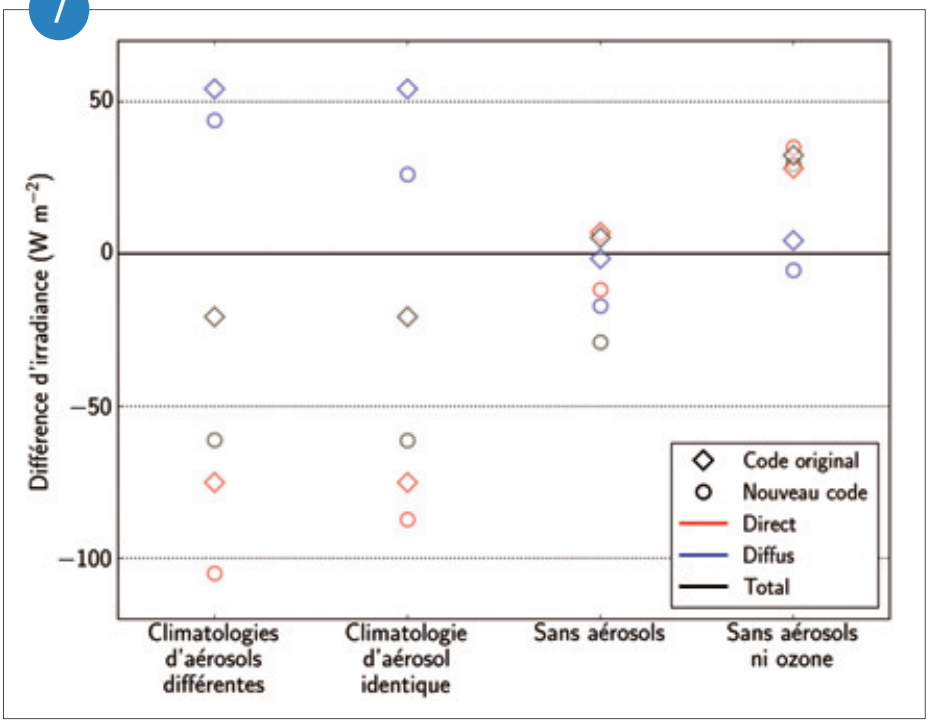
6

Vers un nouveau schéma de transfert radiatif dans les modèles de Météo-France

La transmission du rayonnement solaire à travers l'atmosphère est un élément essentiel de la météorologie. Les codes radiatifs utilisés à Météo-France pour représenter ce processus proviennent historiquement du CEPMMT, la version actuellement en place datant de 2002. C'est pourquoi le nouveau code ecRad est en cours d'implémentation.
Les principales différences entre ce nouveau code et l'original sont 1) l'utilisation du modèle RRTM à 14 bandes spectrales au lieu du modèle original à 6 bandes ; 2) l'implémentation d'une nouvelle climatologie d'aérosols basée sur des observations satellite récentes ; 3) la révision des propriétés optiques des aérosols. La figure présente une comparaison entre les rayonnements mesurés et simulés par le modèle Méso-NH à Carpentras pour une journée de ciel clair. La prise en compte climatologique des aérosols conduit à des flux très différents de ceux mesurés. A climatologie identique les différences entre les deux codes soulignent par ailleurs l'impact du choix des propriétés optiques de ces aérosols. Les simulations sans aérosols sont plus proches des observations car le ciel était peu chargé en aérosols ce jour-là par rapport à la moyenne. Les simulations sans ozone soulignent aussi l'impact radiatif important de ce gaz, impact très différent entre les deux codes.
Ces résultats montrent la sensibilité des flux simulés au code radiatif utilisé et met en évidence l'importance de raffiner la représentation du forçage radiatif des aérosols et des gaz actifs. A l'avenir, ils seront ainsi pris en compte de manière pronostique plutôt que climatologique, afin d'améliorer le bilan d'énergie de surface. Le nouveau code permettra également de développer un outil de prévision de la production photovoltaïque.

7

7

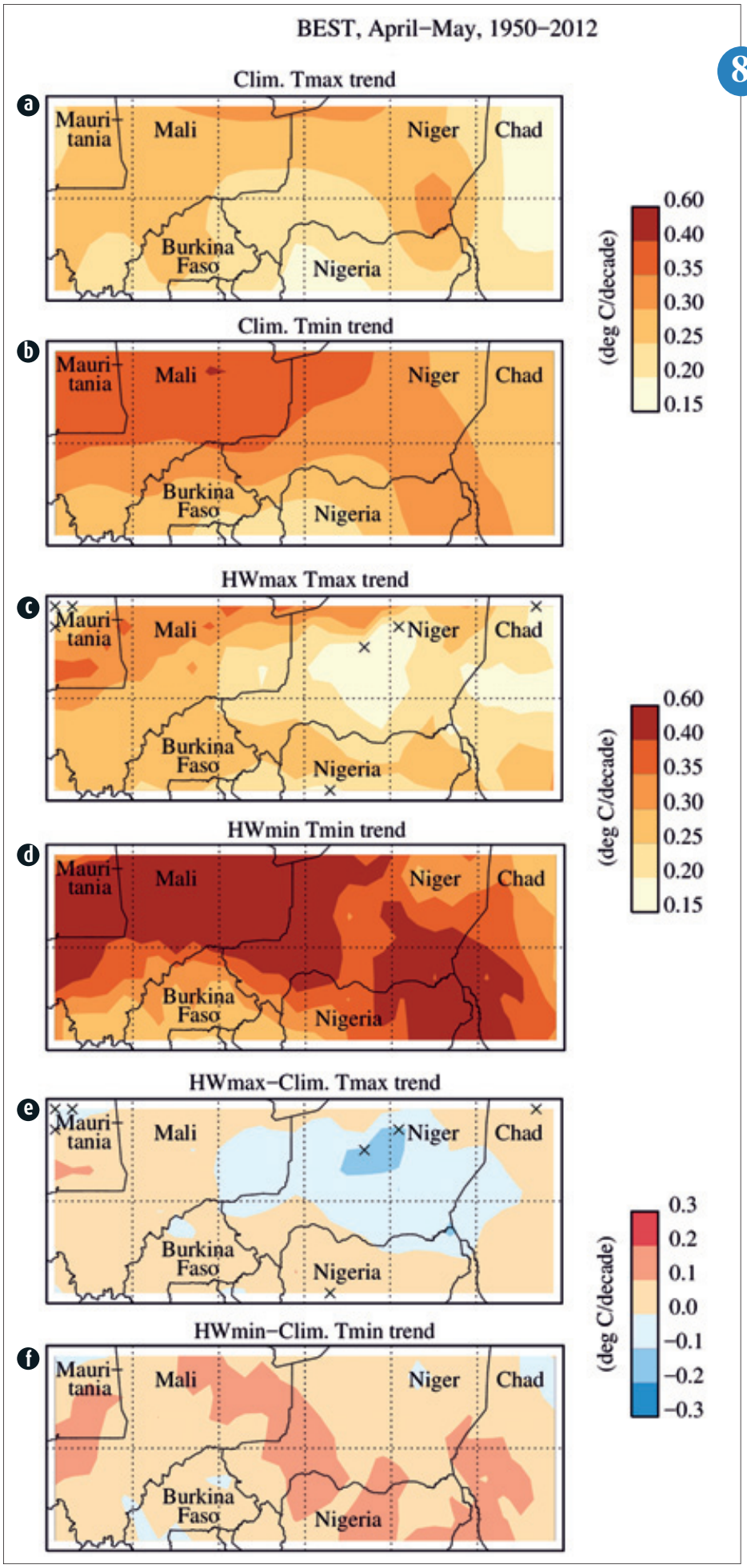


Différence d'irradiance entre les flux solaires descendants simulés et mesurés à Carpentras le 3 juillet 2017 à midi heure locale.
Les mesures de rayonnement sont effectuées avec un pyranomètre et les simulations sont effectuées avec le modèle Méso-NH en utilisant le nouveau code radiatif ou l'original.

Évolution climatique des vagues de chaleur au Sahel

Au Sahel, le cycle annuel de la température présente un maximum marqué au printemps, en avril-mai, juste avant l'arrivée des pluies de mousson. Les températures journalières maximales Tmax (minimales Tmin) sont alors d'environ 40°C (30°C) en moyenne mensuelle. C'est aussi durant cette période de l'année que le réchauffement climatique est le plus fort, atteignant plus de 2°C en 60 ans pour les minima nocturnes (Tmin). Les vagues de chaleur sahéliennes se développent au printemps dans un climat déjà très chaud et qui se réchauffe fortement; elles correspondent donc à des évènements aux répercussions sociétales potentiellement sévères.
Elles sont définies ici comme des évènements météorologiques d'échelle synoptique à intra-saisonnière, et les vagues nocturnes et diurnes sont étudiées séparément. Nous avons analysé comment la tendance climatique moyenne affecte ces vagues de chaleur identifiées à partir d'observations.
Le réchauffement climatique est généralement plus fort dans le nord Sahel, et au premier ordre, les tendances observées pour les vagues sont relativement proches de cette tendance moyenne. Elle est légèrement moindre (plus élevée) pour les vagues de chaleur diurnes (nocturnes) (voir figure). Ces différences font intervenir des circulations atmosphériques et des processus physiques distincts, avec un rôle de la vapeur d'eau sur l'intensification de ces vagues qui appelle des études dédiées. Au-delà, l'influence dominante du réchauffement moyen sur les vagues de chaleur montre qu'il est tout d'abord nécessaire de mieux comprendre le climat moyen, son cycle annuel et ses tendances au Sahel et d'améliorer la modélisation (les simulations climatiques présentent en effet une très grande dispersion au printemps).

8



◀ Carte des tendances climatiques de la température journalière (a) maximale et (b) minimale (Tmax et Tmin) calculées sur avril mai de 1950 à 2012 ; (c) et (d) comme (a) et (b), s auf pour la tendance de Tmax (Tmin) pour les vagues de chaleur diurnes (nocturnes) ; (e) et (f) : différence entre les tendance climatiques et les tendances pour les vagues de chaleur (e=c-a, f=d-b).

Désagrégation du LAI satellitaire pour une meilleure description de la dynamique des couverts végétaux

La dynamique de la croissance de la végétation sur les surfaces terrestres est étroitement liée aux conditions atmosphériques et subit les effets de la variabilité climatique. Par rétroaction sur les échanges d'eau, d'énergie et de carbone, la végétation contribue au changement climatique global. L'indice de surface foliaire (Leaf Area Index, LAI), qui représente la densité du feuillage, est un bon indicateur de la croissance des plantes. Grâce aux observations satellitaires, le LAI est reconstruit à l'échelle du globe à une résolution kilométrique. Cependant, si plusieurs types de végétation (forêt, prairie, etc.) sont présents sur une surface de 1 km2, l'observation satellitaire fournit un LAI moyen et ne permet pas d'accéder au LAI de chaque type de végétation.

Une méthode de désagrégation du LAI a été développée et a permis de produire des cartes mondiales et décadaires de LAI pour chaque type de végétation. Ce nouveau jeu de données a permis d'étudier de façon individuelle l'évolution des différents couverts au cours des deux dernières décennies. Si l'analyse des tendances du LAI montre un verdissement des surfaces terrestres, de fortes disparités entre les types de végétation et les régions du globe sont mises en évidence. Par exemple, ce verdissement global est très marqué pour les forêts de conifères et les cultures d'été, et beaucoup plus faible pour les cultures d'hiver et les prairies. En outre, le nord-est de l'Europe a vu ses forêts verdir contrairement aux cultures et aux prairies qui montrent une tendance négative dans cette région.

Ce nouveau jeu de données permettra d'améliorer le suivi de la végétation, d'analyser les impacts du changement climatique et d'évaluer les modèles de surface utilisés pour l'élaboration des scénarios climatiques.

9

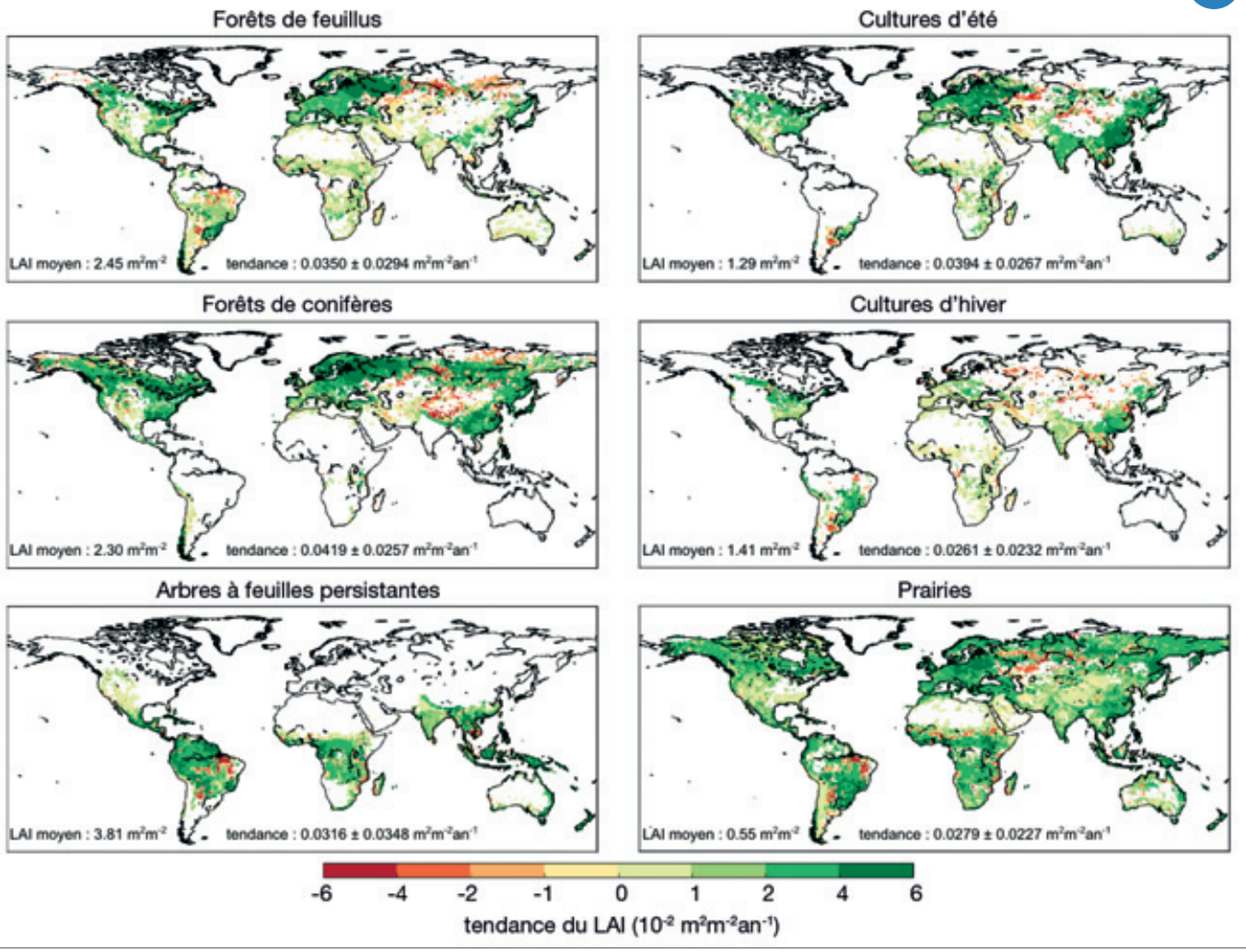
ECOCLIMAP-SG, nouvelle base de données pour les paramètres de la surface

ECOCLIMAP est une base de données globale kilométrique qui décrit les écosystèmes à la surface terrestre. Elle est intégrée à SURFEX qui rassemble plusieurs modèles physiques permettant de simuler l'évolution du milieu considéré (sol, eau, ...). Elle est utilisée par l'ensemble des modèles de Météo-France. En effet, SURFEX est couplé avec les modèles atmosphériques de méso-échelle Méso-NH, AROME et ALADIN ainsi qu'avec les modèles globaux de climat CNRM-CM et bientôt de prévision numérique du temps ARPEGE-PNT. La version originale d'ECOCLIMAP date de 2003, une mise à jour sur l'Europe a été réalisée en 2012.

La modélisation à haute résolution se développe et requiert une description plus fine de la surface. Sa mise à jour plus régulière constitue aussi un enjeu fort. ECOCLIMAP-SG (Seconde Génération) répond à ces deux besoins. Auparavant, la définition des paramètres était

Tendances de l'indice foliaire (*Leaf Area Index,* LAI) sur la période 1999–2015 pour différents types de couvert végétal. Les valeurs représentent le LAI moyen, la tendance moyenne et la disparité géographique.

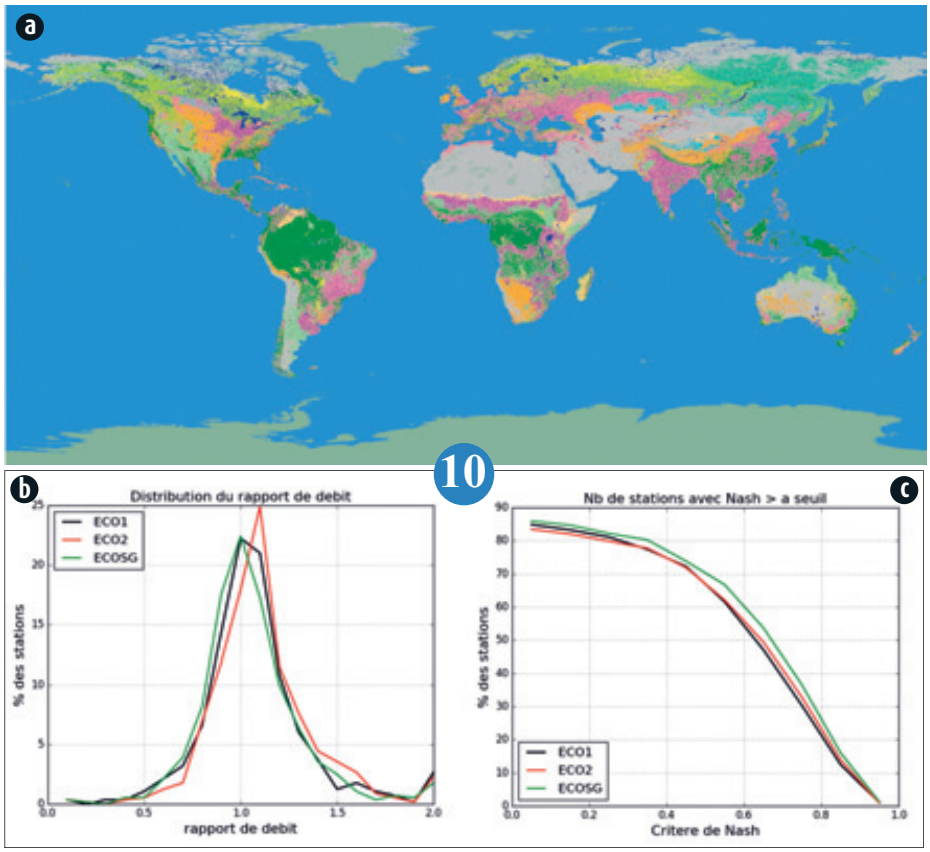
9



a : La carte d'occupation des sols ECOCLIMAP-SG à 300 m de résolution.
b et c : Résultats sur l'application hydrologique SIM : rapport de débit (meilleur = 1) et critère de NASH (meilleur = 1).
ECO1 = ECOCLIMAP1. ECO2 = ECOCLIMAP2. ECOSG = ECOCLIMAP-SG.

étroitement liée à la carte d'occupation des sols. Désormais, cette carte est à 300m de résolution et associée à des cartes de paramètres issues de données satellitaires indépendantes (indice foliaire, albédo, hauteur des arbres...).
Les premiers tests ont été réalisés en mode offline (i.e. guidés par des observations ou des analyses) pour les applications hydrologiques SIM-France et SURFEX-TRIP à l'échelle globale. Les premiers résultats de SIM ont montré une nette amélioration des scores sur les débits des rivières.
Des tests sont également en cours en mode couplé avec Méso-NH et AROME-France. Il s'agit d'évaluer la sensibilité de ces simulations à des variations des paramètres de surface, et le cas échéant de proposer d'ajuster certains de ces paramètres, voire les calculs qui les prennent en compte dans SURFEX, sur lesquels des marges d'incertitudes existent.

10



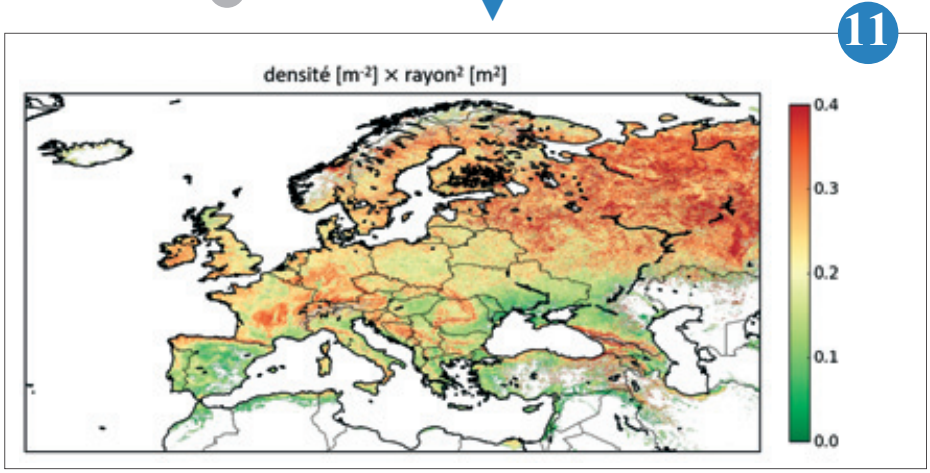
10

Estimation du bilan d'énergie des surfaces terrestres par satellite pour une meilleure caractérisation de la végétation à l'échelle mondiale

La croissance de la végétation dépend du rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre dans la gamme de fréquence utile à la photosynthèse (400-700 nm) appelé le Rayonnement Photosynthétique Actif (PAR en anglais). Avec un nombre grandissant de missions spatiales d'observation de la Terre, il est désormais possible d'avoir une surveillance plus complète du bilan d'énergie dans le PAR qui détermine le processus de photosynthèse. Un modèle à deux couches du bilan d'énergie dans lequel tous les angles d'incidence sont considérés (illumination diffuse) a été développé pour évaluer la cohérence des observations satellite disponibles pour le suivi de la végétation à l'échelle mondiale.
En utilisant des observations satellitaires, on observe que le bilan d'énergie lié au rayonnement diffus est légèrement sous-estimé en Europe mais reste dans l'intervalle théorique d'incertitude. Cela montre que ces observations sont pertinentes pour le suivi de la végétation. L'analyse d'incertitude montre que l'indice de surface foliaire (LAI) « effectif » joue un rôle important dans le bilan d'énergie. Le LAI effectif est composé du « vrai » LAI et d'un facteur de recouvrement exprimant l'hétérogénéité spatiale du feuillage. Ce facteur a un impact direct sur la fraction de rayonnement qui traverse la végétation. A partir des observations disponibles, il est possible d'estimer ce facteur de recouvrement et de le relier à deux caractéristiques physiques de la végétation : la densité et le rayon de la couronne. Cette nouvelle carte des caractéristiques de la végétation améliore le bilan d'énergie en termes de distribution spatiale et temporelle. Des études sont en cours pour attribuer des valeurs à chaque type de végétation afin d'améliorer le bilan d'énergie dans le modèle ISBA.

11

Caractéristiques de la végétation retrouvées à partir des observations satellitaires : densité [m^{-2}] multipliée par le carré du rayon de la couronne [m].
La carte de la combinaison de ces deux paramètres de la végétation présente de fortes similitudes avec la carte d'occupation des sols comme ECOCLIMAP qui est utilisée dans ISBA.



11

Composition atmosphérique : aérosols, microphysique et chimie

La pollution de l'air cause près de 50000 décès prématurés par an en France, et environ 10 fois plus en Europe, constituant un enjeu sanitaire majeur. Cela justifie des mesures visant à améliorer la qualité de l'air mais aussi, dans le périmètre d'activités de Météo-France, des activités de recherche afin de mieux comprendre et modéliser la composition atmosphérique des basses couches de l'atmosphère, avec pour finalité des prévisions toujours plus fiables pour alerter les populations et les pouvoirs publics.

Le modèle de recherche et de prévision MOCAGE de Météo-France fait partie des chaînes opérationnelles de prévision de la qualité de l'air de la plate-forme nationale Prév'Air et du projet européen Copernicus CAMS_50. En 2017, le modèle s'est enrichi d'une représentation des pollens d'olivier et de graminées, qui comptent parmi les plus allergènes. Par ailleurs, une étude alliant modélisation et observations Lidar a porté spécifiquement sur l'hiver 2016-2017, qui a été ponctué de plusieurs épisodes remarquables de pollution aux particules fines associés à des couches d'inversion très basses. Utilisé depuis sa création en mode hors ligne, MOCAGE est désormais l'un des trois modèles de chimie en ligne au sein du modèle de prévision météorologique IFS du CEPMMT. Cette approche permet notamment d'inter-comparer les modèles entre eux, et représente une solution d'avenir, en particulier pour les applications à très haute résolution spatiale.

Il est également nécessaire de représenter la composition atmosphérique dans les modèles de climat, en particulier les aérosols en raison de leurs interactions avec la microphysique nuageuse et le rayonnement. Cela se traduit par le développement du schéma simplifié Tactic au sein d'ARPEGE et ALADIN-Climat, qui permet de disposer d'une représentation réaliste des aérosols pour un coût numérique modéré. Cette approche permettra pour la première fois de mener de nombreuses simulations longues avec aérosols interactifs dans le cadre de l'exercice international CMIP6.

1

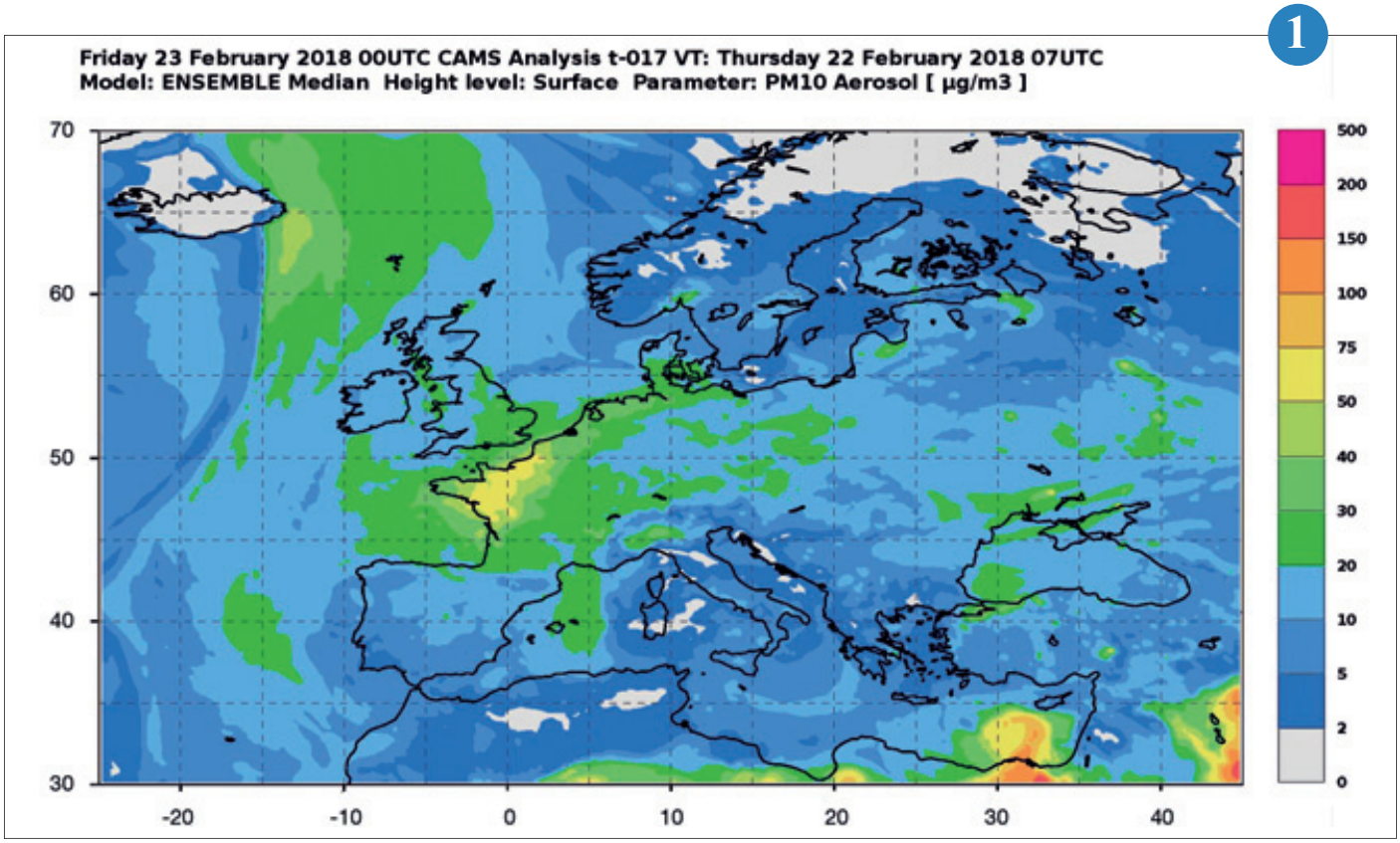
Le schéma d'aérosols TACTIC pour l'étude des interactions aérosols-climat

Les aérosols jouent un rôle essentiel au sein du système climatique à cause de leurs interactions avec le rayonnement et les nuages, et le forçage qui en résulte est toujours soumis à de fortes incertitudes.

Afin de mieux comprendre ces interactions et de pouvoir quantifier l'impact des aérosols sur le climat global et régional, un schéma d'aérosols pronostiques nommé TACTIC est maintenant incorporé dans les modèles de climat du CNRM. Ce schéma, développé depuis plusieurs années au CNRM en coordination avec le CEPMMT, permet de représenter les principaux types d'aérosols naturels et anthropiques de manière réaliste, à un coût numérique abordable pour de longues simulations climatiques. La figure représente les aérosols inclus dans TACTIC, et les paramétrisations des différents processus associés. Les travaux de cette année ont notamment permis d'améliorer la représentation des émissions naturelles (sels marins et poussières désertiques), ainsi que celle du cycle du soufre en prenant en compte les réactions chimiques engendrant la formation de sulfates. Un module permettant de simuler les aérosols de nitrates et d'ammonium dont la contribution au forçage des aérosols anthropiques devrait augmenter d'ici la fin du XXIe siècle a également été ajouté. Tous les aérosols ainsi produits peuvent interagir avec le rayonnement et les nuages, et avoir des impacts sur le climat global et régional.

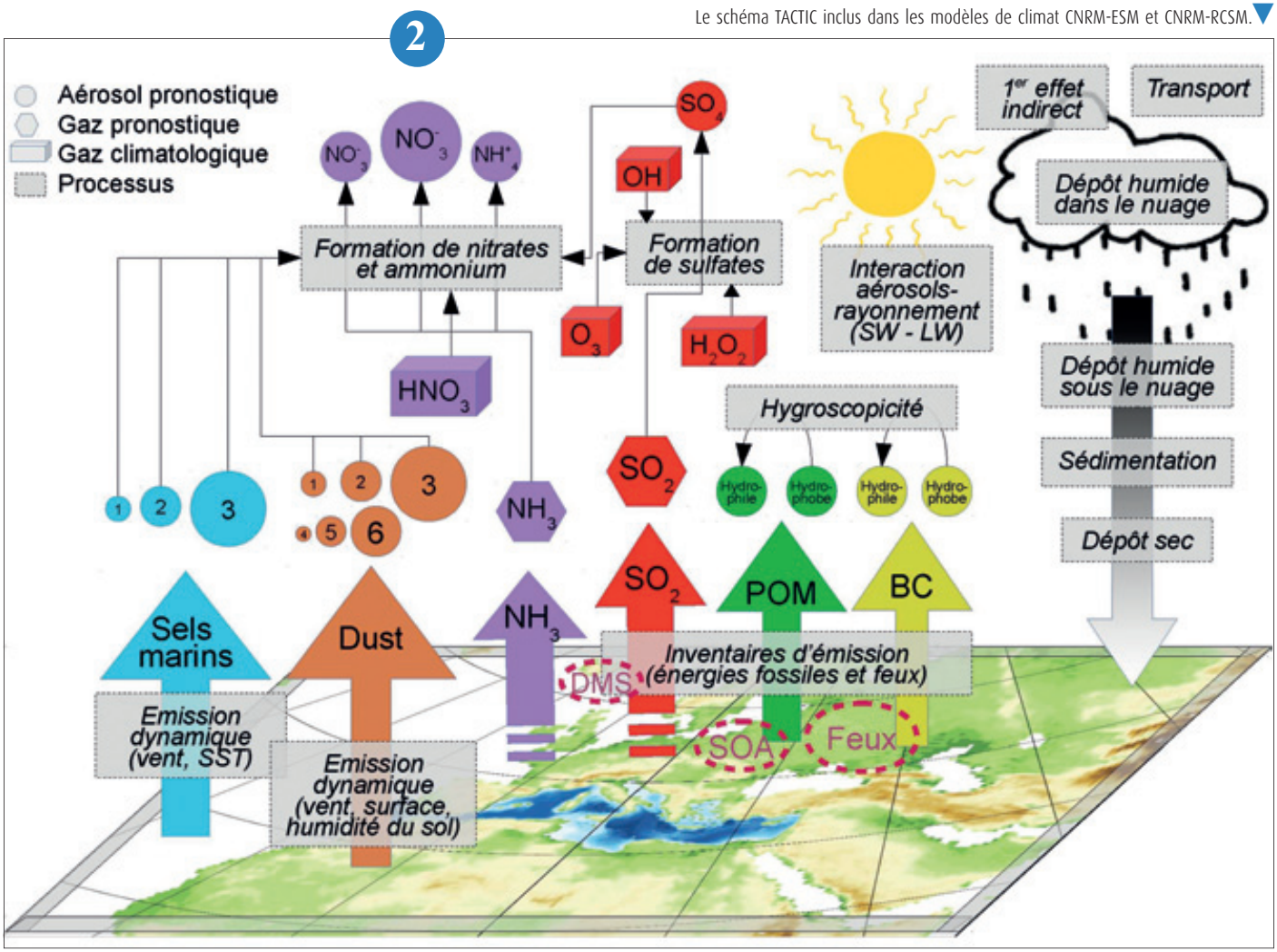
Le schéma TACTIC sera inclus dans les simulations climatiques globales (CNRM-ESM) et régionales (CNRM-RCSM) du CNRM qui seront réalisées pour les exercices internationaux CMIP6 et Med-CORDEX.

2



▲ Épisode de pollution aux particules fines (PM10) sur l'Ouest de la France. L'analyse d'ensemble de la concentration PM10 sur le domaine Europe pour la journée du 22/02/2018 a été produite dans le cadre du projet européen Copernicus CAMS_50 porté par Météo-France. L'ensemble comporte 7 modèles, dont le modèle MOCAGE développé au CNRM.

Le schéma TACTIC inclus dans les modèles de climat CNRM-ESM et CNRM-RCSM. ▼



La chimie de MOCAGE dans le modèle de prévision IFS du CEPMMT

Dans le cadre du programme européen Copernicus, le CEPMMT continue de développer et d'améliorer la prévision journalière de la composition de l'air à l'échelle du globe de la surface à 65 km d'altitude.
Trois modules de chimie décrivant les processus chimiques à la fois dans la troposphère et dans la stratosphère sont désormais implémentés dans le modèle de prévision météorologique opérationnel IFS du CEPMMT. L'un d'eux est le module provenant du modèle MOCAGE. MOCAGE est développé par Météo-France où il est utilisé pour la recherche et opérationnellement pour la prévision de la qualité de l'air sur la France et l'Europe. Récemment, une évaluation complète des trois modules de chimie dans IFS a été réalisée en comparant la composition chimique fournie sur une année complète (2011) à un large panel d'observations faites au sol, à bord d'avions et de satellites. La figure illustre les performances des trois modules de chimie (couleurs) pour différentes espèces chimiques (symboles), calculées par comparaison avec des données récoltées lors de campagnes de mesures avion. Elle montre que les trois configurations de l'IFS donnent des résultats réalistes par rapport aux mesures, avec des disparités suivant les espèces chimiques et les modules de chimie considérés.
Ce travail d'évaluation extensif permet de mieux comprendre les qualités et les défauts de chaque module chimique et sert de base pour proposer des améliorations à ces trois systèmes.

3

Prévision des pics de pollution hivernaux aux particules en présence de couches d'inversions basses

Depuis l'adoption de la loi LAURE en 1996, la prévision des pics de pollution est un enjeu majeur en matière de santé publique. Durant l'hiver, les particules fines (PM10 et PM2.5) sont l'une des principales sources de pollution. Leurs pics de concentrations atmosphériques sont d'autant plus difficiles à modéliser qu'ils sont généralement associés à une couche d'inversion très basse, ce qui piège les polluants au sol. Déterminer avec précision la hauteur maximale à laquelle injecter les émissions dans le modèle de transport-chimie MOCAGE est donc primordial.
Une étude menée sur les épisodes de pollution aux particules fines de l'hiver 2016/2017 a permis de corréler objectivement des hauteurs de couche limite très faibles mesurées par un lidar à Trappes à de fortes concentrations (Fig.) en PM10 au sol sur l'agglomération parisienne. Les deux pics observés entre le 30 novembre et le 10 décembre, à plus de 100 µg/m³, sont ainsi liés à une couche limite ne dépassant pas 200 mètres de haut. Inversement, quand la couche limite est bien développée, début novembre, les concentrations mesurées sont faibles.
Dans le cadre des prévisions de qualité de l'air avec le modèle MOCAGE, les émissions sont réparties sur les 5 niveaux du modèle les plus proches du sol, soit une hauteur de 500 mètres environ. Lors des épisodes de l'hiver 2016/2017, une part des émissions est donc injectée au-dessus de la couche d'inversion, et donc non piégée, empêchant le modèle de prévoir correctement ces pics. En réduisant le nombre de niveaux d'injection à 3 (environ 180 m), MOCAGE simule correctement les pics (courbe orange).
Un diagnostic de hauteur de la couche limite va donc être introduit dans le modèle MOCAGE pour limiter le nombre de niveau d'injection des émissions en fonction de celle-ci.

4

Prévisions de pollens d'oliviers et de graminées à l'échelle de l'Europe

En 2013, Météo-France participait à la première prévision déterministe d'ensemble des concentrations atmosphériques en pollens de bouleau sur l'Europe. Dans le cadre du projet européen Copernicus CAMS_50, ces prévisions ont été étendues aux pollens d'oliviers et de graminées, reconnus par l'OMS comme parmi les plus allergènes et donc enjeux stratégiques de santé publique.
Les flux d'émissions sont calculés par deux paramétrisations, développées par le FMI, utilisant les champs de vent, d'humidité et de précipitations. Pour les oliviers, l'accumulation de chaleur depuis le début de l'année est aussi prise en compte. L'émission débute dès que le réchauffement dépasse un seuil (variable géographiquement), et stoppe dès que le nombre maximal de grains qu'un olivier peut émettre est atteint. Pour les graminées, la paramétrisation se base sur une probabilité d'émission autour de dates déduites d'observations passées.
Ces prévisions ont été validées sur la saison 2014, et sont opérationnelles depuis la saison 2016, le projet CAMS_50 fournissant quotidiennement les prévisions à 96h sur l'Europe de 7 modèles de transport-chimie, dont le modèle MOCAGE de Météo-France, ainsi qu'une prévision d'ensemble. Les modèles sont forcés par les champs météorologiques du modèle opérationnel du CEPMMT.
La redistribution spatio-temporelle des pollens d'oliviers est correctement modélisée par MOCAGE et reste proche de l'ensemble médian (Fig. a). De même, les comparaisons modèle/observations montrent une bonne détermination de la date de début de pollinisation par les graminées, avec cependant certaines surestimations des pics en fonction de la localisation (Fig. b).
L'année prochaine, l'extension aux pollens d'ambroisie est prévue.

5

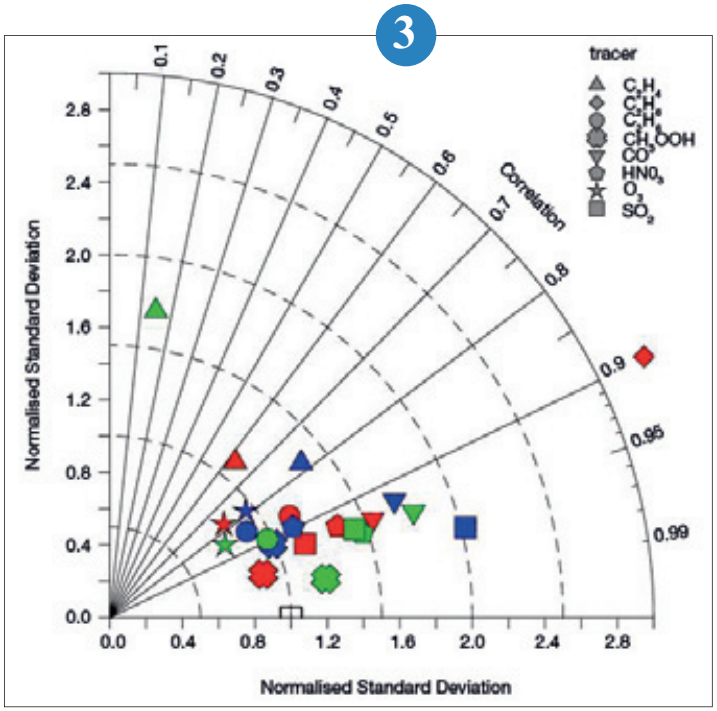
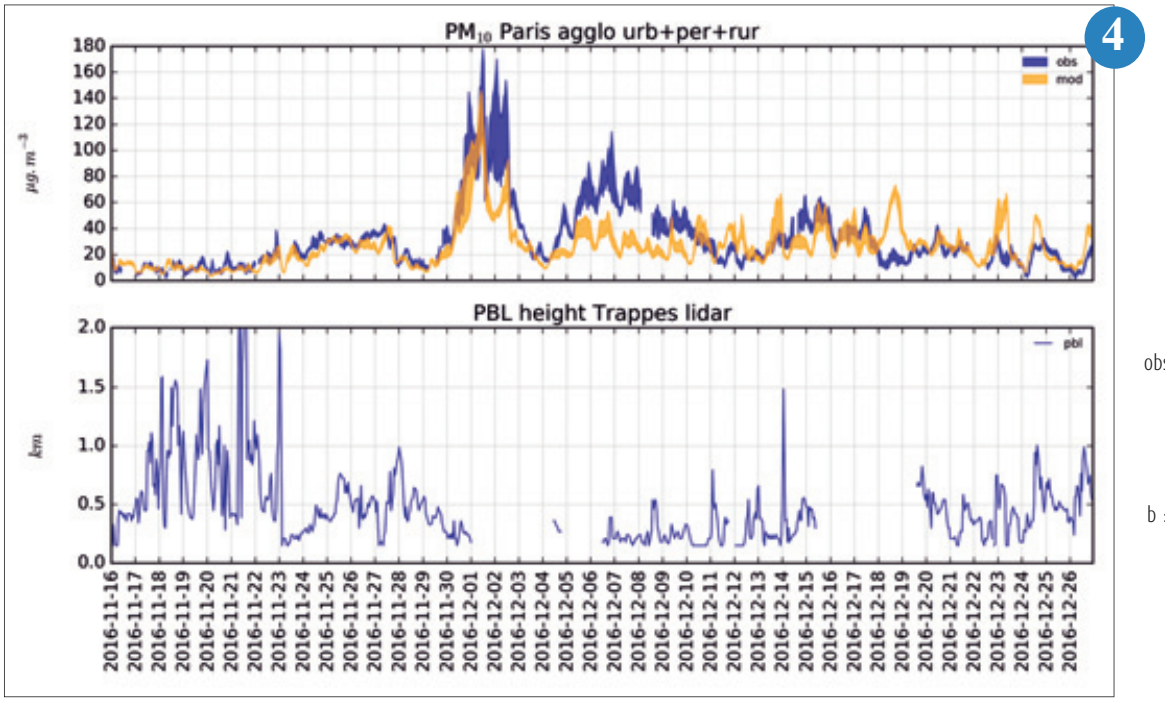
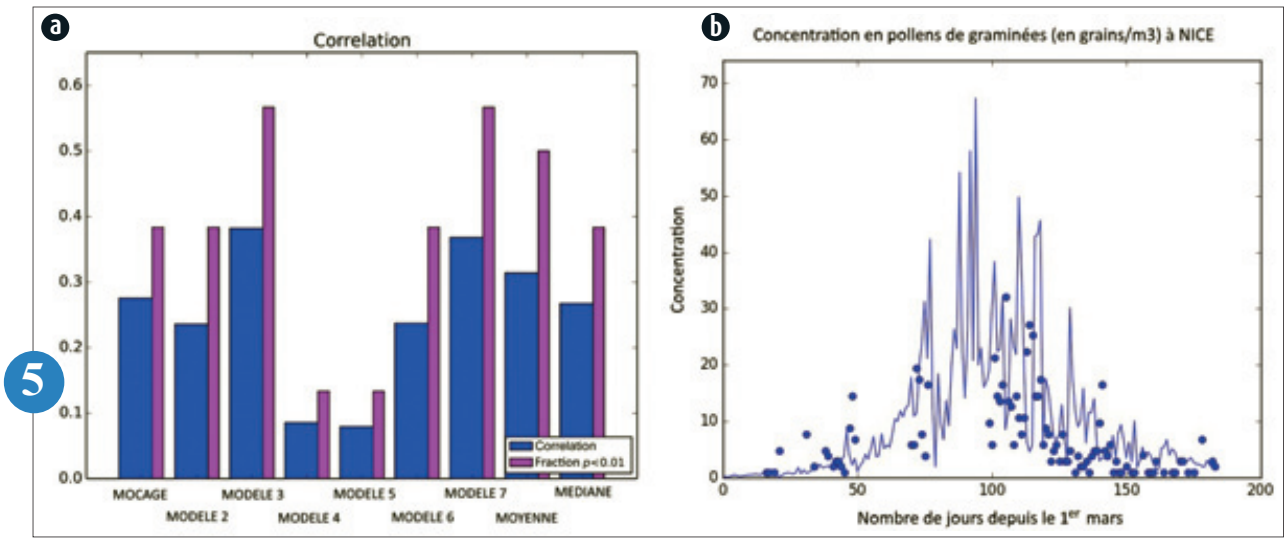


Diagramme de Taylor montrant l'écart et la corrélation pour plusieurs espèces chimiques entre les résultats des simulations IFS et les données récoltées lors de campagnes de mesures avion. Le modèle est d'autant meilleur qu'il se rapproche du rectangle noir en bas de la figure. Les trois modules de chimie sont représentés par des couleurs, et les différentes espèces chimiques par des symboles.

Concentrations en PM10 (µg/m³) mesurées (en bleu) et prévues par le modèle MOCAGE (en orange) au sol à Paris (graphique du haut) et hauteur de la couche limite (en km) mesurée par le lidar de Trappes (graphique du bas).



a : Corrélation entre les observations et les concentrations en pollens d'olivier prévues par les 7 modèles sur l'Europe durant la saison 2014, ainsi que la moyenne et la médiane des modèles.
b : Concentrations atmosphérique en pollens de graminées (en grain/m³), à la surface à Nice, prévues par le modèle MOCAGE (courbe) et observées (point) durant la saison 2014 (1er mars au 31 août).



Évolution de l'ozone dans la haute troposphère aux moyennes latitudes, observée par IAGOS

Plusieurs rôles environnementaux sont attribués à l'ozone atmosphérique. Son impact sur la température de surface est maximal à l'interface entre troposphère et stratosphère, que l'on nomme HTBS.

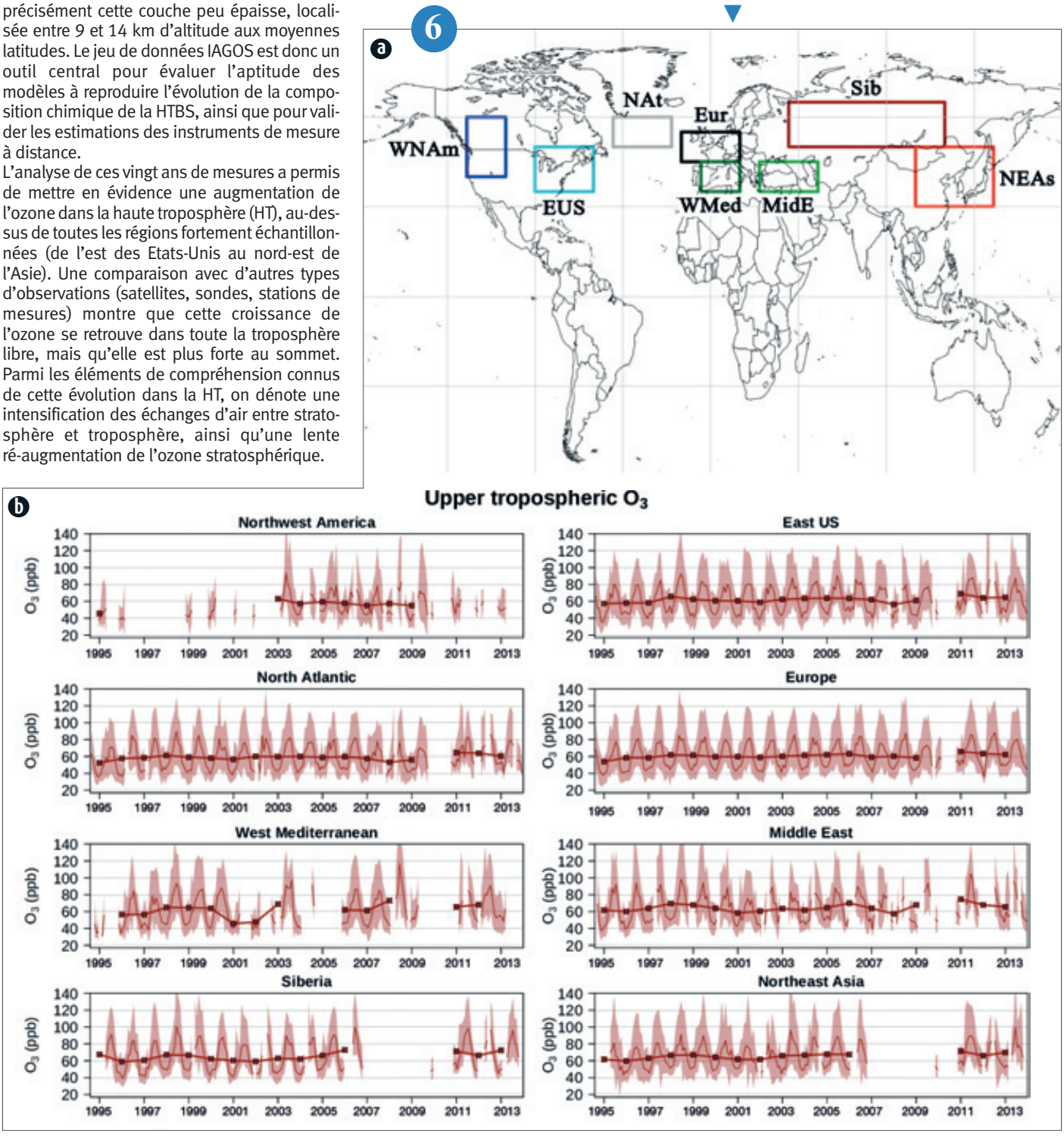
Depuis 1994, le système d'observations IAGOS effectue des mesures in situ de plusieurs espèces chimiques dans la HTBS à bord d'avions commerciaux, dont l'ozone, dans les moyennes latitudes de l'hémisphère nord. La résolution verticale est optimale pour sonder précisément cette couche peu épaisse, localisée entre 9 et 14 km d'altitude aux moyennes latitudes. Le jeu de données IAGOS est donc un outil central pour évaluer l'aptitude des modèles à reproduire l'évolution de la composition chimique de la HTBS, ainsi que pour valider les estimations des instruments de mesure à distance.

L'analyse de ces vingt ans de mesures a permis de mettre en évidence une augmentation de l'ozone dans la haute troposphère (HT), au-dessus de toutes les régions fortement échantillonnées (de l'est des Etats-Unis au nord-est de l'Asie). Une comparaison avec d'autres types d'observations (satellites, sondes, stations de mesures) montre que cette croissance de l'ozone se retrouve dans toute la troposphère libre, mais qu'elle est plus forte au sommet. Parmi les éléments de compréhension connus de cette évolution dans la HT, on dénote une intensification des échanges d'air entre stratosphère et troposphère, ainsi qu'une lente ré-augmentation de l'ozone stratosphérique.

A l'avenir, d'autres éléments de compréhension pourront être amenés par l'ajout récent d'espèces chimiques aux mesures du système IAGOS, ainsi que par l'extension de leur couverture géographique grâce à des partenariats récents avec des compagnies aériennes du secteur Pacifique.

6

a : Définition des régions étudiées dans cet article : Amérique nord-ouest (WNAm) ; est des Etats-Unis (EUS) ; Atlantique nord (NAt) ; Europe de l'ouest (Eur) ; bassin ouest méditerranéen (WMed) ; Moyen-Orient (MidE) ; Sibérie (Sib) ; nord-est de l'Asie (NEAs).
b : Séries temporelles de l'ozone (en ppb) dans la Haute Troposphère (HT), dans les 8 régions étudiées ici.
Les moyennes mensuelles sont représentées en trait fin. L'enveloppe rouge correspond à l'écart entre les valeurs les plus basses et les plus hautes au cours d'un même mois (les centiles 5 et 95, respectivement). Les moyennes annuelles valides sont illustrées par une courbe en gras, ponctuée par des cercles noirs. Noter que l'Amérique nord-ouest n'est pas échantillonnée sur une période assez longue pour pouvoir en déduire une tendance robuste.



Climat

Au cours de la saison cyclonique 2017 de l'Atlantique Nord, les Antilles ont été durement frappées par les trois cyclones Irma, José et Maria, entraînant des pertes en vies humaines et des dégâts considérables. Quelques mois plus tôt, lors d'une vague de chaleur précoce, l'hexagone connaissait le 21 juin la journée la plus chaude (26,4°C) pour un mois de juin depuis le début des relevés.
Météo-France est en charge de la prévision météorologique de tels événements extrêmes et contribue également aux progrès des connaissances sur leur évolution récente et future dans le contexte du réchauffement climatique. Dans cet esprit, le CNRM a effectué cette année des simulations climatiques globales à haute résolution sur les Antilles en mettant en œuvre ARPEGE-Climat. Ces nouvelles simulations seront exploitées par le CNRM et la direction inter-régionale Antilles-Guyane dans le cadre du projet FEDER CA3F afin d'évaluer quel est le lien entre changement climatique et évolution des cyclones. Toujours sur le plan des extrêmes, les activités de recherche ont également porté cette année sur les impacts des tempêtes en France au XX^{e} siècle et sur l'évolution des fortes pluies sur l'arc méditerranéen. Par ailleurs, suite à des travaux récents, il sera désormais possible de prolonger la caractérisation en temps réel des vagues de chaleur par une estimation de leur évolution probable à quelques jours, sur la base de prévisions météorologiques.
L'exploitation de prévisions saisonnières peut apporter des informations sur la probabilité d'occurrence de certains événements extrêmes tels que les canicules ou les vagues de froid dans nos régions, cela quelques mois à l'avance. Le système de prévision saisonnière de Météo-France capitalise sur le modèle de système climatique couplé global CNRM-CM initialisé par des ré-analyses. Après une phase de développement de plus de 4 ans, la version 6 de ce modèle permettra de réaliser un nouvel ensemble de simulations climatiques en amont du 6e rapport d'évaluation du GIEC.

1

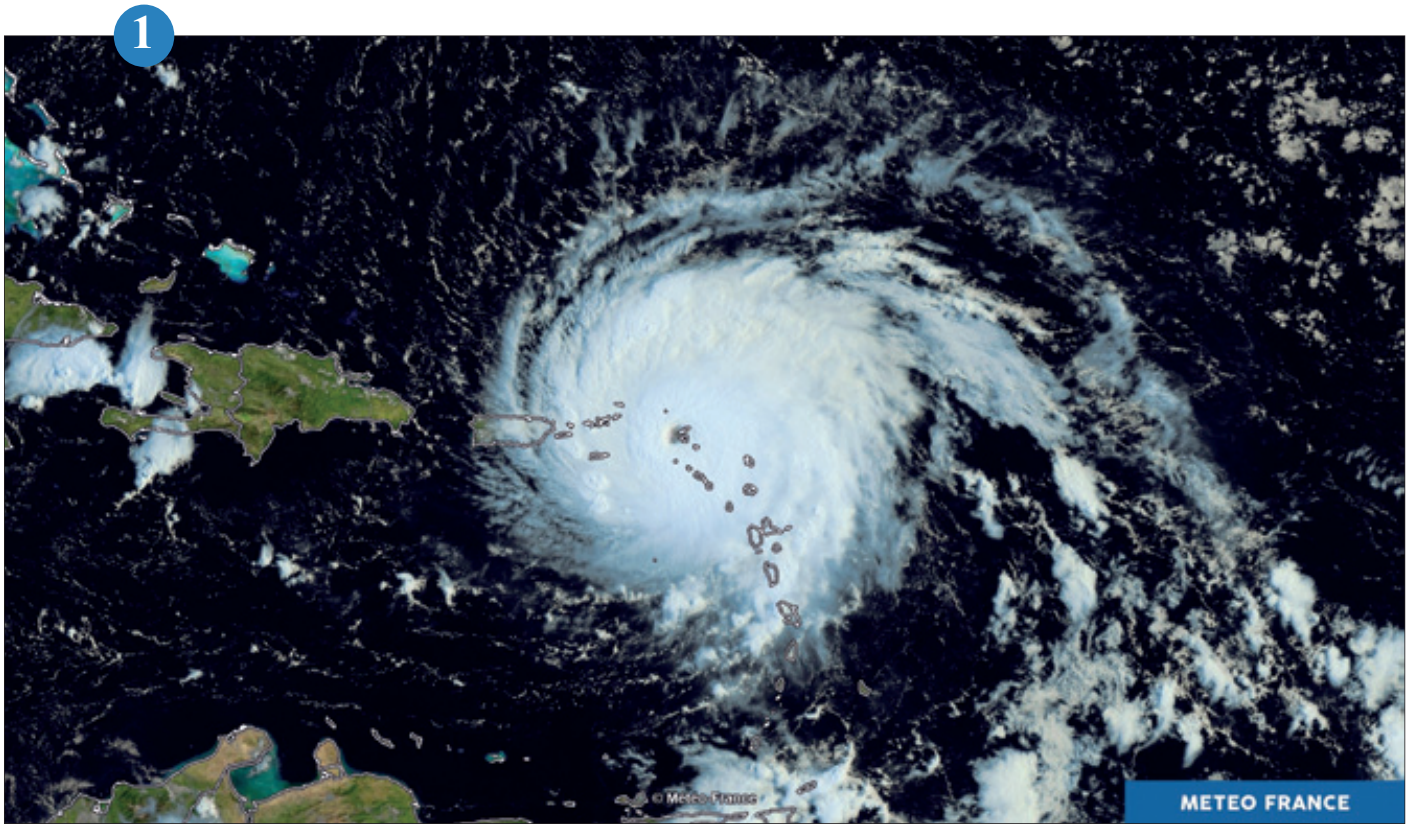


Image du satellite GOES13, le 06/09/2017 à 12h00 UTC : après s'être encore renforcé au cours de la nuit, l'ouragan Irma poursuit sa route en direction de l'ouest. Après Saint-Barthélemy, l'île de Saint-Martin affronte l'œil du cyclone.
© Météo-France.

Étude du climat

Impact de l'anomalie froide de l'Atlantique Nord sur l'été 2015 en Europe

A compter de l'hiver 2014-2015, une anomalie froide a persisté en surface et sur les 700 premiers mètres de l'océan Atlantique Nord entre l'Islande et Terre Neuve pendant près de deux ans. Le CNRM a exploré à l'aide du système 5 de prévision saisonnière de Météo-France l'hypothèse formulée dans des travaux de Duchez et al. (2016) d'une influence de cette anomalie froide sur l'occurrence d'un été anormalement chaud en 2015.

Plusieurs ensembles de prévisions initialisées au 1er mai 2015 et couvrant la saison de juin à août (JJA) ont été réalisés en rappelant la composante océanique NEMO en surface vers des données de référence provenant de la ré-analyse océanique GLORYS2V3 de Mercator-Océan. Le rappel est effectué uniquement sur la région de l'anomalie froide ou sur l'ensemble du globe.

L'étude de la distribution des prévisions d'ensemble pour l'été 2015 par rapport à une période de référence de 1993 à 2014 (Fig.) montre que le système 5 sans rappel ne reproduit pas l'anomalie chaude de température de surface observée sur la région d'Europe Centrale (CE), et que le rappel océanique sur la zone de l'anomalie froide (RANO) ne permet pas de modifier le signal en température de surface sur l'Europe de manière systématique. Avec un rappel global (RGLO), le modèle parvient à reproduire une anomalie chaude compatible avec l'observation, principalement lors des mois de juillet et août. Toutefois, la réponse de la circulation atmosphérique dans le système couplé est faible et suggère que d'autres phénomènes ont contribué aux vagues de chaleur observées sur la région.

La suite de cette étude consistera à explorer d'autres sources de prévisibilité (comme les conditions de surface) et d'étendre l'analyse aux échelles de temps intra-saisonnières.

2

Data Rescue dans l'Océan Indien occidental

L'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a lancé l'initiative de sauvetage de données anciennes climatologiques dans l'Océan Indien (INDARE) pour accélérer la récupération et améliorer la qualité des observations météorologiques de cette zone géographique, dont les bases de données nationales et internationales contiennent très peu de données climatologiques antérieures à 1961.

En 2017, suite à la demande de l'OMM, Météo-France a élaboré un plan de mise en œuvre pour le sauvetage des données climatologiques de Madagascar impliquant la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar (DGM) et Météo-France.

Un premier travail de recherches et d'analyse a permis de récupérer, de classer et d'inventorier toutes les publications numérisées et disponibles en ligne, contenant des observations météorologiques sur la période 1889-1960 à Madagascar, les Comores et Mayotte.

En 2017, dans le cadre du partenariat Météo-France/Archives nationales, 33 cartons d'archives du climat de l'Océan Indien occidental de la période 1864-1961, provenant du fonds historique de la météorologie française, ont été mis à la disposition de Météo-France. La Direction de la Climatologie et des Services Climatiques a rapidement lancé des actions de restauration, d'inventaire et de numérisation en mode image des tableaux climatologiques mensuels de 26 stations météorologiques sur la période 1947-1961.

Le premier objectif de l'action de Météo-France, qui vise à inventorier et à partager les ressources avec les autres services météorologiques et projets internationaux, sera poursuivi pendant les deux prochaines années.

3

Caractérisation des vagues de chaleur en mode anticipé

Une approche « sans couture » mixant observations et prévisions a été développée pour appréhender en temps réel les caractéristiques « probables » d'une vague de chaleur en cours ou prévue et permettre sa qualification en comparaison aux évènements passés.

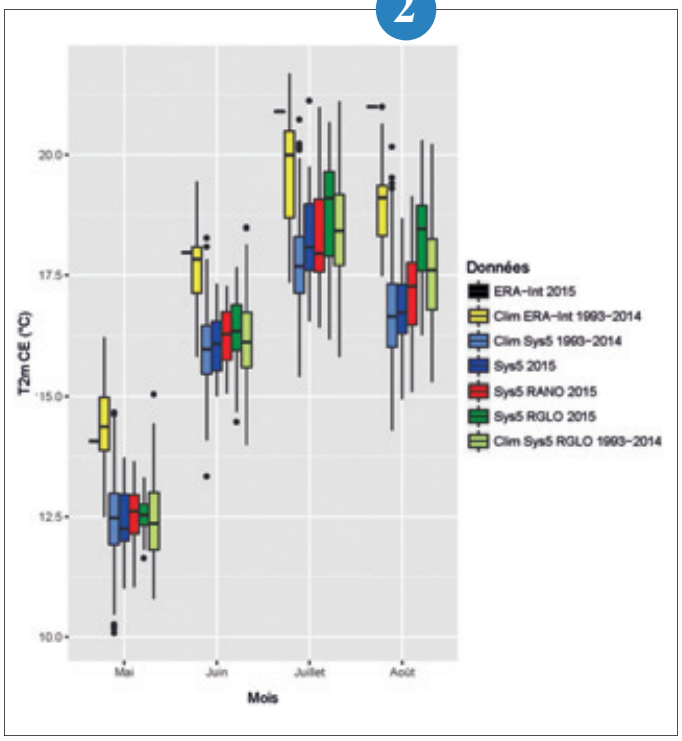
Elle s'appuie sur une méthode d'identification des vagues de chaleur applicable à toute série chronologique de températures quotidiennes. Un ensemble de seuils construit à partir de la distribution de la série est utilisé pour repérer la survenue d'un épisode, en déterminer les dates de début et de fin et en estimer la sévérité.

Cette méthode est mise en œuvre sur un indicateur de température en France, constitué de la moyenne des températures quotidiennes de trente villes réparties de manière homogène sur le territoire. En mode prévisionnel, cet indicateur s'appuie sur les adaptations statistiques des prévisions d'ensemble à quatorze jours pour ces mêmes villes, élaborées par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Les cinquante-et-une séries constituées de l'aboutement de la série observée avec chaque réalisation du modèle sont ensuite injectées dans l'algorithme d'identification des vagues de chaleur. La part des réalisations détectant une vague de chaleur permet alors d'apprécier sa probabilité, mais aussi d'estimer ses caractéristiques probables : durée, pic de chaleur maximal et sévérité globale.

De par l'utilisation d'un indicateur national de température, l'approche reste globale sur la France. Pour appréhender les spécificités géographiques des épisodes, la méthode sera prochainement déclinée aux échelles régionale et départementale, à partir d'indicateurs de températures quotidiennes observés et prévus sur ces mêmes domaines.

4

2

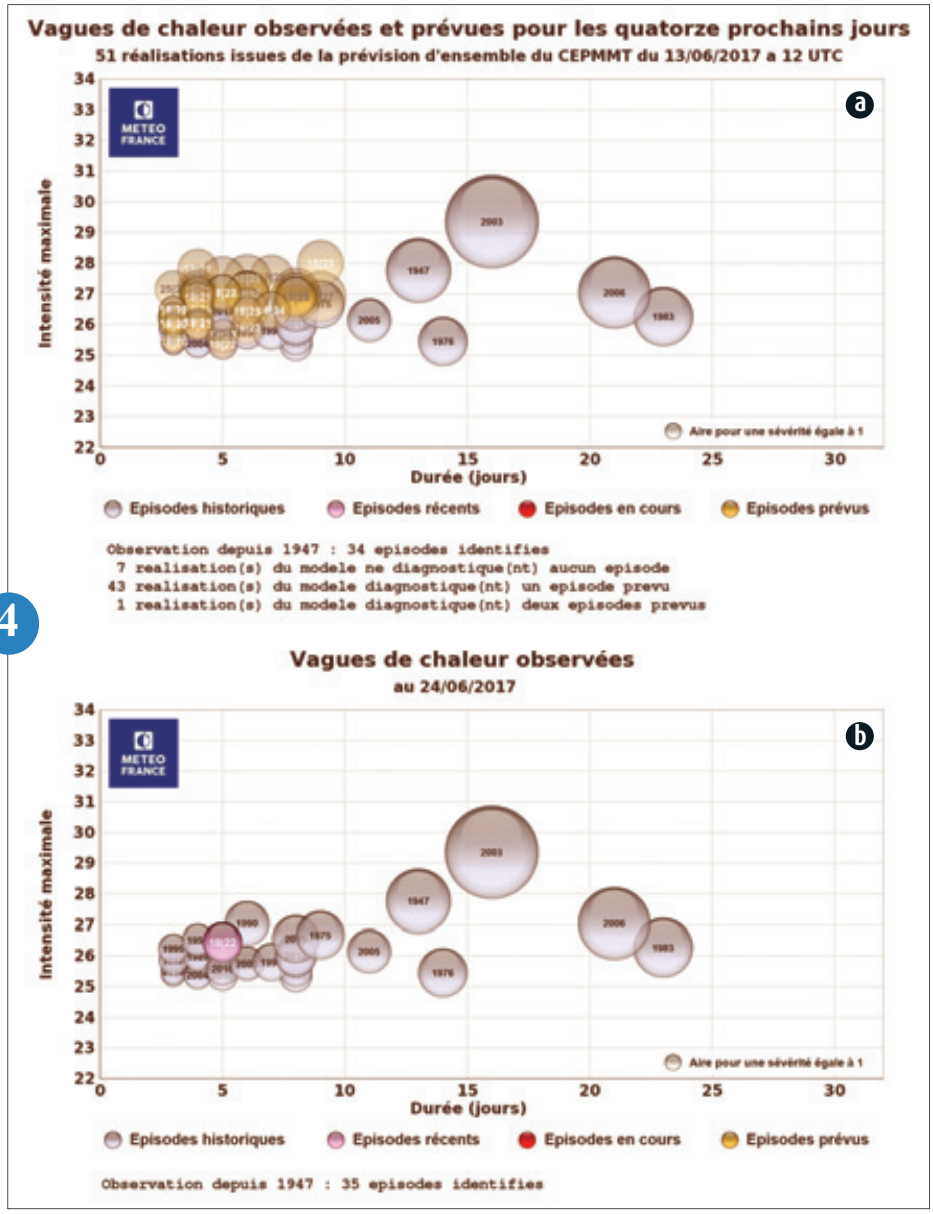


Impact du rappel de l'océan de surface sur la zone de l'anomalie (RANO, en rouge) ou global (RGLO, en vert) sur la distribution (boîtes à moustaches) des températures à 2 m moyennes (T2m) sur la boîte Europe Centrale (CE) dans les prévisions saisonnières d'ensemble de l'été 2015 avec le système 5 (référence, en bleu), en fonction du mois de la prévision. Les données de référence (ERA-Interim) sont désignées par un trait noir pour 2015, et la distribution jaune pour la période 1993-2014. Les climatologies du système 5 sans et avec rappel global sur la période 1993-2014 sont montrées en bleu et vert clair, respectivement.

3

Tableau Climatologique Mensuel de la station Vohemar (Madagascar), janvier 1960.

4



Prévisions d'ensemble du 13 juin 2017 à 12 UTC de la vague de chaleur qui débutera le 18 du même mois (figure a) et caractérisation à posteriori de l'épisode (figure b) : la durée de l'épisode et la valeur maximale de l'indicateur de température sont représentées respectivement en abscisses et en ordonnées tandis que l'aire des symboles traduit la sévérité globale de l'événement.

Prise en compte statistique de l'urbanisation pour la spatialisation des températures en région parisienne

Des cartes de températures minimales et maximales quotidiennes en Ile-de-France prenant en compte l'occupation des sols sont élaborées. Des paramètres dérivés (Degrés Jour Unifiés DJU de chauffe et de refroidissement) peuvent en être déduits.
À partir d'observations météorologiques (2000 à 2015) et de métadonnées (altitude et fraction urbaine), une équation de régression est déduite pour chaque jour (sa pertinence étant vérifiée par validation croisée). Les écarts à cette régression sont ensuite spatialisés par interpolation optimale sur une grille fine. Les températures minimales dépendent très souvent de la fraction urbaine, et cette dépendance est légèrement plus fréquente au printemps et en été. Les températures maximales sont très souvent dépendantes de l'altitude.

À partir de ces données quotidiennes en points de grille, on calcule des DJU, qui précisent, pour une saison de chauffe ou de refroidissement, quelle serait l'énergie consacrée au maintien du confort thermique. La sensibilité des DJU de refroidissement à la prise en compte – ou non – de la fraction de ville est considérable, dépassant 30%. D'autres paramètres climatologiques (moyennes mensuelles et saisonnières) seront analysés.
Ces travaux permettront de connaître finement le phénomène d'îlot de chaleur urbain à Paris, et ce d'autant plus par la prise en compte, une fois disponibles et validées, de mesures de réseaux plus denses en zone urbaine.

5

Détection et impact des tempêtes sur la France au XX^{e} siècle

Les tempêtes de l'Atlantique Nord épousent des trajectoires qui atteignent souvent l'Europe de l'Ouest, dont la France, occasionnant parfois des rafales de vent et des dégâts très importants. La connaissance climatologique de ces tempêtes est en progrès constant depuis quelques années, mais leur impact dû au vent reste encore difficile à appréhender.
La récente ré-analyse ERA20C du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT), dont la durée s'étend sur plus d'une centaine d'années, est utilisée pour calculer une climatologie des tempêtes grâce à un algorithme automatique de détection des trajectoires de dépressions de l'Atlantique Nord. Par ailleurs, on calcule un indice de pertes économiques basé sur la puissance destructrice du vent en surface (reliée au cube de la force du vent) sensible à la densité de population (Pinto et al. 2007). Grâce à cet indice, on peut étudier les jours du siècle où il atteint ses plus fortes valeurs sur toute la période. Pour aller plus loin, pour chaque trajectoire identifiée, nous avons extrait les valeurs de vents associées et calculer l'indice de pertes correspondant à cette trajectoire (cf. Figure a). Cela permet de mettre en évidence les zones d'impact liées à un groupe de tempêtes comme celles affectant la France par exemple. On constate qu'on peut les séparer en deux classes, selon leur position par rapport au Jet Atlantique basse-fréquence. Cela a une incidence sur leur cycle de vie et donc leur intensité. Certaines restent au nord du Jet toute la durée de leur cycle de vie, quand une majorité d'entre elles le croisent du Sud vers le Nord. De nombreuses études de cas ont montré que ces dernières peuvent être associées à des tempêtes dont l'intensification est très rapide. Grâce à cette étude, nous avons pu généraliser ce résultat et le corroborer en terme d'impact. En effet, l'indice d'impact de toutes ces tempêtes atteint son maximum au moment où celles-ci croisent le Jet (cf. Figure b).

6

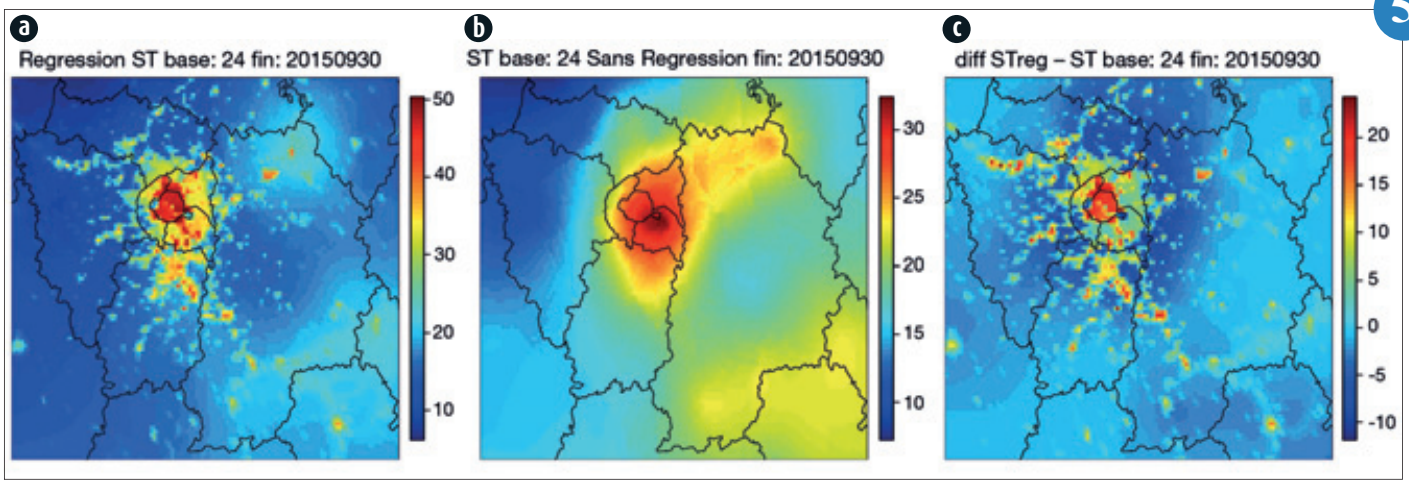
Évolution climatique

Intensification observée des précipitations extrêmes dans les régions méditerranéennes françaises

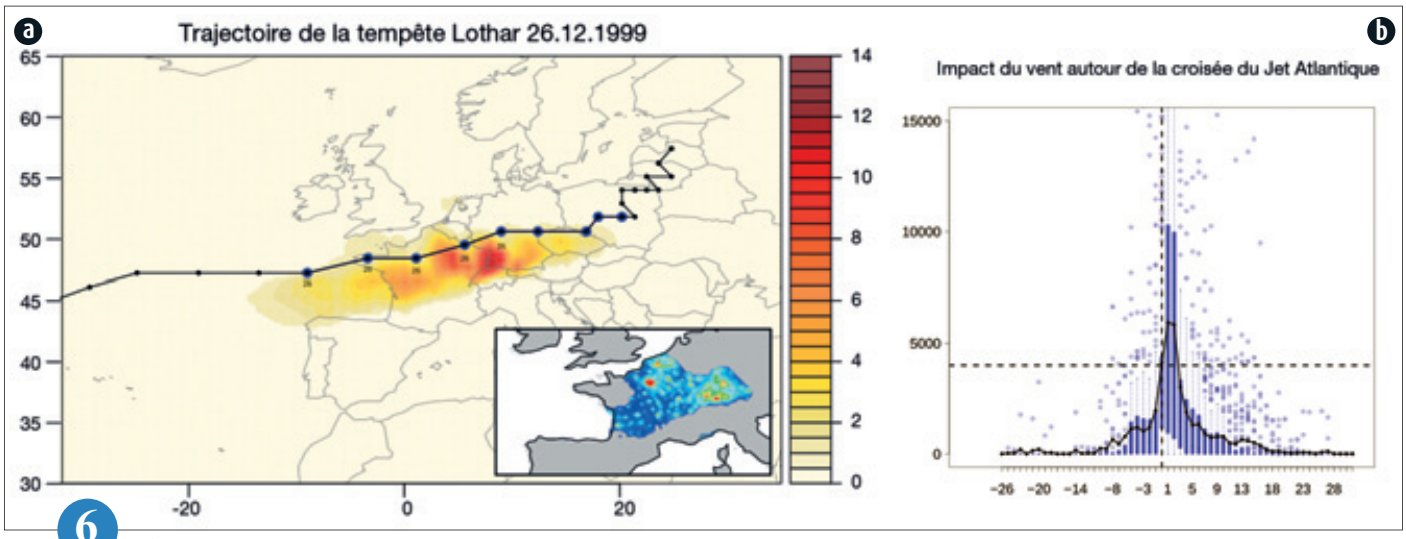
Les épisodes de fortes précipitations observés dans les régions méditerranéennes comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus extrêmes en France métropolitaine. De nombreux travaux ont cherché à évaluer l'évolution de ces événements en réponse au changement climatique anthropique via la modélisation numérique. La présente étude s'est concentrée sur l'évolution observée de ces événements, à partir des 55 ans de données disponibles.
Un indicateur régional de l'intensité relative des maximums annuels de précipitations quotidiennes a été construit en combinant les observations de 70 stations réparties sur l'arc méditerranéen et présentant de bonnes garanties d'homogénéité. Ont ensuite été évalués les changements d'intensité à partir de cet indicateur régional.
Les résultats indiquent une intensification significative (depuis déjà une quinzaine d'années) des précipitations extrêmes, estimée à +22 % [+7 % à +39 %] entre 1961 et 2015. La fourchette d'incertitude, assez large, traduit la grande variabilité des événements de fortes précipitations. Exprimée en *unités Clausius-Clapeyron* (CC, correspondant à +6,8 %/K), l'intensification estimée est proche de 2xCC, mais compte tenu des incertitudes, les observations sont cohérentes avec des valeurs de 1xCC et même plus faibles – soit les valeurs typiquement simulées par les modèles globaux. L'étude d'autres indicateurs tels que le nombre d'événements, leur superficie, ou le volume d'eau précipitée au-delà d'un seuil, conduisent aux mêmes conclusions quant à l'évolution récente de ces événements.
Ces travaux confortent l'idée d'événements plus forts dans un climat plus chaud, diagnostic particulièrement utile en termes d'adaptation. Ils pourront également être étendus à d'autres régions, ou mis à profit pour le suivi climatique des événements méditerranéens.

7

5



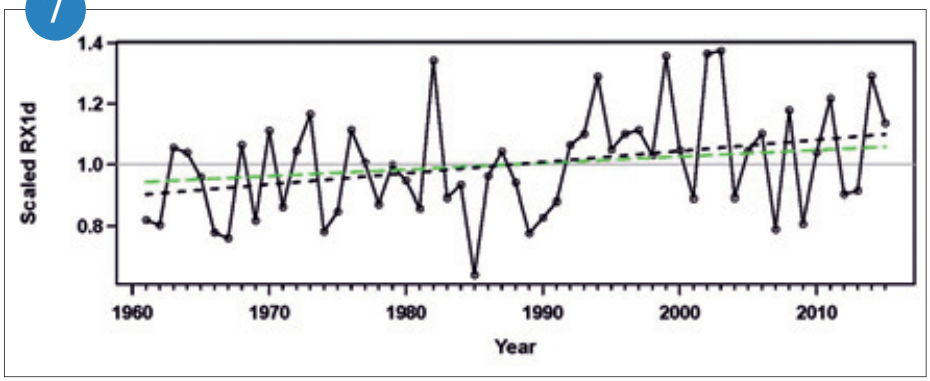
a : Degrés-jour unifiés de refroidissement, calculés au seuil 24°C à partir de températures minimales et maximales spatialisées en prenant en compte les métadonnées de relief et d'occupation urbaine selon la pertinence.
b : Degrés-jour unifiés de refroidissement, calculés au seuil 24°C à partir de températures minimales et maximales spatialisées par un simple krigeage géométrique.
c : Différence entre les degrés-jour unifiés de refroidissement calculés au seuil 24°C à partir de températures minimales et maximales spatialisées en prenant en compte les métadonnées de relief et d'occupation urbaine selon la pertinence et ceux obtenus par simple krigeage géométrique. Sont ainsi mises en évidence les zones urbaines et, dans une moindre mesure, les zones de forte altitude.



6

a : Trajectoire de la tempête Lothar, le 21 décembre 1999, identifiée par l'algorithme de suivi. Le dégradé de couleur indique la valeur de l'indice d'impact dû au vent sans la composante population. Encart: indice comprenant le vent et la densité démographique.
b : Moyenne de l'Indice d'impact autour du moment de la croisée de Jet, pour la classe de trajectoire croisant le Jet Atlantique et affectant la France.

7



Série temporelle de l'indicateur régional de l'intensité des épisodes de fortes précipitations, sur la période 1961-2015.
L'indicateur est construit à partir des maximums annuels re-normalisés, et est donc sans unité (la valeur 1 correspond à l'intensité moyenne).
Pointillés noirs : tendance linéaire estimée sur cet indicateur.
Pointillés verts : tendance linéaire attendue en suivant la relation de Clausius-Clapeyron (+6,8 %/K, soit +11,8 % sur la période compte tenu du réchauffement observé de +1.7K).

Réponse des pluies cycloniques au changement climatique sur l'Atlantique tropical

Les cyclones tropicaux sont connus pour produire des vents très forts et des submersions marines induites par la houle cyclonique. Au-delà de ces deux effets, les fortes pluies qui accompagnent les systèmes peuvent engendrer des inondations ainsi que des glissements de terrains dévastateurs. Avec le réchauffement climatique, la quantité de vapeur d'eau que peut contenir l'atmosphère est attendue d'augmenter suivant la formule de Clausius-Clapeyron. On estime cette augmentation à 7 %/°C qui pourrait se traduire par une augmentation identique des pluies lors d'évènements extrêmes.
L'étude qui a été menée au CNRM s'est attachée à calculer des bilans d'eau dans les ouragans simulés par le modèle en climat présent et futur suivant un scenario de réchauffement (RCP8.5). Une version basculée-étirée du modèle CNRM-CM5 a été utilisée, avec un pôle d'intérêt situé dans l'Atlantique tropical, permettant une résolution locale de 50 kms nécessaire pour simuler des ouragans.
À partir des trajectoires de cyclones constituées à l'aide d'un logiciel de suivi objectif des ouragans, on a reconstitué les termes du bilan d'eau pour chaque percentile de pluies cycloniques. En agrégeant les pluies sur des domaines de taille variable, on a démontré que pour des domaines de petite taille, l'augmentation des pluies pouvait largement dépasser le taux attendu de 7 %/°C, en lien avec des changements de convergence d'humidité à l'intérieur des ouragans.
La sensibilité des résultats au changement de physique du modèle CNRM-CM pour l'exercice CMIP6 pourra être abordée dans des études futures, notamment en exploitant l'ensemble de simulations qui ont été produites pour le projet FEDER C3AF.

8

Étude du changement climatique aux Antilles : climat régional, cyclones et états de mer

Le projet pluridisciplinaire multi-organismes (Universités des Antilles et de Montpellier, BRGM, Météo-France) C3AF financé par le FEDER a pour objectif d'étudier les aléas liés au changement climatique aux Antilles (cyclones, houles, montée du niveau de la mer, inondations, glissements de terrain, érosion) ainsi que leurs impacts environnementaux et socio-économiques dans les îles.
A Météo-France, les chercheurs étudient les changements futurs de l'activité cyclonique dans l'Atlantique Nord et de la houle associée autour des côtes antillaises. Des simulations ARPEGE-Climat à haute résolution sur le bassin cyclonique Atlantique permettent de suivre tempêtes tropicales et ouragans à la trace et détecter d'éventuels changements de fréquence, d'intensité et de distribution géographique. Ces simulations servent aussi à alimenter des modèles de vagues (MFWAM, WaveWatch 3) afin d'estimer les changements dans la climatologie des houles cycloniques. Ces modèles ont également permis de rejouer certains épisodes récents comme l'ouragan Matthew en 2016. De plus, l'évolution historique des précipitations aux Antilles et de la dynamique atmosphérique associée est en cours d'analyse, tant dans les observations que les simulations numériques.
Fin 2017, les premières analyses de l'ensemble des trajectoires cycloniques et de leurs changements seront disponibles, ainsi que celles des états de mer à l'échelle régionale. Le consortium C3AF a par ailleurs inclus dans son plan de travail l'étude des impacts des ouragans Irma et Maria (septembre 2017), qui ont suscité de nombreuses interrogations dans l'opinion quant à leurs liens éventuels avec le changement climatique.

9

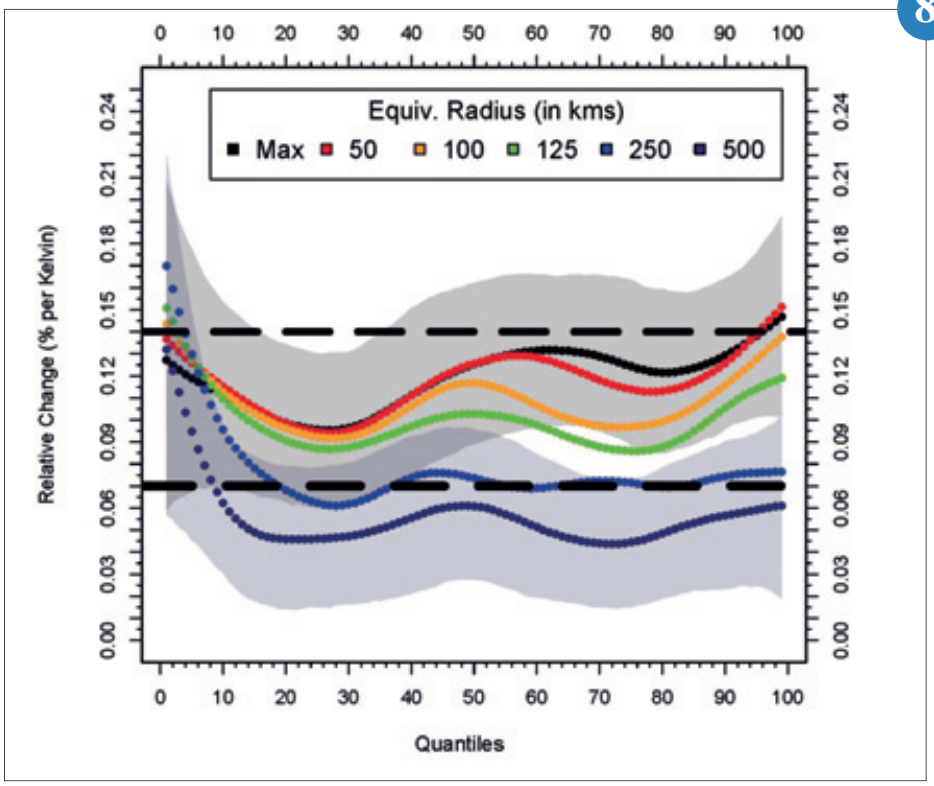
Prévision saisonnière

Prévision saisonnière et dynamique stratosphérique

La prévision saisonnière a pour but d'exploiter le fait que certaines composantes à évolution lente et donc potentiellement prévisible à longue échéance peuvent conditionner les caractéristiques climatiques d'une saison. Parmi ces composantes lentes, le jet stratosphérique équatorial est un prédicteur potentiel intéressant.
Nous avons étendu la résolution verticale du modèle ARPEGE utilisé pour des prévisions saisonnières de Copernicus de 91 à 137 niveaux verticaux, afin de mieux décrire la dynamique stratosphérique. Deux expériences de reprévision de 1993 à 2015 (échéance 7 mois, ensembles de 140 membres) ont été réalisées pour les saisons d'hiver et d'été. Les figures a (hiver) et b (été) montrent que le vent zonal à 30 hPa le long de l'équateur reste prévisible jusqu'à 7 mois. Le vent zonal à 60°N et 30 hPa, qui caractérise en hiver l'occurrence des réchauffements soudains stratosphériques, a une corrélation de 0.42 (137 niveaux) contre 0.26 (91 niveaux) en DJF, et 0.76 contre 0.73 en JJA. Par contre, aucune amélioration notable n'est observée dans la troposphère, sauf l'indice d'oscillation Nord-Atlantique (NAO) dont la corrélation vaut 0.73 contre 0.67, sans que cela soit statistiquement significatif. Compte tenu du surcoût de calcul de la résolution verticale, nous envisageons pour la prochaine version du modèle de prévision (en 2019) d'accroître la résolution horizontale océanique.

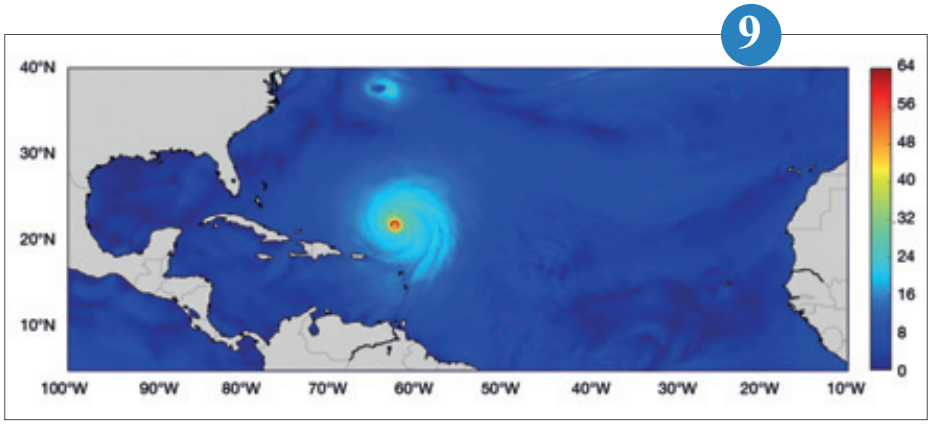
10

8



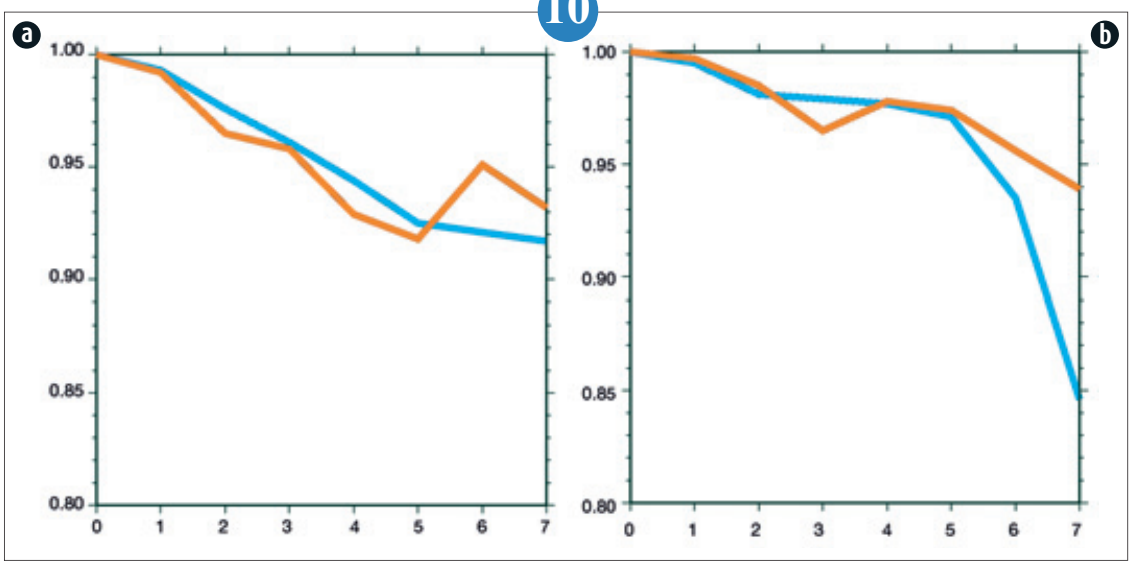
Changement relatif des quantiles de pluie pour 6 domaines d'agrégation spatiale. Les tailles équivalentes des domaines sont indiquées dans l'encadré en haut de la figure. Les changement ont été normalisés par le changement moyen de températures de surface de la mer sur l'Atlantique tropical. Les lignes horizontales en tirets gras correspondent respectivement à une et deux fois le taux de Clausius-Clapeyron (7 %/°C). Les unités sont en %/°C.

9



Exemple d'ouragan catégorie 4 sur l'échelle de Saffir-Simpson pendant un mois d'août, tiré d'une simulation d'ensemble de type AMIP du modèle ARPEGE-Climat étiré-basculé sur l'Atlantique tropical (15-150 km de résolution). La physique du modèle est identique à la version utilisée pour l'exercice CMIP6 du GIEC.

10



a et b : Coefficient de corrélation entre prévision et observation pour le vent zonal moyen le long de l'équateur à 30 hPa, en fonction de l'échéance (mois), pour une date initiale au 1er novembre (a) et 1er mai (b) ; courbe rouge pour ARPEGE à 137 niveaux sur la verticale, bleue pour la version à 91 niveaux.

Prévisibilité saisonnière des vagues de chaleur et de froid en Europe

Dans le cadre du contrat sur les « prévisions saisonnières » du programme Copernicus Climate Change Service (C3S/433), la DCSC était en charge de proposer de nouveaux produits répondant aux attentes des utilisateurs tout en respectant les limites de l'état de l'art. En phase de « Proof of Concept », un des nouveaux domaines explorés concernait la prévisibilité de la fréquence d'occurrence des évènements extrêmes, et notamment les vagues de chaleur ou de froid en Europe.

Dans la continuité des applications réalisées dans le cadre du projet ANR/ACASIS sur l'Afrique de l'Ouest et du projet Extremoscope sur la Métropole, des évènements de vagues de chaleur ou de froid ont été définis en chaque point du domaine en combinant une approche fréquentielle (dépassement du percentile 90 – respectivement 10 – de la température moyenne quotidienne) et en valeur absolu (température moyenne quotidienne supérieure à 20°C pour les vagues de chaleur, ou inférieure à +3°C pour les vagues de froid) et une durée d'évènement (ici 3 jours).

La référence climatologique du nombre de jours de vagues de chaleur (froid) a été réalisée à partir de la ré-analyse ERA Interim sur l'Europe et la Méditerranée. La prévisibilité saisonnière a été évaluée avec le modèle Météo-France Système 5 à partir des initialisations respectives de mai (pour les vagues de chaleur) et novembre pour les vagues de froid. Après débiaisage des températures, selon la méthode quantile -quantile, des scores probabilistes de type ROC (Receiver Operating Characteristic) ont été calculés sur la période de re-jeu du modèle (1991-2014) et mis en évidence des zones de meilleure prévisibilité de la fréquence d'occurrence des vagues de chaleur (Europe Centrale et Orientale) et vagues de froid (Europe de l'Ouest et du Nord). Les résultats obtenus sont cohérents avec la prévisibilité températures moyennes estivales et hivernales en Europe mais permettent dans l'esprit des services climatiques de rapprocher la donnée climatique du besoin utilisateur.

Des produits ont également été testés en mode prévision sur les années 2015 et 2016 et pourront être fournis avec les futures versions des modèles de prévision saisonnière C3S.

11

Suivi climatique et prévision saisonnière de la circulation atmosphérique sur l'Atlantique Nord et l'Europe

Les régimes de temps et les modes de variabilité sont des outils d'analyse de la circulation atmosphérique mis au point par les chercheurs sur le climat depuis plusieurs décennies. Ils permettent de synthétiser la dynamique atmosphérique au travers d'un nombre réduit d'indicateurs, facilitant ainsi la compréhension des impacts des circulations moyennes sur le temps sensible à l'échelle du jour, du mois ou de la saison.

Cependant ces outils sont relativement peu utilisés à ce jour par les services météorologiques ou climatiques opérationnels (hors quelques produits sur les régimes de temps), faute de définitions homogènes, applicables avec les différents jeux de données de climat passé (ré-analyses) et futur (prévisions saisonnière notamment), et également par manque de modes de représentation adaptés aux utilisateurs.

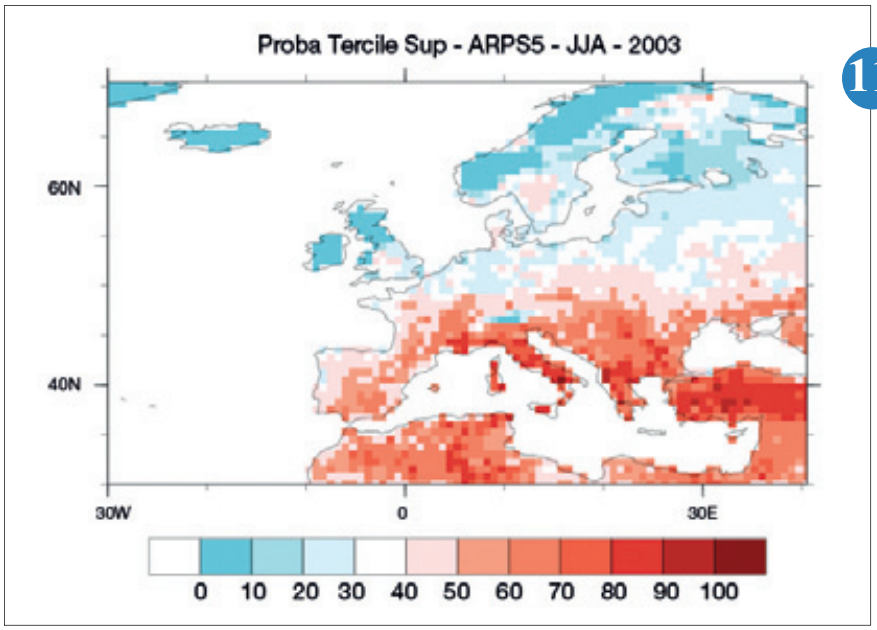
C'est ce travail qui a été engagé par la DCSC pour les produits basés sur les régimes et les modes de variabilité sur l'Atlantique Nord et l'Europe, répondant à la fois aux problématiques de suivi climatique et de prévision saisonnière. Les régimes et les modes ont été calculés à partir de champs de la ré-analyse ERA-Interim disponibles depuis 1979, afin de définir des structures spatiales fixes, facilitant leur interprétation aux différentes échéances. Un travail a aussi été mené, notamment dans le programme COPERNICUS, pour définir des modes de représentation adaptés à l'expertise en prévisions saisonnières.

Parmi les produits disponibles, on trouve des données et des graphiques sur des situations passées ou prévues, au pas de temps quotidien (pour les régimes uniquement), mensuel ou trimestriel, en référence à la climatologie. On trouve également des cartes synthétisant les impacts habituels des modes et des régimes sur le climat européen en termes de températures ou de précipitations, ainsi que des graphiques mettant en parallèle les modes et les régimes avec les températures et les précipitations en France (cf. figure).

En prévision saisonnière, ces outils ont l'avantage de disposer d'une meilleure prévisibilité, exploitant l'information principale de grande échelle fournie par les modèles. Ces produits seront prochainement proposés sur les différents modèles de prévisions saisonnières du projet COPERNICUS.

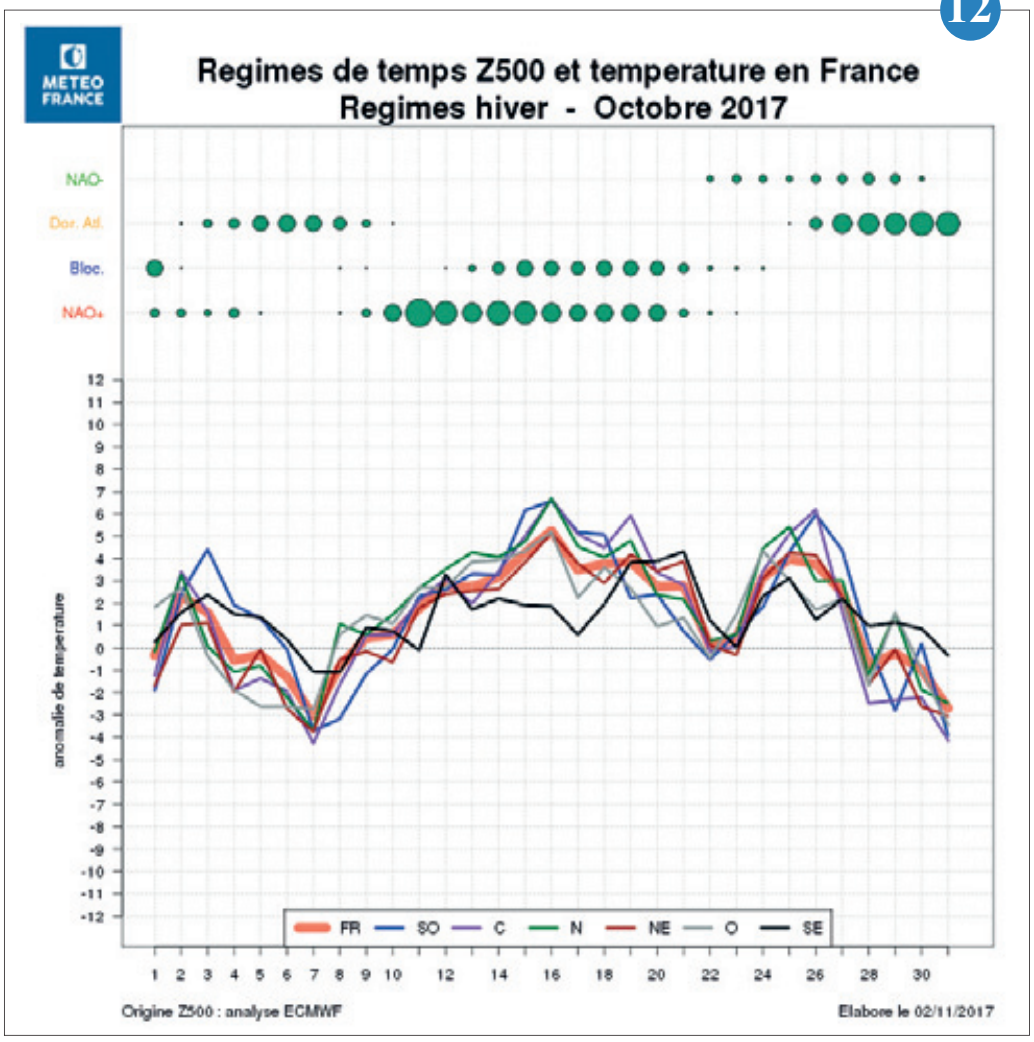
Pour en savoir plus :
http://dcsc-avh-net.meteo.fr/avh/
et http://seasonal.meteo.fr/.

12



11

Probabilité forte (tercile supérieur) d'occurrences de vagues de chaleur sur l'Europe pour l'été 2003 à partir du modèle de prévision saisonnière Météo-France Système 5 (initialisation de mai).



12

Suivi quotidien, en temps réel (disponible à J+1), des régimes de temps et des anomalies de température en France. Pour chaque journée, on représente la corrélation entre les centroïdes de chaque régime (NAO-, dorsale atlantique, blocage scandinave, NAO+) et le champ moyen quotidien de Z500 sur l'Atlantique Nord et l'Europe.

Cryosphère et Hydrologie

Le cycle de l'eau constitue une composante très active du système climatique, reliant les compartiments atmosphériques, océaniques et les surfaces continentales. Prévisions météorologiques et projections climatiques ne peuvent s'envisager à l'aide de modèles numériques que quand les flux d'énergie et d'eau entre ces compartiments y sont suffisamment bien représentés, et ce à toutes les échelles de temps. En outre, le devenir de l'eau présente sur les surfaces continentales revêt une importance capitale pour les écosystèmes et les sociétés humaines qui s'y développent. Sous forme liquide, l'eau contribue au débit des rivières, y compris parfois en quantités excessives sources d'inondations et de crues. L'ensemble des systèmes où l'eau est présente sous forme solide (glace) forme la cryosphère, qui rassemble les glaciers, le manteau neigeux saisonnier, le pergélisol, ainsi que la glace de lac et de rivière, et la glace de mer (banquise). La cryosphère joue un rôle important dans le système climatique à toutes échelles d'espace, et est notamment associée à des risques naturels proéminents en régions de montagne tels que les avalanches.

Le CNRM conduit des recherches variées pour mieux observer (in-situ et par satellite), comprendre et modéliser les diverses facettes du cycle de l'eau sur les surfaces continentales. Le Centre d'Etudes de la Neige assure le fonctionnement de deux observatoires spécifiques de la cryosphère dans les Alpes du Nord, le Col de Porte, situé à 1325 m dans le massif de la Chartreuse, et le Col du Lac Blanc, situé à 2700 m dans le massif des Grandes Rousses. Ces observations permettent de mesurer l'évolution à long terme de l'enneigement en régions de montagne (voir Figure), en appui aux démarches de modélisation et de projection des effets du changement climatique sur la cryosphère de montagne, en lien étroit avec la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques. Les observations réalisées dans ces observatoires jouent un rôle fondamental pour développer et évaluer des modèles informatiques d'évolution du manteau neigeux. L'accroissement de leur complexité est rendu nécessaire pour améliorer les capacités de prévision en appui aux missions opérationnelles de Météo-France (notamment la prévision du risque d'avalanche), et pour tester et repousser les limites de nos connaissances au sujet des interactions entre le manteau neigeux et son environnement. À une beaucoup plus grande échelle, les recherches menées au CNRM s'attaquent à l'amélioration des outils utilisés pour simuler le climat à l'échelle de la planète, notamment en ce qui concerne la représentation du pergélisol, c'est à dire la zone géographique dont le sol est gelé de façon permanente. L'évolution du pergélisol joue un rôle crucial dans le système climatique, en raison du carbone qui y est stocké, en particulier sous forme de méthane et de dioxyde de carbone, et dont le rejet vers l'atmosphère lors de la fonte du pergélisol pourrait amplifier le réchauffement en cours. La capacité à modéliser correctement l'évolution du pergélisol dépend de la qualité du modèle concernant le devenir du carbone piégé dans le sol, mais aussi le régime thermique du sol, qui est influencé par ses propriétés, les conditions atmosphériques, et la présence de neige et de végétation en surface. L'ensemble de ces éléments joue également un rôle majeur pour réguler le cycle de l'eau à l'échelle du territoire français, dont le suivi et la prévision requiert de surcroit de prendre en compte le devenir de l'eau en subsurface, notamment dans les aquifères. Le CNRM contribue au développement d'une plateforme de simulation à l'échelle nationale, nommée AquiFR.

L'ensemble de ces recherches contribue à l'amélioration des connaissances scientifiques et techniques au sein de la communauté scientifique nationale et internationale. Que ce soit par la mise au point de modèles utilisés pour contribuer aux exercices de simulation climatique et aux analyses en appui aux travaux du GIEC, ou en prise directe avec les moyens de prévision opérationnelle de Météo-France dans le domaine météorologique, hydrologique et nivologique (avalanches), tous ces travaux sont motivés par des questions et des besoins sociétaux à court ou moyen termes. Dans de nombreux cas, les personnels de recherche du CNRM dans le domaine de l'hydrologie et de la cryosphère jouent un rôle important dans le processus d'innovation, qui consiste à convertir un résultat de recherche en outil mobilisé pour la production d'un service opérationnel.

1

Évolution observée et projetée de l'enneigement dans les Pyrénées

Dans le cadre du projet Interreg ClimPy visant au développement de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) et à la connaissance de l'évolution du climat sur les Pyrénées, Météo-France (DCSC avec le CNRM/CEN et la DIRSO) a engagé des travaux sur l'évolution de l'enneigement à différents horizons temporels.

Sur le climat passé, un inventaire des séries de hauteur de neige du réseau nivo-météorologique a été produit et une quarantaine de séries ont été identifiés sur les Pyrénées Françaises et Andorranes selon un double critère de qualité sur la durée (plus de 20 ans) et de taux de données manquantes. Une action originale de contrôle et reconstitution des données a été mise au point en s'appuyant sur une configuration spécifique du modèle de neige Crocus, assimilant les observations aux postes. Ces séries de neige complètes de début décembre à fin avril seront utilisées pour produire un diagnostic sur l'évolution observée de l'enneigement. Ce travail est prévu aussi d'être étendu au versant espagnol où une action de data rescue / digitalisation est en cours

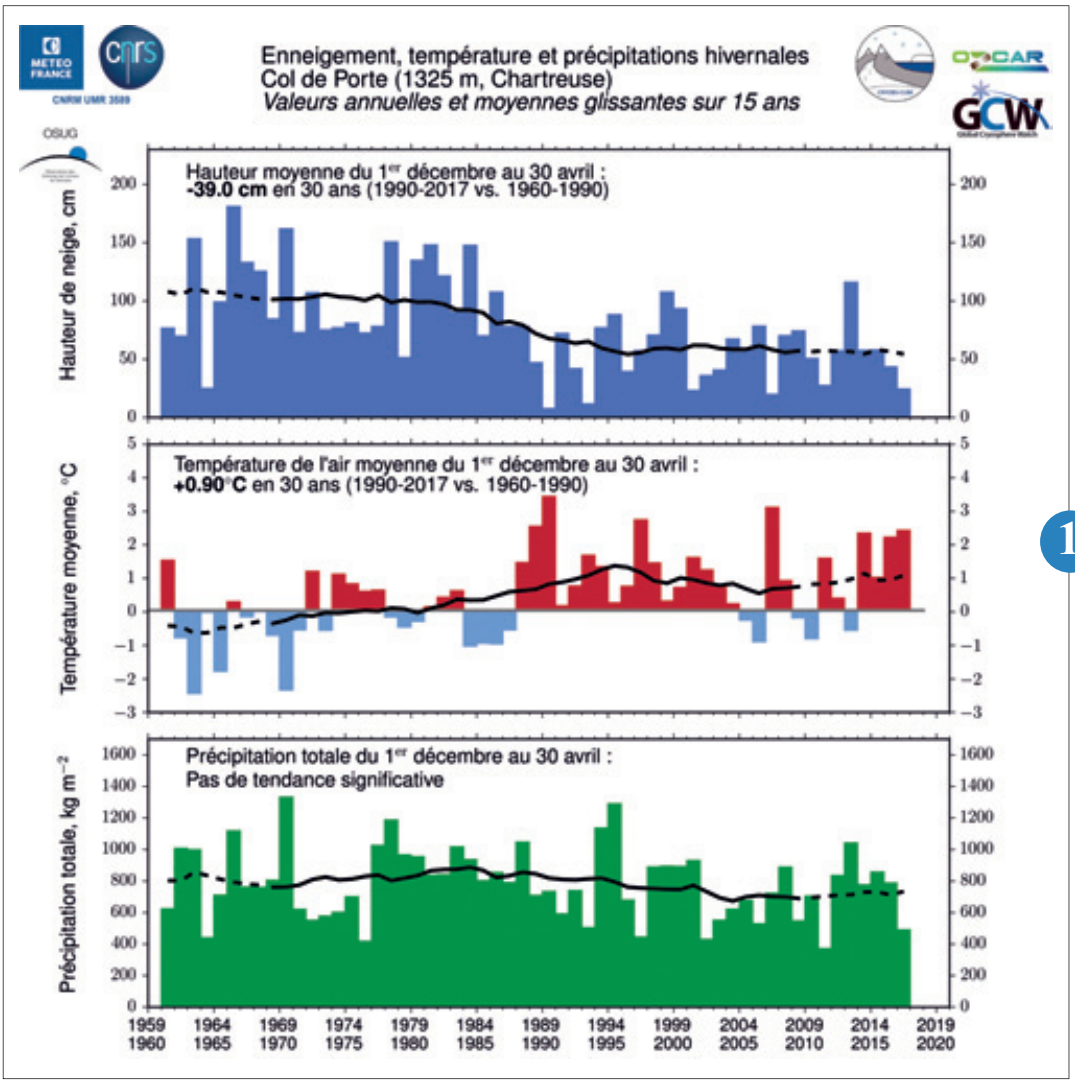
En parallèle, une action de récupération de données climatologiques espagnoles a été engagée avec l'AEMET et une ré-analyse SAFRAN a été produite sur l'ensemble du Massif. Des actions d'évaluation sont en cours pour en mesurer la performance en comparaison aux séries homogénéisées de température et précipitation, aux séries de neige évoquées ci dessus et à des mesures de télédétection développées par le CESBIO dans le cadre du projet à partir des données satellitaires MODIS.

Un troisième volet du projet concerne les projections climatiques d'enneigement et s'appuie sur l'ensemble de projections climatiques régionalisées EUROCORDEX, ajustées en utilisation la méthode ADAMONT.

Différents indicateurs ont été définis pour caractériser l'évolution du climat sur les Pyrénées (température moyenne, cumul de précipitation hivernal, taux de précipitation sous forme de neige) et de l'enneigement (moyenne sur l'hiver, nombre de jours au dessus de seuils, équivalent en eau maximum du manteau neigeux, date de début et fin d'enneigement continu).

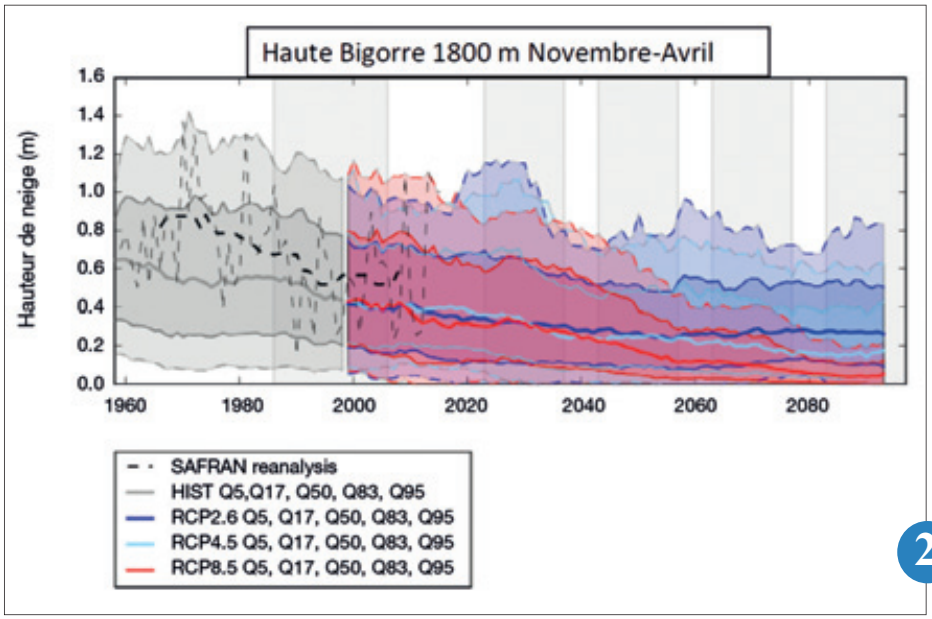
Ces indicateurs produits sur l'ensemble de la chaîne ont vocation à être proposés sur le futur géo-portail du site OPCC mais aussi sur les portails de services climatiques DRIAS et Climat^{HD}.

2



1

Synthèse des mesures réalisées au Col de Porte, 1325 m d'altitude, de 1959 à 2017. La figure du haut représente les variations de hauteur moyenne de neige en hiver, la figure du milieu les variations de température de l'air en hiver, la figure du bas les fluctuations de précipitation totale hivernale. Toutes ces variables varient fortement d'une année à l'autre, avec une tendance significative à la baisse concernant l'épaisseur de neige, une tendance significative à la hausse pour la température, et pas de tendance significative pour les précipitations totales.



2

Évolution de la hauteur de neige moyenne sur l'hiver de 1960 à 2100 à l'altitude de 1800m sur le massif de Haute Bigorre (France) à partir de la ré-analyse SAFRAN-Crocus (pointillé gris, médiane des valeurs annuelles pour une période de 15 ans en trait pointillé noir) et de l'ensemble EUROCORDEX incluant les runs historiques (gris), le RCP 2.6 (bleu foncé), le RCP 4.5 (bleu clair), le RCP 8.5 (rouge). Pour chaque scénario RCP sont représentés la médiane et plusieurs percentiles (5, 17, 83, 95) des valeurs annuelles de hauteur de neige moyenne calculés sur une période glissante de 15 ans permettant d'évaluer les incertitudes mais aussi l'évolution temporelle de la variabilité interannuelle.

Un nouveau modèle pour estimer l'impact du dépôt d'impuretés absorbantes sur l'évolution du manteau neigeux

Les impuretés absorbant la lumière qui se déposent sur le manteau neigeux (poussières désertiques, suies, résidus de combustion, particules atmosphériques, débris végétaux, etc.) altèrent la blancheur de la neige. En modifiant sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire, ceci a pour effet direct d'accélérer la fonte de la neige. Ces dépôts ont également des conséquences indirectes sur les transformations internes du manteau neigeux.

Le modèle multicouches de manteau neigeux Crocus a récemment été doté d'une représentation détaillée des processus atmosphériques de dépôt des impuretés, de leur devenir au sein du manteau neigeux (concentration par tassement, entraînement par l'eau de fonte, etc.) et de leur effet sur le bilan d'énergie et l'absorption du rayonnement solaire.

Une expérience de modélisation a été menée en utilisant les données acquises au site expérimental du Col de Porte (1325 m, Chartreuse) pendant l'hiver 2013-2014. Le modèle reproduit raisonnablement les observations de hauteur et masse de neige et de propriétés radiatives (albédo), et permet d'appréhender quantitativement l'impact des impuretés sur le comportement de la neige. Par exemple, au cours de la saison 2013-2014 marquée par plusieurs épisodes de dépôts de poussières sahariennes, les simulations montrent que la date de fonte du manteau neigeux est avancée de 9 jours par rapport à un manteau neigeux demeurant propre.

Ces résultats ouvrent de nombreuses perspectives pour mieux appréhender l'impact des impuretés atmosphériques sur la neige dans le domaine de l'étude du climat et ses interactions avec la Cryosphère, des ressources en eau et de la prévision du risque d'avalanches.

3

Simulations d'ensemble multi-physique du manteau neigeux

Le modèle détaillé de manteau neigeux SURFEX/ISBA-Crocus est couramment utilisé en support à la prévision opérationnelle du risque d'avalanches mais aussi dans des études d'impact du changement climatique.

Malgré la base physique du modèle, il souffre d'erreurs et approximations dans les paramétrisations empiriques d'un certain nombre de processus. Il est difficile d'isoler une configuration unique et optimale du modèle car il existe une « équi-finalité » entre ces paramétrisations : des configurations différentes du modèle peuvent aboutir à une performance globale similaire.

De nouvelles options ont été implémentées pour différents processus (densité de la neige fraîche, métamorphisme, transfert radiatif, flux turbulents, conductivité thermique, rétention de l'eau liquide, tassement, etc.). Cela permet de construire un nouveau système d'ensemble multi-physique (ESCROC, Ensemble System Crocus). Des méthodes d'optimisation ont permis de sélectionner un sous-ensemble de 35 membres équiprobables. La dispersion obtenue explique environ 2/3 de l'erreur totale dans des simulations du manteau neigeux sur le site instrumenté du Col de Porte (1325 m, Chartreuse).

Le nouveau système ESCROC ouvre la voie à un grand nombre d'applications. Il permet de quantifier la contribution de l'incertitude du modèle de neige dans des projections futures de l'enneigement (environ 20 % de l'incertitude totale obtenue pour un scénario d'émission donné). Il permettra aussi de prendre en compte l'incertitude du modèle dans le futur système numérique opérationnel en support à la prévision du risque d'avalanches, en le combinant à des ensembles météorologiques et à un algorithme ensembliste d'assimilation d'observations du manteau neigeux.

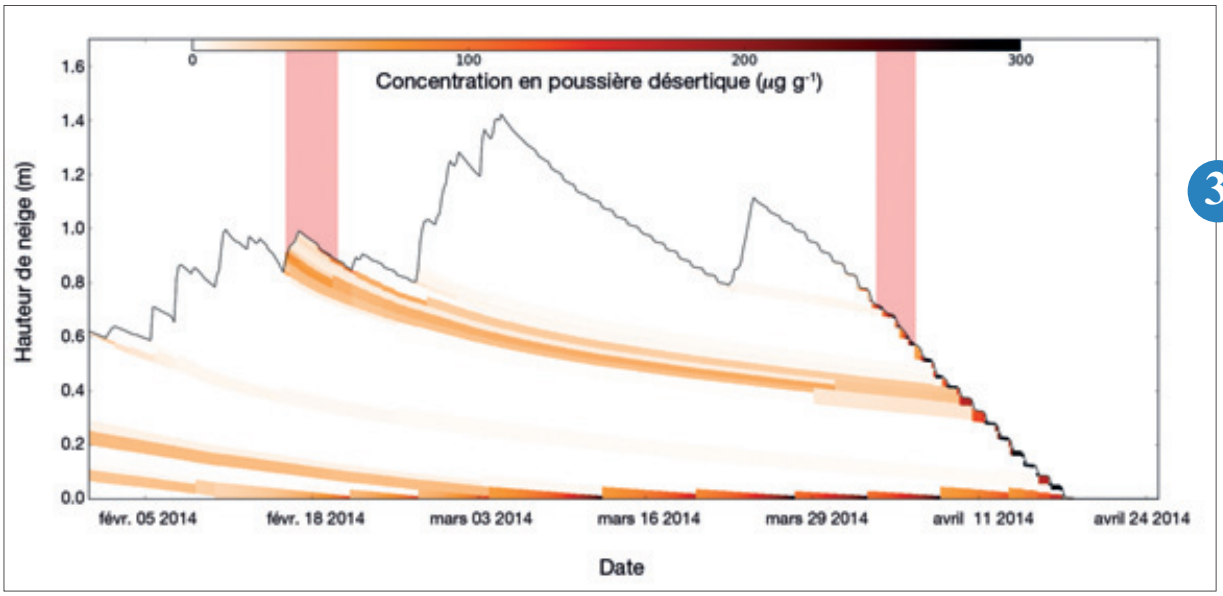
4

Col du Lac Blanc : un site observatoire pour l'observation et la modélisation de la neige en haute montagne

Depuis 1990, le CNRM et Irstea-Grenoble gèrent le site expérimental du col du lac Blanc situé à 2700 m dans le massif des Grandes Rousses dans les Alpes. Le site est dominé par des vents orientés nord-sud et il est particulièrement bien adapté pour l'observation et la modélisation des effets du transport de neige par le vent. Ce type de mesures en haute montagne est assez rare, ce qui fait du site un observatoire unique. Il a récemment été reconnu au sein de la communauté nationale et internationale via différentes labellisations.

Une des ambitions phares pour le Col du Lac Blanc est qu'il demeure un site de référence fiable en observations de haute montagne. Cette ambition est entretenue au quotidien par un travail de suivi et d'évaluation des mesures du site ainsi que par l'accueil d'expérimentations pilotes pour tester de nouvelles approches ou de nouveaux prototypes de mesures. Le dispositif expérimental du site garantit la pérennité des recherches sur la compréhension et la modélisation de l'effet du transport de neige par le vent, qui joue un rôle majeur pour l'évolution saisonnière du manteau neigeux de montagne et le risque d'avalanches. Des travaux d'évaluations systématiques des sorties des modèles au Col du Lac Blanc permettent d'envisager de nouvelles utilisations du modèle AROME déterministe et ensembliste, comme le potentiel des rafales de vent du modèle pour cartographier le transport de neige (voir la figure jointe pour une évaluation ponctuelle des prévisions du vent AROME). Par ailleurs, le site du Col du Lac Blanc est de plus en plus prisé pour suivre l'évolution du manteau neigeux, et du risque qui découle de son instabilité, en exploitant les mesures de télédétection haute et très haute résolution in-situ, sur drones ou spatiales.

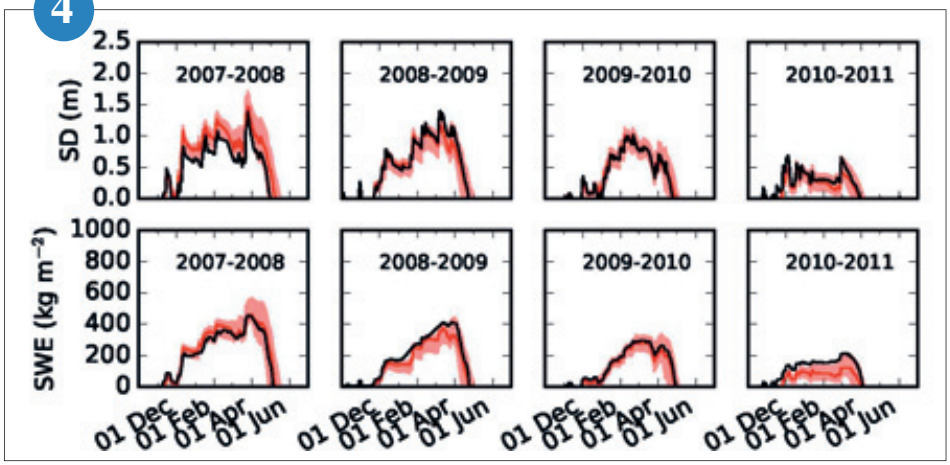
5



3

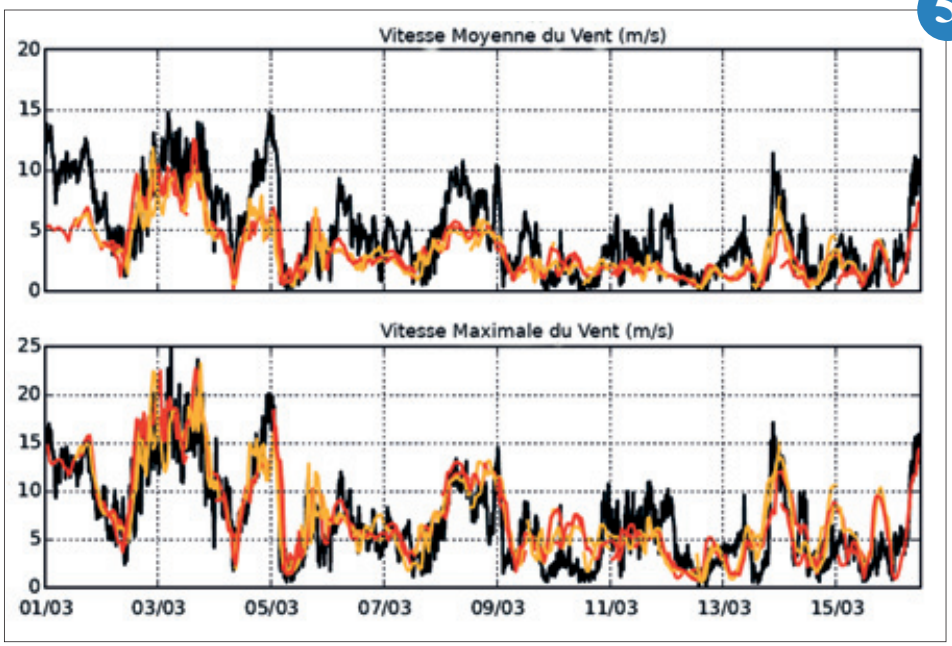
Profil de concentrations de poussières désertiques pour la seconde moitié de la saison d'hiver 2013-2014 au Col de Porte (1325m, Chartreuse).
La simulation a été réalisée avec le modèle de manteau neigeux Crocus en utilisant les flux de dépôts de poussières minérales d'ALADIN-Climate. Les deux dépôts majeurs de sable saharien sont indiqués par les zones en rouge.

4



Hauteurs de neige (SD) et équivalent en eau du manteau neigeux (SWE) observés (en noir) et simulés par 35 membres équiprobables du système ESCROC au cours de 4 saisons hivernales entre 2007 et 2011. L'enveloppe rouge représente l'incertitude des paramétrisations du modèle de neige (écart entre les quantiles 5 et 95 % de l'ensemble) et la ligne rouge représente la médiane de l'ensemble.

5



Vitesse moyenne (haut) et maximale (bas) du vent au Col du Lac Blanc : Observations (noir) et prévisions du modèle AROME (réseau de 00h00 UTC : rouge ; réseau de 12 h00 UTC : orange) pour la période du 1er au 16 mars 2016.

Changement climatique et pergélisols

Une conséquence importante du changement climatique dans les régions boréales est le retrait vers le Nord des pergélisols, les sols perpétuellement gelés. Or ces sols contiennent de grandes quantités de carbone qui pourrait être libéré dans l'atmosphère sous forme de CO_2 et/ou de CH_4 et amplifier le changement climatique. Cela représenterait une des rétroactions les plus importantes sur le climat. Lors de la conférence climatique de Doha en 2012, le dégel du pergélisol a été décrit comme l'un des processus clefs pouvant impacter le devenir de la planète.

La vitesse de cette libération de carbone et la forme sous laquelle elle se produit (CO_2, CH_4) dépendent fortement de la couverture de neige, de la température et du contenu en eau du sol. Le méthane est produit essentiellement dans des sols gorgés d'eau. Il est donc nécessaire pour un modèle de climat de représenter correctement les processus qui interviennent dans les échanges de CO_2 et de CH_4 avec l'atmosphère. Jusqu'ici, le modèle de surface continentale ISBA du CNRM représentait les échanges d'énergie, d'eau et de CO_2 entre le sol, la végétation et l'atmosphère, mais pas les émissions de méthane. Nous avons construit un nouveau modèle du carbone organique dans le sol qui représente la dynamique verticale du contenu en carbone dans le sol (advection, cryoturbation) ainsi que les processus de décomposition qui libèrent du CO_2 et du CH_4 en fonction de la température, du contenu en eau, glace et oxygène dans le sol, ainsi que de l'évolution du manteau neigeux. Ce modèle représente également la diffusion de ces trois gaz dans le sol. Il a été validé sur 2 sites bien instrumentés au Groenland et 1 site en Sibérie. Le modèle indique qu'en plus des paramètres physiques, la quantité de carbone stocké dans le sol joue un rôle prépondérant sur les émissions de CO_2 et de méthane.

6

Aqui-FR, la future plateforme de modélisation hydrogéologique nationale

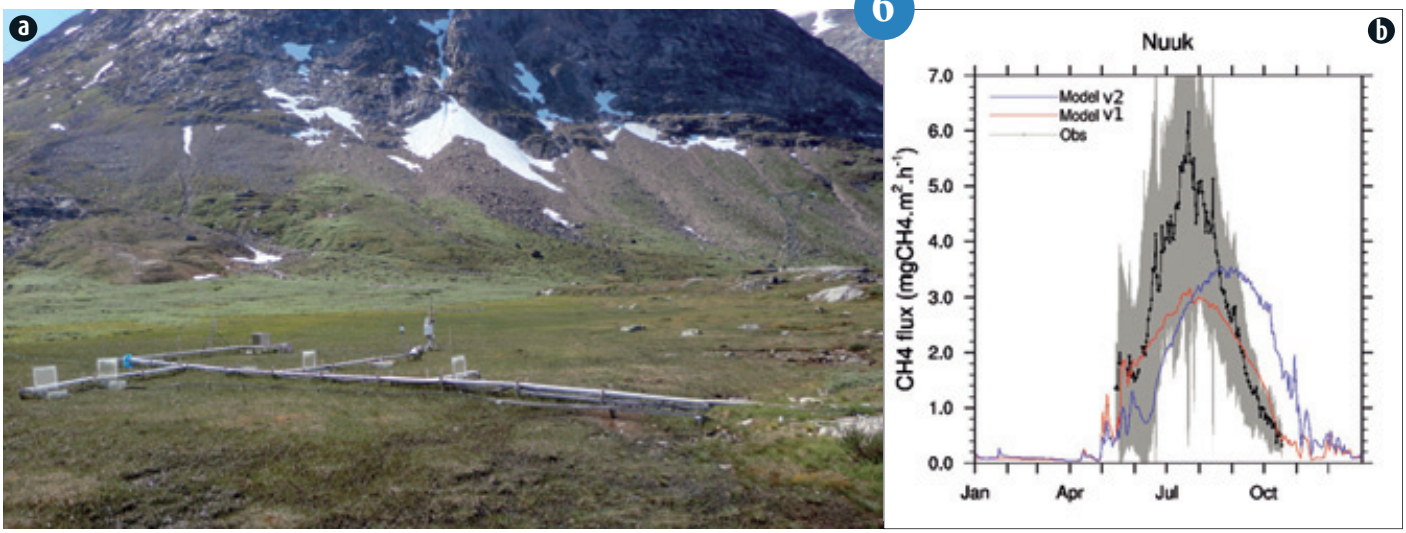
Le projet Aqui-FR vise à mettre en place des prévisions de l'évolution des eaux souterraines et des débits en rivières en France, à des échelles de temps allant de la dizaine de jours à la saison, jusqu'aux projections climatiques. Il se base sur les modélisations hydrogéologiques utilisées par les gestionnaires de l'eau, lorsqu'elles existent, et vise également à favoriser leurs développements là où elles n'existent pas encore. En ce sens, le projet Aqui-FR est conçu comme un outil de valorisation des travaux de modélisations hydrogéologiques réalisés en France.

La première phase du projet a permis d'aboutir à une consolidation de la structure de la plateforme ainsi qu'à sa validation scientifique par le calcul de scores de performances relatifs aux niveaux des eaux souterraines et aux débits en rivières. L'exploitation propre de la plateforme a pu démarrer, et une ré-analyse historique des niveaux piézométriques sur la période de 1958 à 2017 (période de ré-analyse atmosphérique SAFRAN) a été effectuée sur le domaine couvert à ce jour.

Afin de comparer dans le temps et dans l'espace l'état de remplissage des aquifères, l'IPS (développé par le BRGM en cohérence avec le SPI) est utilisé. Il permet d'obtenir une information qualitative, répartie en 7 classes, du niveau des nappes par rapport à son historique (voir figure). L'évolution temporelle sur l'ensemble du domaine modélisé ainsi que la répartition spatiale de l'IPS à deux extrêmes sont représentés à titre d'exemple sur la figure. La poursuite de ce projet, en plus de l'inclusion de nouvelles modélisations régionales, va porter sur de la prévision saisonnière et l'étude de l'apport de la modélisation des aquifères en terme de gain de fiabilité des prévisions d'étiages (sur les débits et la piézométrie).

7

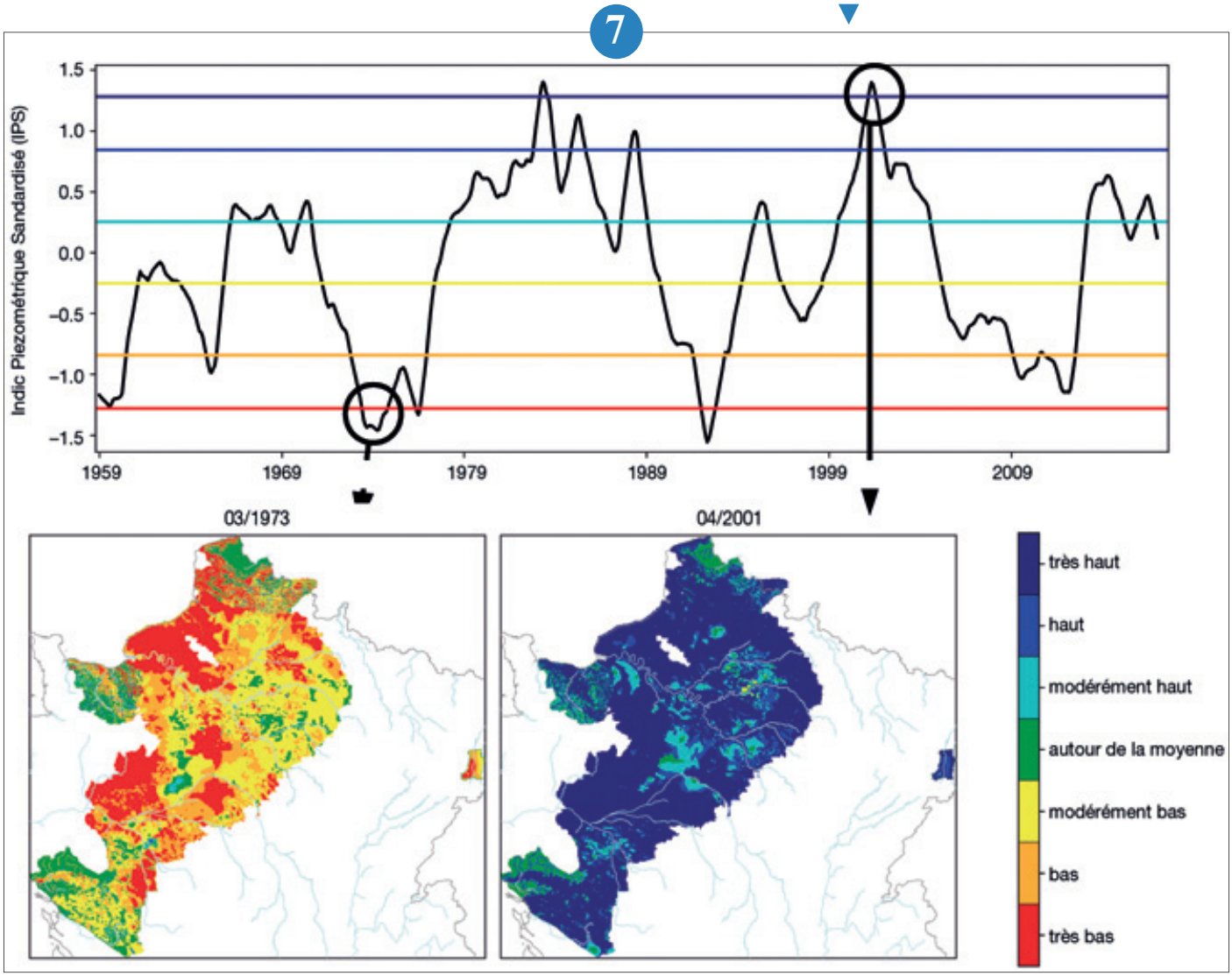
6



a : de mesure de la tourbière de Kobbelfjord au Groenland en juillet 2017 (instrumenté par l'Université d'Aarhus et le Centre Danois pour l'Environnement et l'Energie).
b : Évolution saisonnière du flux de méthane observé (courbe noire) par les chambres de mesure et simulé par 2 versions d'ISBA (courbes rouge et bleue).
La surface grisée représente la dispersion des mesures entre les différentes chambres de mesure.

Évolution temporelle de l'Indice Piézométrique Standardisé sur le domaine Aqui-FR ainsi que sa répartition spatiale durant une période sèche en 1973 et durant une période humide en 2001.

7



Océanographie

Une meilleure connaissance des mécanismes les plus fins qui régissent le « système Terre » – l'atmosphère, et les milieux qui la jouxtent, l'océan en premier lieu, leurs constituants et leurs interactions –, et leur représentation sans cesse améliorée dans les modèles numériques renforcent constamment la capacité des équipes opérationnelles et améliorent la qualité des produits fournis.
Ainsi, une bonne prise en compte des aérosols permet d'améliorer sensiblement l'évaluation de la température de la mer vue depuis le satellite géostationnaire Météosat, donc le forçage imposé à l'atmosphère par l'océan. De même, les panaches des fleuves côtiers inondent la mer salée et s'invitent dans les interactions océan – atmosphère. Enfin, les vagues et le niveau de la mer se dressent ensemble face au littoral, jouent avec d'éventuels lagons, et frappent nos côtes.
Les moyens d'études et de prévision mis en œuvre sont, en apparence, toujours les mêmes : systèmes d'observation disponibles, depuis la mesure *in situ* jusqu'à la télédétection spatiale, et modèles numériques. Pourtant, d'année en année, ils évoluent, s'affinent, s'affûtent, et prennent en compte davantage d'ingrédients, pour être toujours plus réalistes et utiles. Ils sont travaillés à l'aune d'une histoire météorologique précieusement conservée : pour les surcotes à nos latitudes, la tempête de février 1953 en mer du Nord demeure le cas de référence, banc test incontournable. Ainsi en ira-t-il des cyclones qui ont frappé nos îles en 2017.
La mer est, depuis l'aube du service météorologique, un lieu d'action privilégié des météorologues et donc des chercheurs. Les connaissances qu'ils apportent sont utiles à tous les usagers de l'océan, marins, industriels, aménageurs, décideurs ou simples citoyens. Les outils qu'ils développent sont déterminants pour contribuer à la sécurité, optimiser les activités, ou protéger les milieux, au grand large comme le long du littoral, en métropole comme dans les Outremers. Que les grains de sable des déserts jouent également dans cette mécanique complexe en surprendra quelques-uns – et pourtant !

1

Nouveau modèle de vagues en côtier pour La Réunion et Mayotte

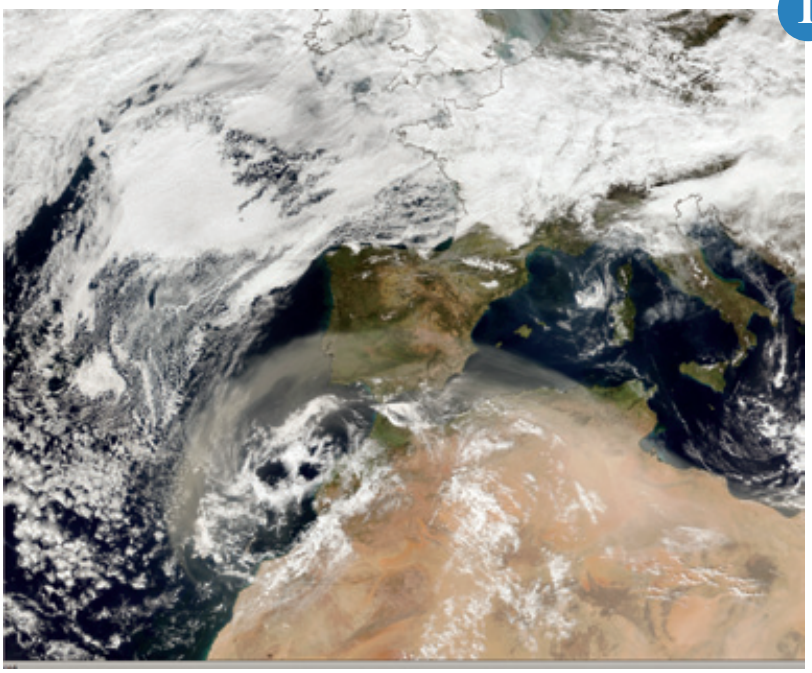
Fin 2015, la seconde phase du projet HOMONIM, conduit par Météo-France et le SHOM, a été lancée avec le soutien du MTES pour améliorer les outils de prévisions des surcotes et des vagues à la côte, notamment en Outre-Mer. Après sa mise en place sur les côtes antillaises et guyanaises en 2016, une configuration du modèle de vagues haute-résolution, WaveWatch 3 (WW3), a été installée pour La Réunion et Mayotte en 2017.
Cette configuration a pu bénéficier de la bathymétrie côtière à 100 m produite dernièrement par le SHOM dans le cadre du projet. Plusieurs paramétrisations, décrivant l'état de la mer et l'interaction avec le fond, ont été testées sur des événements marquants de ces dernières années. Ces épisodes correspondent en grande majorité à des cyclones, comme l'ouragan Felleng (catégorie 3) de janvier 2013 (voir illustration).
Un premier domaine couvre les îles de La Réunion et Maurice et l'autre, l'archipel des Comores. Ces configurations sont forcées par les vents du modèle atmosphérique AROME Outre-Mer, à 2,5 km de résolution, et sont imbriqués dans le modèle régional de vagues de Météo-France MFWAM, à 10 km de résolution. La résolution de WW3 atteint 100 m dans le lagon de Mayotte, permettant de bien représenter les passes et les détails bathymétriques, et atteint 200 m près des côtes réunionnaises.
Le contexte spécifique du lagon mahorais demandera de tester le forçage par un modèle de niveau d'eau et de courants (marée et surcotes), prévu être implémenté mi 2018 à une résolution de 200 m. En outre, ces configurations feront l'objet de re-jeux sur de nouveaux épisodes documentés pour parfaire leur validation ou leur calage.

2

Prévision des surcotes pour l'Océan Indien et Antilles-Guyane

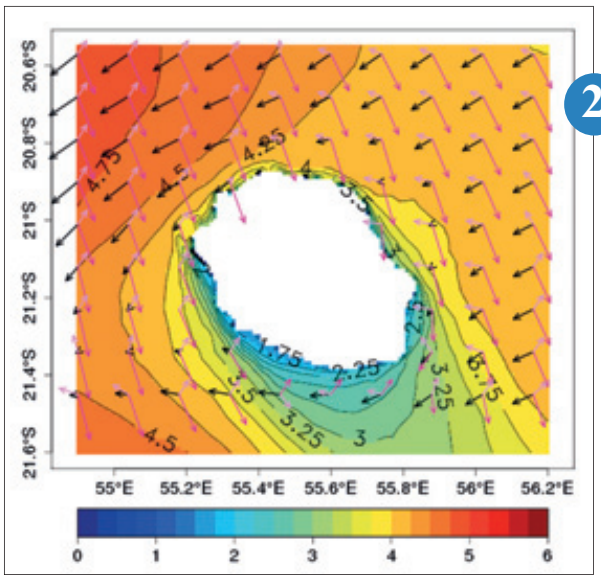
Dans le cadre du projet HOMONIM, conduit par Météo-France et le SHOM, sous la maîtrise d'ouvrage de la DGPR et de la DGSCGC, deux configurations du modèle de surcotes (Hycom2D), l'une pour le sud-ouest de l'océan indien et l'autre pour Antilles-Guyane ont été développées puis intégrées à la chaîne opérationnelle de Météo-France en 2017. La résolution du maillage pour l'océan indien est de 3,2 km et elle descend à 2 km pour la Guyane et à 900 m pour les Petites Antilles.
Ces configurations ont fait l'objet d'un calage pour reproduire au mieux la marée et de nombreux événements remarquables (essentiellement des cyclones tropicaux). La plus grande difficulté a consisté à disposer de données observées de surcotes : les marégraphes sont rares et parfois détériorés lors des épisodes sévères qui nous intéressent. Lors du passage de l'ouragan Irma sur le nord des Petites Antilles, une surcote d'environ 2 m a été observée au marégraphe de Marigot à Saint Martin. Le modèle de surcotes, forcé par le modèle atmosphérique AROME lors du réseau de production du 6 septembre à 0 UTC a simulé une surcote de 1,70 m (voir Figure).
Ces configurations feront l'objet dans les prochains mois de nouveaux travaux avec la prise en compte de bathymétries mises à jour et le rejeu d'événements mieux documentés ou récents. En outre, pour Mayotte, compte tenu de la présence d'un vaste lagon, une descente d'échelle sera mise en place pour atteindre une résolution d'environ 200 m.

3



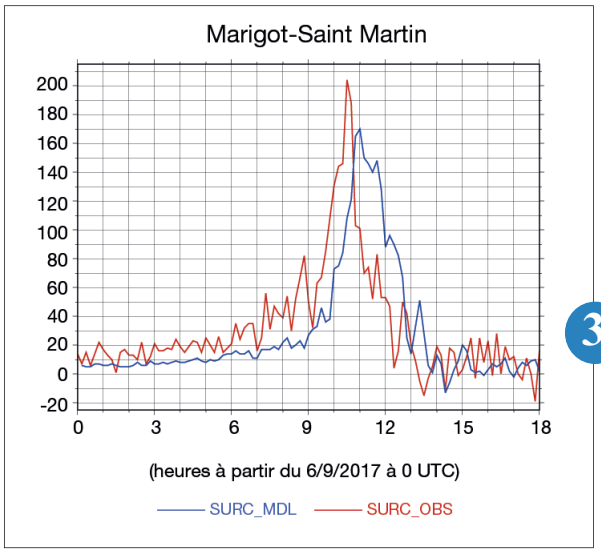
1

La tempête emporte les sables du désert saharien
au-dessus de l'océan Atlantique
et de la mer Méditerranée.
Image acquise le 21 février 2017, à 1325 UTC,
par le satellite défilant américain Suomi-NPP.



2

Hauteur significative des vagues de la mer totale (m) de WW3 le 31/01/2013 à 18h UTC,
lors du passage de l'ouragan Felleng (catégorie 3).
Les flèches violettes foncées représentent la direction de la houle primaire,
les flèches claires la houle secondaire et les flèches noires la mer du vent.



3

Comparaison entre la mesure (trait rouge) et la simulation (trait bleu)
de la surcote océanique à Marigot (au nord de l'île de Saint Martin dans les Petites Antilles)
lors du passage de l'ouragan Irma le 6 septembre 2017.
Le modèle de surcotes a été forcé par le vent et la pression atmosphérique du modèle AROME
de Météo-France.

Amélioration du modèle de vagues global pour le large

Dans le cadre du Copernicus Marine Environment and Monitoring Service (CMEMS-MFC), Météo-France a implémenté une nouvelle version du modèle opérationnel global de vagues MFWAM. Les améliorations apportées par cette mise à jour concernent en premier lieu une meilleure résolution de la grille de calcul atteignant un pas de 10 km et l'utilisation journalière des courants de surface produits par le système de prévision océanique PSY4 de Mercator. L'impact des courants sur la prévision des vagues est significatif et peut enregistrer par endroit des différences de hauteurs de vagues atteignant environ 1 m, comme l'illustre la figure a pour la zone océanique des aiguilles.
Par ailleurs, la physique du modèle MFWAM a été aussi ajustée afin d'améliorer à la fois la description du stress à l'interface air-mer pour les vents forts et une meilleure prévision des vagues de hautes fréquences. Concernant le volet assimilation des données, le système opérationnel MFWAM assimilera les spectres directionnels de vagues fournis par le radar à ouverture synthétique (SAR) des satellites Sentinel-1A et 1B qui font partie du programme spatial de Copernicus. L'assimilation des spectres de vagues SAR dans un modèle opérationnel de vagues constitue une première mondiale dans la prévision des états de mer, et par cette réalisation, Météo-France consolide sa position de leader dans cette thématique. Des études d'impact ont montré que l'assimilation des spectres de vagues SAR améliore significativement les propriétés directionnelles de la houle, avec une réduction remarquable de l'écart-type normalisé sur la période pic des vagues longues (supérieur à 200 m de longueur d'onde) pouvant atteindre 20 %.
Enfin, le modèle opérationnel MFWAM assimilera également les hauteurs de vagues issues de l'altimétrie (niveau 3) de Sentinel-3A qui sont produites par le TAC-waves dans le cadre de Copernicus CMEMS. L'assimilation combinée des données altimétriques et les spectres SAR permet d'atteindre globalement un indice de dispersion normalisé des hauteurs significatives des vagues d'environ 8-9 %, comme le montre la figure b.

4

Nouvelle configuration océanique et amélioration de la représentation des débits pour la prévision couplée océan-atmosphère

La Méditerranée joue un rôle important lors des épisodes fortement précipitants qui affectent fréquemment la région. L'apport d'eau douce par les fleuves contribue significativement au cycle de l'eau et peut avoir une influence sur les interactions air-mer.
La campagne de mesures du programme HyMeX durant l'automne 2012 (SOP1) a permis de recueillir de nombreuses observations et notamment des observations de débits à fréquence quotidienne et horaire permettant de mieux représenter les pics de crues et leurs impacts sur la circulation et la stratification océanique.
Une nouvelle configuration du modèle océanique NEMO, nommée NWMED72 couvrant la Méditerranée nord-occidentale avec une résolution horizontale de ~1.3 km a été développée et utilisée pour étudier la sensibilité à la représentation des débits. Forcées par les prévisions AROME-WMED et trois jeux de forçages de rivières (climatologie, observations quotidiennes et horaires), les simulations océaniques mettent en évidence l'impact sur la taille des panaches et sur la salinité de surface, plus faible aux alentours des panaches quand les observations sont utilisées (figure). A cet endroit, la stratification est modifiée et la couche de mélange devient plus fine, entraînant une réponse océanique plus forte aux forçages atmosphériques impactant alors la température de surface. Des diagnostics sont également mis au point pour évaluer l'impact sur la circulation proche des embouchures et des simulations couplées océan-atmosphère AROME-NEMO permettront d'examiner l'impact sur la prévision d'épisodes méditerranéens.

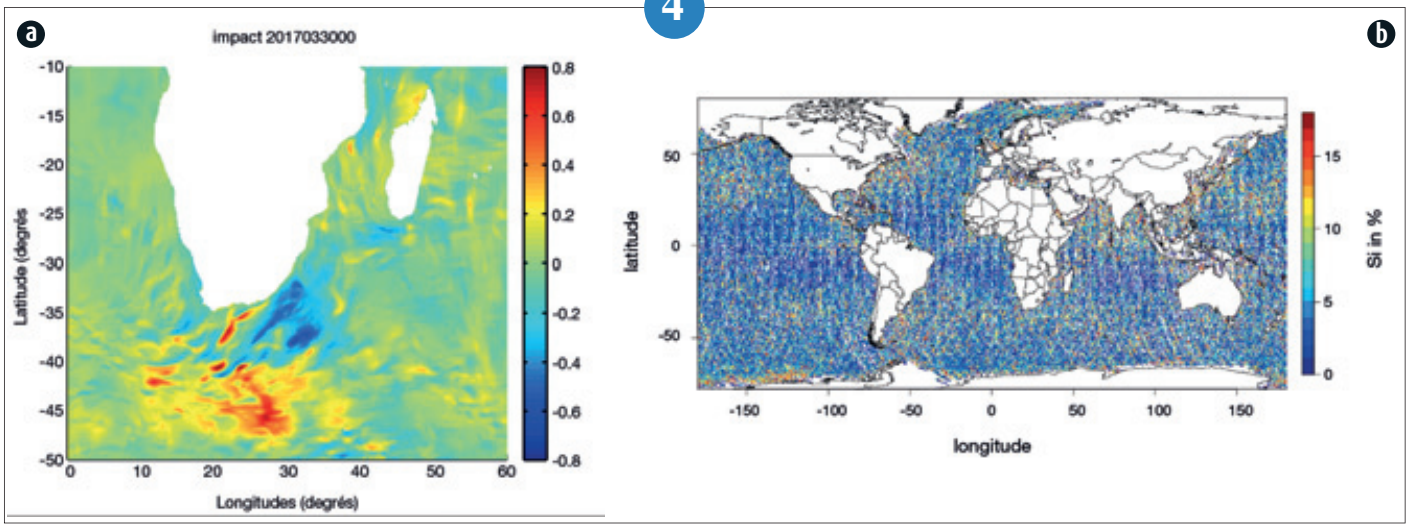
5

Re-jeu d'événements maritimes anciens : WW3 remonte le temps

Depuis de nombreuses d'années, la technique et les moyens de calcul permettent de simuler des événements météorologiques passés en utilisant des chaînes de modélisation modernes et opérationnelles. Cette approche s'applique à la ré-analyse des événements en mer. Il s'agit alors, pour un événement donné, de mettre en œuvre un modèle de vagues à très haute résolution en utilisant les meilleures données d'entrée atmosphériques disponibles.
Avec le support de la Prévision Marine de la DIROP, nous nous sommes intéressés à l'épisode dramatique du 1er février 1953, qui a ravagé le sud de la Mer du Nord et plus particulièrement les Pays-Bas et la Belgique. Cette tempête de Nord-Ouest, violente et durable, s'est produite dans une période de fortes marées, ce qui a considérablement aggravé ses impacts côtiers.
Ont été analysées les sorties du modèle de vagues WW3, elles-mêmes alimentées par les données atmosphériques issues du projet INCREO, projet pour lequel la pertinence a été évaluée. Ces sorties mettent en évidence des vagues fortes et inhabituelles, de courte période, venant principalement du Nord-Ouest sur le sud de la Mer du Nord.
Le modèle WW3 reproduit de façon tout à fait satisfaisante les vagues près du rivage grâce à sa haute résolution et à l'utilisation d'une bathymétrie très fine. En zoomant sur de petites zones, on peut également mettre en évidence des déferlements de vagues tout à fait réalistes sur les hauts fonds sableux qui parsèment ces zones de faible profondeur.

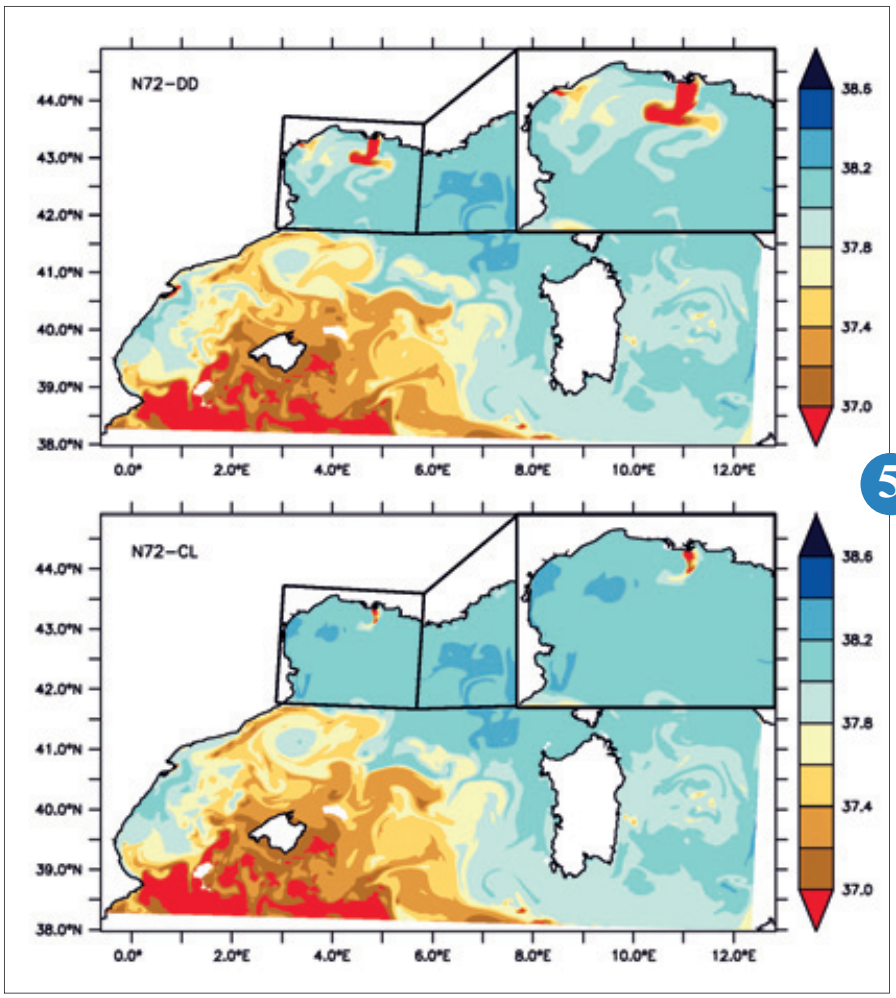
6

4



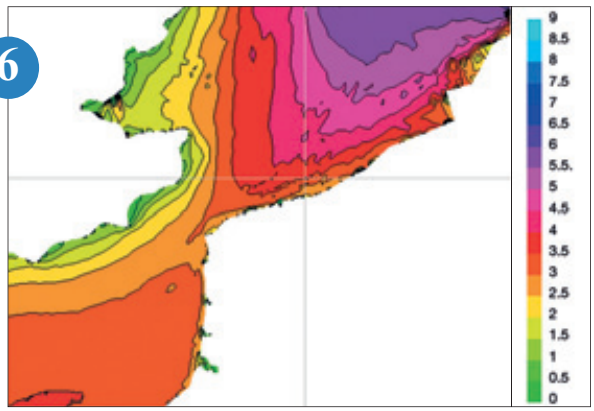
a : Différence de hauteurs significative des vagues issues de simulations du modèle MFWAM avec et sans courants de surface PSY4 pour le 30 Mars 2017 à 0:00 UTC.
b : Carte globale d'écart-type normalisé des hauteurs significatives des vagues issues de la nouvelle version du système MFWAM pour le mois de Mars 2017. La validation est effectuée avec les données altimétriques du satellite Hy-2A.

5



Salinité de surface (psu) dans le bassin Méditerranéen Nord-Ouest simulée pour le 14 octobre 2012. L'utilisation d'observations de débits quotidiens (N72-DD) permet notamment de mieux représenter le panache du Rhône ainsi que ceux de l'Orb et de l'Aude, tous deux absents dans la simulation utilisant une climatologie mensuelle (N72-CL).

6



1er février 1953 – Simulation de H1/3 (en mètres) par le modèle WW3 de Météo-France – zoom autour du Pas de Calais.

Température de Surface de la Mer : retraitement de l'archive Météosat Seconde Génération

L'instrument SEVIRI à bord des satellites MSG comporte des canaux dans l'infrarouge thermique qui permettent la restitution de la TSM ; il est opérationnel depuis janvier 2004. Le Centre de Météorologie Spatiale s'est engagé dans le projet SAF OSI financé par EUMETSAT à retraiter l'archive MSG/SEVIRI de 2004 à 2012 pour fournir des produits horaires à la résolution de 0,05°.

La TSM est estimée par une combinaison quasi-linéaire des températures de brillance des canaux 10.8 et 12.0 µm. Les coefficients de l'algorithme sont déterminés par régression sur des simulations de température de brillance, puis l'algorithme est ajusté sur des mesures de température de surface acquises par des bouées dérivantes.

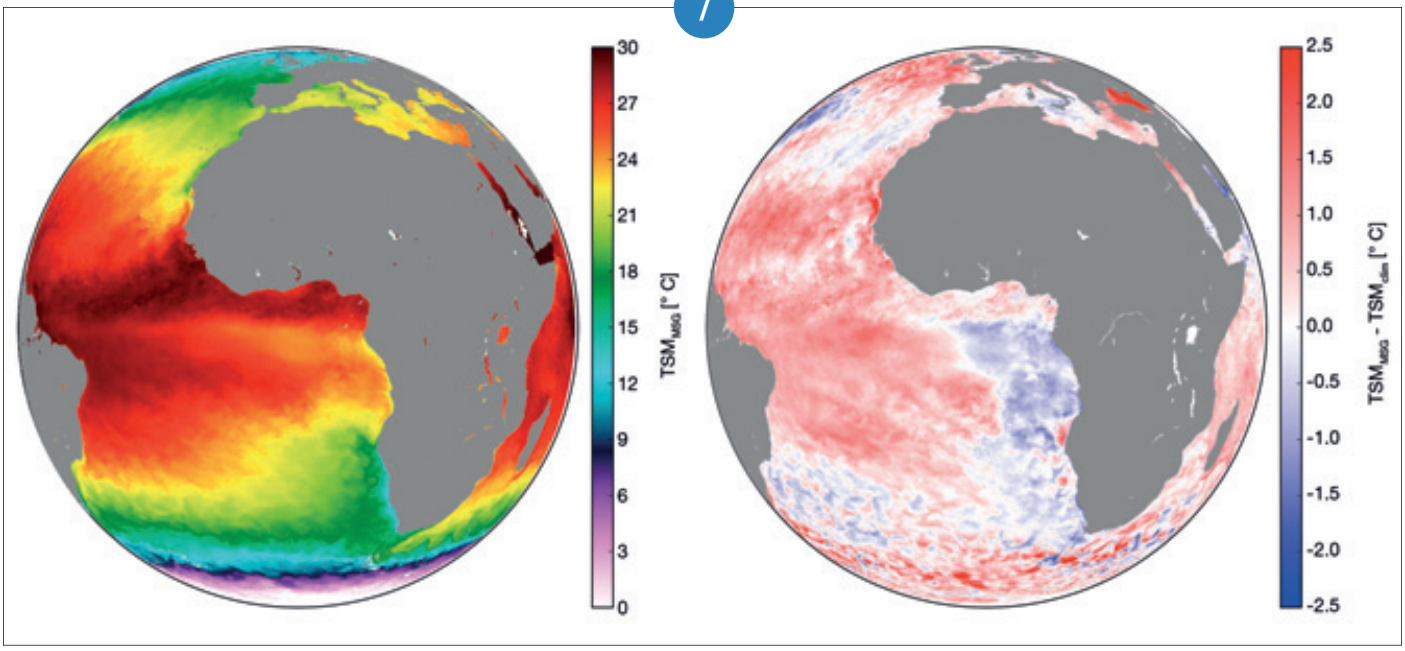
Une méthode de correction d'algorithme est également utilisée afin de corriger les biais régionaux et saisonniers liés en grande partie aux variations du contenu en vapeur eau de l'atmosphère. Cette méthode repose sur l'utilisation de champs atmosphériques issus de la ré-analyse du CEPMMT et d'un modèle de transfert radiatif.

Les poussières désertiques en suspension dans l'atmosphère font également l'objet d'une attention particulière car leur impact sur l'estimation de la TSM est très important. Un indice de présence de poussière est déterminé à partir des canaux 3.9, 8.7, 1.8 et 12.0 µm et permet de corriger la TSM et/ou dégrader l'indice de qualité du produit final.

Le retraitement a fait l'objet d'une validation détaillée à l'aide de données de bouées dérivantes. Les résultats montrent que les produits sont de très bonne qualité (biais moyen global : -0.02°C ; écart-type : 0.43°C) avec une très grande stabilité temporelle. Le jeu de données ainsi produit présente un intérêt majeur pour l'analyse sur le long terme des phénomènes à variabilité haute fréquence (fronts, variabilité diurne de la TSM,...).

7

7



Mois de juin 2010 : à gauche, moyenne mensuelle de la TSM de nuit issue du retraitement de l'archive MSG ; à droite, moyenne mensuelle de la différence à une climatologie de la ré-analyse OSTIA de 1985 à 2007.

Campagnes, techniques et produits d'observation

Les progrès de notre compréhension des processus météorologiques et de leur représentation dans les modèles reposent sur des observations, conduites lors de campagnes de mesure pour des processus ciblés (cyclones tropicaux avec la future campagne ReNov'Risk, dynamique des écoulement à échelle hectométrique en zone de relief avec la campagne Cerdanya-2017, aérosols et nuages avec AERO-CLO-SA), ou sur des observations de longue durée pour évaluer la qualité des modèles à simuler tel ou tel paramètre atmosphérique sur le long terme (évaluation des prévisions des paramètres et flux d'énergie à la surface d'ARPEGE et AROME grâce à la station Météopole-Flux) et situer les améliorations à apporter.

Les besoins de la modélisation appellent le développement des techniques de mesure, de nouveaux capteurs (mesures de qualité de l'air sous ballon jusqu'à la stratosphère avec récupération de la charge utile), ou de techniques de traitement afin d'extraire de nouveaux produits ou des produits plus fins et dont la qualité est mieux caractérisée (estimation de la précision des lames d'eau déduites des mesures radar).

L'observation est enfin un élément clé de la prévision à travers l'assimilation de données issues d'un réseau opérationnel intégrant de nouvelles mesures à valeur ajoutée au fur et à mesure de leur disponibilité (transmission en temps réel de mesures à altitude de vol du système IAGOS) ou selon une logique de prévision statistique immédiate reposant essentiellement sur la mesure (prévision des cyclones de l'Océan indien).

1

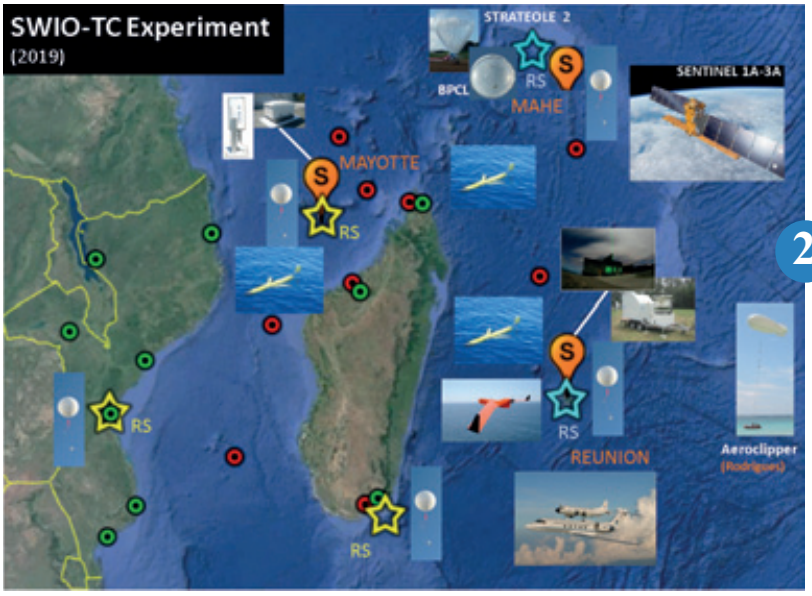
1

◀ Radar nuage BASTA.

Campagnes

Améliorer la compréhension et la prévision de l'activité cyclonique et de ses impacts dans le sud-ouest de l'Océan Indien : la campagne expérimentale du programme INTERREG-V ReNov'Risk-Cyclones

Les cyclones tropicaux (CT) provoquent régulièrement d'énormes pertes humaines, matérielles et environnementales dans les régions tropicales et subtropicales. Ceci est particulièrement vrai dans le sud-ouest de l'océan Indien (SOOI), une région peu étudiée qui connaît une activité cyclonique aussi intense que le bassin Atlantique Nord. Au cours des dernières décennies, un grand nombre de tempêtes ont ainsi causé des ravages dans les Mascareignes (Maurice, La Réunion), à Madagascar, au Mozambique et dans bien d'autres pays voisins. En mars 2017, les CT Enawo et Dineo ont ainsi causé des centaines de morts et plus d'un million de réfugiés à Madagascar et au Mozambique.
La capacité de recueillir des observations précises dans et autour des CT est essentielle pour améliorer leur représentation dans les nouveaux modèles de prévision météorologique numérique à haute résolution élaborés par les principaux services météorologiques. Ceci est d'autant plus important dans le bassin SOOI où les observations sont extrêmement limitées (absence d'observations aéroportées, réseaux d'observation au sol épars...). Afin de pallier ce problème, le programme de recherche ReNov'Risk-Cyclones a été financé par l'UE pour renforcer les capacités d'observation permanente dans cette région et pour organiser une campagne expérimentale de quatre mois dédiée à l'étude des cyclones s'y développant.
Cette campagne expérimentale, appelée SWIO-TC, sera conduite en janvier-avril 2019 par le LACy en collaboration avec ses nombreux partenaires nationaux et internationaux (e.g. NOAA, SMA, DIROI, CNRS, IFREMER, BOM, ESA, CNES, ...). Cette expérimentation, qui visera à mieux documenter les impacts météorologiques et océaniques des CT sur les territoires habités du bassin SOOI, fournira des observations sans précédent sur les cyclones tropicaux et autres phénomènes météorologiques à fort impact se produisant dans cette région, à travers l'obtention de mesures atmosphériques et océaniques coordonnées dans le canal du Mozambique et l'archipel des Mascareignes.



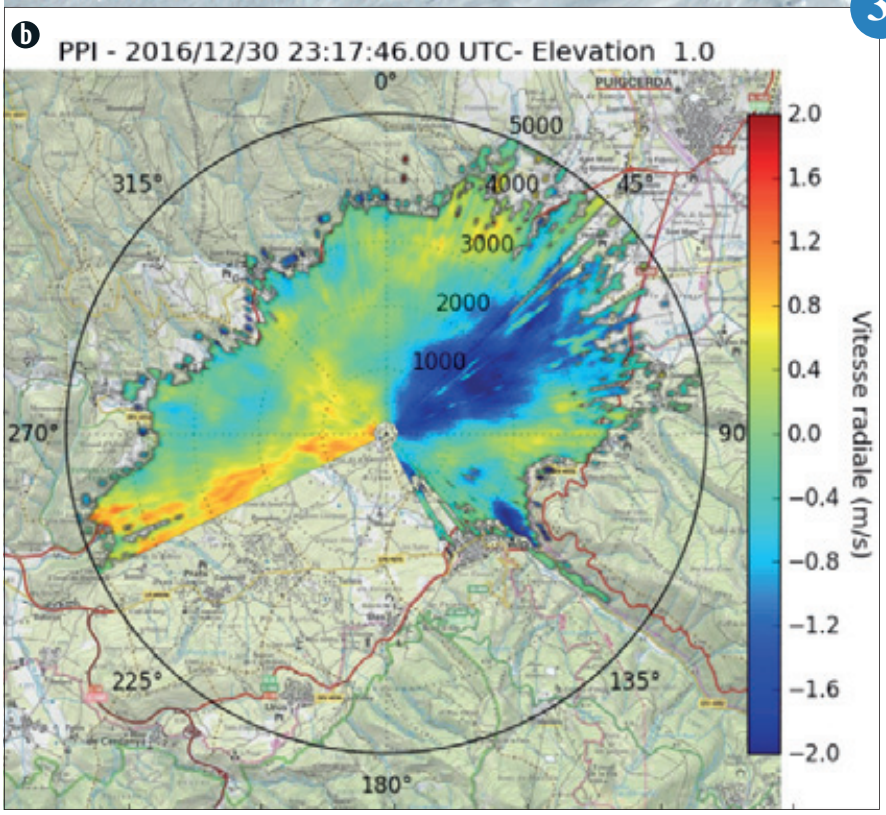
2

Vue d'ensemble du dispositif expérimental envisagé lors de l'expérience SWIO-TC (ce dernier pourra évoluer en fonction des fonds disponibles).

La campagne Cerdanya-2017 : lacs d'air froid, ondes et précipitations orographiques

La Cerdagne est une des vallées les plus larges, sèches et ensoleillées des Pyrénées. Cette vallée d'environ 10 km de large et 35 km de long orientée ENE-OSO, alors que la plupart des vallées pyrénéennes sont orientées N-S, possède un fond relativement plat à environ 1000 m d'altitude entouré de sommets culminant à plus de 2900 m.
La campagne Cerdanya-2017 s'y est déroulée d'Octobre 2016 à Mai 2017, pour étudier trois phénomènes météorologiques: les lacs d'air froid, les ondes et les précipitations orographiques.
La campagne s'intéresse en particulier à la structure fine de l'inversion et au bilan d'énergie en surface dans les lacs d'air froid, aux rotors et à la séparation de couche limite dans les situations d'onde, ainsi qu'au déclenchement et à l'intensification des précipitations dans les régimes stratiformes et convectifs.
Elle est le fruit de l'effort commun de plusieurs équipes de l'euro-région Pyrénées-Méditerranée, appartenant à l'Université des Iles Baléares, l'Université de Barcelone, Météo-France et MeteoCat.
Le CNRM y a déployé dix stations météorologiques de surface dont une station de mesure des échanges surface-atmosphère, une caméra panoramique et plusieurs instruments de télédétection (radar UHF, lidar vent scannant, radiomètre micro-onde en collaboration avec le Laboratoire d'Aérologie), ainsi qu'un drone profileur pendant les périodes d'observation intensive.
Le CNRM s'intéresse en particulier aux conditions stables (lacs d'air froid). Elles ne sont toujours pas très bien représentées dans les modèles de prévision, ce qui induit des difficultés importantes pour prévoir des phénomènes associés tels que température minimale extrême, gel des chaussées, brouillard, mauvaise qualité de l'air ou jet de basse couche (énergie éolienne)...

3



3

▲
a : Vue du site principal (aérodrome de la Cerdagne) le 20 janvier 2017 depuis le point d'envol du ballon captif et des drones. Le fond de vallée était alors couvert de neige ce qui permet d'étudier l'impact de cette couverture sur les phénomènes étudiés, notamment les lacs d'air froid. La tour de contrôle (lidar vent scannant) et plusieurs instruments (station météorologique, radiomètre micro-onde, mini radar précipitation...) se devinent au centre de l'image.
b : Vent radial observé par le lidar vent scannant situé sur le site principal (aérodrome de la Cerdagne, au centre de l'image) dans un plan quasi-horizontal le 30 décembre 2016 à 23h. Les valeurs négatives (en bleu) signifient que le vent va vers le centre de l'image, les valeurs positives (en rouge) qu'il s'en éloigne. Un vent descendant la vallée dans son axe (ENE-OSO) ainsi qu'un écoulement descendant une vallée tributaire (La Molina) dans le secteur SE sont présents. L'étude de l'impact de ces écoulements sur les températures minimales observées dans la vallée est en cours.
◀

Techniques et produits d'observation

Un avion laboratoire à la recherche des aérosols en Namibie pour le projet Aeroclo-sA

Le projet AErosol RadiatiOn and CLOuds in Southern Africa (AEROCLO-sA), soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, le CNES et le CNRS, cherche à évaluer les interactions entre les aérosols, les nuages et le rayonnement et leur représentation dans les modèles globaux et régionaux en Afrique Australe. La représentation des interactions aérosol-rayonnement-nuage demeure parmi les plus grandes incertitudes dans le changement climatique. Il permet de livrer un large jeu de donnée sur l'Atlantique Sud Est, cruciales pour contraindre la génération actuelle des modèles de prévision numérique et les modèles climatiques, grâce à une campagne de terrain au sol et aéroportée en septembre 2017.

Le Falcon 20 exploité par le Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement SAFIRE (CNRS/Météo-France/CNES) a participé à ce projet, en complément de nombreux équipements sol. Basé à Walvis Bay en Namibie, il embarquait différents instruments de télédétection, comme le lidar à rétrodiffusion à haute résolution spatiale LNG ou un radio-polarimètre maquette de l'instrument 3MI (EPS-SG) appelé Osiris, mais aussi des instruments de mesure in-situ (drop-sondes, caractérisation des aérosols). Le Falcon 20 a ainsi réalisé plus de 70 heures de vols, et grâce à l'expertise des personnels des laboratoires français LISA, LATMOS, LOA, DT-INSU et CNRM, de nombreuses données aéroportées ont été collectées. Des données sol ont également été réalisées grâce à la participation complémentaire de l'IRCELYON et du LCE.

Cette campagne aéroportée a permis de documenter les interactions entre les aérosols et les nuages, et d'étudier leur impact sur le rayonnement. Avec l'appui complémentaire de deux projets financés par EUFAR (FP7), elle a également renseigné sur les sources de pollution régionales comme les feux de biomasse ou les poussières désertiques avec l'implication de chercheuses européennes (TROPOS, NOA). Les chercheurs vont maintenant analyser ces données afin d'améliorer la représentation des aérosols dans les modèles climatiques, de réduire l'incertitude de l'effet radiatif direct, semi-direct et indirect des aérosols, et leur impact sur les stratocumulus, et d'améliorer les algorithmes de télédétection de nuages et des aérosols.

3

Développement d'outils statistico-dynamiques pour la prévision d'intensité des cyclones du sud-ouest de l'Océan Indien

Pour soutenir les efforts internationaux visant à améliorer la prévision des systèmes tropicaux, les erreurs de prévision opérationnelle des systèmes du sud-ouest de l'océan Indien (SOOI) ont été examinées sur la période 2001-2016 au CMRS de La Réunion. Les erreurs sont significativement plus élevées à courte échéance pour les systèmes subissant des intensifications rapides (IR), définies comme un changement d'intensité du vent ≥ 15.4 m/s en 24 h : les erreurs moyennes de prévision à 24 h pour ces systèmes sont de 10.8 m/s contre 4.9 m/s pour le reste de l'échantillon.

Des outils statistico-dynamiques de la même veine que ceux développés dans d'autres bassins ont donc été conçus pour améliorer la prévision à courte échéance des changements d'intensité et de l'intensification rapide des systèmes du SOOI. Ils se basent sur l'examen de 26 prédicteurs météorologiques potentiels et des données d'observations du CMRS sur la période 1999-2016. Un prédicteur important, l'IPM (Intensité Potentielle Maximale), est ainsi formulé pour la première fois dans le SOOI, à partir de la relation statistique liant le maximum d'intensité des systèmes et la température de surface de la mer. Le deuxième outil développé est un modèle de régression multilinéaire à plusieurs variables pour la prévision d'intensité à 24 h tenant compte des non-linéarités et des interactions entre variables. Enfin, un arbre de décision a été construit pour la prévision des intensifications rapides dans les prochaines 24 heures (voir figure).

Ces outils seront utilisés et testés lors des prochaines saisons cycloniques. Ils devraient soutenir les prévisionnistes du CMRS en leur apportant des directives supplémentaires pour améliorer la prévision à courte échéance des changements d'intensité des systèmes tropicaux du SOOI.

4

Transmission temps réel des données IAGOS

L'atmosphère est constituée d'une multitude d'ingrédients qui, tous, jouent un rôle dans le ballet tumultueux du temps et du climat : l'eau, sous ses multiples formes, des aérosols et des composés chimiques. En comprendre l'alchimie est un enjeu : le climat dérape sous l'effet des gaz à effet de serre, nos villes sont engluées dans une mélasse de pollution… IAGOS (*In-service aircraft for a global observing system www.iagos.org*) s'emploie à mesurer ces composants à partir d'avions commerciaux : ozone, monoxyde de carbone, oxydes nitreux, aérosols, eau, gaz à effet de serre… IAGOS est une des principales infrastructures de recherche européennes sur le climat.

Les Airbus A340 et A330 des compagnies partenaires de IAGOS – Air France, Lufthansa, China Airlines… jusqu'à la toute récente recrue Hawaiian Airlines – sillonnent le globe et engrangent, vol après vol, de précieuses mesures, sondant finement la verticale atmosphérique et détaillant, aux altitudes de croisière, des interfaces critiques entre haute troposphère et basse stratosphère.

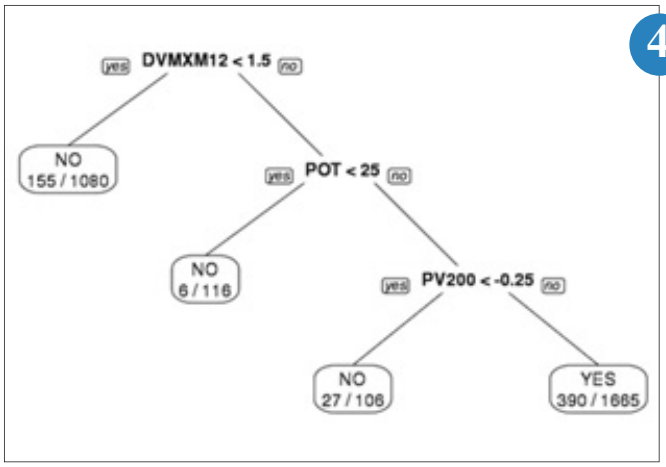
Or, la prévision de la qualité de l'air est aussi un enjeu majeur. Les services météorologiques déploient des systèmes de prévision aux échelles globale et régionale. Météo-France met en œuvre Mocage, qui sert le programme européen « Copernicus Atmosphère » et la plateforme nationale Prev'Air. Dès lors, il semblait logique de collecter en temps réel les mesures IAGOS.

Le CNRM a installé un système de transmission par satellite des mesures IAGOS obtenues à bord de l'A340 D-AIGT de la Lufthansa. Des profils réduits sont transmis, adaptés aux résolutions verticales des modèles numériques et diminuant le coût de télécommunications ; les profils complets sont naturellement conservés à bord pour une exploitation ultérieure. Voici un petit pas technique associant service météorologique et recherche académique, exemple à suivre pour *in fine* toujours mieux servir nos concitoyens.

5

3

« Océan » de particules de feux de biomasse surplombant la Namibie, l'énorme quantité d'aérosol rend impossible de voir la surface. L'épaisseur optique en aérosols est de 1.5 à 500 nm à Windpoort (nord du pays).
Copyright : F. Blouzon, DT-INSU/CNRS



4

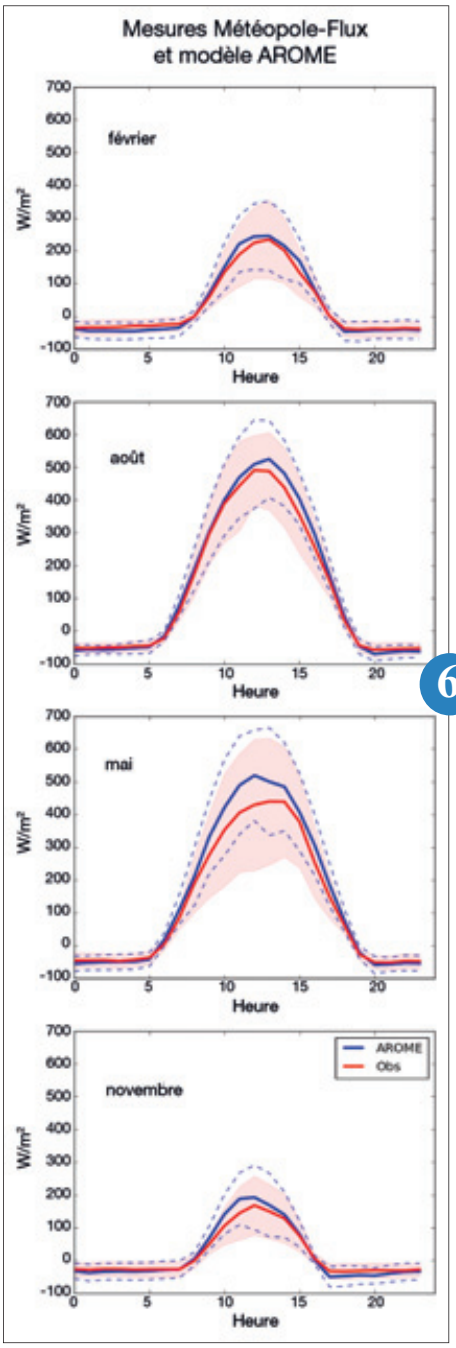
Arbre de décision pour la prévision d'intensification rapide (classe étiquetée YES) à 24 h d'échéance, basé sur les valeurs de 3 prédicteurs météorologiques : DVMX12 (changement d'intensité observé sur les 12 h précédentes, en m/s), POT (l'Intensité Potentielle Maximale IPM moins l'intensité initiale, en m/s), et PV200 (la vorticité potentielle à 200 hPa moyennée sur une couronne de 200 à 800 km de rayon autour du centre du système, en PVU).
Dans chaque feuille terminale sont comptabilisées les observations mal classées parmi le nombre total d'observations qui suivent la branche.

5

a : L'unité de transmission temps réel (RTTU) sert de passerelle entre le système de mesures et d'analyses IAGOS et le Satcom du bord.
b : Le système IAGOS et l'unité de transmission temps réel (RTTU) sont installés dans la soute technique de l'avion, au sein d'une multitude d'équipements. Le technicien de Lufthansa Technik pose les liaisons électriques entre le RTTU et le Satcom, conformément aux spécifications validées par les autorités de certification.

Météopole-Flux : des mesures sur le long terme pour améliorer la modélisation des échanges surface-atmosphère

Le dispositif expérimental Météopole-Flux mesure en continu les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de CO_2 entre la surface et l'atmosphère, les profils de température et d'humidité dans le sol, et les grandeurs météorologiques usuelles, sur le site de la Météopole depuis 2012.
Ces mesures long-terme sont particulièrement intéressantes pour évaluer de manière systématique les comportements des paramétrisations physiques des modèles numériques. En 2017, les mesures ont été comparées aux variables de surface issues des modèles AROME et ARPEGE sur un cycle annuel complet.



6

La température et l'humidité à 2 m sont bien restituées par les modèles, mais on observe des différences significatives et systématiques dans la répartition des différents termes du bilan d'énergie en surface. La poursuite de l'exploitation des données, et notamment des profils dans le sol, contribuera à améliorer la représentation des processus de surface dans les modèles de prévision numérique.
Ce dispositif s'intègre dans des réseaux de recherche nationaux : l'infrastructure de recherche ACTRIS-France, et le réseau ICOS-Ecosystèmes-France (en tant que site associé). La collaboration dans le groupe de travail "flux" d'ACTRIS-France permet une harmonisation des filières de calcul de flux turbulents avec les autres sites (SIRTA et P2OA), et des analyses scientifiques partagées sur une base commune.
En 2018, le nombre de variables mesurées sera élargi grâce à la collaboration de la Direction des Services d'Observation (DSO) de METEO-FRANCE qui dispose d'autres types de capteurs à proximité.

◀ Moyenne mensuelle sur l'année 2016 de l'évolution diurne de la somme des flux de chaleur en surface mesurés par la station Météopole-Flux (rouge) et modélisé par AROME (bleu). Zone ombré rouge : écart-type des mesures. Pointillés bleu : écart-type du modèle. Les mesures permettent de mettre en évidence un biais du modèle au mois de mai.

Capteurs récupérables sous ballons libres

Depuis 2011, l'équipe 4M a développé de nouvelles chaînes de vols sous ballons libres, utilisés classiquement pour le radiosondage, avec double-ballons ou parachutes permettant de récupérer les capteurs embarqués pour permettre leur réutilisation afin de mesurer fréquemment les paramètres thermodynamiques in situ de la couche limite atmosphérique à des altitudes jusqu'à 30 km.
Aujourd'hui, l'équipe 4M est en mesure de réaliser dans la couche limite atmosphérique « des sondages haute cadence », mesure à la montée et à la redescente, double-ballons avec récupération et réutilisation immédiate des radiosondes (BLLAST 2011, PASSY 2015) avec un taux de récupération supérieur à 85 % (Fig. a).
L'équipe 4M réalise également des sondages jusqu'à 30km sous parachute en utilisant des nacelles récupérables pouvant embarquer des capteurs innovants à fortes valeurs ajoutées, comme des capteurs mesurant des gaz à effet de serre CO2 et CH4, (collaboration GSMA de Reims : AMULSE 2013, APOGEE 2017) d'un poids inférieur à 4Kg.
Les développements techniques se poursuivent pour améliorer les systèmes de largage (séparateur double-ballons) ou encore développer des parachutes spécifiques.
Une interface de simulation des sondages a été aussi développée, au sein de l'équipe 4M, pour affiner les prévisions de trajectoire pour récupérer la nacelle au sol. On utilise aussi bien des données issues des champs vent des modèles ARPEGE et AROME (Fig. b) que des données in-situ (radiosondage, profileur de vent...).

7

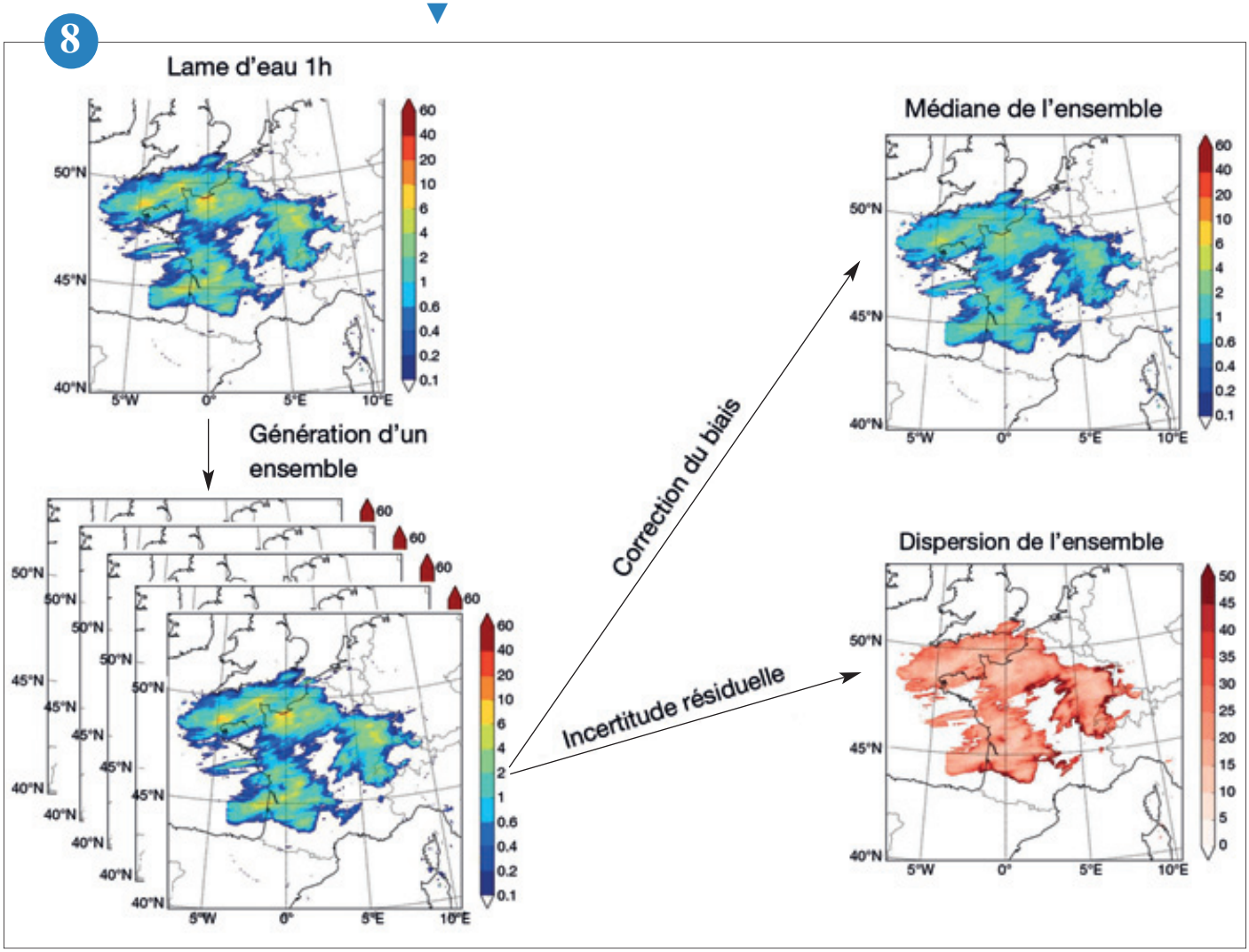
▶ a : lâcher d'une sonde récupérable avec double-ballons lors de la campagne BLLAST 2011.
b : exemple de simulations des sondages récupérables double-ballons lors de la campagne PASSY 2015.

Utilisation de méthodes ensemblistes pour caractériser l'incertitude associée à la lame d'eau radar

L'estimation des précipitations par radar est un élément clé dans de nombreux domaines : prévision immédiate, risques de crues, assimilation de données, etc. Les radars météorologiques présentent un avantage notable en termes de couverture géographique et de fréquence des observations.
Néanmoins, l'estimation de la précipitation au sol à partir d'observations radars volumiques est entachée d'une incertitude importante liée aux erreurs de mesures radars et de paramétrisation des algorithmes de traitement. Une demande croissante des utilisateurs est de pouvoir disposer d'une estimation quantitative de l'incertitude associée à la lame d'eau radar ; ce besoin est d'autant plus important que la résolution des lames d'eau radars va augmenter.
Pour caractériser les incertitudes et corriger les biais, une méthode stochastique qui génère des ensembles de lames d'eau a été développée à Météo France. Cette méthode utilise modèle statistique de variation de l'erreur d'estimation des précipitations (cumulées sur une heure) en fonction de plusieurs paramètres (type et intensité de la précipitation, position de l'observation par rapport au radar, etc.). La médiane de l'ensemble permet alors d'avoir une estimation des précipitations mesurée par le radar corrigé des biais habituels. La dispersion de l'ensemble donne une estimation de l'incertitude associée à la lame d'eau déterministe.
Dans le futur, l'utilisation de ces méthodes doit être étendue aux précipitations cumulées sur 5 minutes afin de répondre à la demande des utilisateurs concernant la composante temporelle de l'évolution de ces incertitudes.

8

Génération d'un ensemble de lames d'eau pour quantifier les incertitudes de la lame d'eau.



Recherche et aéronautique

L'augmentation constatée et prévue à l'horizon 2030 du trafic aérien et les objectifs fixés par les plans globaux ou régionaux de la navigation aérienne obligent à un investissement continu en recherche sur les phénomènes météorologiques impactant l'aéronautique. Ainsi, Météo-France a poursuivi ses travaux pour une meilleure modélisation de la turbulence en altitude, et pour la détection et la prévision du givrage et des cisaillements de vent, en particulier dans les zones d'approche autour des aéroports, travaux précurseurs de futurs services MET - pour les zones terminales - tels que prochainement exigés par l'OACI. En parallèle, les projets de déploiement SESAR pour des nouveaux services MET innovants, tel que développés et prototypés dans la première phase de ce programme européen, ont démarré et l'établissement y est fortement impliqué.

L'année 2017 a ainsi été consacrée essentiellement aux phases de spécifications des futurs services et de définition d'organisation et d'architecture pour une véritable production harmonisée à l'échelle de l'Europe. D'autre part, les activités de la plateforme d'avions instrumentés pour la recherche et l'environnement ont eu pour objectif de contribuer à l'amélioration de la sécurité aérienne. Enfin, Météo-France a eu l'honneur d'accueillir en son Centre International de Conférences au mois de novembre la seconde conférence internationale de l'OMM sur la météorologie et l'aéronautique (AeroMetSci-2017). Première édition depuis 1968, cet évènement a vu la participation de plus de 200 personnes provenant de nombreux services météorologiques nationaux et d'institutions de recherche, de représentants d'usagers aéronautiques (compagnies aériennes, industriels, constructeurs, fournisseurs de services de navigation aérienne, gestionnaires d'aéroport) et d'organisations internationales de régulation. Via des exposés oraux et sous forme de poster, trois grands thèmes ont été développés : la recherche et la science en météorologie aéronautique (cristaux de glace, turbulence, brouillard, cendres volcaniques, météorologie de l'espace), les exigences du futur service au client aéronautique et l'impact du changement climatique sur l'aviation. Cette conférence a répondu aux attentes de l'Organisation, de l'établissement et des participants en termes de transfert de connaissances et d'expertise, de réseaux d'échanges et de travail, et d'établissement de recommandations et d'orientations pour le futur de la recherche en météorologie aéronautique.

1

Utilisation de l'EDR modèle et observé pour la détection de la turbulence en altitude pour l'aéronautique

Phénomène dangereux pour l'aéronautique, la turbulence entraîne des coûts importants pour les compagnies aériennes liés aux blessures des passagers, du personnel navigant et aux dommages causés sur l'avion. Par ailleurs, les compagnies aériennes cherchent à éviter la mauvaise publicité générée par la diffusion rapide des informations via les réseaux sociaux.

L'observation des événements de turbulence se fait par les retours de pilotes et par l'EDR (Eddy Dissipation Rate) enregistré à bord des avions. De plus en plus d'avions sont équipés, ce qui permet de constituer une base de données observées.

Ainsi pour le premier semestre 2017, deux bases de données d'EDR avion issues de flottes différentes, sur les Etats-Unis et sur l'Europe, ont été analysées (climatologie, sensibilité). On note 1% d'événements modérés à sévères (critère de sévérité préconisé en 2017 par le Panel de Météorologie de l'OACI, modéré › 0.2 $m^{2/3}s^{-1}$) sur l'Europe. Les bases de données sont comparées entre elles et au regard des rapports de pilotes. Elles permettent l'évaluation de l'EDR issu du modèle de prévision numérique ARPEGE, ainsi que des indices de turbulence opérationnels à Météo-France calculés à différentes résolutions verticales. Les résultats de la vérification (figure a) montrent des performances similaires entre l'EDR modèle et les différents indices, ainsi que l'impact positif d'une meilleure résolution verticale pour les indices actuels. Des études de cas complètent l'analyse pour définir les spécificités de l'EDR modèle par rapport aux autres indices (voir figure b).

2

Détection des cisaillements de vent sur aéroport : expérimentation sur l'aéroport de Clermont-Ferrand Aulnat

DSO/DOA réalise une expérimentation à l'aéroport de Clermont-Ferrand pendant l'hiver 2017-2018 dont l'objectif est de tester la capacité d'un radar profileur UHF modifié à détecter et caractériser les cisaillements de vent potentiellement gênants pour le trafic aérien.

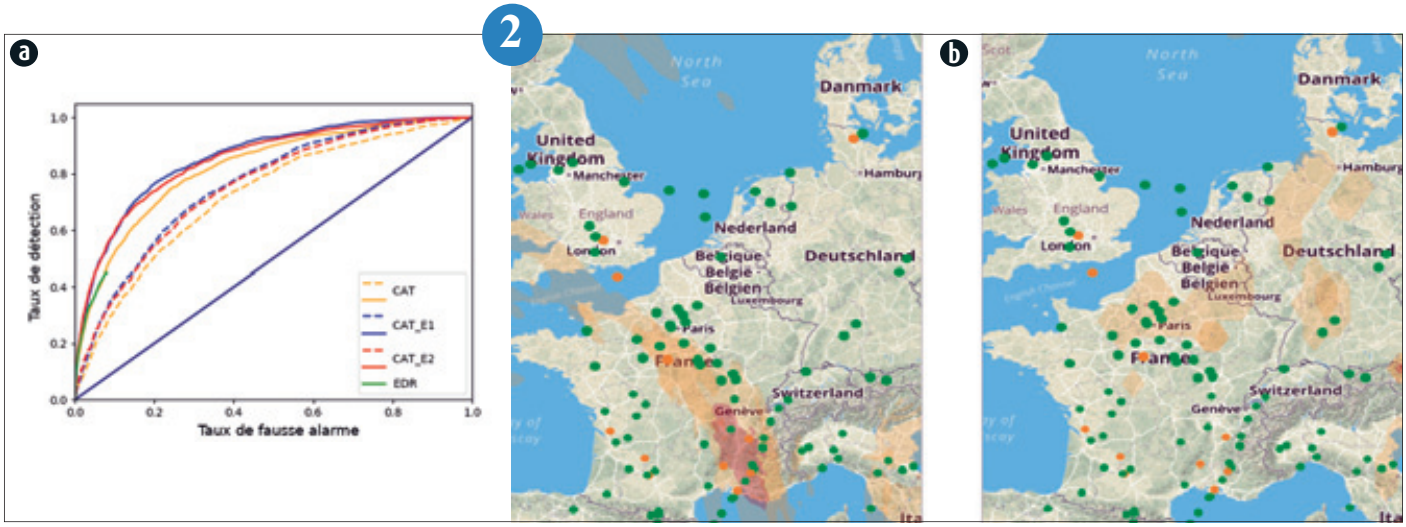
La modification est ambitieuse puisqu'il s'agit de faire « tirer » le radar dans une direction de quelques degrés seulement d'élévation sans que les échos de sol empêchent la mesure du vent. Une référence est nécessaire pour la validation. Elle est fournie par le lidar Doppler scannant du CNRM/GMEI. Installé fin septembre sur le toit du centre météorologique de l'aéroport, le lidar explore le vent horizontal à basse élévation (2,5°) dans un large secteur angulaire (271°) incluant les axes de pistes, ainsi que des coupes verticales dans quatre directions de visée dont les axes de piste. L'exploration d'une portée de 4 km à 5 km est renouvelée toutes les 10 minutes.

Quelques situations intéressantes ont déjà pu être documentées (voir figure). Les vents mesurés par le lidar et le radar dans les mêmes directions vont être comparés pour vérifier la qualité des vents radar, puis pour vérifier que le radar est capable de détecter les cisaillements de vent quand ils ont lieu. Si elle est validée, la solution radar aura l'avantage de pouvoir fonctionner par tout type de temps.

3

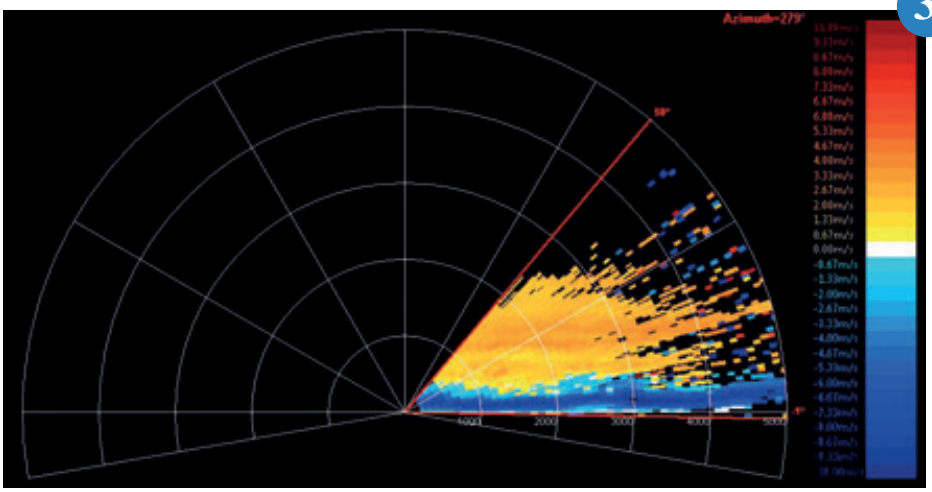
1

AeroMetSci-2017 : Conférence internationale de l'OMM sur la météorologie et l'aéronautique, 6-10 novembre 2017, Météo-France, Toulouse (France).



2

a : courbes ROC des différents indices de turbulence sur l'Europe calculés à partir d'ARPEGE en résolution 0.1° (traits pleins - résolution verticale ~ 1 km / tirets - résolution verticale ~ 2 km).
b : situation 05/03/2017 à 06UTC. Les observations d'EDR avion sont représentées entre 04UTC et 08UTC (points verts = NULL/LIGHT, orange = MOD) sur les indices de turbulence calculés à partir du modèle ARPEGE pour le run de 00UTC échéance 06h. Figure de gauche : indice de Dutton. Figure de droite : EDR modèle. Plage de couleur (orange = MOD, rouge = SEV). Des zones de turbulence différentes sont identifiées (ex : Sud de la France avec Dutton – diffluence de Jet, Nord Allemagne avec EDR – sortie de jet à l'avant d'un thalweg).



3

Vitesse radiale du vent mesurée dans un axe perpendiculaire à la piste de Clermont-Ferrand (azimut 145°).
Les couleurs chaudes indiquent un vent de Nord, les couleurs froides un vent de Sud (l'axe de la piste est 80°/260°).
Un cisaillement de vent intense apparaît vers 250m d'altitude avec un vent de Sud en dessous, à environ 10m/s, et de Nord au-dessus, à environ 3m/s.

Test d'un équipement novateur pour l'amélioration de la sécurité aérienne

Le déclenchement de balises de détresse des aéronefs se fait actuellement au sol lors d'un impact (crash) ou sur déclenchement manuel. Il n'est alors pas rare que le système de détresse ait été endommagé par l'accident et/ou que les conditions environnementales soient défavorables à une bonne transmission ; lorsque les secours recherchent un aéronef manquant, la réception du signal de détresse n'est parfois plus possible.
Le déclenchement d'une balise en vol, automatiquement et dès la détection d'anomalies spécifiques à bord, permettrait de disposer des positions successives de l'aéronef en vol et de localiser avec plus de précision la zone d'impact avec le sol ou la mer. Ceci favoriserait des opérations de secours plus rapides et efficaces, et augmenterait les chances de récupérer des survivants. Ce concept s'appelle l'Autonomous Distress Tracking (ADT) et fait partie du Global Aeronautical Distress and Safety System (GADSS) de l'OACI.
Le projet GRICAS est financé par l'Union Européenne et en particulier l'Agence Européenne pour le GNSS (GSA) au travers du programme Horizon 2020 ; il associe divers industriels et agences publiques dont Thales Alenia Space (TAS), le coordinateur du projet. GRICAS vise à développer un démonstrateur bout en bout d'un système de détresse répondant aux exigences de l'ADT basé sur le système Medium-Earth Orbit Search And Rescue (MEOSAR) de COPAS-SARSAT. De plus, le concept opérationnel GRICAS inclut la possibilité d'activer la balise de détresse à distance grâce au Return Link des satellites Galileo : une commande d'activation est envoyée à la balise d'un avion non-coopératif, typiquement le MH 370, qui peut alors être suivi en vol. Les responsables du projet se sont tournés vers SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement, Unité Mixte de Service Météo-France/CNRS/CNES) pour tester en vol ce démonstrateur incluant notamment une nouvelle balise de détresse ELT(DT) (Emergency Locator Transmitter for Distress Tracking) sur un jet biréacteurs : le Falcon 20. Cet avion spécialement modifié pour la recherche et la R&D aéroportés se prête idéalement à ce type d'essais tant par ses performances de vol que par ses capacités d'adaptation ; doté d'une antenne de réception du système européen de positionnement par satellite «Galileo » et d'emplacements disponibles sur son fuselage pour y implanter une antenne VHF SAR, il intègre également des moyens d'enregistrement très précis de son environnement direct comme de sa trajectoire. En 2017, SAFIRE a intégré le prototype à bord de son jet pour réaliser le troisième essai en vol du projet.
Par son implication dans ce projet, SAFIRE fait la démonstration, au-delà de son activité de support à la recherche en environnement, de sa capacité à contribuer, à travers la R&D aéronautique, à des enjeux importants pour la société comme l'amélioration de la sécurité de la navigation aérienne.

4

L'ATR 42 de SAFIRE, une plateforme pour des évaluations de recalage de système de navigation

La position et l'attitude d'un avion font appel à un instrument dit « centrale inertielle ». Les données issues de tels instruments sont faites par rapport à des référentiels terrestres. L'alignement d'une centrale est une phase essentielle à son fonctionnement. C'est le moment pendant lequel elle va se créer ses axes de référence (plan horizontal et vertical). Une centrale inertielle est constituée de 3 gyromètres et de 3 accéléromètres permettant de mesurer les vitesses angulaires et les accélérations linéaires. Les technologies utilisées évoluent depuis quelques années. La précision des centrales atteignent le 1/100^{e} de degré sur le CAP, le roulis ou le tangage. La position de la centrale est calculée par intégration des sorties capteurs qui sont affectées par des erreurs qui induisent une dérive de la centrale inertielle. Pour recaler ces erreurs, dues aussi à la rotondité de la terre, on peut utiliser des données GPS (système américain de positionnement, ou GLONASS et bientôt GALILEO), on parle d'hybridation. Dans l'espace, les satellites se positionnent sur leur orbite (orientation le long de la trajectoire) en utilisant la position des étoiles.
Le but de l'expérience menée en collaboration avec la DGA est d'utiliser la direction des étoiles pour recaler les données des centrales inertielles en plein jour. Ainsi une centrale, matériel déjà autonome, serait corrigée de l'erreur de dérive en l'hybridant avec un viseur stellaire. Le challenge consiste à détecter puis poursuivre les étoiles dans des conditions de vol aéronautique de jour ou de nuit afin de recaler le système inertiel. Lors des derniers vols une architecture de caméra mise au point par le CNES (Viseur diurne MIRA) a permis de faire la démonstration qu'un concept innovant de viseur diurne est capable d'acquérir et de poursuivre des étoiles de jour – une première en France ! Les essais, d'une durée totale d'environ quinze heures, ont été réalisés à divers moments de la journée afin de tester plusieurs environnements lumineux suivant plusieurs scenarios de vols. D'autres essais auront lieu fin 2017 pour tester d'autres moyens d'hybridation.

5

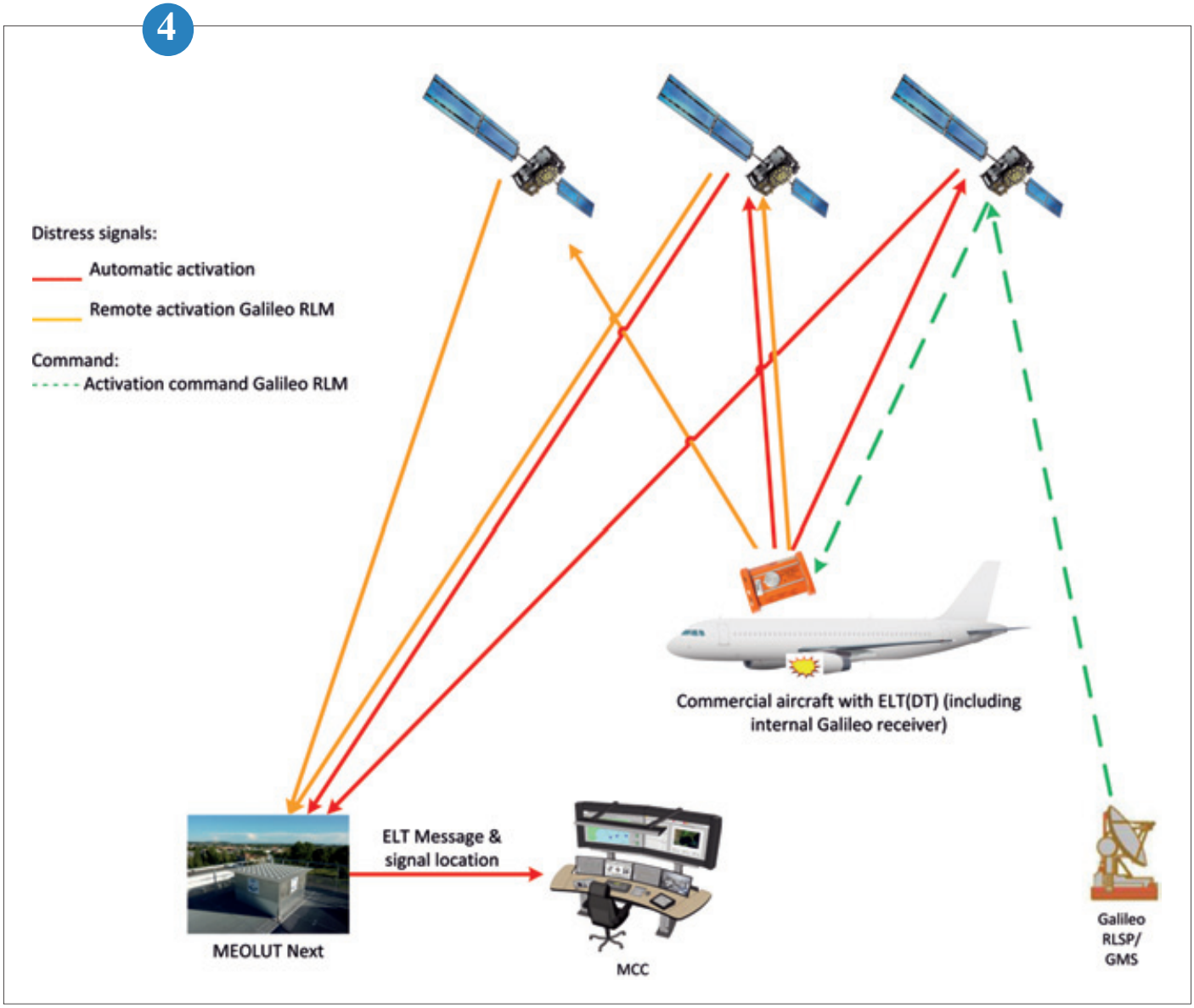


Schéma de principe du fonctionnement du projet GRICAS.

L'ATR 42 de SAFIRE.
Crédit : Jean-Christophe Canonici / Météo-France

Élaboration d'un nouvel indice de givrage à partir d'AROME pour la prévision aéronautique

Le givrage par congélation d'eau surfondue représente un danger important pour l'aéronautique pouvant provoquer des pertes de contrôle. La disponibilité de nouvelles observations de givrage a permis de réaliser deux études contribuant à l'amélioration de la prévision des zones givrantes.

Tout d'abord, les simulations du modèle opérationnel AROME ont été confrontées à vingt-deux mois d'observations d'occurrence de givrage sur la métropole par une compagnie aérienne, pour construire des histogrammes multidimensionnels de probabilité de givrage en fonction de différentes variables simulées. Les variables les plus pertinentes ont été sélectionnées par un algorithme objectif pour établir un nouveau diagnostic de givrage (Fig. b). Ce nouvel indice améliore les scores (taux de détection et de fausses alarmes), et est en cours d'évaluation par les prévisionnistes.

Ensuite, une campagne de mesures en conditions givrantes réalisée sur un hiver par AIRBUS Hélicoptères a été exploitée pour comparer directement les propriétés microphysiques observées (contenu en eau liquide et diamètre volumique moyen des gouttes) à celles simulées par le modèle de recherche Méso-NH, utilisant plusieurs versions du schéma microphysique à un moment ICE3 opérationnel dans AROME et le schéma à deux moments LIMA destiné à AROME. La capacité du modèle à prévoir des conditions givrantes est limitée par la tendance des schémas microphysiques à transformer trop d'eau surfondue en espèces glacées.

Le nouvel indice pourrait permettre de mieux prévoir le givrage avec la configuration actuelle des modèles, et l'étude sur les nouveaux schémas participera à l'amélioration des capacités de prévision de givrage dans les futures versions d'AROME.

6

Potentiel des observations radar à double-polarisation pour la détection du givrage

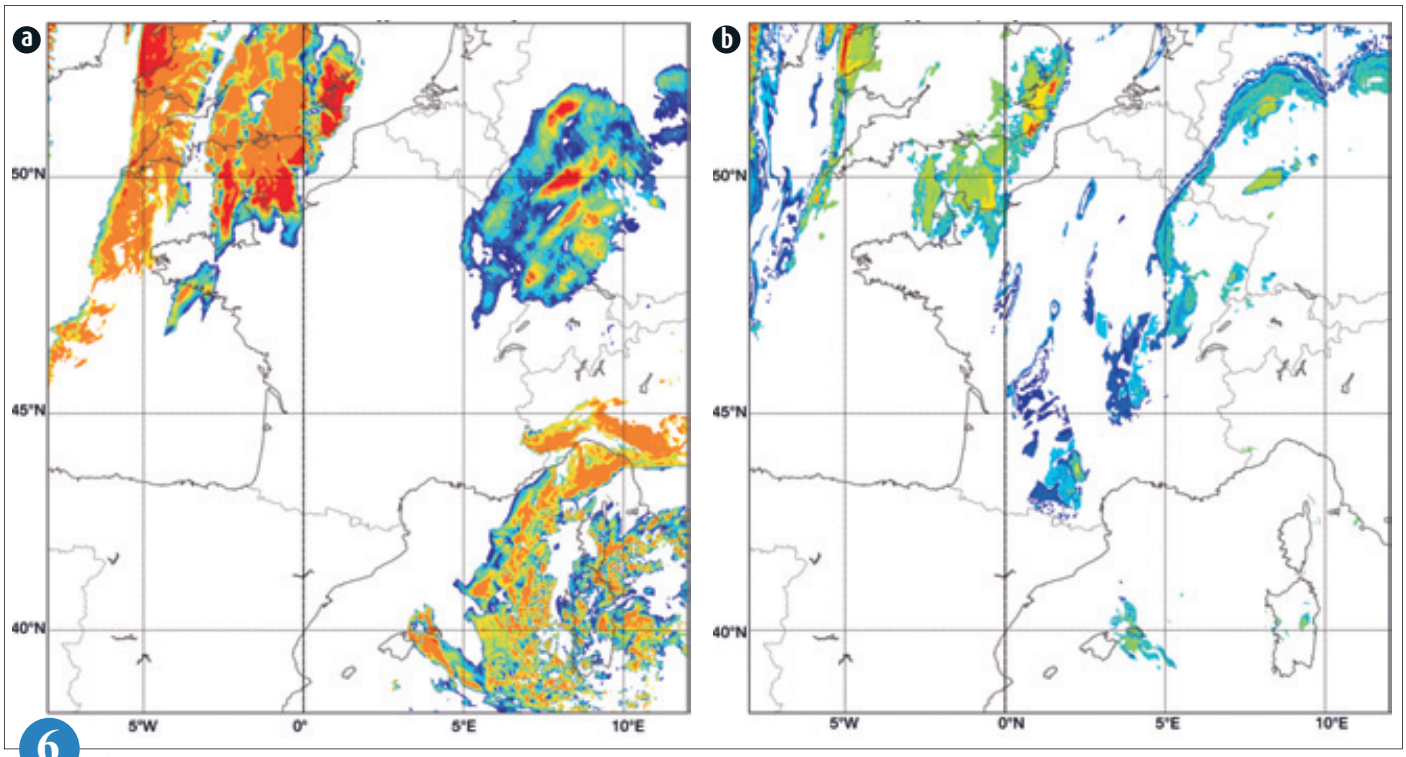
Les données radar à double-polarisation peuvent être particulièrement utiles pour diagnostiquer les processus microphysiques dans les précipitations, car elles apportent des informations sur la taille, la forme et la composition des hydrométéores. L'objet de cette étude était d'examiner leur potentiel pour la détection d'eau surfondue dans les nuages, ce qui pourrait être utile pour le suivi des conditions givrantes pour les avions.

Les observations du radar de Plabennec ont été examinées ainsi que des données in-situ (température, contenu en eau liquide) provenant d'une campagne de mesure par hélicoptère pendant l'hiver 2015-2016. L'évolution des profils verticaux moyens des variables radar a été analysée, tel qu'illustré sur la figure.

En particulier, quatre cas avec des valeurs significatives de déphasage différentiel spécifique Kdp (›0.5° km-1) ont été observés à une température de -5°C, juste au-dessus d'une région caractérisée par un minimum de réflectivité différentielle spécifique (Zdr) correspondant à la zone d'eau surfondue. De telles signatures ont également été reportées dans des études récentes, qui ont attribué les valeurs significatives de Kdp à de petits cristaux denses et très aplatis (aiguilles) tandis que les valeurs faibles de Zdr seraient liées à la présence de particules de graupel, plus grosses et quasi-sphériques. Sachant que ces deux types d'hydrométéores se forment en présence d'eau surfondue, ces signatures de Zdr et Kdp semblent être de bons indicateurs de la présence de conditions givrantes.

Ces premiers résultats suggèrent donc que l'analyse des distributions verticales des données radar peut mettre en évidence des processus microphysiques liés à la présence d'eau surfondue, ce qui pourrait contribuer à améliorer le diagnostic existant de givrage à Météo France (SIGMA).

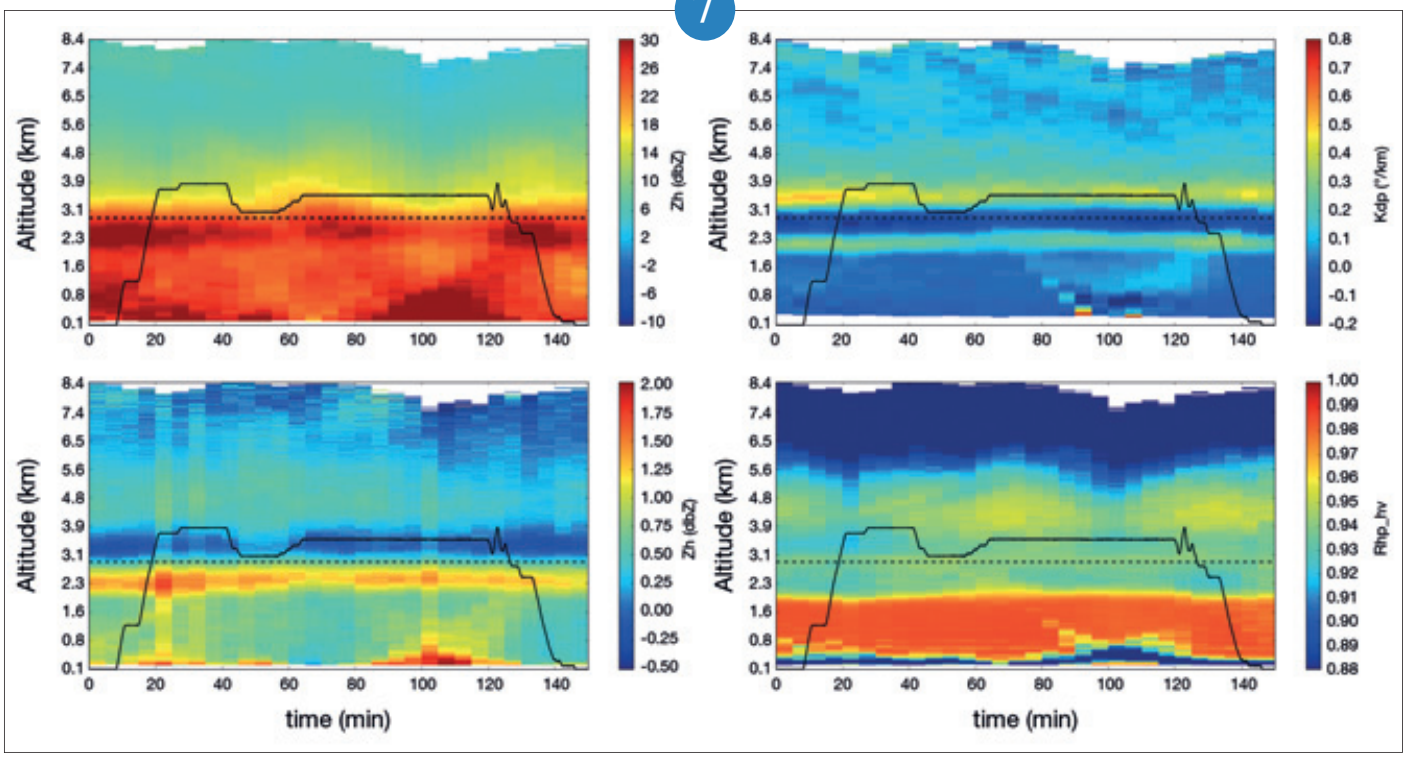
7



6

Indices de givrage prévus par AROME pour le 7 novembre 2017 à 9h UTC à 800 hPa par (a) l'ancien indice et (b) le nouvel indice. Les indices n'étant pas calibrés de la même manière, les valeurs ne peuvent pas être comparées, seules les zones impactées peuvent l'être.

7



Évolution temporelle des pseudo-profils verticaux de réflectivité (Zh), déphasage différentiel spécifique (Kdp), réflectivité différentielle (Zdr) et coefficient de corrélation (ρhv), obtenus en moyennant tous les azimuts du radar bande C de Plabennec, à l'élévation 2.8°. Cas 1 : 1435 à 1650 UTC. La ligne noire indique l'altitude de l'hélicoptère, correspondant à une température d'environ -4°C. L'hélicoptère a mesuré de l'eau surfondue avec des contenus en eau liquide de 0.1 à 0.6 g m-3 entre 40 et 120 de vol. L'isotherme 0°C est indiqué par une ligne noire en pointillés.

Annexes

Liste des publications scientifiques 2017

Publications scientifiques dans des revues de rang « a » (facteur d'impact > 1)

Abida, R., Attié, J.-L., El Amraoui, L., Ricaud, P., Lahoz, W., Eskes, H., Segers, A., Curier, L., de Haan, J., Kujanpää, J., Nijhuis, A. O., Tamminen, J., Timmermans, R., and Veefkind, P.: Impact of spaceborne carbon monoxide observations from the S-5P platform on tropospheric composition analyses and forecasts. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17, Issue: 2, Pages: 1081-1103, Doi: 10.5194/acp-17-1081-2017. Published: JAN 24 2017.

Adam, O., F. Brient et al., 2017: Regional and seasonal variations of the double-ITCZ bias in CMIP5 models, see here.

Adloff, F., G. Jordà, S. Somot, F. Sevault, T. Arsouze, B. Meyssignac, L. Li, S. Planton, 2017: Improving sea level simulation in Mediterranean regional climate models. Climate Dynamics, Doi: 10.1007/s00382-017-3842-3.

Albergel, C., S. Munier, D.J. Leroux, H. Dewaele, D. Fairbairn, A. L. Barbu, E. Gelati, W. Dorigo, S. Faroux, C. Meurey, P. Le Moigne, B. Decharme, J.-F. Mahfouf, J.-C. Calvet, 2017: Sequential assimilation of satellite-derived vegetation and soil moisture products using SURFEX_v8.0: LDAS-Monde assessment over the Euro-Mediterranean area. Geoscientific Model Development, Volume: 10 Issue: 10 Pages: 3889-3912 Published: OCT 25 2017

Anderson, D. C., J. M. Nicely, G. M. Wolfe, T. F. Hanisco, Ross J. Salawitch, T. P. Canty, R. R. Dickerson, E. C. Apel, E. Atlas, S. Baidar, T. J. Bannan, N. J. Blake, D. Chen, B. Dix, R. P. Fernandez, S. R. Hall, R. S. Hornbrook, G. Huey, B. Josse, P. Jöckel, D. E. Kinnison, T. K. Koenig, M. LeBreton, V. Marécal, O. Morgenstern, L. D. Oman, L. L. Pan, C. Percival, D. Plummer, L. Revell, E. Rozanov, A. Saiz-Lopez, A. Stenke, S. Tilmes, K. Ullmann, R. Volkamer, A. J. Weinheimer, G.Zeng, Formaldehyde in the Tropical Western Pacific: Evaluation of controlling mechanisms, models, and its effects on the atmospheric oxidative capacity J. Geophys. Res., vol. 122, 20, 11,201–11,226, 10.1002/2016JD026121, 2017.

Ardilouze, C., Batté, L., Bunzel, F., Decremer, D., Déqué, M., Doblas-Reyes, F.J., Douville, H., Fereday, D., Guemas, V., MacLachlan, C., Müller, W., Prodhomme, C., 2017 : Multi-model assessment of the impact of soil moisture initialization on mid-latitude summer predictability. Clim Dyn. doi:10.1007/s00382-017-3555-7. Published : NOV 2017

Ardilouze, C., Batté, L., Déqué, M., 2017 : Subseasonal-to-seasonal (S2S) forecasts with CNRM-CM : a case study on the July 2015 West-European heat wave, Adv. Sci. Res., 14, 115-121, doi:10.5194/asr-14-115-2017. Published : MAY 2017.

Arndt J., J. Sciare, M. Mallet, G. Roberts, N. Marchand, K. Sartelet, K. Sellegri, F. Dulac, R. M. Healy, and J. C. Wenger, 2017: Sources and mixing state of summertime background aerosol in the northwestern Mediterranean basin. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17, Issue: 11, Pages: 6975-7001, Doi: 10.5194/acp-17-6975-2017. Published : JUN 14 2017.

Ayhan, S., M. Pauli, S. Scherr, B. Gottel, A. Bhutani, S. Thomas, T. Jaeschke, J.-M. Panel, F. Vivier, L. Eymard, A. Weill, N. Pohl and T. Zwick, 2017 : Millimeter-Wave Radar Sensor for Snow Height Measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Volume: 55, Issue: 2, Pages: 854-861, Doi: 10.1109/TGRS.2016.2616441, Published: NOV. 2017.

Bador, M., Terray L., Boé J., Somot S., Alias A., Gibelin A.-L., Dubuisson B., 2017 : Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate. Environmental Research Letters, Volume: 12, Issue : 7, Article Number: 074025, Doi: 10.1088/1748-9326/aa751c. Published: JUL 2017.

Barlow, J., M. Best, S.I. Bohnenstengel, P. Clark, S. Grimmond, H. Lean, A. Christen, S. Emeis, M. Haeffelin, I.N. Harman, A. Lemonsu, A. Martilli, E. Pardyjak, M.W. Rotach, S. Ballard, I. Boutle, A. Brown, X. Cai, M. Carpentieri, O. Coceal, B. Crawford, S. Di Sabatino, J. Dou, D.R. Drew, J.M. Edwards, J. Fallmann, K. Fortuniak, J. Gornall, T. Gronemeier, C.H. Halios, D. Hertwig, K. Hirano, A.A. Holtslag, Z. Luo, G. Mills, M. Nakayoshi, K. Pain, K.H. Schlünzen, S. Smith, L. Soulhac, G. Steeneveld, T. Sun, N.E. Theeuwes, D. Thomson, J.A. Voogt, H.C. Ward, Z. Xie, and J. Zhong, 2017: Developing a Research Strategy to Better Understand, Observe, and Simulate Urban Atmospheric Processes at Kilometer to Subkilometer Scales. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, ES261–ES264, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0106.1

Barrere, M., F. Domine, B. Decharme, S. Morin, V. Vionnet and M. Lafaysse, 2017: Evaluating the performance of coupled snow–soil models in SURFEXv8 to simulate the permafrost thermal regime at a high Arctic site. Geoscientific Model Deve-lopment, Volume: 10, Issue: 9, Pages: 3461-3479, Doi: 10.5194/gmd-10-3461-2017 (https:// doi.org/10.5194/gmd-10-3461-2017), Published: SEP 2017.

Bellprat, O., J. García-Serrano, N. Fučkar, F. Massonnet, V. Guemas, and F. J. Doblas-Reyes, 2017 : The Role of Arctic Sea Ice and Sea Surface Temperatures on the Cold 2015 February Over North America AMS.

Benedetti, F., Guilhaumon F., Adloff F., Ayata S.-D. (2017) Investigating uncertainties in zooplankton composition shifts under climate change scenarios in the Mediterranean Sea. Ecography (accepted)

Berner J., U. Achatz, L. Batté, L. Bengtsson, A. de la Cámara, Antje Weisheimer, Michael Weniger, Paul D. Williams, J.-I. Yano and al., 2017: Stochastic Parameterization: Toward a New View of Weather and Climate. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 98, Issue: 3, Pages: 565-587, Doi: 10.1175/BAMS-D-15-00268.1. Published: MAR 2017.

Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Béranger, K., C. Lebeaupin Brossier, 2017: Lagged effects of the Mistral wind on heavy precipitation through ocean-atmosphere coupling in the region of Valencia. Climate Dynamics, Doi: 10.1007/s00382-016-3153-0.

Birman, C., F. Karbou, J. Mahfouf, M. Lafaysse, Y. Durand, G. Giraud, L. Mérindol and L. Hermozo, 2017 : Precipitation Analysis over the French Alps Using a Variational Approach and Study of Potential Added Value of Ground-Based Radar Observations. Journal of Hydrometeorology, Volume: 18, Pages: 1425-1451, Doi: 10.1175/JHM-D-16-0144.1, Published : MAY 2017.

Blanchard-Wrigglesworth, E., A. Barthélemy, M. Chevallier, R. Cullather, N. Fu kar, F. Massonnet, P. Posey, W. Wang, J. Zhang, C. Ardilouze, M. Bitz, G. Vernieres, A. Wallcraft and M. Wang, 2017 : Multi-model seasonal forecast of Arctic sea-ice: forecast uncertainty at pan-Arctic and regional scales. Climate Dynamics, Volume: 49, Issue: 4, Pages: 1399-1410, Doi: 10.1007/s00382-016-3388-9. Published : AUG 2017.

Boone, A., P. Samuelsson, S. Gollvik, A. Napoly, L. Jarlan, E. Brun, and B. Decharme, 2017 : The interactions between soil–biosphere–atmosphere land surface model with a multi-energy balance (ISBA-MEB) option in SURFEXv8 – Part 1: Model description. Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 2, Pages: 843-872, Doi: 10.5194/gmd-10-843-2017. Published: FEB 21 2017.

Bordois, L., F. Auclair, A. Paci, Y. Dossmann and C. Nguyen (2017). Non-linear processes generated by supercritical tidal ow in shallow straits. Physics of Fluids.

Bouin, M.-N., Redelsperger, J.-L. and Lebeaupin Brossier, C., 2017: Processes leading to deep convection and sensitivity to sea-state representation during HyMeX IOP8 heavy precipitation event.Quaterly journal of the Royal Meteorological Society. Volume: 143 Issue: 707 Pages : 2600-2615 Part: B Published: JUL 2017. doi: 10.1002/qj.3111

Bourgeois, D. Bouniol, F. Couvreux, F. Guichard, J. Marsham, L. Garcia-Carreras, C. Birch and D. Parker, 2017: Characteristics of mid-level clouds over West Africa. Accepted manuscript online: 24 nov 2017 - Doi: 10.1002/qj.3215.

Brooks, I. M., Tjernström, M., Persson,P. O. G., Shupe, M. D., Atkinson, R. A., Guylaine Canut, Cathryn E. Birch, Thorsten Mauritsen, Joseph Sedlar, and Barbara J. Brooks, 2017 : The turbulent structure of the Arctic summer boundary layer during The Arctic Summer Cloud-Ocean Study. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122.

Calvet, J.-C., Fritz, N., Berne, C., Piguet, B., Maurel, W., and Meurey, C.: Deriving pedotransfer functions for soil quartz fraction in southern France from reverse modeling, SOIL, 2, 615-629, Doi : 10.5194/soil-2-615-2016.

Canal, N., O. Deudon, X. Le Bris, P. Gate, G. Pigeon, M. Regimbeau, J.-C. Calvet , 2017: Anticipation of the winter wheat growth using the seasonal weather forecast over France. Meteorological Applications, Volume: 24, Issue: 3, Pages: 432-443, Doi: 10.1002/met.164. Published: JUL 2017.

Cariolle, D., P. Moinat, H. Teyssèdre, L. Giraud, B. Josse, and F. Lefèvre, 2017 : ASIS v1.0: an adaptive solver for the simulation of atmospheric chemistry.

Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 4, Pages: 1467-1485, Doi: 10.5194/gmd-10-1467-2017, Published: APR 11 2017.

Cavicchia, L., Scoccimarro E., Gualdi S., Ahrens B., Berthou S., Conte D., Dell'Aquila A., Drobinski P., Djurdjevic V., Dubois C., Gallardo C., Li L., Oddo P., Sanna A., Torma C. (2016) Spatiotemporal characterisation of Mediterranean extreme precipitation events: a multi-model assessment. Climate Dynamics, doi : 10.1007/s00382-016-3245-x

Cesana, G., K. Suselj and F. Brient, 2017 : On the Dependence of Cloud Feedbacks on Physical Parameterizations in WRF Aquaplanet Simulations. Geophysical Research Letters, Volume : 44, Issue : 20, Pages : 10762-10771, Doi : 10.1002/2017GL074820. Published : OCT 28 2017.

Chadwick, R., H. Douville and C.B. Skinner, 2017: Timeslice experiments for understanding regional climate projections: Applications to the tropical hydrological cycle and European winter circulation. Climate Dynamics, Volume: 49, Issue: 9-10, Pages: 3011-3029, Doi: 10.1007/s00382-016-3488-6. Published: NOV 2017.

Chadwick, R., G. M. Martin, D. Copsey, G. Bellon, M. Caian, F. Codron, C. Rio, and R. Roehrig (2017): Examining the West African Monsoon circulation response to atmospheric heating in a GCM dynamical core. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Volume: 9, Issue: 1, Pages: 149-167, Doi: 10.1002/2016MS000728. Published: MAR 2017.

Chauvin F, H. Douville and A. Ribes, 2017: Atlantic tropical cyclones water budget in observations and CNRM-CM5 model. Climate Dynamics, Volume: 49, Issue: 11-12, Pages: 4009-4021, Doi: 10.1007/s00382-017-3559-3. Published: DEC 2017.

Chevallier, M., Smith, G., Lemieux, J.-F., Dupont, F., Forget, G., Fujii, Y., Hernandez, F., Msadek, R., Peterson, K.A., Storto, A., Toyoda, T., Valdivieso, M., Vernieres, G., Zuo, H., Balmaseda, M., Chang, Y.-S., Ferry, N., Garric, G., Haines, K., Keeley, S., Kovach, R.M., Kuragano, T., Masina, S., Tang, Y., Tsujino, H., Wang, X, 2016. Intercomparison of the Arctic sea ice cover in global ocean-sea ice reanalyses from the ORA-IP project. Climate Dynamics, Volume: 49, Issue: 3, Special Issue: SI, Pages: 1137-1138, Doi: 10.1007/s00382-016-2985-y. Published: AUG 2017.

Coppola, L., L. Prieur, I. Taupier-Letage, C. Estournel, P. Testor, D. Lefevre, S. Belamari, S. LeReste, and V. Taillandier (2017), Observation of oxygen ventilation into deep waters through targeted deployment of multiple Argo-O2 floats in the northwestern Mediterranean Sea in 2013, J. Geophys. Res. Oceans, 122, doi:10.1002/2016JC012594.

Couto, F., V. Ducrocq, R. Salgado and M. J. Costa, 2017 : Understanding significant precipitation in Madeira island using high-resolution numerical simulations of real cases. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 702, Special Issue: UNDEFINED, Supplement: UNDEFINED, Pages: 251-264, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2918. Published: JAN 2017.

D'Amboise, C. J. L., K. Müller, L. Oxarango, S. Morin and T. V. Schuler, 2017 : Implementation of a physically based water percolation routine in the Crocus/SURFEX (V7.3) snowpack model. Geoscience Model Development, Volume: 10, Issue: 9, Pages: 3547-3566, Doi: 10.5194/gmd-10-3547-2017, Published: SEP 2017.

Daniel, M., A. Lemonsu, V. Viguié: "Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate", Urban Climate, Available online 15 November 2016, http://dx.doi.org.insu.bib.cnrs.fr/10.1016/j.uclim.2016.11.001

Dayan, U., P. Ricaud, R. Zbinden and F. Dulac : Atmospheric pollution over the eastern Mediterranean during summer - a review. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17, Issue: 21, Pages: 13233-13263, DOI: 10.5194/acp-17-13233-2017. Published: NOV 8 2017.

De Angelis, F., Cimini, D., Lohnert, U., Caumont, O., Haefele, A., Pospichal, B., Martinet, P., Navas-Guzman, F., Klein-Baltink, H., Dupont, J.C., Hocking, J., 2017: Long-term observations minus background monitoring of ground-based brightness temperatures from a microwave radiometer network. Atmospheric Measurement Techniques, Volume: 10, Issue: 10, Pages: 3947-3961, Doi: 10.5194/amt-10-3947-2017. Published: OCT 25 2017

Dell'Aquila, A, A. Mariotti, S. Bastin, S. Calmanti, L. Cavicchia, M. Déqué, V. Djurdjevic, M. Dominguez, M. Gaertner, and S. Gualdi, 2017: Evaluation of simulated decadal variations over the Euro-Mediterranean region from ENSEMBLES to Med-CORDEX, Climate Dynamics, Volume: , Issue: , Pages: , Doi : 10.1007/s00382-016-3143-2

Demuzere, S. Harshan, L. Järvi, M. Roth, C. S. B. Grimmond, V. Masson, K. W. Oleson, E. Velasco and H. Wouters, 2017: Impact of urban canopy models and external parameters on the modelled urban energy balance in a tropical city . Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 704, Pages: 1581-1596, Part: A, Doi: 10.1002/qj.3028. Published : APR 2017.

Déqué, M., S. Calmanti, O. Christensen, A. Dell Aquila, C. Maule, A. Haensler, G. Nikulin, C. Teichmann, 2017: A multi-model climate response over tropical Africa at +2 °C, Climate Services, Doi: 10.1016/j.cliser.2016.06.002.

Dewaele, H., Munier, S., Albergel, C., Planque, C., Laanaia, N., Carrer, D., and Calvet, J.-C.: Parameter optimisation for a better representation of drought by LSMs: inverse modelling vs. sequential data assimilation, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4861–4878, https://doi.org/10.5194/hess-21-4861-2017, 2017.

Diallo, F. B., Hourdin, F., Rio, C., Traore, A.-K., Mellul, L., Guichard, F., Kergoat, L., 2017: The surface energy budget computed at the grid-scale of a climate model challenged by station data in West Africa. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 9, 2710–2738. https://doi.org/10.1002/ 2017MS001081

Dorigo, W., W. Wagner, C. Albergel, F. Albrecht, G. Balsamo, L. Brocca, D. Chung, M. Ertl, M. Forkel, A. Gruber, E. Haas, P. D. Hamer, M. Hirschi, J. Ikonen, R. de Jeu, R. Kidd, W. Lahoz, Y. Y. Liu, D. Miralles, T. Mistelbauer, N. Nicolai-Shaw, R. Parinussa, C. Pratola, C. Reimer, R. van der Schalie, S. I. Seneviratne, T. Smolander and P. Lecomte, 2017: ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. Remote Sensing of Environment, Volume: 203, Pages: 185-215, Doi: 10.1016/ j.rse.2017.07.001. Published: DEC 15 2017.

Dorigo, W., W. Wagner, C. Albergel, F. Albrecht, G. Balsamo, L. Brocca, D. Chung, M. Ertl, M. Forkel, A. Gruber, E. Haas, P. D. Hamer, M. Hirschi, J. Ikonen, R. de Jeu, R. Kidd, W. Lahoz, Y. Y. Liu, D. Miralles, T. Mistelbauer, N. Nicolai-Shaw, R. Parinussa, C. Pratola, C. Reimer, R. van der Schalie, S. I. Seneviratne, T. Smolander and P. Lecomte, 2017: ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions, Remote Sensing of Environment, Volume: 203 Pages: 185-215 Published: DEC 15 2017

Douville H., Y. Peings and D. Saint-Martin, 2016: Snow-(N)AO relationship revisited over the whole 20th century. Geophysical Research Letters, Volume: 44, Issue: 1, Pages: 569-577, Doi: 10.1002/2016GL071584. Published: JAN 2017.

Douville H., M. Plazzotta, 2017: Midlatitude summer drying: An underestimated threat in CMIP5 models ? Geophysical Research Letters, Volume : 44, Issue: 19, Pages: 9967-9975, Doi: 10.1002/2017GL075353. Published: OCT 16 2017.

Drobinski, P., Da Silva N., Panthou G., Bastin S., Muller C., Ahrens B., Borga M., Conte D., Fosser G., Giorgi F., Güttler I., Kotroni V., Li L., Morin E., Onol B., Quintana-Segui P., Romera R., Torma C.Z. (2016) Temperature-precipitation extremes relationship in the Mediterranean: past climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. Climat Dynamics, Doi: 10.1007/s00382-016-3083-x

Dubois G., Céron J.-P., Dubois C., Frias M.D., Herrera S. (2016) Reliability and usability of tourism climate indices. Earth Perspectives (2016) 3:2, Doi: 10.1186/s40322-016-0034-y

Duffourg F., K.-O. Lee, V. Ducrocq, C. Flamant, P. Chazette and P. Di Girolamo, 2017: Role of moisture patterns in the backbuilding formation of HyMeX IOP13 heavy precipitation systems. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. DOI: 10.1002/qj.3201.

Dumont, M., L. Arnaud, G. Picard, Q. Libois, Y. Lejeune, P. Nabat, D. Voisin and S. Morin, 2017: In situt continuous visible and near-infrared spectroscopy of an alpine snowpack. The Cryosphere, Volume: 11, Issue: 2, Pages: 1091-1110, Doi: 10.5194/tc-11-1091-2017, Published: MAY 2017.

Dunic N., Vilibic I., Šepic J., Somot S., Sevault F. (2016) Dense water formation and BiOS-induced variability in the Adriatic Sea simulated using an ocean regional circulation model. Climate Dynamics, Med-CORDEX special issue, Doi: 10.1007/s00382-016-3310-5

Eeckman, J., P. Chevallier, A. Boone, L. Neppel, A. De Rouw, F. Delclaux, and D. Koirala, 2017 : Providing a non-deterministic representation of spatial variability of precipitation in the Everest region. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4879–4893.

Fairbairn, D., A. L., Barbu, A. Napoly, C. Albergel, J.-F. Mahfouf, & J.-C. Calvet (2016) : The effect of satellite-derived surface soil moisture and leaf area index land data assimilation on streamflow simulations over France. Hydrology and Earth System Sciences, Volume: 21, Issue: 4 Pages: 2015-2033, Published: APR 13 2017.

Faisal H., M. Srinivasan, C. Peterson, M. Gosset, P. Le Moigne, L. Li and al., 2017 : Engaging the User Community for Advancing Societal Applications of the Surface Water Ocean Topography (SWOT) mission. BAMS -D-17-0161.

Field, P. R., Brožková, R., Chen, M., Dudhia, J., Lac, C., Hara, T., Honnert, R., Olson, J., Siebesma, P., de Roode, S., Tomassini, L., Hill, A. and McTagart-Cowan, R., 2017: Exploring the convective grey zone with regional simulations of a cold air outbreak. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 707, Pages: 2537-2555, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3105. Published: JUL 2017.

Flaounas, E., F. Kelemen, H.Wernli, M.A. Gaertner, M. Reale, E. Sanchez-Gomez, P. Lionello, S. Calmanti, Z. Podrascanin, S. Somot, N. Akhtar, R. Romera and D. Conte, 2016 : Assessment of an ensemble of ocean-atmosphere coupled and uncoupled regional climate models to reproduce the climatology of Mediterranean cyclones. Climate Dynamics, Med-

CORDEX special issue, Doi: 10.1007/s00382-016-3398-7.

Freney, E., K. Sellegri, M. Chrit, K..Adachi, J. Brito, A. Waked, A. Borbon, A. Colomb, R. Dupuy, J.-M. Pichon, L. Bouvier, C. Delon, C. Jambert, P. Durand, T. Bourianne, C. Gaimoz, S. Triquet, A. Féron, M. Beekmann, F. Dulac and K. Sartelet, 2017 : Aerosol composition and the contribution of SOA formation over Mediterranean forests, Atmospheric Chemistry and Physics.

Fučkar, N., F. Massonnet, V. Guemas, J. García-Serrano, O. Bellprat, M. Acosta, and F. J. Doblas-Reyes, 2017 : Record low northern hemisphere sea ice extent in march 2015, AMS

Gaertner M.A., J.J. Gonzalez-Aleman , R. Romera, M. Dominguez, V. Gil, E. Sanchez C. Gallardo M.M. Miglietta , K. Walsh D. Sein S. Somot , A. dell'Aquila, B. Ahrens, A. Colette, S. Bastin, E. van Meijgaard and G. Nikulin, 2017: Simulation of medicanes over the Mediterranean Sea in a regional climate model ensemble impact of ocean-atmosphere coupling and increased resolution. Climate Dynamics, Med-CORDEX special issue. Doi: 10.1007/s00382-016-3456-1.

García-Serrano, J., C. Cassou, H. Douville, A. Giannini, F. J. Doblas-Reyes, 2017: Revisiting the ENSO teleconnection to the tropical North Atlantic. Journal of Climate, Volume: 30, Issue : 17, Pages: 6945-6957, Doi: 10.1175/JCLI-D-16-0641.1. Published: SEP 2017.

Garrigues, S., A. Boone, B. Decharme, A. Olioso, C. Albergel, J. Calvet, S. Moulin, S. Buis, and E. Martin, 2017: Impacts of the Soil Water Transfer Parametrization on the Simulation of Evapotranspiration over a 14-Year Mediterranean Crop Succession. J. Hydrometeor. doi: 10.1175/JHM-D-17-0 058. in press. See here.

Getirana, A., A. Boone, C. Peugeot, and, 2017: Streamflows over a West African Basin from the ALMIP2 Model Ensemble. J. Hydrometeor., 18, 1831–1845, https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0233.1

Giordani, H., C. Lebeauoin-Brossier, F. Léger, G. Caniaux, 2017 : A PV-approach for dense water formation along fronts : Application to the Northwestern Mediterranean. Journal of Geophysiacal Research-Oceans, Volume: 122, Issue: 2, Pages: 995-1015, Doi: 10.1002/2016JC012019. Published: FEB 2017.

Grippa, M.; Kergoat, L.; Boone, A.; Peugeot, C.; Demarty, J.; Cappelaere, B.;Gal, L.; Hiernaux, P.; Mougin, E; Ducharne, A; Dutra, E; Anderson, M; Hain, C., 2017: Modeling Surface Runoff and Water Fluxes over Contrasted Soils in the Pastoral Sahel: Evaluation of the ALMIP2 Land Surface Models over the Gourma Region in Mali. Journal of Hydrometeorology, Volume: 18, Issue: 7, Pages: 1847-1866, Doi: 10.1175/JHM-D-16-0170.1. Published: JUL 2017.

Guichard, F., Couvreux, F., 2017: A short review of numerical cloud-resolving models. TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorolgy and Oceanography, Volume: 69, Article Number: 1373578, Published: SEP 19 2017.

Guth, J., V. Marécal, B. Josse and J. Arteta, 2017 : Primary aerosols and secondary inorganic aerosols budget over the Mediterranean basin during 2012 and 2013.

Harzallah, A., Jordà G., Dubois C., Sannino G., Carillo A., Li L., Arsouze T., Beuvier J., Akthar N., Ahrens B. (2016) Long term evolution of the heat budget in the Mediterranean Sea from Med-CORDEX forced and coupled simulations. Clim Dyn. 1-21, doi: 10.1007/s00382-016-3363-5

Hermozo, L., L. Eymard and F. Karbou, 2017: Modeling Sea Ice Surface Emissivity at Microwave Frequencies: Impact of the Surface Assumptions and Potential Use for Sea Ice Extent and Type Classification. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume: 55, Issue: 2, Pages: 943-961, Doi: 10.1109/TGRS.2016.2616920, Published: FEB 2017.

Horemans J.A., A. Henrot, C. Delire, C. Kollas, P. Lasch-Born, C. Reyer, F. Suckow, L. Francois, and R. Ceulemans, Combining multiple statistical methods to evaluate the performance of process-based vegetation models across three forest stands. Central European Forestry Journal 63,4,, doi:10.1515/forj-2017-0025, Nov 2017.

Jaidan, N., L. El Amraoui, J.-L. Attié, P. Ricaud, and F. Dulac, Future changes in surface ozone over the Mediterranean basin in the framework of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment (ChArMEx), Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, acp-2017-553, 2017.

Jomelli, V., F. Mokadem, I. Schimmelpfennig, E. Chapron, V. Rinterknecht, V. Favier, D. Verfaillie, D. Brunstein, C. Legentil, E. Michel, D. Swingedouw, A. Jaoen, G. Aumaître, D.L. Bourles, K. Keddadouche, 2017 : Sub Antarctic glacier extensions in the Kerguelen region (49ºS, Indian Ocean) over the past 23 000 years constrained by 36Cl moraine dating. Quaternary Science Reviews, Volume: 162, Pages: 128-144, Doi: 10.1016/j.quascirev.2017.03.010 Published: APR 2017.

Kangah, Y., P. Ricaud, J.-L. Attié, N. Saitoh, D. A. Hauglustaine, R. Wang, L. El Amraoui, R. Zbinden, and C. Delon, Summertime upper tropospheric nitrous oxide over the Mediterranean as a footprint of Asian emissions. Journal of Geophysiacal Research-Atmospheres, Volume : 122, Issue : 8, Pages : 4746-4759, Doi : 10.1002/2016JD026119. Published : APR 27 2017.

Kergoat, L., Guichard, F; Pierre, C; Vassal, C, 2017: Influence of dry-season vegetation variability on Sahelian dust during 2002-2015 : Geophysical Research Letters, Volume: 44, Issue: 10, Pages: 5231-5239, Doi: 10.1002/2016GL072317. Published : MAY 28 2017.

Lacressonnière, G., Watson, L., Gauss, M., Engardt, M., Andersson, C., Beekmann, M., Colette, A., Foret, G., Josse, B., Marécal, V., Nyiri, A., Siour, G., Sobolowski, S., and Vautard, R.: Particulate matter air pollution in Europe in a +2 ºC warming world. Atmospheric Environment, Volume: 154, Pages: 129-140, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.037. Published: APR 2017.

Lafaysse, M., B. Cluzet, M. Dumont, Y. Lejeune, V. Vionnet and S. Morin, 2017: A multiphysical ensemble system of numerical snow modelling. The Cryosphere, Volume: 11, Issue: 2, Pages: 1173-1198, Doi: 10.5194/tc-11-1173-2017, Published: MAY 2017.

Lafore, J.-P., Beucher, F., Peyrillé, P., Diongue-Niang, A., Chapelon, N., Bouniol, D., Caniaux, G., Favot, F., Ferry, F., Guichard, F., Poan, E., Roehrig, R. and Vischel, T., 2017: The extreme rain event of Ougadougou in 2009 Part I: multi-scale analysis and conceptual model. Q. J. R. Meteorol. Soc. Volume: 143 Issue: 709 Pages: 3094-3109 Part: B Published: OCT 2017. Doi: 10.1002/qj.3165

Le Gall, A., C. Leyrat, M. A. Janssen, G. Choblet, G. Tobie, O. Bourgeois, A. Lucas, C. Sotin, C. Howett, R. Kirk, R. D. Lorenz, R. D. West, A. Stolzenbach, M. Massé, A. H. Hayes, L. Bonnefoy, G. Veyssière and F. Paganelli, 2017: Thermally anomalous features in the subsurface of Enceladus's south polar terrain. Nature Astronomy, Volume: 1, Article number: 0063, Doi: 10.1038/s41550-017-0063, Published: MAR. 2017.

Leauthaud, C., Cappelaere, B.; Demarty, J.; Guichard, F; Velluet, C.; Kergoat, L.; Vischel, T.; Grippa, M.; Mouhaimouni, M.; Bouzou Moussa, I.; Mainassara, I.; Sultan, B., 2017: A 60-year reconstructed high-resolution local meteorological data set in Central Sahel (1950-2009) : evaluation, analysis and application to land surface modelling. International Journal of Climatology, Volume: 37, Issue: 5, Pages: 2699-2718, Doi: 10.1002/joc.4874. Published: APR 2017.

Lebeaupin Brossier, C., F. Léger, H. Giordani, J. Beuvier, M-N. Bouin, V. Ducrocq, N. Fourrié, 2017 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36º ocean simulations: Ocean-atmosphere coupling impact.Journal of Geophysical Research-Oceans, 122 (7), 5749-5773,

Lee, K.-O, Flamant, C., Ducrocq, V., Duffourg, F., Fourrié, N., Delanoë, J. and Bech, J., 2016 : Initiation and development of a mesoscale convective system in the Ebro River Valley and related heavy precipitation over north-eastern Spain during HyMeX IOP 15a. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume : 143, Issue : 703, Pages : 942-956, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2978. Published : JAN 2017.

Llasses, J., G. Jordà, D. Gomis, F. Adloff, D. Macías, A. Harzallah, T. Arsouze, N. Akthar, L. Li, A. Elizalde, G. Sannino (2017), Heat and salt redistribution within the Mediterranean Sea in the Med-CORDEX model ensemble, Climate dynamics, doi : 10.1007/s00382-016-3242-0.

Lunet, T., C. Lac, F. Auguste, F. Visentin, V. Masson, and J. Escobar, 0: Combination of WENO and Explicit Runge-Kutta methods for wind transport in Meso-NH model. Monthly Weather Review, Volume: 145 Issue: 9 Pages: 3817-3838 Published: SEP 2017

Martin, G.M., P. Peyrillé, R. Roehrig, C. Rio, M. Caian, G. Bellon, F. Codron, J.-P. Lafore, D. E. Poan, A. Idelkadi, 2017: Understanding the West African Monsoon from the analysis of diabatic heating distributions as simulated by climate models. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Volume : 9, Issue : 1, Pages : 239-270, Doi : 10.1002/2016MS000697. Published : MAR 2017.

Martinet, M., Nuissier, O., Duffourg, F., Ducrocq, V. and Ricard, D., 2017:Fine-scale numerical analysis of the sensitivity of the HyMeX IOP16a heavy precipitating event to the turbulent mixing-length parametrization. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143 Issue: 709 Pages: 3122-3135 Part: B Published: OCT 2017

Martinet, P., Cimini, D., De Angelis, F., Canut, G., Unger, V., Guillot, R.,Tzanos, D., and Paci, A., : Combining ground-based microwave radiometer and the AROME convective scale model through 1DVAR retrievals in complex terrain: an Alpine valley case study. Atmospheric Measurment Techniques, Volume : 10, Issue : 9, Pages : 3385-3402, Doi : org/10.5194/amt-10-3385-2017. Published : SEP 18 2017.

Martoia, F., L. Orgeas, P. Dumont, J.-F. Bloch, F. Flin and J. Viguie, 2017 : Crumpled paper sheets : low-cost biobased cellular materials for structural applications. Materials and Design, Volume: 136, Pages: 150-164, Doi: 10.1016/j.matdes.2017.09.031, Published: DEC. 2017.

Mazoyer, M., C. Lac, O. Thouron, T. Bergot, V. Masson, and L. Musson-Genon, 2017 : Large eddy simulation of radiation fog : impact of dynamics on the fog life cycle. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17 Issue: 21 Pages: 13017-13035 Published: NOV 6 2017

Morgenstern, O., M. I. Hegglin, E. Rozanov, B. Josse, V. Marécal, M. Michou, L. D. Oman, G. Pitari, D. Saint-Martin and al., 2017 : Review of the global models

used within phase 1 of the Chemistry–Climate Model Initiative (CCMI). Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 2, Pages: 639-671, Doi: 10.5194/gmd-10-639-2017. Published: FEB 13 2017.

Munier, S. and F. Aires, 2017 : A new global method of satellite dataset merging and quality characterization constrained by the terrestrial water budget. Remote Sensing of Environment, 205, 119-130. See here.

Napoly, A., Boone, A., P. Samuelsson, S. Gollvik, E. Martin, R. Seferian, D. Carrer, B. Decharme and L. Jarlan, 2017 : The Interactions between Soil-Biosphere-Atmosphere (ISBA) land surface model Multi-Energy Balance (MEB) option in SURFEX - Part 2: Model evaluation for local scale forest sites. Geoscientific Model Development, Volume : 10, Issue : 4, Pages : 1621-1644, Doi : 10.5194/gmd-10-1621-2017. Published : APR 18 2017.

Nicolet, G., N. Eckert, S. Morin and J. Blanchet, 2017 : A multi-criteria leave-two-out cross-validation procedure for max-stable process selection. Spatial Statistics, Vol: 22, Part 1, Pages: 107-128, https://doi.org/10.1016/j.spasta.2017.09.004, Published : OCT 2017.

Nord, G., Boudevillain, B., Berne, A. Branger, F., Braud, I., Dramais, G., Gerard, S., Le Coz, J., Legout, C., Molinie, G., Van Baelen, J., Vandervaere, JP, Andrieu, J., Aubert, C., Calianno, M., Delrieu, G., Grazioli, J., Hachani, S., Horner, I., Huza, J., Le Boursicaud, R., Raupach, T.H., Teuling, A.J., Uber, M., Vincendon, B., Wijbrans, A .,2017: A high space-time resolution dataset linking meteorological forcing and hydro-sedimentary response in a mesoscale Mediterranean catchment (Auzon) of the Ardeche region, France. Earth System Science Data, Volume: 9 Issue: 1 Published: MAR 22 2017

Obermann, A., Bastin S., Belamari S., Conte D., Gaertner MA, Li L., Ahrens B. (2017) : Mistral and Tramontane wind speed and wind direction patterns in regional climate simulations. Clim Dyn. doi : 10.1007/s00382-016-3053-3

Omrani, H., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Lebeaupin-Brossier, C., Mailler, S., 2017: Spatial and temporal variability of wind energy resource and production over the North Western Mediterranean Sea: Sensitivity to air-sea interactions. Renewable Energy, Volume: 101 Pages: 680-689 Published: FEB 2017

Osinski, R. and F. Bouttier, 2017 : Short-range probabilistic forecasting of convective risks for aviation based on a LAF-ensemble approach. Met. Apps, Volume 25, Issue 1, January 2018105-118. doi : 10.1002/met.1674.

Oudar, T., E. Sanchez-Gomez, F. Chauvin, J. Cattiaux, C. Cassou and L. Terray, Respective effects of Arctic sea ice loss and GHGs increase on the Northern Hemisphere atmospheric circulation, Climate Dynamics, Volume: 49, Issue: 11-12, Pages: 3693-3713, Doi: 10.1007/s00382-017-3541. Published: DEC 2017.

Ouzeau, G., J.-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, and S. Planton, 2016: Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. Climate Services, Doi: 10.1016/j.cliser.2016.09.002.

Ovadnevaite J., A. Zuend, A. Laaksonen, K. J. Sanchez, G. Roberts, D. Ceburnis, S. Decesari, M. Rinaldi, N. Hodas, M. C. Facchini, J. H. Seinfeld & C. O' Dowd 2017: Surface tension prevails over solute effect in organic-influenced cloud drople activation. Nature, Volume: 546, Issue: 7660, Pages: 637-641, Doi: 10.1038/ nature22806. Published: JUN 29 2017.

Parodi, A., D. Kranzlmueller, A. Clematis, E. Danovaro, A. Galizia, L. Garrote, M. C. Llasat, O. Caumont, E. Richard, Q. Harpham, F. Siccardi, L. Ferraris, N. Rebora, F. Delogu, E. Fiori, L. Molini, E. Foufoula-Georgiou, D. D'Agostino, 2017 : DRIHM(2US): an e-Science environment for hydro-meteorological research on high impact weather events. Bulletin American Meteorological Society, Volume 98, Issue: 10, Pages: 2149-2166, Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0279.1. Published: OCT 2017.

Parsons, D.B., M. Beland, D. Burridge, P. Bougeault , G. Brunet, J. Caughey, S. M. Cavallo, M. Charron, H. C. Davies, A. Diongue Niang, V. Ducrocq, P. Gauthier, T. M. Hamill, P. A. Harr, S. C. Jones, R. H. Langland, S. J. Majumdar, B. N. Mills, M. Moncrieff, T. Nakazawa, T. Paccagnella, F. Rabier, J.-L. Redelsperger, C. Riedel, R. W. Saunders, M. A. Shapiro, R. Swinbank, I. Szunyogh, C. Thorncroft, A. J. Thorpe, X. Wang, D. Waliser, H. Wernli, Z. Toth, 2017: THORPEX Research and the Science of Prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 98, Issue 4, Pages: 807-830, Doi: 10.1175/BAMS-D-14-00025.1. Published : APR 2017.

Peings, Y., J. Cattiaux, S. Vavrus and G. Magnusdottir, 2017: Late Twenty-First-Century Changes in the Midlatitude Atmospheric Circulation in the CESM Large Ensemble. Journal of Climate, Volume: 30, Issue: 15, Pages: 5943-5960, Doi: 10.1175/JCLI-D-16-0340.1. Published: AUG 2017.

Phillips, V.T.J. , Yano, J.I., Formenton, M., Ilotoviz, E., Kanawade, V., Kudzotsa, I., Sun, J.M., Bansemer, A., Detwiler, A.G., Khain, A., Tessendorf, S.A.., 2017: Ice Multiplication by Breakup in Ice-Ice Collisions. Part II: Numerical Simulations. Journal of Atmospheric Sciences, Volume: 74 Issue: 9 Pages: 2789-2811 Published: SEP 2017

Phillips, Vaughan T. J.; Yano, Jun-Ichi; Khain, Alexander, 2017: Ice Multiplication by Breakup in Ice-Ice Collisions. Part I: Theoretical Formulation. Journal of the Atmospheric Sciences, Volume : 74, Issue: 6, Pages : 1705-1719, Doi : 10.1175/JAS-D-16-0224.1. Published : JUN 2017.

Pineau-Guillou L., F. Ardhuin, M.-N. Bouin, J.-L. Redelsperger, B. Chapron, J.R. Bidlot and Y. Quilfen, 2017: Strong winds in a coupled waveatmosphere model during a North Atlantic storm event: evaluation against observations. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. DOI: 10.1002/qj.3205.

Planque, C., Carrer, D., and Roujean, J.-L., : Analysis of MODIS albedo changes over French steady woody covers during the period 2001-2013, Remote Sensing of Environment, Volume: 191, Pages: 13-29, Doi: 10.1016/j.rse.2016.12.019. Published: MAR 15 2017.

Planton, Y., A. Voldoire, H. Giordani, G. Caniaux, Main processes of interannual variability of the atlantic cold tongue, Climate Dynamic, Doi: 10.1007/s00382-017-3701-2, online.

Puy, M., J. Vialard, M. Lengaigne, E. Guilyardi, P. Di Nezio, A. Voldoire, M. Balmaseda, G. Madec, C. Menkes, M. McPhaden, 2017: The lottery El Niño?, Clim. Dyn., doi: 10.1007/s00382-017-3938-9, online.

Rabatel, A., P. Sirguey, V. Drolon, P. Maisongrande, Y. Arnaud, E. Berthier, L. Davaze, J.-P. Dedieu and M. Dumont, 2017: Annual and Seasonal Glacier-Wide Surface Mass Balance Quantified from Changes in Glacier Surface State: A Review on Existing Methods Using Optical Satellite Imagery. Remote Sensing, Volume: 9, Issue:5, Pages: 507, Doi: 10.3390/rs9050507, Published: MAY 2017.

Raimonet, M., Oudin, L., Vautard, R., Le Moigne, P., Silvestre, M., Rabouille, C., Garnier, J., Thieu, V., 2017 : Evaluation of reanalysis datasets for hydrological modeling. Journal of Hydrometeorology, Volume: 18 Issue: 11,Pages: 3027-3041, Published: NOV 2017

Rainaud, R., Lebeaupin Brossier, C., Ducrocq, V. and Giordani, H. (), High-resolution air-sea coupling impact on two heavy precipitation events in the Western Mediterranean. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 707, Pages: 2448-2462, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3098. Published: JUL 2017.

Raynaud, L. and F. Bouttier, 2017: The impact of horizontal resolution and ensemble size for convective-scale probabilistic forecasts. Quartely Journal Royal Meteorological Society, Volume : 143, Issue: 709, Pages: 3037-3047, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3159. Published: OCT 2017.

Redon, E., Aude Lemonsu, Valéry Masson, Benjamin Morille, and Marjorie Musy, 2017 : Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0. Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 385-411, Doi: 10.5194/gmd-10-385-2017. Published: JAN 25 2017.

Reindert, J., M. Roberts, P. Vidale, C. Senior, A. Bellucci, Q. Bao, P. Chang, S. Corti, N. Fučkar, V. Guemas, J. von Hardenberg, W. Hazeleger, C. Kodama, T. Koenigk, L. Leung, J. Lu, J. Luo, J. Mao, M. Mizielinski, R. Mizuta, P. Nobre, M. Satoh, E. Scoccimarro, T. Semmler, J. Small and J. von Storch, 2016 : High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIPv1.0) for CMIP6. GMD article.

Revuelto, J., C. Azorin-Molina, E. Alonso-González, A. Sanmiguel-Vallelado, F. Navarro-Serrano, I. Rico, and J. I. López-Moreno, 2017: Meteorological and snow distribution data in the Izas Experimental Catchment (Spanish Pyrenees) from 2011 to 2017. Earth System Science Data, Volume: 9, Pages: 993-1005, Doi: 10.5194/essd-9-993-2017, Published: DEC 2017.

Ribes A., F. Zwiers, J.-M. Azaïs, P. Naveau (2017): A new statistical method for climate change detection and attribution. Climate Dynamics, Volume: 48, Issue: 1-2, Pages: 367-386. Doi: 10.1007/s00382-016-3079-6. Published: JAN 2017.

Ricaud P., E. Bazile, M. del Guasta, C. Lanconelli, P. Grigioni, and A. Mahjoub, 2017: Genesis of diamond dust, ice fog and thick cloud episodes observed and modelled above Dome C, Antarctica. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17, Issue: 8, Pages: 5221-5237, Doi: 10.5194/acp-17-5221-2017. Published: APR 21 2017.

Richon, C., Dutay, J.-C., Dulac, F., Wang, R., Balkanski, Y., Nabat, P., Aumont, O., Desboeufs, K., Laurent, B., Guieu, C., Raimbault, P., Beuvier, J., 2017 : Modeling the impacts of atmospheric deposition of nitrogen and desert dust–derived phosphorus on nutrients and biological budgets of the Mediterranean Sea, Progress in Oceanography.

Roca, R., Fiolleau, T., Bouniol, D., 2017: A Simple Model of the Life Cycle of Mesoscale Convective Systems Cloud Shield in the Tropics. JOURNAL OF CLIMATE Volume: 30 Issue: 11 Pages: 4283-4298 Published: JUN 2017

Rochetin, N., F. Couvreux and F. Guichard, 2017 Morphology of breeze circulations induced by surface flux heterogeneities and their impact on convection initiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 702, Special Issue: UNDEFINED, Supplement: UNDEFINED, Pages: 463-478, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2935. Published: JAN 2017.

Rodier, Q., V. Masson, F. Couvreux and A. Paci, 2017: Evaluation of a Buoyancy and Shear based Mixing Length for a Turbulence Scheme. Frontiers in Earth Science, Volume: 5, Article Number: UNSP 65,

Doi: 10.3389/feart.2017.00065. Published: AUG 9 2017.

Rodríguez-Fernández, N. J., Muñoz Sabater, J., Richaume, P., de Rosnay, P., Kerr, Y. H., Albergel, C., Drusch, M., and Mecklenburg, S., 2017: SMOS near-real-time soil moisture product: processor overview and first validation results, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5201-5216, see here.

Rottner, L., Baehr, C., Couvreux, F., Canut, G., Rieutord, T., 2017: A new downscaling method for sub-grid turbulence modeling. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 17 Issue: 11 Pages: 6531-6546 Published: JUN 2 2017

Sachsperger, J., S. Serafin, V. Grubiši , I. Stiperski and A. Paci, 2017: The amplitude of lee waves on the boundary-layer inversion (pages 27–36). Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 702, Special Issue: UNDEFINED, Supplement: UNDEFINED, Pages: 27-36, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2915. Published : JAN 2017.

Sarrat, C., Aubry, S., Chaboud, T., Lac, C., 2017: Modelling Airport Pollutants Dispersion at High Resolution. Aerospace, Volume: 4 Issue: 3 Article Number: 46 Published: SEP 2017.

Schellekens, J., Dutra, E; Martinez-de la Torre, A; Balsamo, G; van Dijk, A; Weiland, FS; Minvielle, M; Calvet, JC; Decharme, B; Eisner, S; Fink, G; Florke, M; Pessenteiner, S; van Beek, R; Polcher, J; Beck, H; Orth, R; Calton, B; Burke, S; Dorigo, W; Weedon, GP, 2017: A global water resources ensemble of hydrological models: the eartH2Observe Tier-1 dataset. Earth System Science Data, Volume: 9, Issue: 2, Pages: 389-413, Doi: 10.5194/essd-9-389-2017. Published: JUL 3 2017.

Schoetter, R., V. Masson, A. Bourgeois, M. Pellegrino, and J.-P. Lévy, 2017: Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in TEB (SURFEX v. 8.2). Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 7, Pages: 2801-2831, Doi: 10.5194/gmd-10-2801-2017. Published: JUL 21 2017.

Séférian, R., S. Baek, O. Boucher, J.-L. Dufresne, B. Decharme, D. Saint-Martin and R. Roehrig, 2017 : An interactive ocean surface albedo scheme : formulation and evaluation in two atmospheric models, Geoscientific Model Development.

Sherpa, S., P. Wagnon, F. Brun, E. Berthier, C. Vincent, Y. Lejeune, Y. Arnaud, R. Kayastha and A. Sinisalo, 2017: Contrasted surface mass balances of debris-free glaciers observed between the southern and the inner parts of the Everest region (2007-2015). Journal of Glaciology, Pages: 1-15, Doi: 10.1017/jog. 2017.30, Published: JUL 2017.

Silva R. A , J. J. West, J.-F. Lamarque, D. T. Shindell, W. J. Collins, G. Faluvegi, G. A. Folberth, L. W. Horowitz, T. Nagashima, V. Naik, S. T. Rumbold, K. Sudo, T. Takemura, D.Bergmann, P.Cameron-Smith, R.M. Doherty, B. Josse, I. A. MacKenzie, D.S. Stevenson and G. Zeng : Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change. Nature Climate Change, Volume: 7, Issue: 9, Pages: 647-+, Doi: 10.1038/nclimate3354. Published: SEP 2017.

Slangen, A., F. Adloff, S. Jevrejeva, P. W. Leclercq, B. Marzeion, Y. Wada, R. Winkelmann (2016), A review of recent updates of sea-level projections at global and regional scales. Surveys in Geophysics, Volume: 38, Issue : 1, Special Issue: SI, Pages: 385-406, Doi: 10.1007/s10712-016-9374-2. Published: JAN 2017.

Somot, S., Houpert, L., Sevault, F., Testor, P., Bosse, A., Taupier-Letage, I., Bouin, M.-N., Waldman, R., Cassou, C., Sanchez-Gomez, E., Durrieu de Madron, X., Adloff, F., Nabat, P., Herrmann, M., 2016: Characterizing, modelling and understanding the climate variability of the deep water formation in the North-Western Mediterranean Sea. Climate Dynamics, DOI: 10.1007/s00382-016-3295-0.

Spandre, P., H. François, E. Thibert, S. Morin and E. George-Marcelpoil, 2017 : Determination of snowmaking efficiency on a ski slope from observations and modelling of snowmaking events and seasonal snow accumulation. The Cryosphere, Volume: 11, Issue: 2, Pages: 891-909, Doi: 10.5194/tc-11-891-2017, Published: APR 2017.

Stavropulos-Laffaille, X., Chancibault, K., Andrieu, H., Lemonsu, A., Masson, V., 2017: Hydrological validation of an urban hydro-microclimate model (TEB-Hydro): Sensitivity analysis on the catchment of Reze (Nantes, France). Houille Blanche-Revue Internationale de L'Eau, Issue: 3 Pages: 14-21 Published: JUN 2017

Stiperski I., S. Seran, A. Paci, H. Ágústsson, A. Belleudy, R. Calmer, K. Horvath, C. Knigge, J. Sachsperger, L. Strauss and V. Grubisic (2017). Water tank experimentt on stratied ow over double mountain-shaped obstacles at high Reynolds number. Atmosphere 8 (13). http://dx.doi.org/10.3390/atmos8010013

Stoffelen, A., S. Aaboe, J.-C. Calvet, J. Cotton, G. De Chiara, J. Figua-Saldana, A. A. Mouche, M. Portabella, K. Scipal, W. Wagner: Scientific developments and the EPS-SG scatterometer, IEEE Journal of Selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing, Volume: 10, Issue: 5, Pages: 2086-2097, Part: 2, Doi: 10.1109/JSTARS.2017. 2696424. Published: MAY 2017.

Taylor, CM; Belusic, D; Guichard, F; Arker, DJP; Vischel, T; Bock, O;Harris, PP; Janicot, S; Klein, C; Panthou, G, 2017: Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. Nature, Volume: 544, Issue: 7651, Pages: 475-+, Doi: 10.1038/nature22069. Published: APR 27 2017.

Teixeira, M, A. Paci and A. Belleudy (2017). Drag produced by waves trapped at a density interface in non-hydrostatic ow over an axisymmetric hill. J. Atmos. Sci., 74, 1839-1857, https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0199.1

Termonia, P., C. Fischer, E. Bazile, F. Bouyssel, R. Brožková, Pierre Bénard, B. Bochenek, D. Degrauwe, M. Derkova, R. El Khatib, R. Hamdi, J. Mašek, P. Pottier, N. Pristov, Y. Seity, P. Smolíková, O. Spaniel, M. Tudor, Y. Wang, C. Wittmann and A. Joly, 2017: The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, GMD. See here.

Testor P., Bosse A., Houpert L., Margirier F., Mortier L., Lego H., Dausse D., Labaste M., Karstensen J., Hayes D., Olita A., Ribotti A., Schroeder K., Chiggiato J., Onken R., Heslop E., Mourre B., D'Ortenzio F., Mayot N., Lavigne H., de Fommervault O., Coppola L., Prieur L., Taillandier V., Durrieu de Madron X., Bourrin F., Many G., Damien P., Estournel C., Marsaleix P., Taupier-Letage I., Raimbault P. Waldman R., Bouin M.-N., Giordani H., Caniaux G., Somot S., Ducrocq V., Conan P. (2017) Multiscale observations of deep convection in the northwestern Mediterranean Sea during winter 2012-2013 using multiple platforms. JGR-Oceans, Special Issue HyMeX-Mermex (accepted), doi:10.1002/2016JC012671.

Tornay, N., R. Schoetter, M. Bonhomme, S. Faraut, A. Lemonsu and V. Masson (2017): GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations, Urban Climate, Volume : 20, Pages: 75-93, Doi: 10.1016/j.uclim.2017.03.002. Published: JUN 2017.

Tommasi, D., Stock, C. A., Hobday, A. J., Methot, R., Kaplan, I. C., Paige Eveson, J., Holsman, K., Miller, T. J., Gaichas , S., Gehlen, M., Pershing, A., Vecchi, G. A., Msadek, R., Delworth, T., Mark Eakin, C., Haltuch, M. A., Séférian, R., Spillman, C. M., Hartog, J. R., Siedlecki, S., Samhouri, J. F., Muhling, B., Asch, R. G., Pinsky, M. L., Saba, V. S., Kapnick, S. B., Gaitan, C. F., Rykaczewski, R. R., Alexander, M. A., Xue, Y., Pegion, K. V., Lynch, P., Payne, M. R., Kristiansen, T., Lehodey, P. and Werner, F. E., 2017: Managing living marine resources in a dynamic environment: the role of seasonal to decadal climate forecasts. Progress in Oceanography, Volume: 152, Pages: 15-49, Doi: 10.1016/j.pocean.2016. 12.011. Published: MAR 2017.

Tompkins, A.M., Ortiz de Zárate, M.I., Saurral, R.I., Vera, C., Saulo, C., Merryfield, W.J., Sigmond M., Lee, W.S., Baehr, J., Braun, A., Butler, A., Déqué, M., Doblas-Reyes, F.J., Gordon, M., Scaife, A.A., Imada, Y., Ishii, M., Ose, T., Kirtman, B., Kumar, A., Müller, W.A., Pirani, A., Stockdale, T., Rixen, M., and T. Yasuda, 2017 : The Climate-system Historical Forecast Project: providing open access to seasonal forecast ensembles from centers around the globe . Bull. Amer. Meteor. Soc., https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0209.1

Tramblay Y., Jarlan L., Hanich L., Somot S. (2017) Future scenarios for surface water resources availability in North African dams. Water Resources Management (published on line), https://doi.org/10.1007/s11269-017-1870-8

Tuzet, F., M. Dumont, M. Lafaysse, G. Picard, L. Arnaud, D. Voisin, Y. Lejeune, L. Charrois, P. Nabat and S. Morin, 2017: A multilayer physically based snowpack model simulating direct and indirect radiative impacts of light-absorbing impurities in snow. The Cryosphere, Volume: 11, Issue: 6, Pages: 2633-2653, https://doi.org/10-5194/tc-11-2633-2017, Published: NOV 2017.

Vavrus, S., F. Wang, J. Martin, J. Francis, Y. Peings and J. Cattiaux (2017), Changes in North American Atmospheric Circulation and Extreme Weather. Journal of Climate, Volume: 30, Issue: 11, Pages: 4317-4333, Doi: 10.1175/JCLI-D-16-0762.1. Published : JUN 2017.

Verfaillie, D., M. Déqué, S. Morin and M. Lafaysse, 2017 : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustement of climate projections applicable to energy balance land surface models. Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 11, Pages: 4257-4283, Doi: 10.5194/gmd-10-4257-2017, Published: NOV 24 2017.

Verrelle, A., D. Ricard, and C. Lac, 2017 : Evaluation and improvement of turbulence parameterization inside deep convective clouds at kilometer-scale resolution. Monthly Weather Review, Volume: 145, Issue: 10, Pages: 3947-3967, Doi: 10.1175/MWR-D-16-0404.1. Published: OCT 2017.

Vidot, J., B. Bellec, M. Dumont and P. Brunel, 2017 : A daytime VIIRS RGB pseudo composite for snow detection. Remote Sensing of Environment, Volume: 196, Pages: 134-139, Published: NOV 2017.

Vidot, J., P. Brunel, M. Dumont, C. Carmagnola and J. Hocking, 2017: The VIS/NIR land and snow BRDF atlas for RTTOV: Comparaison between MODIS MCD43C1 C5 and C6. Remote Sensing, Volume: 10, Issue: 1, Page: 21, Doi: 10.3390/rs10010021, Published: DEC 2017.

Vignon, E., van de Wiel, B. J. H., van Hooijdonk, I. G. S., Genthon, C., van der Linden, S. J. A., van Hooft, J. A., Baas, P., Maurel, W., Traullé, O. and Casasanta, G. (2017), Stable boundary-layer regimes at Dome C, Antarctica: observation and analysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 704, Pages: 1241-1253, Part : A, Doi: 10.1002/qj.2998. Published: APR 2017.

Vionnet, V., E. Martin, V. Masson, C. Lac, F. Naaim Bouvet and G. Guyomarc'h, 2017 : High-resolution Large Eddy simulation of snow accumulation in alpine terrain. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Volume: 122, Doi: 10.1002// 2017JD026947, Published: OCT 2017.

Vitart, F., C. Ardilouze, A. Bonet, A. Brookshaw, M. Chen, C. Codorean, M. Deque, L. Ferranti, E. Fucile, M. Fuentes, H. Hendon, J. Hodgson, H. Kang, A. Kumar, H. Lin, G. Liu, X. Liu, P. Malguzzi, I. Mallas, M. Manoussakis, D. Mastrangelo, C. MacLachlan, P. McLean, A. Minami, R. Mladek, T. Nakazawa, S. Najm, Y. Nie, M. Rixen, A. Robertson, P. Ruti, C. Sun, Y. Takaya, M. Tolstykh, F. Venuti, D. Waliser, S. Woolnough, T. Wu, D. Won, H. Xiao, R. Zaripov, and L. Zhang, 2016 : The Sub-seasonal to Seasonal Prediction (S2S) Project Database. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 98, Issue: 1, Pages: 163-+, Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0017.1. Published: JAN 2017.

Voldoire A., B. Decharme, J. Pianezze, C. Lebeaupin Brossier, F. Sevault, A. Alias, V. Ducrocq, S. Faroux, H. Giordani, F. Léger, P. Marsaleix, R. Rainaud, .., Evelyne Richard, S. Riette and al., 2017 : SURFEX v8.0 interface with OASIS3-MCT to couple atmosphere with hydrology, ocean, waves and sea-ice models, from coastal to global scales. Geoscientific Model Development, Volume: 10, Issue: 11, Pages: 4207-4227, Doi: 10.5194/gmd-10-4207-2017. Published NOV 20 2017.

Waldman R., Somot S., Herrmann M., Bosse A., Caniaux G., Estournel C., Houpert L., Prieur L., Sevault F., Testor P. (2016): Modelling of the intense 2012-2013 dense water formation event in the northwestern Mediterranean Sea: evaluation with an ensemble simulation approach. Journal of Geophysical Research-Oceans, Volume : 122, Issue: 2, Pages: 1297-1324, Doi: 10.1002/ 2016JC012437. Published: FEB 2017.

Watson. L., Michou M, Nabat P, Saint-Martin D (2017) Assessment of CNRM coupled ocean-atmosphere model sensitivity to the representation of aerosols. Climate Dynamics DOI: 10.1007 s00382-017-4054-6, URL https://doi.org/ 10.1007/s00382-017-4054-6

Wautier, A., C. Geindreau and F. Flin, 2017: Numerical homogenization of the viscoplastic behavior of snow based on X-ray tomography images. The Cryosphere, Volume: 11, Issue: 3, Pages: 1465-1485, Doi: 10.5194/tc-11-1465-2017, Published: JUN 2017.

Webb, M. J., T. Andrews, A. Bodas-Salcedo, S. Bony, C. S. Bretherton, R. Chadwick, H. Chepfer, H. Douville, P. Good, J. E. Kay, S. A. Klein, R. Marchand, B. Medeiros, A. P. Siebesma, C. B. Skinner, B. Stevens, G. Tselioudis, Y. Intercomparison Project (CFMIP) contribution to CMIP6. Geoscientific Model Development, Doi: 10.5194/gmd-2016-70.

Xia, J., A. McGuire, D. Lawrence, E. Burke, G. Chen, X. Chen, C. Delire, C. Koven, A. MacDougall, S. Peng, A. Rinke, K.Saito, W. Zhang, R. Alkama, T. Bohn, P. Ciais, B. Decharme, I. Gouttevin, T. Hajima, D. Hayes, D. Ji, G. Krinner, D. Lettenmaier, P. Miller, M. John, B. Smith, T. Sueyoshi, Z. Shi, L. Yan, J. Liang, L. Jiang,Y. Luo, Terrestrial ecosystem model performance in simulating productivity and its vulnerability to climate change in the northern permafrost region. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, Volume: 122, Issue: 2, Pages: 430-446, Doi: 10.1002 /2016JG003384. Published: FEB 2017.

Yano J-I and J. Tribbia, 2017: Tropical Atmospheric Madden–Julian Oscillation: A Strongly Nonlinear Free Solitary Rossby Wave? Journal of the Atmospheric Sciences - Volume: 74, Number: 10 (October 2017).

Yano, J.-I. and Ambaum, M. H.P. (), Moist Static Energy: Definition, Reference Constants, a Conservation Law, and Effects on Buoyancy. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 708, Pages: 2727-2734, Part: A, Doi: 10.1002/qj.3121. Published : OCT 2017.

Yano, J-I and E. Ouchtar, 2017: Convective initiation uncertainties without trigger or stochasticity: probabilistic description by the Liouville equation and Bayes' theorem, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 143, Issue: 705, Pages: 2025-2035, Part : B, Doi: 10.1002/qj.3064. Published: APR 2017.

Yano, J.I., 2017: Inertio-gravity waves under the non-traditional f-plane approximation: singularity in the large-scale limit. Journal of Fluid Mechanics, Volume: 810, Pages: 475-488 Published: JAN 2017

Zhang, S., Roussel, N., Boniface, K., Ha, M. H., Frappart, F., Darrozes, J., Baup, F., and Calvet, J.-C.: Use of GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 4767–4784, https://doi.org/ 10.5194/hess-21-4767-2017, 2017.

Zhang, WM., Brandt, M; Guichard, F; Tian, QJ; Fensholt, R, 2017: Using long-term daily satellite based rainfall data (1983-2015) to analyze spatio-temporal changes in the sahelian rainfall regime. Journal of Hydrology, Volume: 550, Pages: 427-440, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2017. 05.033. Published : JUL 2017.

Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

Calvet, J.-C., Ceschia, E., Courault, D., Dewaele, H., Goulas, Y., Inglada, J., Le Toan, T., and Maignan, F. : Observation de la végétation depuis l'espace, La Météorologie, 97, 86-93, 2017.

Chambon P., Geer A. : All-sky assimilation of Megha-Tropiques/SAPHIR radiances in the ECMWF numerical weather prediction system. ECMWF Technical Memorandum n° 802

Dombrowski-Etchevers, I., V. Vionnet, , 2017 : Pertinence des prévisions météorologiques à l'échelle kilométrique pour la modélisation du manteau neigeux en montagne. La Météorologie, Numéro : 99, Série: 8, Pages : 25-34, https://hdl.handle.net/2 042/63587, Published: NOV 2017.

Dombrowski-Etchevers, I., V. Vionnet, L. Quéno : La prévision météorologique à l'échelle kilométrique au service de la nivologie, La Météorologie, soumis

Labadie C., P. Cébron, P. Raynaud, L. Descamps, P. Arbogast : Le vendeur de glaces et le chaos : Expliquer la prévision probabiliste à travers un jeu. La Météorologie, 96, 21.

Mahfouf J-F., J-M. Moisselin, F. Autonès, J. Vidot : Apport de l'observation satellitaire pour la prévision du temps, La Météorologie, 97, 27.

Mahfouf J-F. « Les modèles de prévision numérique à aire limitée opérationnels de Météo-France » par C. Fischer, en préparation pour le numéro 100 de La Météorologie

Menut, L., J.-L. Attié, M. Beekmann, B. Bessagnet, C. Clerbaux, J. Cuesta, G. Dufour, G. Foret, L. El Amraoui, M. Mallet, F. Melleu, P. Ricaud, D. Tanré, S. Turquety, Apport de l'observation satellite à l'analyse et à la prévision de la qualité de l'air, La Météorologie, 97, 34-45, doi:10.4267/2042/62165, 2017.

Rabatel, A., E. Berthier, Y. Arnaud, J.-P. Dedieu, M. Dumont, S. Gascoin, M. Gay, K. Guerreiro, F. Karbou, A. Douraev, G. Picard, F. Rémy, P. Sirguey, E. Trouvé and E. Zakharova, 2017 : Télédétection satellitaire des surfaces enneigées et englacées. La Météorologie, n° 97, Pages: 78-85, Doi: 10.4267/2042/62170, Published : MAI 2017.

Vionnet, V., F. Naaim-Bouvet, Y. Deliot, H. Bellot, F. Karbou, M. Naaim, G. Guyomarc'h et Y. Durand, 2017 : Col du lac Blanc : un site pour l'observation et la modélisation de la neige en haute montagne. La Météorologie, Numéro : 99, Série : 8, Pages : 35-44, https://hdl.handle.net/2042/63588, Published: NOV 2017.

Publications 2017 dans des revues à comité de lecture hors CNRM

Andrey-Andrés, J., Fourrié, N., Guidard, V., Armante, R., Brunel, P., Crevoisier, C., and Tournier, B.: A simulated observation database to assess the impact of the IASI-NG hyperspectral infrared sounder, Atmos. Meas. Tech., 11, 803818, https://doi.org/ 10.5194/ amt-11-803-2018, 2018.

Bador M., Terray L., Boé J., Somot S., Alias A., Gibelin A.-L., Dubuisson B. (2017): "Future summer mega-heatwave and record-breaking temperatures in a warmer France climate". Environ. Res. Lett. 12 074025.

Buizza R., S. Brönnimann, L. Haimberger, P. Laloyaux, J. Martin, M. Fuentes, M. Alonso-Balmaseda, A. Becker, Michael Blaschek, Per Dahlgren, E. de Boisseson, Dick Dee, M. Doutriaux, Boucher (3), X. Feng, Keith Haines , S. Jourdain, Y. Kosaka (1), D. Lea, M. Mayer, P. Messina, C. Perruche, P. Peylin, J. Pullainen, N.Rayner, E. Rustemeier, D. Schepers, R. Saunders, J. Schulz, A. Sterin, S. Stichelberger, A. Storto (12), C.E. Testut, M-A. Valente, A. Vidard (15), N. Vuichard (16), A. Weaver, J. While and M. Ziese: "The EU-FP7 ERA-CLIM2 project contribution to advancing science and production of Earth-system climate reanalyses". Doi: 10.1175/BAMS-D-17-0199.1.

Canal, N., Deudon, O., Le Bris, X., Gate, P., Pigeon, G., Regimbeau, M. and Calvet, J.-C. (2017), Anticipation of the winter wheat growth based on seasonal weather forecasts over France. Met. Apps, 24: 432–443. Doi: 10.1002/met.1642

Hersbach, H., S. Brönnimann, L. Haimberger, M. Mayer, L. Villiger, J. Comeaux, A. Simmons, D. Dee, S. Jourdain, C. Peubey, P. Poli, N. Rayner, A.M. Sterin, A. Stickler, M.A. Valente, and S.J. Worley, 2017: The potential value of early (1939-1967) upper-air data in atmospheric climate reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143:1197-1210, doi: 10.1002/qj.3040.

Jeannin, N., L.Castanet, I.Dahman, V.Pourret, B.Pouponneau: "Smart Gateways Switching Control Algorithms Based on Tropospheric Propagation Forecasts", International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017,1-13.

Laurent, Victoire ; Varney, Patrick ; Chewtchouk, Jonathan ; Tardy, Marc ; Flohr, Michaël ; Dubuisson, Brigitte ; Piquemal, Jean-Michel : « Les évolutions passées et futures du climat des îles Marquises et de la Société », La Météorologie - n° 96 - février 2017, DOI : 10.4267/2042/61972.

Platt T., Sathyendranath S., White III GN, Jackson T., Saux Picart S. and Bouman H. (2017) Primary Production: Sensitivity to Surface Irradiance and Implications for Archiving Data. Front. Mar. Sci. 4:387. Doi: 10.3389/fmars.2017.00387.

Poli, P., D.P. Dee, R. Saunders, V.O. John, P. Rayer, J. Schulz, K. Holmlund, D. Coppens, D. Klaes, J.E. Johnson, A.E. Esfandiari, I.V. Gerasimov, E.B. Zamkoff, A.F. Al-Jazrawi, D. Santek, M. Albani, P. Brunel, K. Fennig, M. Schröder, S. Kobayashi, D. Oertel, W. Döhler, D. Spänkuch, and S. Bojinski, 2017: Recent Advances in Satellite Data Rescue. Bulletin of the American Meteorological Society, 98, 1471-1484, doi:10.1175/BAMS-D-15-00194.1.

Pouponneau, B., V. Pourret, E. Faucou, O. Mestre, M.Sorel, R.Bellini, M. Barthod, C. Dubois, S. Martinoni-Lapierre: « Évaluation de la ressource éolienne terrestre en France », La Météorologie, 2017, 98, 28-35.

Saux, S., Picart, P. Tandeo, E. Autret, B. Gausset, 2018. "Exploring machine learning to correct satellite-derived sea surface temperatures", Remote Sens., 10 (2), 224; doi:10.3390/rs10020224

Shinya Kobayashi, Paul Poli, Viju O. John. (2017) Characterisation of Special Sensor Microwave Water Vapor Profiler (SSM/T-2) radiances using radiative transfer simulations from global atmospheric reanalyses. Advances in Space Research 59: 4, 917-935.

Su, Z., W. Timmermans, Y. Zeng, J. Schulz, V. John, R. Roebeling, P. Poli, D. Tan, F. Kaspar, A. Kaiser-Weiss, E. Swinnen, C. Toté, H. Gregow, T. Manninen, A. Riihelä, J. Calvet, Y. Ma, and J. Wen, 2017: An overview of European efforts in generating climate data records. Bulletin of the American Meteorological Society, Early Online Release, doi: 10.1175/BAMS-D-16-0074.1.

Thorne, P.W., R. J. Allan, L. Ashcroft, P. Brohan, R.J.H Dunn, M. J. Menne, P. R. Pearce, J. Picas, K. M. Willett, M. Benoy, S. Bronnimann, P. O. Canziani, J. Coll, R. Crouthamel, G. P. Compo, D.. Cuppett, M. Curley, C. Duffy, I. Gillespie, J. Guijarro, S. Jourdain, E. C. Kent, H. Kubota, T. P. Legg, Q. Li , J. Matsumoto, C. Murphy, N. A. Rayner, J. J. Rennie, E. Rustemeier, L. C. Slivinski, V. Slonosky, A. Squintu, B. Tinz, M. A. Valente, S. Walsh, X. L. Wang, N. Westcott, K. Wood, S. D. Woodruff and S. J. Worley, "Towards an integrated set of surface meteorological observations for climate science and applications". Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0165.1.

Vidot J., B. Bellec, M. Dumont, P. Brunel, 2017, "A daytime VIIRS RGB pseudo composite for snow detection", Remote Sensing of Environment, 196, 134-139, doi:10.1016/j.rse.2017.04.028.

Vidot, J., Brunel, P., Dumont, M., Carmagnola, C., Hocking, J., 2018, "The VIS/NIR Land and Snow BRDF Atlas for RTTOV: Comparison between MODIS MCD43C1 C5 and C6". Remote Sens., 2018, 10, 21.

Vignon, E., Bas J.H. van de Wiel, Ivo G. S. van Hooijdonk, C. Genthon, S. J.A. van der Linden, J. Antoon van Hooft, P. Baas, W. Maurel, O. Traullé, G. Casasanta, 2017: Stable boundary-layer regimes at Dome C, Antarctica: observation and analysis. Q.J.R. Meteorol. Soc. Doi: 10.1002/qj.2998.

Zamo, M. and Philippe Naveau. "Estimation of the Continuous Ranked Probability Score with Limited Information and Applications to Ensemble Weather Forecasts." Mathematical Geosciences (2017): 1-26.

Thèses soutenues en 2017

Barbier, J., 2017 : "Extrêmes climatiques : les vagues de chaleur au printemps sahélien". Thèse soutenue le 15 décembre 2017.

Boukachaba, N., 2017 : "Apport des observations satellitaires hyperspectrales infra rouges IASI au-dessus des continents dans le modèle météorologique à l'échelle convective AROME". Thèse soutenue le 25 septembre 2017.

Bourgeois, E., 2017 : Les nuages de mi-niveau en Afrique de l'Ouest : observation, caractérisation, modélisation. Thèse soutenue le 7 décembre 2017.

Brioulet, P.-E., 2017 : "Thermodynamique et turbulence dans les épisodes de vents forts sur le Golfe du Lion". Thèse soutenue le 28 novembre 2017.

Daniel, M., 2017 : "Ville, climat urbain et climat régional sur la France : étude par une approche de modélisation climatique couplée". Thèse soutenue le 17 novembre 2017.

Dewaele, H., 2017 : "Intégration de données satellitaires dans SURFEX pour le suivi de la végétation à l'échelle mondiale". Thèse soutenue le 4 décembre 2017.

Kangah, Y., 2017 : "Mesure du protoxyde d'azote (N2O) depuis l'espace". Thèse soutenue le 1er décembre 2017.

Martinet, M., 2017 : Initiation et organisation d'un système fortement précipitant méditerranéen dans le cadre de la période d'observation spéciale HyMeX : simulations aux échelles hectométriques. Thèse Soutenu le 11 décembre 2017.

Queno L., 2017 : "Apport de prévisions météorologiques à échelle kilométrique pour la modélisation du manteau neigeux en montagne". Thèse soutenue le 24 novembre 2017.

Redon, E., 2017 : "Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique". Thèse soutenue le 20 juin 2017.

Rieutord, T., 2017 : "Analyse de sensibilité d'un algorithme de filtrage des mesures de vent par lidar". Thèse soutenue le 13 novembre 2017.

Rodier, Q., 2017 : Paramétrisation de la turbulence atmosphérique dans le couche limte stable. Thèse soutenue le jeudi 14 décembre 2017.

Taillardat, M., 2017 : "Méthodes Non-Paramétriques de Post-Traitement des Prévisions d'Ensemble". Thèse soutenue le lundi 11 décembre 2017.

Tav J., 2017 : "Étude du dépôt de radionucléides par les gouttelettes de brouillards et de nuages sur les végétaux à partir d'expérimentations in situ". Thèse soutenue le 12 octobre 2017.

Varino F., 2017 : "Typologie des tempêtes du XXe siècle". Thèse soutenue le 22 septembre 2017.

Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2017

Bouniol, D., 2017 : Contributions à l'étude des processus physiques dans les nuages. HDR soutenue le mardi 14 novembre 2017.

Couvreux, F., 2017 : Contribution à l'analyse des processus de couche limite et à leur représentation dans les modèles à partir de simulations explicites. HDR soutenue le 9 juin 2017.

Dumont, M., 2017 : « De la couleur de la neige : mesure, modèle et applications ». HDR soutenue le lundi 20 novembre 2017.

El Amraoui, L., 2017 : « Apport de l'assimilation de données dans la chimie atmosphérique : De l'environnement stratosphérique vers la prévision de la qualité de l'air » le 10 janvier 2017.

Mallet, M., 2017 : "Interaction : "Aérosol, rayonnement et climat" à l'échelle régionale" le jeudi 14 décembre 2017.

Plu, M., 2017 : "Prévisibilité des tempêtes, des cyclones tropicaux et de la composition chimique de l'atmosphère" le jeudi 9 novembre 2017.

Glossaire

Organismes et Laboratoires

Organismes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
ANELFA	Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques
ANR	Agence Nationale de la Recherche
BEC	Bureau d'Etudes et de Consultance
CDM	Centre Départemental de la Météorologie
CDMA	Cellule de développement Météo-Air
CEH	Centre for Ecology and Hydrology
CEMAGREF	CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts (Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture)
CEN	Centre d'Etudes de la Neige
CEPMMT	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CMM	Centre de Météorologie Marine
CMRS	Centre Météorologique Régional Spécialisé
CMS	Centre de Météorologie Spatiale
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNP	Centre National de Prévision
DGA	Délégation générale pour l'armement
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DGSCGC	Direction générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise
EALAT	Ecole de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre
EASA	European Aviation Safety Agency, Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
EEA	Agence Environnementale Européenne
ENAC	Ecole Nationale de l'Aviation Civile
ENM	Ecole Nationale de la Météorologie
ESA	European Space Agency
ETNA	Division Ecoulements Torrentiels, Neige et Avalanches du CEMAGREF
EUFAR	Réseau européen d'infrastructures de recherche aéroportée pour les sciences environnementales et de la Terre
EUMETNET	EUropean METeorological NETwork
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
FAA	Federal Aviation Agency, Agence US de la Sécurité Aérienne
FAAM	Facility for Airborne Atmospheric Measurements (United Kingdom)
FMI	Institut Finlandais de Météorologie
ICARE	International Conference on Airborne Research for the Environment
IFREMER	Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la MER
INERIS	Institut National de l'Environnement et des RISques
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
INSU	Institut National des Sciences de l'"Univers
IPEV	Institut Paul Emile Victor
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (anciennement CEMAGREF)
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency
JMA	Japan Meteorological Agency
KNMI-TNO	Royal Netherlands Meteorological Institute and Netherlands Organization for Applied Scientific Research
MEEM	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
MERCATOR-OCEAN	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle
MetOffice	United Kingdom Meteorological Office
MPI	Max Planck Institut
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NEC	Nippon Electric Company
NIWA	National Institute for Water and the Atmosphere (Nouvelle-Zélande)
NOAA	National Ocean and Atmosphere Administration
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONERA	Office national d'études et de recherches aérospatiales
RTRA-STAE	Réseau Thématique de Recherche Avancée - Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace
SCHAPI	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
UE	Union Européenne
UKMO	United Kingdom Meteorological Office
VAAC	Volcanic Ash Advisory Centre

Laboratoires ou unités de recherche/développement

3SR	Laboratoire Sols – Solides – Structures – Rhéologie, UJF Grenoble / CNRS / Grenoble INP
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEREA	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM-GAME	Groupe d'études de l'Atmosphère MEtéorologique
CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques
CRA	Centre de Recherches Atmosphériques
DSO	Direction des Systèmes d'Observation (Météo-France)
GAME	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique
GSMA	Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique, UMR 7331 CNRS Université de Reims Champagne Ardennes
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
IGN	Institut Géographique National
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
LaMP	Laboratoire de Météorologie Physique
LATMOS	Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LAVUE	Laboratoire Architecture, Ville, Urbanisme, Environnement
LCP	Laboratoire Chimie et Procédés
LEGI	Laboratoire des écoulements physiques et industriels
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
LHSV	Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant
LIRIS	Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information
LISST	Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LPCEE	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
LPED	Laboratoire Population Environnement Développement
LRA	Laboratoire de Recherche en Architecture
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
RIU	Rhenish Institute for environmental research at the University of Cologne
SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
WUT	Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

Programmes et projets nationaux et internationaux

BACCHUS	Impact of Biogenic versus Anthropogenic emissions on Clouds and Climate: towards a Holistic UnderStanding
BAMED	BAlloons in the MEDiterranean
C3AF	Changement Climatique et Conséquences sur les Antilles Françaises

CHFP	Climate Historical Forecasting Project
CHROME	Couplage Hydrométéorologique RégiOnal Multi-Ensemble
CIDEX	Calibration and Icing Detection EXperiment
CMIP	Coupled Model Intercomparaison Project
COPERNICUS	European Earth observation system http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/
CYPRIM	projet Cyclogénèse et précipitations intenses dans la zone méditerranéenne
ERA-CLIM	European Reanalysis of Global Climate Observations
ESURFMAR	Eumetnet SURFace MARine programme
EUFAR2	2nd projet EUFAR dans le cadre de 7e PCRD et 4e projet EUFAR depuis 2000
EUREQUA	Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUArtiers, projet financé par l'Agence Nationale pour la Recherche, ANR-2011-VILD-006. Partenaires : GAME, IFSTTAR, CEREA, LISST, LAVUE, LPED.
EURO4M	European reanalysis and observations for monitoring http://www.euro4m.eu/
GeoMIP	Geoengineering Model Intercomparison Project
GHRSST	International Group for High Resolution SST
GLOSCAL	GLobal Ocean Surface salinity CALibration and validation
H2020	Programme-cadre pour la recherche et l'innovation (2014-2020)
HOMONIM	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins
HyMeX	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment
IMAGINES	Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels
IncREO	Increasing Resilience through Earth Observation
LEFE	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
MACC	Monitoring Atmospheric Composition and Climate
METOP	METeorological Operational Polar satellites
PCRD	Programme Cadre de Recherche et de Développement
PLUVAR	Variabilité sub-saisonnière des pluies sur les iles du Pacifique Sud
PNRA	Programma Nazionale di Recerche in Antartide
QUANTIFY	Programme QUANTIFYing the climate impact of global and European transport systems
RHYTMME	Risques HYdro-météorologiques en Territoires de Montagnes et MEditerranéens
SCAMPEI	Scénarios Climatiques Adaptés aux Montagnes : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes - projet de l'ANR coordonné par le CNRM
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity Suomi-NPP Programme américain de satellites météorologiques en orbite polaire
THORPEX	THe Observing system Research and Predictability EXperiment
UERRA	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
USAP	United States Antarctic Program
VOLTIGE	Vecteur d'Observation de La Troposphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement
WCRP	World Climate Research Programme

Campagnes expérimentales

AMMA	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
CAPITOUL	Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
EUREQUA	Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnemental des QUArtiers
HAIC	High Altitude and Ice Crystals (www.haic.eu)
MEGAPOLI	Megacities : Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLlution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation
SMOSREX	Surface MOnitoring of the Soil Reservoir EXperiment

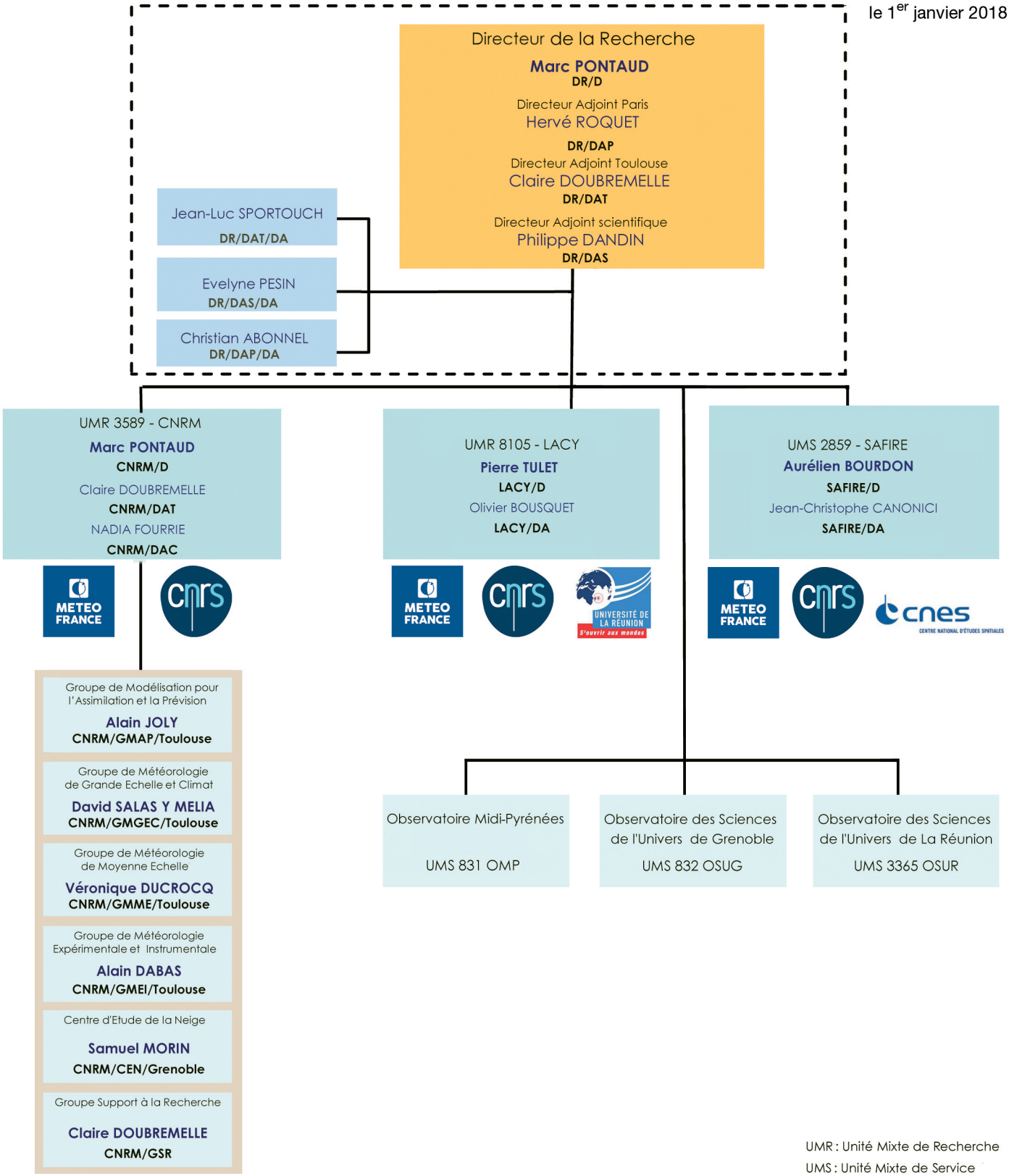
Autres sigles, abréviations ou acronymes

AIRS	Sondeur Infrarouge avancé
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational
ALIDS	Interféromètre laser aéroporté pour mesurer la granulométrie des gouttes d'eau dans les nuages
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit-B
AMULSE	Atmospheric Measurements by Ultra-Light SpEctrometer
ANASYG	ANAlyse Synoptique Graphique
ANTILOPE	ANalyse par spaTIaLisation hOraire des PrEcipitations
ARAMIS	Application Radar A la Météorologie Infra-Synoptique
ARGO	Array for Real time Geostrophic Oceanography
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle
AROME-COMB	AROME - COMBinaison
AROME-PERTOBS	AROME (OBServations PERTurbées aléatoirement)
AROME-WMED	Configuration AROME sur la Méditerranée occidentale
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
AS	Adaptations Statistiques
ASAR	Advanced Synthetic Arperture Radar
ASCAT	Advanced SCATterometer
ASTEX	Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment
ATM	Air Traffic Management - Contrôle du trafic aérien
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BAS	British Antarctic Survey
BLLAST	Boundary Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence
BPCL	Ballon Pressurisé de Couche Limite
BSS	Score probabiliste « Brier Skill Score »
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CANARI	Code d'Analyse Nécessaire à ARPEGE pour ses Rejets et son Initialisation
CAPE	Convective Available Potential Energy
CAPRICORNE	CAractéristiques PRIncipales de la COuveRture NuageusE
CARIBOU	Cartographie de l'Analyse du RIsque de Brume et de brOUillard
CAROLS	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
Cb	Cumulonimbus
CFMIP	Cloud Feedback Intercomparison Project
CFOSAT	Chinese-French SATellite
ChArMEx	Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment
CISMF	Centre Inter-armées de Soutien Météorologique aux Forces
CLAS	Couches Limites Atmosphériques Stables
CMC	Cellule Météorologique de Crise
CMIP6	6ème phase du Coupled Model Intercomparison Project
CNRM-CM5	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM
CNRM-RCSM	Regional Climate System Model
COP	Contrat d'Objectifs et de Performances
COPAL	COmmunity heavy-PAyload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences
CPR	Cloud Profiling Radar
CrIS	Cross-track Infra-Red Sounder
CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.
CTRIP	CNRM-Total Routing Integrated Pathway
DCSC	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
DCT	Diffraction Contrast Tomography
DEM	Discrete Element Method
DMT	Dropplet Measurement Technologies
DOA	Département de l'Observation en Altitude
DP	Direction de la Production
DPI	Droits de Propriété Intellectuelle
DPR	Dual frequency Precipitation Radar
DPrévi	Direction de la Prévision
DSI	Direction des Systèmes d'Information (Météo-France)
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
ECOCLIMAP	Base de données de paramètres de surface
ECUME	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaings Estimates
EGEE	Etude du golfe de GuinEE
ENVISAT	ENVIronmental SATellite
ERA	European Re-Analysis
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
EUCLIPSE	European Union Cloud Intercomparison, Process Study & Evaluation
FAB	Fonctionnal Aerospace Block
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central
FAR	Fausse AleRte
FSO	Forecast Sensitivity to Observations
FSOi	Forecast Sensitivity to Observations-based impact
GABLS4	Gewex Atmospheric Boundary Layer Study
GELATO	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
GEV	Loi généralisée des valeurs extrêmes
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat
GMAP	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision
GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale
GMME	Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS-R	Global Navigation by Satellite System (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) – R pour « Réflectométrie »

GPM	Global Precipitation Measurement
GPP	Gross Primary Production
GPS	Global Positionning System
GSMA	Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique
High IWC	High Ice Water Content
HIRLAM	HIgh Resolution Limited Area Model
HISCRTM	HIgh Spectral resolution Cloudy-sky Radiative Transfer Model
HSS	Measurement of improvement of the forecast
HTBS	Haute Troposphère - Basse Stratosphère
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
IAGOS	In-service Aircraft for Global Observing System
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge
IAU	Incremental analysis update, mise à jour incrémentale par une analyse
IFS	Integrated Forecasting System
IIR	Infrared Imaging Radiometer
INDARE	Indian Ocean Data Rescue Initiative
IPS	Indice Piézométrique Standardisé
ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
ISBA-A-gs	Modèle Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère, avec représentation de la photosynthèse et de la croissance de la végétation
ISBA - ES	Modèle numérique du CNRM représentant l'évolution du sol en surface (végétation incluse) et en profondeur, mettant particulièrement l'accent sur l'évolution de la couverture de neige
ISBA-TOP	Couplage du schéma de surface ISBA et d'une version « méditerranéenne » du modèle hydrologique TOPMODEL
ISFC	Indice de Segmentation de la Composante de Fourier
ISIS	Algorithme de suivi automatique des systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Météosat
IWC	Ice Water Content
LAI	Leaf Area Index (indice foliaire)
Land-SAF	LAND Satellite Application Facilities
LAURE	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
LCCS	Land Cover Classification System
LES	Large Eddy Simulation model
LISA	LIdar SAtellite
4M	Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques
Med-CORDEX	Mediterranean Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
MEDUP	MEDiterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment
Megha-Tropiques	Satellite fanco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale
MEPRA	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche (modélisation)
MERSEA	Marine EnviRonment and Security for the European Area
MESCAN	Combinaison de MESAN (nom du système suédois) et de CANARI
MESO-NH	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatisque
MFWAM	Météo-France WAve Model
MHS	Microwave Humidity Sounder
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MNPCA	Microphysique des Nuages et de Physico-Chimie de l'Atmosphère
MOCAGE	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
MODCOU	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)
MoMa	Méthodes Mathématiques pour le couplage modèles et données dans les systèmes non-linéaires stochastiques à grand nombre de degrés de liberté
MOTHY	Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbure
MRR	Micro Rain Radars
MSG	Météosat Seconde Génération
NAO	North Atlantic Oscillation
NEMO	Nucleus for European Modelling of Ocean
NEMO-WMED36	Configuration de NEMO sur la Méditerranée occidentale
NSF	Norges StandardiseringsForbund
NWCSAF	Satellite Application Facility for Nowcasting
OASIS	Ocean Atmosphere Sea Ice Soil
OPIC	Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection
ORACLE	Opportunités et Risques pour les Agro-ecosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatiquE, socio-économiques et politiques en France
ORCHIDEE	ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms
OSCAT	OCEANSAT-2 Scatterometer
OSTIA	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis
OTICE	Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires
PALM	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
PDO	Pacific Decadal Oscillation
PEARO	Prévision d'Ensemble AROME
PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège
PI	Prévision Immédiate
PN	Prévision Numérique
PNT	Prévision Numérique du Temps
POD	PrObabilité de Détection
POI	Période d'Observation Intensive
PRESYG	PREvision Synoptique Graphique
Prev'Air	Plateforme nationale de la qualité de l'air
PREVIBOSS	PREvisibilité à courte échéance de la variabilité de la VIsibilité dans le cycle de vie du Brouillard, à partir de données d'Observation Sol et Satellite.
Prévi-Prob	Projet sur les prévisions probabilistes
PSI	Pollutant Standard Index
PSR	Plan Submersions Rapides
PVM	Particulate Volume Monitor
PVs	Tourbillon potentiel de l'air humide
RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu
RCP8.5	8.5 W/m² Representative Concentration Pathway corresponding to a 8.5 W/m² radiative forcing at the end of the 21st century compared to preindustrial climate
RDI	Référent Départemental Inondation
RDT	Rapidly Developing Thunderstorm
RHI	Range Height Indicator (coupe verticale)
ROC	Relative Operating Characteristic curve
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
RTI	Recherche Technologie & Innovation
RTTOV	Radiative Transfer for TOVS
SAF NWP	Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction
SAF OSI	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice
SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige
SAPHIR	Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Intertropicale par Radiométrie
SARA	Spectroscopy by Amplified Resonant Absorption
SATOB	Satellite Observation
SCM	Single-Column Model
SESAR	Single European Sky ATM Research
SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
SFRI	Système Français de Recherche et d'Innovation
S2M	SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus – MEPRA
SIM	SAFRAN ISBA MODCOU
SIRTA	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique
SMOSMANIA	Soil Moisture Observing System – Meteorological Automatic Network Integrated Application
SMT	Système Mondial de Télécommunications
SOERE/GLACIOCLIM	Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement : "Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat".
SOP	Special Observing Period
SPC	Service de Prévision des Crues
SPI	Standardized Precipitation Index (Indice de Précipitation Standardisé)
SPIRIT	SPectromètre Infra-Rouge In situ Toute altitude
SPPT	Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies
SSI	Solar Surface Irradiance
SSMI/S	Special Sounder Microwave Imager/Sounder
SURFEX	code de SURFace EXternalisé
SVP	Surface Velocity Program
SWI	Soil Wetness Index
SWIM	Surface Wave Investigation and Monitoring
SYMPOSIUM	SYstème Météorologique de Prévision Orienté Services, Intéressant des Usagers Multiples - découpage du territoire métropolitain en 615 zones « climatiquement » homogènes, dont la taille varie de 10 à 30 km
TACTIC	Tropospheric Aerosols for ClimaTe In CNRM
TCU	Towering Cumulus
TRL	Technology Readiness Level
TEB	Town Energy Balance
TRIP	Total Runoff Integrating Pathways
TSM	Températures de Surface de la Mer
UHF	Ultra-Haute Fréquence
UNIBAS	Modèle de précipitations
VARPACK	Current tool for diagnostic analysis in Meteo-France
VHF	Very High Frequency
VOS	Voluntary Observing Ships
WWLLN	World Wide Lightning Location Network

Organigramme de la Direction de la Recherche (DR)

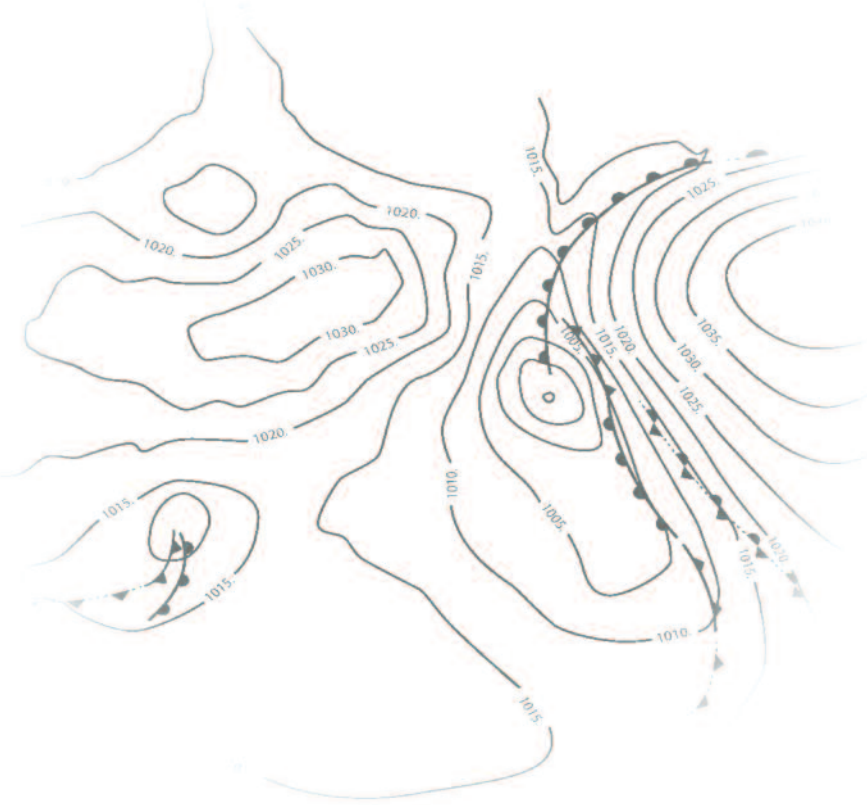
le 1er janvier 2018



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.umr-cnrm.fr
Mail : contact@cnrm.meteo.fr



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

Création DIRCOM/CGN

Météo-France est certifié ISO 9001
par AFNOR Certification
© Météo-France 2018
Copyright avril 2018
ISSN : 2116-438X