

Rapport **Recherche**  
**2018**



# Rapport Recherche 2018

---



# Sommaire

---

**Prévision numérique du temps et assimilations de données** ● page 5

**Étude des processus** ● page 14

**Climat** ● page 22

Diagnostic, étude et modélisation du climat, de la saison au siècle  
Impacts et adaptation

**Chimie, aérosols et qualité de l'air** ● page 34

**Neige** ● page 38

**Océanographie** ● page 41

**Techniques, campagnes et produits d'observation** ● page 46

Techniques et produits d'observation  
Campagnes de mesures

**Recherche et aéronautique** ● page 54

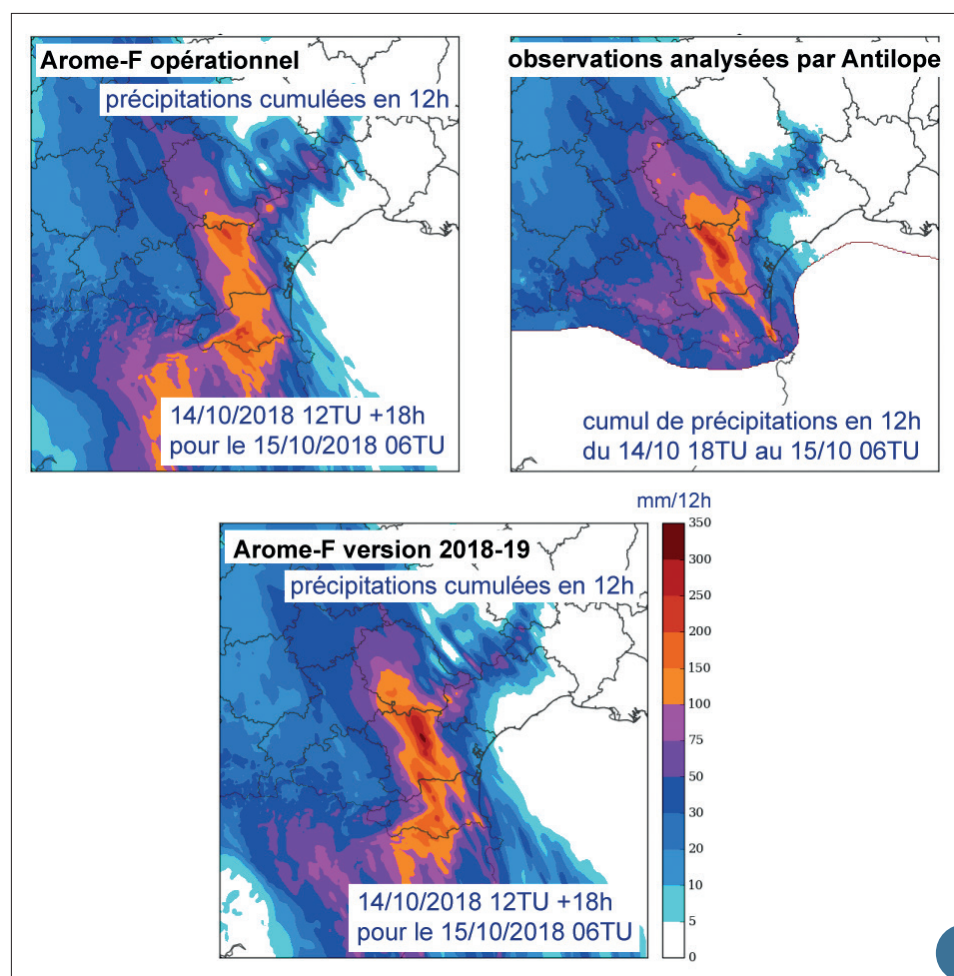
**Annexes** ● page 59



# Prévision numérique du temps et assimilations de données

Météo-France dispose, au sein de sa chaîne opérationnelle de prévision numérique, de plusieurs systèmes au niveau de l'état de l'art : un système mondial dénommé ARPEGE et un autre, nommé AROME, doté d'une résolution suffisante pour représenter les plus gros nuages convectifs de façon explicite. AROME est décliné sur de nombreux domaines limités un peu partout dans le monde, l'exemplaire couvrant la métropole (AROME-F) bénéficie de plus d'une assimilation de données variationnelle 3D et d'une prévision d'ensemble. Les réalisations opérationnelles de 2018 les plus significatives sont les suivantes :

- les échéances de fin des prévisions d'AROME-F ont été repoussées de manière à couvrir toute la journée du lendemain et l'ensemble est désormais lancé 4 fois par jour au lieu de 2. Tout ceci est destiné à préparer l'extension de la vigilance de 1 à 2 jours ;
- les prévisions des AROME au bénéfice des pays d'outre-mer ont tous une échéance limite de base de +42 h. Mais, changement plus significatif, elles peuvent être étendues jusqu'à +78 h si la situation le demande, c'est à dire quand un cyclone tropical menace l'un des domaines ;
- un ensemble de 25 assimilations variationnelles 3D, dotées d'un cycle de 3 h, a été mis en place dans la chaîne opérationnelle. Il couvre le domaine AROME-F à une résolution horizontale de 3,25 km. Pour le moment, il fournit des champs de perturbations qui améliorent de manière très nette les performances de l'ensemble AROME aux courtes échéances ;
- l'ensemble mondial basé sur ARPEGE est aussi lancé désormais 4 fois par jour.



Précipitations cumulées en 12 h prévues par les versions opérationnelles (à gauche) et la future version (à droite) d'AROME-F, cette dernière couplée à la future version d'ARPEGE. Au milieu, la lame d'eau estimée par l'analyse Antilope de la DSO. Il s'agit de la situation du 14 au 15 octobre 2018, qui a donné lieu à des inondations soudaines dévastatrices dans l'Aude. Le réalisme dans la zone de fortes précipitations est accru, ce qui constitue une amélioration notable, pour autant tous les défauts ne sont pas corrigés, comme les cumuls trop élevés sur les Pyrénées.

Un certain nombre de développements passionnants ont pour but d'aider Météo-France à repenser en profondeur l'organisation de sa production de prévisions élaborées, adaptées à chacun de ses utilisateurs. Ils prennent la forme de nouvelles grandeurs diagnostiquées à partir de la variable d'état du modèle de prévision, telle une assez riche caractérisation des types de précipitations. Dans quelques cas, des versions probabilistes sont aussi déduites des sorties des prévisions d'ensemble. Une des approches les plus novatrices est sans doute la capacité de représenter les champs non plus sous la forme de valeurs aux nœuds d'une grille mais sous la forme d'« objets » ou zones cernées d'un bord flou, ce qui traduit les incertitudes sur la forme ou la position. La construction de ces objets peut être accélérée par l'utilisation de réseaux de neurones multicouches.

Un travail considérable a permis de préparer une chaîne d'essai complète de nouvelles versions des applications de prévision numérique fondée sur une version récente du code commun de prévision numérique, code partagé avec le CEPMMT et 25 autres services hydrométéorologiques nationaux. Les changements les plus caractéristiques sont des améliorations des résolutions horizontales de tous les systèmes mondiaux, accompagnées de tous les changements cohérents avec ces résolutions. Ainsi, une tâche spécifique a consisté à ajuster le comportement de la paramétrisation de la convection profonde précipitante de manière à lui permettre de fonctionner avec des résultats raisonnables dans la gamme de résolution de 10 à 5 km. La recherche s'est concentrée sur les conditions d'activation du schéma, les conditions d'échelle résolue qui forcent la convection. Dans les systèmes AROME, le principal changement en cours d'essai est une version entièrement nouvelle du schéma de paramétrisation de la microphysique. Ce dernier décrit comment se forment et croissent les condensats qui précipitent au sein des nuages. Ces nouvelles versions, qui ont fait l'objet d'expérimentations intensives et améliorent la qualité des prévisions de façon encourageante, devraient devenir opérationnelles en 2019.

Dans le domaine de la télédétection, il convient de faire ressortir les recherches en cours sur l'intérêt de prendre en compte le contenu spécifique effectif, local, d'un gaz trace absorbant tel que l'ozone ou le dioxyde de carbone lors de l'assimilation des luminances spectrales dans l'infra-rouge. Une autre avancée est l'expérimentation intensive d'une approche en deux étapes de l'utilisation des luminances spectrales dans les micro-ondes en présence d'air nuageux ou pluvieux. Une nouvelle source de données in-situ commence d'être explorée, l'utilisation des vents déduits des courts messages échangés entre les avions commerciaux et le contrôle aérien. L'assimilation variationnelle avec ensembles, une famille d'algorithmes d'assimilation dénotée EnVar, qui est la cible de moyen terme destinée à renouveler les algorithmes d'assimilation, a aussi connu des progrès significatifs. Deux jeux d'expériences effectués avec AROME, sur deux périodes différentes, montrent de façon claire que l'approche EnVar présente un réel potentiel d'amélioration de la qualité des prévisions d'AROME. Plusieurs projets de ré-analyses soit touchent à leur fin, comme la ré-analyse HyMeX de la première période d'observation spéciale, ou repartent avec de nouvelles ambitions, comme le futur service Copernicus de ré-analyse des états de surface à haute résolution sur l'Europe. Un chercheur du groupe de prévision numérique du temps a découvert un moyen de résoudre un nouveau système d'équations décrivant l'évolution de l'atmosphère, système appelé « quasi-élastique », au sein d'un unique problème semi-implicite. Une retombée de ce travail est une reformulation mieux posée de la condition à la limite inférieure de la formulation discrète actuelle du schéma d'AROME, ce qui améliore sa stabilité numérique. Les pages qui suivent fournissent des résumés de ces recherches et d'autres, comme des travaux sur les cyclones tropicaux, les inondations et d'autres sujets. Ainsi, une expérience extrême d'une audace remarquable a conduit à réaliser une simulation longue réussie avec le modèle mondial ARPEGE en activant le noyau dynamique non-hydrostatique (le même que celui qu'utilise AROME) à une résolution de 2,5 km, sans rencontrer de problème numérique significatif.

1

---

## Simulation à l'échelle kilométrique avec le modèle ARPEGE

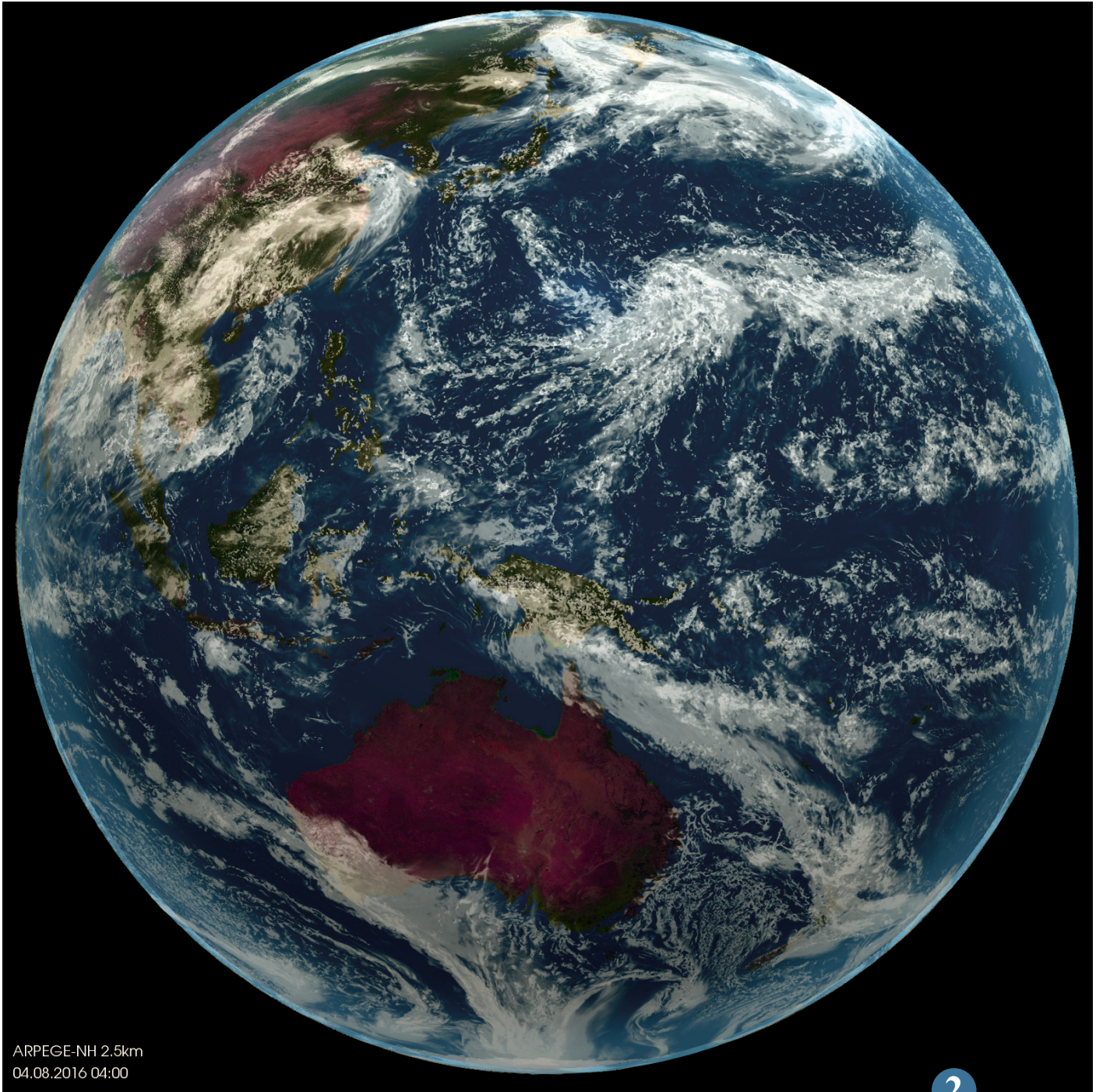
Le modèle global ARPEGE fonctionne avec des pas des temps élevés lui conférant une grande efficacité numérique grâce à son noyau dynamique dit « semi-implicite et semi-lagrangien » au prix de transformées spectrales effectuées à chaque pas de temps. Ces transformées spectrales sont réputées mal s'adapter aux supercalculateurs récents. Il est donc nécessaire de tester ce que peut valoir ce modèle pour des tailles de domaine qui seront opérationnelles dans le futur. D'autre part nous souhaitons également vérifier que le modèle ARPEGE peut fonctionner correctement à l'échelle kilométrique.

Nous avons dans ce but participé au projet DYAMOND d'inter-comparaison de modèles sur tout le globe fonctionnant à une échelle permettant de résoudre sans paramétrisation la convection et les nuages (< 5 km). Il s'agissait de réaliser une simulation en mode climatique de 50 jours à la résolution horizontale de 2,5 km (en utilisant la dynamique non-hydrostatique et la convection explicite). Nous avons pu observer que cette simulation présentait des résultats cohérents notamment au niveau de la convection explicite, pour un coût informatique comparable à celui des meilleurs modèles du projet DYAMOND

fonctionnant à cette résolution. Ceci nous a permis de conclure que le noyau dynamique d'ARPEGE sera vraisemblablement encore performant en opérationnel dans une quinzaine d'années.

2





ARPEGE-NH 2.5km  
04.08.2016 04:00

2

▲  
Prévision de nébulosité du modèle ARPEGE à 2,5 km de résolution  
(avec l'aimable autorisation de Niklas Röber et du DKRZ).

## Utilisation des méthodes de Deep Learning pour la détection d'objets précipitants dans les prévisions AROME et AROME-PE

L'utilisation des prévisions de précipitations peut être améliorée grâce à un traitement adapté des champs en sortie des modèles. Une approche innovante et prometteuse consiste à extraire des champs prévus une information d'échelle plus large que la maille du modèle, et donc plus prévisible, sous la forme d'« objets précipitants stochastiques ». Ces objets sont définis par des contours flous à l'intérieur desquels la distribution des pluies, en terme d'intensité et/ou de variabilité spatiale (aussi appelée texture), est homogène. La détection automatique de ces objets est néanmoins complexe et plusieurs approches peuvent être envisagées. Une première méthode a été développée pour détecter des objets selon leur intensité à partir d'une mesure de similarité entre la distribution locale des pluies et des distributions de référence. Une nouvelle méthode de détection, qui utilise un réseau de neurones convolutifs développé initialement pour la segmentation d'images médicales, a été évaluée. Entraîné

sur les détections issues de l'algorithme existant, ce réseau fournit des résultats similaires en un temps de calcul réduit s'il est exécuté sur processeur graphique. Déterminer la texture des pluies, en particulier leur caractère continu ou discontinu, est un deuxième aspect important pour définir précisément le temps ressenti, qui n'est pas encore traité par l'algorithme actuel. Des tests préliminaires avec un réseau de neurones entraîné sur une base d'apprentissage de petite taille fournissent des résultats encourageants. À l'avenir, cette méthode pourrait permettre une détection simultanée de l'intensité et de la texture des pluies, puis une caractérisation plus fine des types de pluie incluant notamment les orages.

3

## Ré-analyse AROME-WMED

Depuis 2010, le programme HyMeX cherche à améliorer la compréhension et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée, avec un intérêt particulier sur la prévisibilité et l'évolution des événements intenses associés.

De nombreux moyens d'observation et de modélisation ont été déployés durant des Périodes d'Observations Spéciales (SOP). Pour la partie occidentale de la Méditerranée ces SOPs ont eu lieu pendant l'Automne 2012 et l'Hiver 2013. Pour les besoins de la campagne, une version du modèle AROME, dénommée AROME-WMED, a été développée et utilisée en temps réel pour superviser le déploiement des observations.

Afin de tirer profit de toutes ces observations de recherche acquises durant la campagne, une ré-analyse utilisant un maximum d'observations a été réalisée. Ces données proviennent de lidars vapeur d'eau (sol ou aéroporté), de ballons de couche limite, des données de cinq radars espagnols et de radiosondages à haute résolution verticale. Des données retraitées de GNSS et de profileurs de vent ont également été assimilées dans le modèle AROME-WMED. Cette ré-analyse a par ailleurs bénéficié d'une version plus récente du modèle AROME-WMED. Ainsi 24 % d'observations supplémentaires ont été utilisées par rapport à la version temps réel.

4

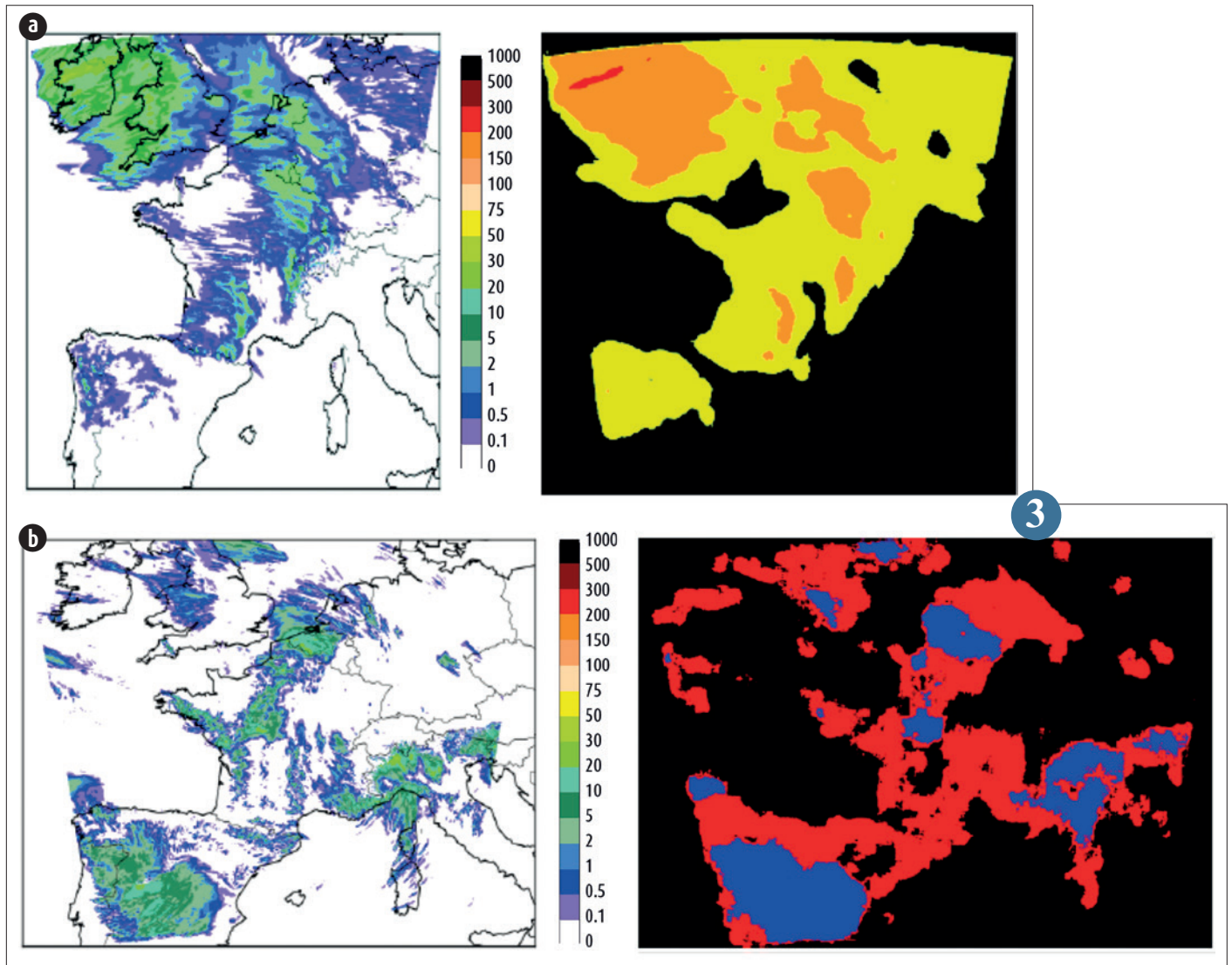
Cette ré-analyse finale est plus proche des observations que les versions précédentes. Les comparaisons des prévisions avec les observations de GNSS ont montré que le contenu intégré en vapeur d'eau était amélioré jusqu'à 42 heures d'échéance. De même, les champs atmosphériques prévus sont plus proches des radiosondages tout comme les taux de précipitations inférieurs à 10 mm/24 h qui sont améliorés. Les champs météorologiques d'AROME-WMED sont disponibles dans la base de données HyMeX pour permettre aux scientifiques de réaliser des études de processus.

## Prévision immédiate intégrée des crues rapides

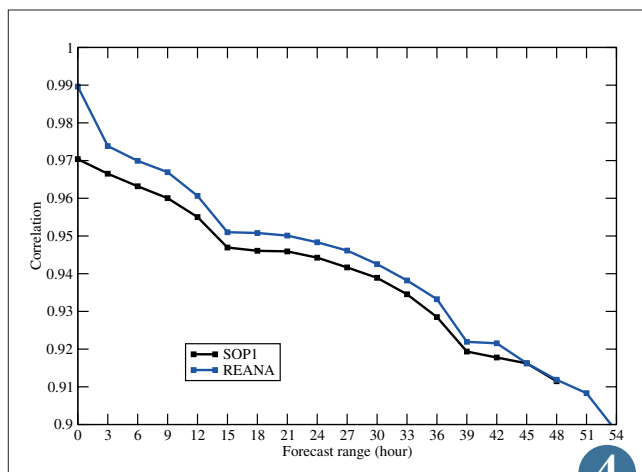
Les crues éclair ravagent régulièrement les régions méditerranéennes. La rapidité de ces phénomènes est un problème majeur pour la mise en alerte des populations et l'intervention des secours. Disposer d'une prévision aux échéances dites de prévision immédiate (dans les 6 heures à venir) peut être crucial.

Une approche intégrée hydrométéorologique permet de prévoir les phénomènes de crues rapides et de ruissellement à ces échéances. Des modèles hydrologiques dédiés sont forcés par des prévisions immédiates de pluie. Si, pour la prévision des pluies, l'extrapolation des lames d'eau radar est adaptée à des échéances d'une à deux heures, la prévision numérique est indispensable au-delà. La chaîne de prévision immédiate numérique AROME-PI, basée sur le modèle de résolution kilométrique AROME mais avec une fenêtre temporelle d'assimilation réduite, réalise des prévisions de pluie allant de 30 mn jusque 6 h d'échéance toutes les heures. PIAF, le produit de fusion de données issues de l'extrapolation radar et d'AROME-PI, délivre des prévisions de pluie jusqu'à 3 h d'échéance toutes les 5 mn et permet une transition continue entre ces deux sources d'information. L'apport de ces pluies pour la prévision immédiate hydrologique est à estimer avec l'étude des lames d'eau moyennées sur les bassins versants et des débits simulés aux exutoires. Pour les lames d'eau, une étude menée sur sept cas passés entre 2015 et 2018 a montré que AROME-PI obtient de meilleurs résultats que PIAF sur des échéances de prévision allant de 45mn à 3 h et de moins bons résultats que AROME pour des échéances de 3 à 6 h. L'apport d'une prévision d'ensemble des crues basée sur l'utilisation ensembliste de prévisions de pluie successives décalées dans le temps de AROME-PI et de PIAF est en cours d'étude.

5

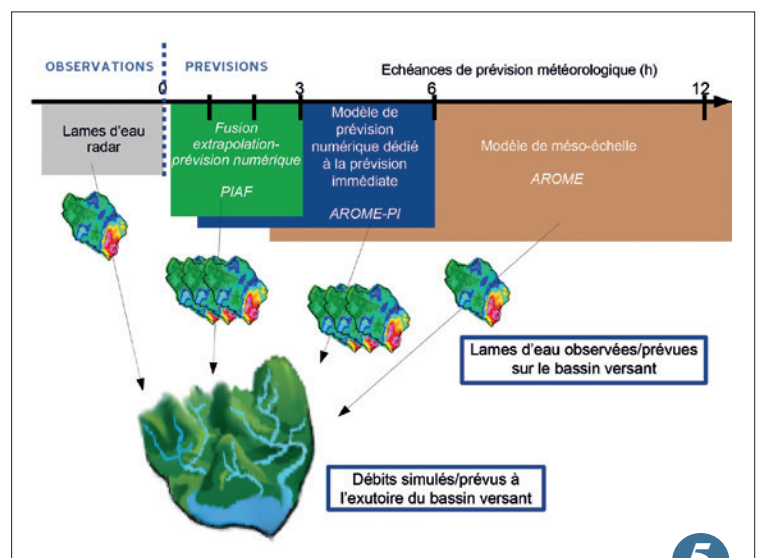


(a) Pluies cumulées en 6 h prévues par le modèle AROME (gauche) et objets de pluie totale (jaune), modérée (orange) et forte (rouge) détectés par le réseau de neurones (droite).  
 (b) Pluies cumulées en 6 h prévues par le modèle AROME (gauche) et objets de pluie continue (bleu) et discontinue (rouge) détectés par le réseau de neurones (droite).



Corrélation du contenu intégré en vapeur d'eau entre les prévisions AROME-WMED et les observations GNSS pour la ré-analyse en bleu et la version temps réel en noir en fonction de l'échéance.

Schéma du système de prévision intégrée des crues rapides.



## La prévision probabiliste des orages

Jusqu'à présent, la prévision du risque d'orage est surtout effectuée manuellement. Dans le cadre du projet 3P/Alpha, une méthode originale automatisant ce travail a été développée. Le principe est de fusionner la plupart des prévisions numériques disponibles, à toutes les échéances et sur tous les domaines requis, sous forme d'une prévision d'ensemble hétérogène (issue de modèles numériques variés). Des algorithmes de diagnostic extraient l'information physique pertinente spécifique à chaque type de modèle, et un logiciel d'apprentissage homogénéise cette information sous une forme simple à interpréter, y compris pour les non-spécialistes en météorologie. Cette approche combine précision et cohérence dans les prévisions ; elle permet de traiter de gros débits d'informations. Le résultat valorise les qualités complémentaires de modèles aussi divers qu'AROME, ARPEGE, l'IFS du CEPMMT, ou la prévision immédiate. Des évaluations objectives et subjectives ont été effectuées sur des épisodes passés : elles montrent que cet outil est compétitif avec les produits existants, et pourrait être déployé pour la prévision en temps réel. Il est adapté à la prévision quotidienne de routine ; cependant, en cas de situations dangereuses, l'expertise humaine restera nécessaire pour corriger les produits automatisés et structurer efficacement les informations d'alerte.

Cette approche sera progressivement étendue à d'autres paramètres, tels que les précipitations.

6

## Prévision d'ensemble AROME pour les cyclones tropicaux

Un prototype pour un système de Prévision d'Ensemble AROME Outre-Mer (PE-AROME-OM) a été développé au LACy, et testé sur des cas de cyclones tropicaux qui ont touchés l'île de la Réunion et les Antilles pendant les saisons cycloniques 2017 et 2018.

Ce système est une adaptation directe du système de PE-AROME qui tourne opérationnellement sur le domaine France. Les principales spécificités d'AROME-OM qui ont été prises en compte dans ce prototype sont l'initialisation et le couplage aux bords latéraux du domaine par le modèle haute résolution du CEPMMT et le couplage avec un modèle prognostique de couche de mélange océanique (CMO) initialisé par les analyses océaniques MERCATOR.

Pour ce premier prototype, 12 des 50 membres de la prévision d'ensemble du CEPMMT (EPS) sont sélectionnés grâce à une technique de clustering. Les conditions initiales et de couplages sur les bords latéraux fabriqués à partir de ces 12 membres de l'EPS apportent la structure des perturbations de grande échelle qui contrôlent en grande partie la dispersion

de l'ensemble. Les conditions initiales de la température de surface de la mer et du profil de température de la CMO sont également perturbées et le schéma de perturbation aléatoire des tendances produites par les paramétrisations physiques du modèle (schéma SPPT) est activé tout au long des simulations.

Les résultats de la PE-AROME pour le cyclone Fakir qui est passé au large de la Réunion fin avril 2018 montrent que le scénario produit par certains des 12 membres aurait pu alerter les prévisionnistes de la rapidité et de l'intensité du cyclone dont la vitesse de propagation et le creusement avaient été sous-estimés par les différents modèles déterministes et par l'EPS (figure).

Ce prototype a été adapté au domaine Antilles et il est utilisé pour rejouer les cas de cyclones de septembre 2017 dans le cadre du projet TIREX. Il sera également lancé en cas d'alerte cyclonique pendant la campagne ReNovRisk sur l'Océan Indien de janvier à avril 2019.

7

## Simulations haute résolution du cycle de remplacement du mur de l'œil du cyclone Fantala (2016)

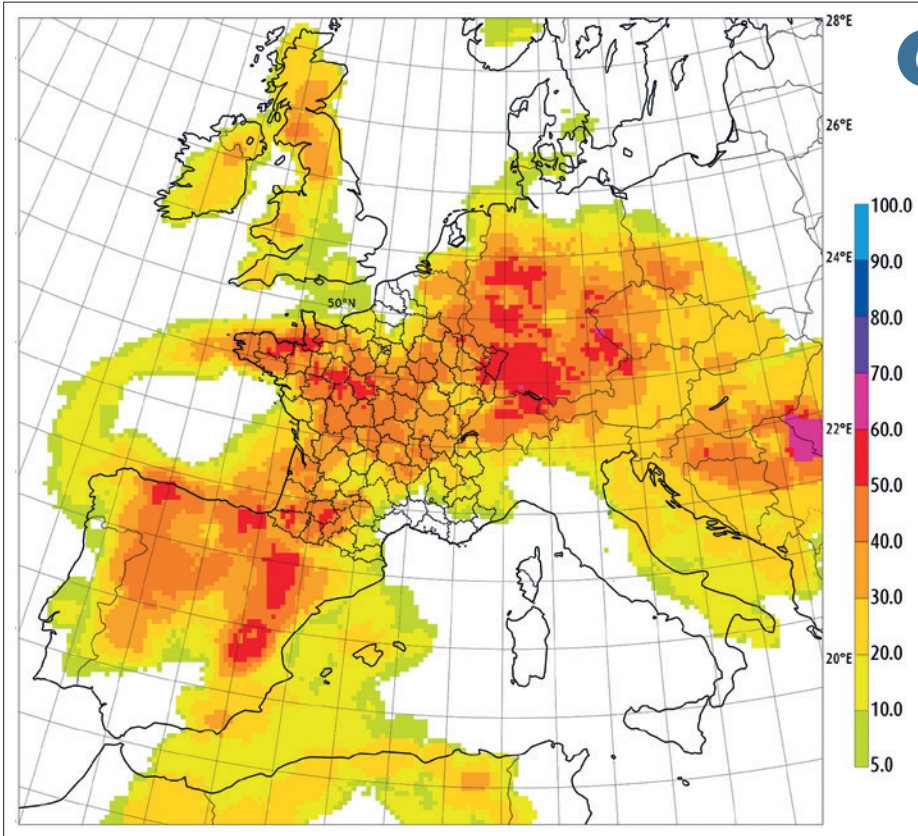
Le cyclone tropical Fantala est l'un des deux cyclones les plus intenses jamais observés dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien. Avec une durée de vie de près de 3 semaines et des vents de près de 360 km/h en rafales, ce cyclone exceptionnel a entièrement ravagé l'archipel des Farquhar (Seychelles) sur lequel il est passé 3 fois en moins d'une semaine.

Outre ces caractéristiques exceptionnelles, Fantala présente également plusieurs propriétés typiques des cyclones extrêmes telles que l'occurrence de plusieurs cycles de remplacement du mur de l'œil (CRMO). Ce phénomène, généralement visible à travers l'imagerie micro-onde, constitue l'un des principaux processus d'intensification des cyclones tropicaux, mais reste peu prévisible au moyen des modèles de prévision numérique du temps.

Afin de mieux comprendre les mécanismes responsables du déclenchement d'un CRMO, plusieurs simulations numériques à haute résolution spatiale (500 m) ont été réalisées avec le système couplé Méso-NH/CROCO sur une période englobant l'un des deux

CRMO subis par Fantala. Ces simulations témoignent de la capacité du modèle à reproduire ce phénomène de manière réaliste (décalage spatio-temporel de l'ordre de 50 km / 9 heures). L'évolution temporelle des principaux paramètres météorologiques au sein du cyclone (température, humidité et vitesse du vent au voisinage de l'œil) est ainsi très proche des tendances climatologiques observées par avions aéroportés dans les cyclones du bassin Atlantique Nord. L'analyse préliminaire de ces simulations montre également que les interactions océan-atmosphère ne semblent pas jouer de rôle prépondérant dans le déclenchement de ce phénomène. On note ainsi (voir figure) que le CRMO est présent à la fois dans les simulations couplées et non couplées – bien que l'on note un léger décalage temporel – même si l'évolution générale de l'intensité du système est bien plus réaliste lorsque le couplage océanique est activé.

8

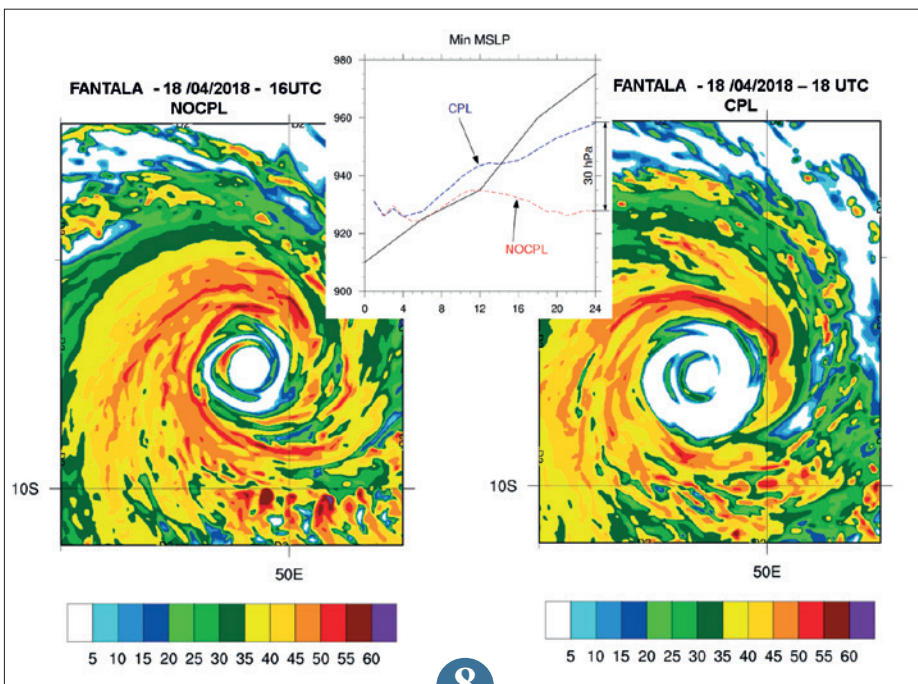


6

Carte de prévision automatique de probabilité d'orage fusionnant les ensembles AROME, ARPEGE et IFS, exprimée par un indice de risque entre 0 et 100 %.

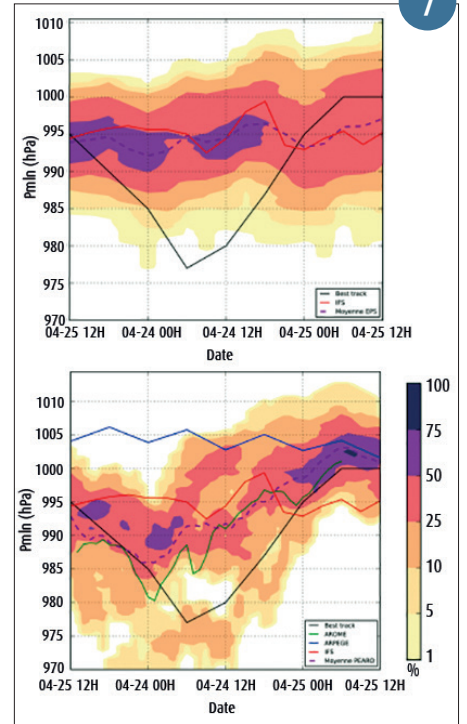
Panaches de probabilité de Pmin pour l'EPS (ECMWF) et la PE-AROME-OI. Cas du cyclone Fakir. (S. Kébir)

Coupe horizontale de réflectivité dans le cyclone Fantala simulé par Meso-NH le 16 avril 2016 en configuration non couplée à 16 UTC (NOCP, panneau de gauche) et couplée à 18 UTC (CPL, panneau de droite). L'encart montre l'évolution temporelle de l'intensité du système simulé dans les deux configurations sur la période simulée de 24 h (best-track en noir).



8

7



## Ouragans de 2017 aux Antilles : reconstitution, incertitudes et impacts

La saison cyclonique 2017 dans l'Atlantique a été exceptionnelle à plus d'un titre. Elle a vu l'atterrissage de deux ouragans de catégorie 5 sur les Antilles, un fait inédit depuis le début des relevés météorologiques. La persistance des vents soutenus extrêmes d'Irma et l'intensification explosive de Maria ont été particulièrement catastrophiques.

La DIRAG cherche à étudier ces phénomènes exceptionnels et en traduire les incertitudes afin de mieux en comprendre les impacts. Dans le cadre du projet FEDER C3AF, une synthèse des productions de Météo-France a permis une première évaluation dans l'optique de mieux anticiper les impacts potentiels d'une activité cyclonique future avec des ouragans majeurs plus fréquents. Le

projet ANR TIREX s'inscrit dans la continuité de missions réalisées fin 2017 aux Antilles par plusieurs acteurs du projet C3AF (UMR GRED, LC2S, Université des Antilles/LARGE). Dans ce cadre, la DIRAG, la DIROI, le LACy et le CNRM collaborent afin d'approfondir la reconstitution des cyclones avec des re-jeux d'AROME à plus haute résolution.

Par ailleurs l'incertitude associée sera évaluée avec la Prévision d'Ensemble et alimentera une réflexion sur l'amélioration de l'alerte cyclonique.

9

## Nouveaux produits d'aide à la prévision du temps sensible

Que ce soit le brouillard, la neige, la grêle ou encore les précipitations verglaçantes, ces phénomènes météorologiques présentent un risque pour la sécurité des biens et des personnes. Ils impactent notablement les activités de nos concitoyens en perturbant la circulation des trains, le trafic aérien et routier, ou en provoquant des dégâts sur les cultures par exemple.

Différents algorithmes ont été intégrés aux modèles de prévision numérique du temps, que ce soit ARPEGE pour la prévision globale ou AROME pour la prévision centrée sur la France ou sur les Outre-Mer, afin de fournir aux prévisionnistes des éléments complémentaires et synthétiques pour la prévision du temps sensible.

Désormais deux visibilité prévues sont produites en sortie des modèles : la première est une valeur de visibilité par temps de brume ou brouillard. La seconde est la baisse de visibilité induite par des précipitations de pluie, grêle ou neige. L'algorithme est inséré dans la physique des modèles afin de tenir compte au mieux des contenus en eau liquide, en glace, mais aussi en pluie et en neige.

Dans un second temps, une discrimination du type de précipitations prévue par les modèles a été implantée dans leur physique. Cet algorithme applique des seuils sur les paramètres de la microphysique et la thermodynamique afin de déterminer le type de précipitations le plus fréquent dans l'heure précédente, mais également le type le plus dangereux. Une partie de ces seuils sont communs avec le produit de fusion de données d'observations HYDRE, afin que les prévisionnistes puissent aisément faire le lien entre observations et prévisions. La figure montre la situation du 28 février 2018, autour de Toulouse.

La prochaine étape sera de produire ces nouveaux champs dans les prévisions ensemblistes d'ARPEGE et d'AROME et d'élaborer une synthèse pertinente de ces paramètres sous forme probabiliste.

10

Image satellitaire prévue d'Arome 2.5km : 5 septembre 2017 r0 + 24h

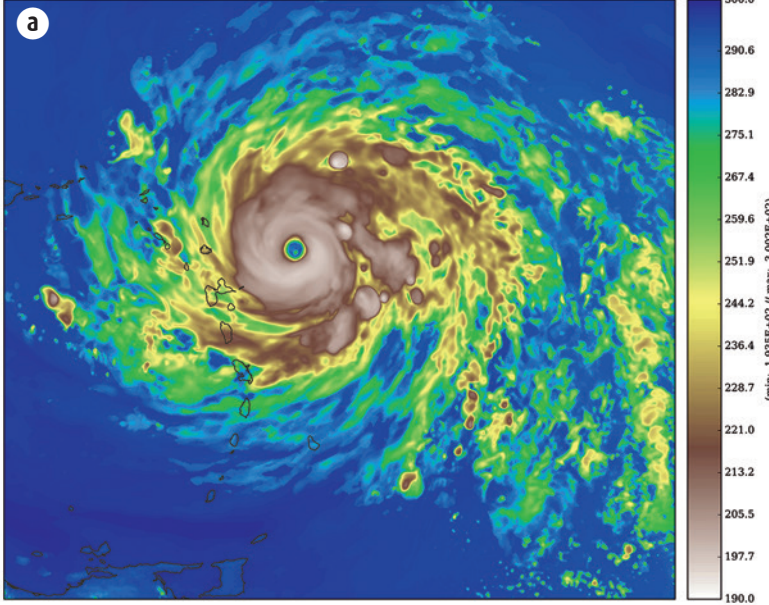
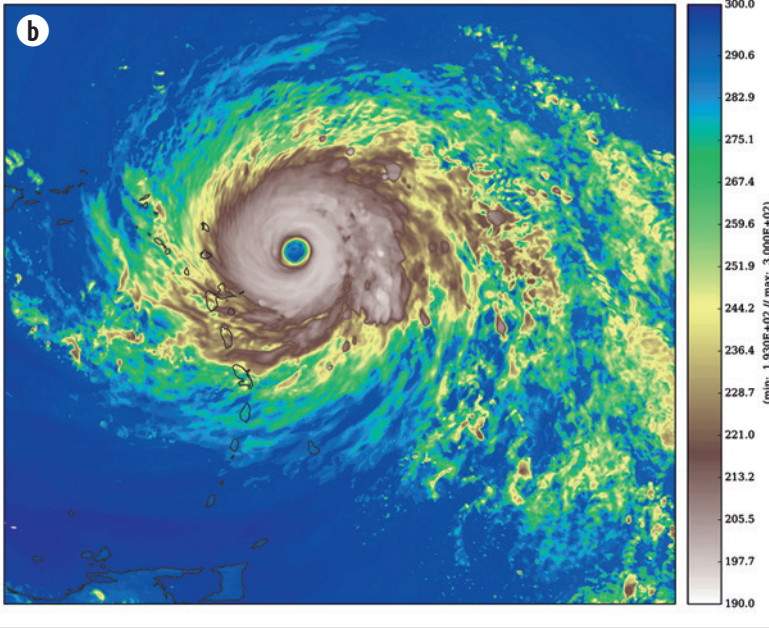
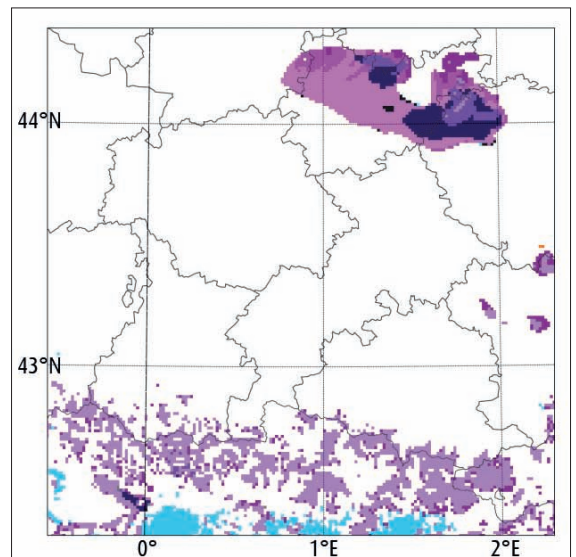


Image satellitaire prévue d'Arome 1.3km : 5 septembre 2017 r0 + 24h



Températures de brillance Infrarouge (K) simulées par 2 versions d'AROME-Antilles : 2,5 km (a, version opérationnelle) et 1.3 km (b, version recherche). Prévission +24 du 5 septembre à 0 h UTC.



- Averse de grêle
- Averse de neige sèche
- Averse de neige humide
- Averse de neige mouillée
- Averses de pluie/neige mêlées
- Averses de pluie
- Pluie verglaçante
- Bruine verglaçante
- Grêle
- Neige mouillée
- Neige humide
- Neige sèche
- Grésil
- Pluie et neige mêlées
- Pluie
- Bruine
- Pas de precipitation

Type de précipitations le plus fréquent sur l'heure précédente, le 28 février 2018 à 12 TU autour de Toulouse.

# Étude des processus

---

Les études de processus conduites en recherche ont pour finalité l'amélioration de la représentation de ces processus dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France et dans la conception de services météo-climatiques pertinents pour les différents secteurs économiques météo-dépendants. Les méthodologies mises en œuvre pour progresser dans la compréhension des processus reposent généralement sur l'exploitation d'observations de campagnes de mesures et de sites instrumentés et d'expériences numériques.

Les exemples ci-après illustrent entre-autres l'exploitation des observations de la campagne internationale NAWDEX et de simulations du modèle Meso-NH pour étudier les processus diabatiques dans les bandes transporteuses chaudes (« Warm Conveyor Belt » en anglais) des perturbations atlantiques, ainsi que des observations du site instrumenté Météopole Flux à Toulouse pour diagnostiquer les biais des systèmes de prévision ARPEGE et AROME de Météo-France sur le bilan en eau en surface. L'année 2018 a aussi été consacrée à la préparation de la campagne internationale SOGOG3D sur le brouillard qui aura lieu de l'automne 2019 à la fin de l'hiver 2020 dans le Sud-ouest de la France.

La simulation numérique à l'aide de modélisation détaillée ou idéalisée est un moyen d'investigation également essentiel aux études sur les processus et à leur représentation dans les modèles, comme l'illustre par exemple ci-après l'étude sur l'effet de la discrétisation numérique du modèle ARPEGE sur les ondes tropicales. La figure ci-contre illustre une approche originale qui combine calculs de référence du transfert radiatif basés sur des méthodes de Monte-Carlo appliqué à un champ de nuages simulée à très haute résolution par le modèle Meso-NH afin d'évaluer les effets tridimensionnels des nuages et la nécessité de les représenter dans les paramétrisations du rayonnement des modèles de prévision et de climat.

Une autre série d'articles ci-après illustre les avancées réalisées en matière de modélisation des processus atmosphériques et des interactions surfaces-atmosphère, avec des retombées en termes de capacités et performances des outils d'aide à la décision dans les domaines de l'adaptation des villes au changement climatique, de la transition énergétique ou encore de l'agriculture.

1

---

## Développement d'un outil de prévision de production photovoltaïque

La part croissante des énergies renouvelables sur le marché de l'électricité suscite un besoin d'anticiper leur production, afin d'optimiser les réseaux mais également pour limiter les pertes financières liées à de mauvaises prévisions sur le marché de l'énergie.

Dans ce contexte, nous avons développé un modèle permettant de convertir des grandeurs atmosphériques (rayonnement direct, diffus, température et vent) en production photovoltaïque (PV). Les flux radiatifs sont en effet prédits par les modèles de prévision de Météo-France, mais la production PV dépend d'autres

facteurs tels que le matériau constituant les panneaux solaires, leur inclinaison et leur orientation. Le modèle développé permet de prendre en compte tous ces éléments de manière détaillée. Contrairement aux modèles existants qui s'appuient sur les sorties de modèle disponibles (souvent un rayonnement intégré spectralement sans distinction entre les composantes directe et diffuse), notre modèle utilise des variables internes beaucoup plus riches. En effet, à Météo-France les flux radiatifs sont calculés dans 14 bandes spectrales, et cette discrétisation permet de mieux représenter l'interaction avec le panneau solaire, lui aussi

caractérisé par une réponse spectrale très marquée (les panneaux ne convertissent en électricité que le rayonnement de longueur d'onde inférieure à environ 1100 nm).

Le modèle a été validé à partir de mesures effectuées au Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique, puis a été couplé aux sorties d'AROME pour créer un atlas de production PV. La figure montre ainsi la production moyenne prédite pour Janvier et Juillet 2017, information utile pour la planification du développement de nouvelles fermes PV.

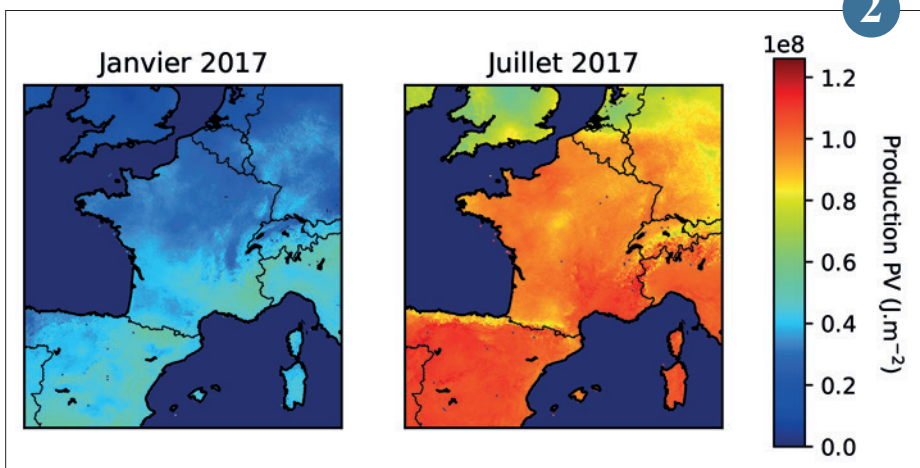
2





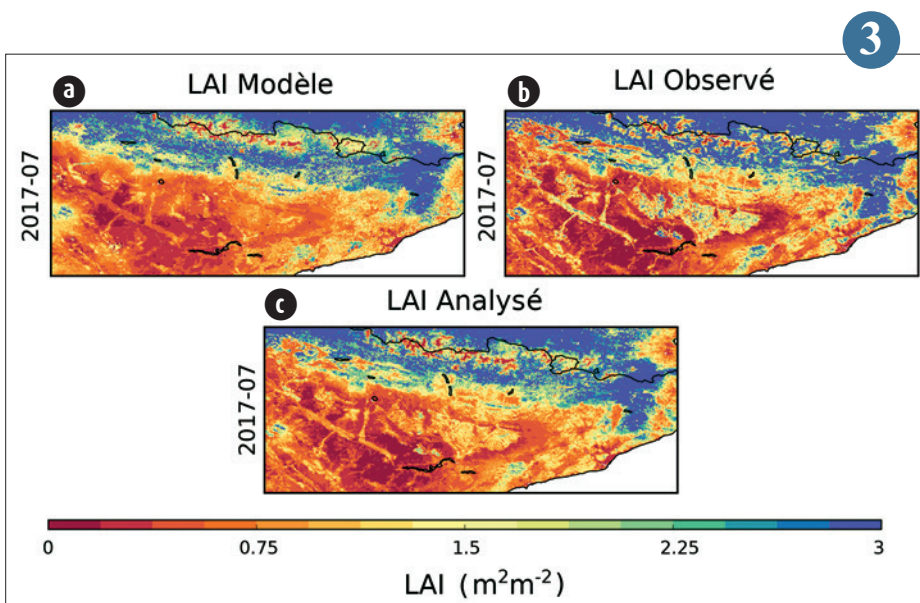
▲ Image de synthèse d'une scène nuageuse simulée par le modèle Meso-NH produite par un outil de simulation du transfert radiatif capable de traiter les complexités surfaciques et volumiques associées aux nuages et aux reliefs.

1



▲ Production photovoltaïque estimée à partir des analyses horaires d'AROME pour un panneau solaire monocristallin orienté vers le Sud et incliné de 37°, cumulée sur les mois de janvier et juillet 2017.

2



3

## Vers l'assimilation de données satellitaires à haute résolution spatiale sur les surfaces terrestres

La détection et le suivi des sécheresses fait intervenir de nombreuses variables du système sol- plante, comme le contenu en eau des sols et l'indice de surface foliaire (LAI) de la végétation.

Le modèle ISBA des surfaces terrestres, développé par le CNRM, est capable de reconstituer ces variables et peut fonctionner à diverses échelles spatiales, de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Une des limitations pour utiliser le modèle à haute résolution spatiale, par exemple sur une trame de 1 km ou de 300 m, est l'absence d'analyse des variables atmosphériques à ces échelles spatiales. Cette incertitude peut être réduite par l'intégration dynamique d'observations satellitaires du LAI dans le modèle ISBA par assimilation de données. Ces observations sont désormais disponibles à l'échelle mondiale en temps quasi réel, de manière répétée dans le temps, à 1 km ou à 300 m de résolution.

Le système d'assimilation de données pour les surfaces continentales développé au CNRM (LDAS-Monde) permet d'intégrer des observations satellitaires pour contraindre le modèle ISBA. Il a été mis en place de l'échelle mondiale (0.25° de résolution spatiale) à l'échelle de la région (1 km). La figure ci-contre représente l'impact de l'assimilation d'un produit d'indice de surface foliaire (LAI) sur le bassin de l'Ebre en Espagne pour le mois de juillet 2017. Les observations de LAI font ressortir les zones irriguées au centre de l'image tandis que ces zones ne sont pas visibles clairement dans le modèle. En effet, l'irrigation n'est pas représentée dans cette version du modèle.

L'assimilation permet d'inclure de l'information géographique dans le modèle, de réduire la cascade des incertitudes affectant les simulations, et de compenser l'absence de représentation de certains processus.

3

▲ Impact de l'assimilation de l'indice de surface foliaire (LAI) issu de données satellitaires sur le LAI simulé par le modèle des surfaces terrestres ISBA sur le nord-est de l'Espagne (bassin de l'Ebre). L'analyse représente le meilleur compromis entre le modèle et les observations.

## Évaluation de l'impact de l'étirement sur la propagation des ondes tropicales en aqua-planète

La résolution des modèles globaux de prévision du temps ne leur permet pas de résoudre la dynamique de la convection profonde. Il est donc nécessaire de paramétrer l'effet de ce phénomène non résolu.

La configuration aqua-planète est un cadre idéalisé qui permet d'étudier le comportement des paramétrisations et leurs impacts sur la circulation globale. Dans cette configuration, on peut étudier le déplacement des ondes atmosphériques tropicales qui se propagent librement en l'absence de continents. Dans le cas d'ARPEGE, qui est un modèle dont la résolution varie selon la position sur le globe, on peut étudier l'effet d'un changement de résolution le long de la bande tropicale sur le déplacement de ces ondes tropicales.

Pour mesurer cet impact, on considère deux simulations en aqua-planète, d'une part le modèle ARPEGE sans étirement (figure a), d'autre part le modèle ARPEGE étiré (figure b), de telle sorte que la variation de résolution le long de la bande équatoriale soit maximale. Pour étudier le déplacement des ondes tropicales, on s'intéresse à l'intensité des précipitations le long de la bande tropicale et plus particulièrement à leurs caractéristiques spectrales (nombre d'onde et pulsation). Sur les figures c et d est tracée en couleur, pour les deux configurations, l'énergie des ondes en fonction du nombre d'onde et de la pulsation. On superpose aussi en lignes noires les ondes solutions du modèle en eau peu profonde linéarisé.

Les résultats montrent que, pour les deux configurations, les ondes de Kelvin sont très présentes et qu'il y a un peu de signal d'ondes d'inertie gravité et d'ondes équatoriales de Rossby. On en conclut que la variation de résolution le long de la bande équatoriale n'impacte pas la propagation des ondes tropicales.

4

## Quantité de glace injectée dans la tropopause tropicale par la convection profonde

La vapeur d'eau stratosphérique a un fort impact sur le climat et sur l'ozone stratosphérique. Quantifier les quantités d'eau totale (vapeur d'eau et glace) injectées par la convection profonde dans la haute troposphère jusqu'à la basse stratosphère tropicale (~12-20 km d'altitude) est important pour estimer l'impact de la convection sur l'entrée de vapeur d'eau dans la stratosphère.

L'étude utilise des mesures de glace et de précipitation de 2004 à 2017 provenant de divers instruments satellitaires (sondeurs en visée au limbe MLS et SMILES et, nadir, TRMM) dans le but de quantifier les concentrations moyennes de glace injectées dans la haute troposphère et tropopause tropicale. Il est ainsi montré que les concentrations de glace dans ces couches augmentent proportionnellement avec les précipitations durant la phase de croissance convective (figure).

Les résultats permettent d'obtenir des informations sur le cycle diurne de la glace dans ces couches atmosphériques en fonction de différentes régions : Océan Pacifique, Amérique du Sud, Afrique du sud, Océan Indien, Continent Maritime (îles et mers au nord de l'Australie). Les résultats aideront à une meilleure compréhension des processus impactant l'entrée de vapeur d'eau dans la stratosphère tropicale sur ces régions convectives.

5

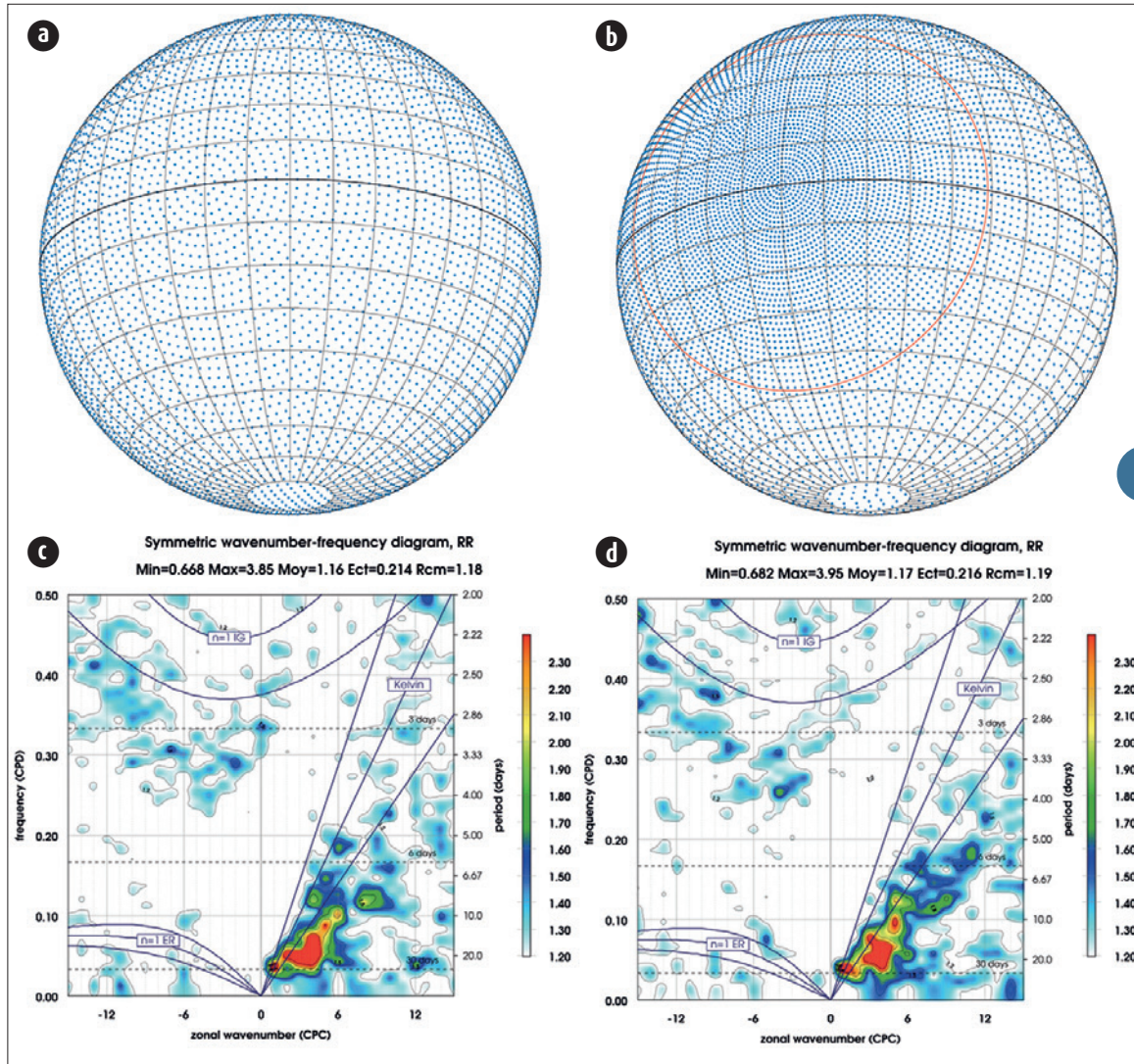
## Warm Conveyor Belts dans la campagne NAWDEX

Les Warm Conveyor Belts (WCB) sont des bandes transporteuses de masse d'air dynamiquement importantes dans les dépressions des latitudes tempérées. Elles correspondent à l'ascension de masses d'air chaudes et humides issues des basses couches de l'atmosphère en direction de la haute troposphère.

Les WCB constituent la partie nuageuse principale des dépressions et les dégagements de chaleur qui sont associés à la formation d'espèces nuageuses peuvent avoir un impact marqué sur la dynamique de ces dépressions. La représentation de ces processus mal-connus pourrait constituer une source importante d'incertitudes pour la prévision de ces dépressions.

La campagne de mesure aéroportée NAWDEX visait à améliorer leur connaissance. Elle s'est déroulée du 19 septembre au 16 octobre 2016 au large de l'Islande. L'instrumentation embarquée sur les avions Falcon et Gulf Stream V (LIDAR, RADAR, Drop-sonde) a permis de reconstituer les profils de vent et de réflectivité des espèces nuageuses dans les WCB. Ces observations sont comparées aux résultats de simulations obtenues avec le modèle Méso-NH. Différentes paramétrisations pour la représentation des espèces nuageuses sont alors évaluées et confrontées aux grandeurs observées par le radar aéroporté RASTA (voir figure). L'allure générale des systèmes nuageux est bien prévue par les deux modèles utilisés. Néanmoins, une étude systématique des différents processus, et de leur représentation, associés à des dégagements de chaleur lors des différents cas de WCB échantillonnés, devrait permettre de clarifier les sources d'incertitudes ainsi que d'ouvrir des voies d'amélioration de ces paramétrisations.

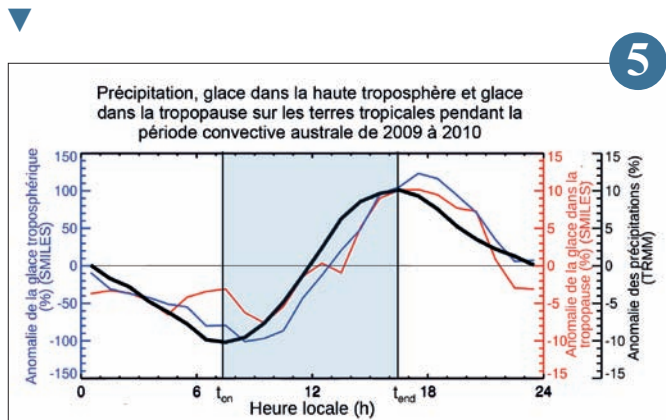
6



Grille ARPEGE sans étirement (figure a) et étirée (figure b). Moyenne sur 4 périodes de 120 jours de la transformée spectrale des précipitations totales, pour la configuration sans étirement (figure c) et la configuration étirée (figure d).

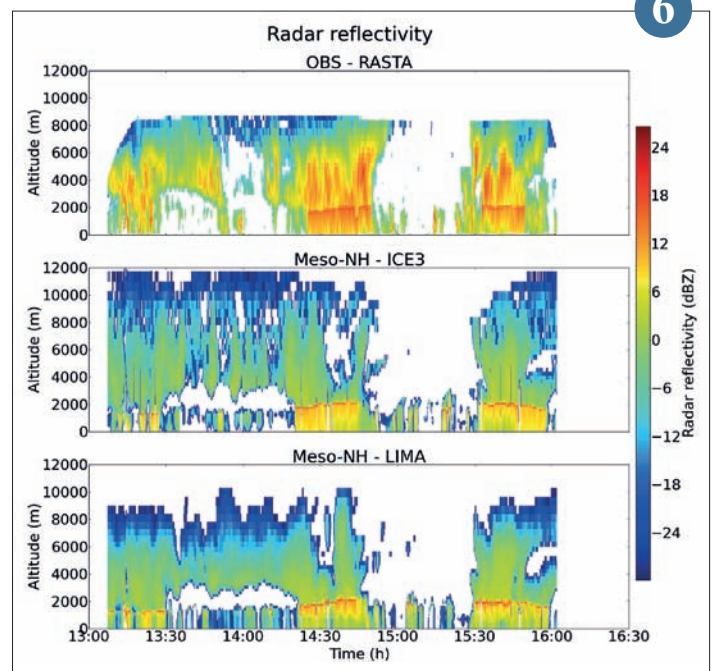
4

Cycles diurnes (Afrique du Sud, Amérique du Sud et Continent Maritime) de la glace mesurée par SMILES dans la troposphère (bleu) et la tropopause tropicale (rouge) et des précipitations mesurées par TRMM (noir) en décembre-février 2009-2010 (Dion et al., 2018).



5

Comparaison des réflectivités RADAR mesurées (en haut) dans un cas de Warm Conveyor Belt le 1<sup>er</sup> octobre 2016 et simulées par Més0-NH utilisant ICE3 (au centre) pour la paramétrisation nuageuse ou LIMA (en bas).



6

## Amélioration de l'analyse de précipitation MESCOAN en zone de montagne à l'échelle kilométrique

La spatialisation des données pluviométriques en terrain complexe constitue une étape fondamentale pour les applications hydrologique ou nivologique. Ce champ de précipitation est actuellement généré à partir de l'analyse de surface SAFRAN qu'il est prévu de remplacer par le système MESCOAN en cours de développement. MESCOAN permet de fusionner un champ 2D de précipitations cumulées sur 24h issu du modèle opérationnel AROME 1.3 km avec les données mesurées par des pluviomètres. Lors de chute de neige, la mesure des précipitations peut être sous-estimée de plus de 50 % lorsque le vent dépasse les 8 m/s. Afin de corriger cette sous-estimation, une méthode de correction de biais a donc été appliquée aux mesures pluviométriques. Cette méthode est basée sur l'estimation de l'équivalent en eau des mesures de hauteur de neige fraîche aux stations qui disposent d'un pluviomètre.

Pour valider cette méthode de façon indirecte, des simulations offline du modèle de surface SURFEX ont été réalisées durant l'hiver 2015-2016, les précipitations étant fournies par MESCOAN, et le reste des forçages provenant de SAFRAN. L'analyse de la hauteur totale du manteau neigeux observé et modélisé en région montagneuse montre que l'utilisation de la méthode de correction de biais des précipitations en entrée du système (courbe bleu sur la figure) permet d'en améliorer les performances. Ce travail sera utilisé par la suite pour la réalisation d'une ré-analyse de surface à haute résolution sur la France.

7

## Validation du bilan d'eau en surface dans les modèles opérationnels à partir des mesures du site instrumenté Météopole-Flux

Le dispositif expérimental Météopole-Flux situé à Toulouse, mesure en continu depuis 2012 le flux de vapeur d'eau, les précipitations, et le contenu en eau dans le sol jusqu'à 2,20 m. Ces mesures long-terme des processus de surface nous permettent de faire des comparaisons systématiques avec les modèles de prévisions opérationnels AROME et ARPEGE.

Une étude du bilan d'eau en surface à partir des observations nous a permis d'analyser pour la première fois le comportement des différents termes de ce bilan dans le modèle. La figure illustre cette comparaison sur deux périodes de l'année (printemps et été). Une surestimation significative du flux

d'évapotranspiration est mise en évidence dans le modèle, alors que les précipitations et le bilan d'eau dans le sol sont plus comparables. Le bilan de ces termes produit donc un résidu significatif dans le modèle qui devra faire l'objet d'études plus approfondies avec l'aide des observations. Ce travail ouvre de nouvelles perspectives pour l'amélioration de la représentation des échanges avec la surface dans AROME et ARPEGE.

8

## Amélioration du confort thermique simulé en ville par la prise en compte des strates végétales

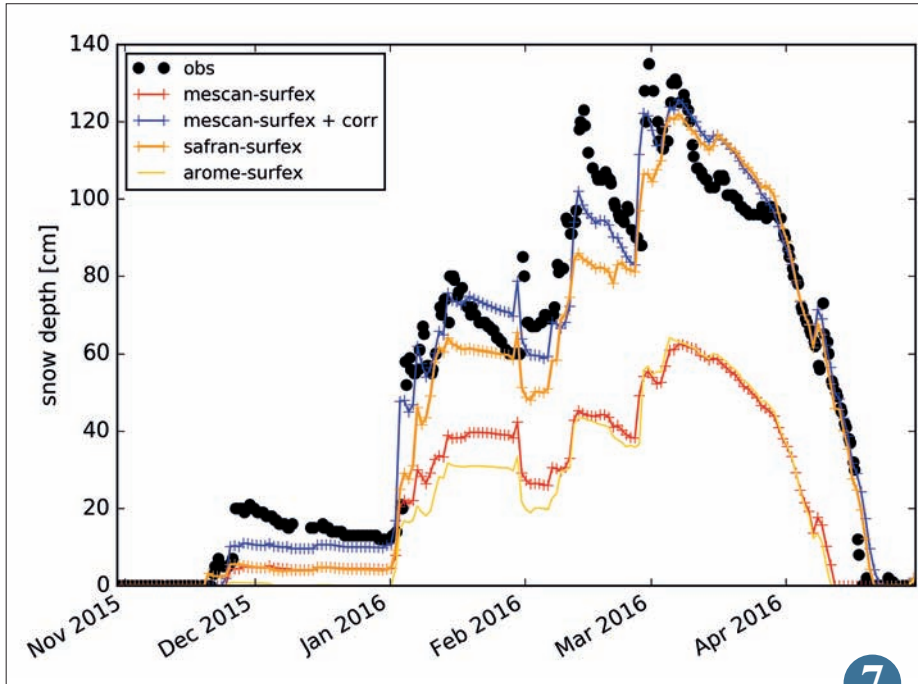
Améliorer la prise en compte de la végétation dans les modèles de canopée urbaine est essentiel pour une meilleure simulation du climat urbain.

Pour cela, le modèle de canopée urbaine TEB, qui simule les interactions entre villes et atmosphère, dispose d'une nouvelle paramétrisation qui permet de distinguer les strates arborées des surfaces naturelles au sol. Elle prend en compte les effets radiatifs, énergétiques, et aérauliques de la végétation arborée, en interaction avec les bâtiments, le sol et l'air dans la rue. Le niveau de sophistication de cette paramétrisation nécessitant de connaître la répartition des strates de végétation au sein des villes, une méthodologie aussi générique que possible a été établie pour construire une base de données détaillée, en combinant la BD-TOPO de l'IGN et des images satellitaires Pléiades. Ces développements ont été appliqués et évalués sur un quartier toulousain où des mesures ont été collectées. Grâce à la nouvelle paramétrisation, mais aussi à la

base de données plus réaliste (figure a), les variables microclimatiques sont mieux simulées. Mais la modélisation de la canopée arborée permet aussi d'améliorer le confort thermique simulé en ville, qui dépend de différentes variables environnementales (figure b). En phase diurne, l'amélioration provient principalement de la prise en compte du ralentissement de l'écoulement de l'air par les arbres. En phase nocturne, la prise en compte du rayonnement infra-rouge émis par les arbres dans le modèle limite la diminution de l'indice de confort thermique, conformément aux observations.

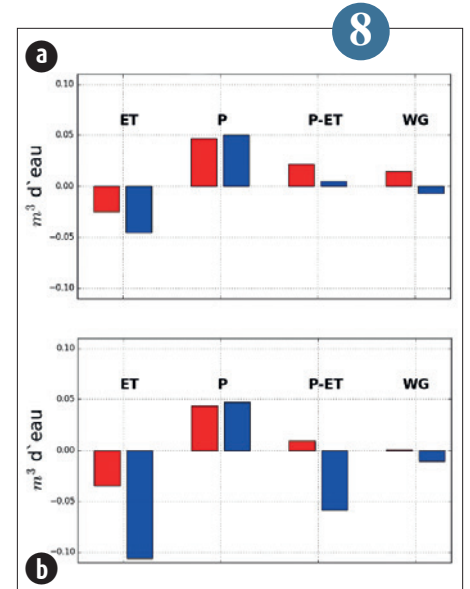
Ces nouveaux développements permettront d'évaluer de façon plus réaliste les performances de scénarios de végétalisation pour adapter les villes au changement climatique.

9



7

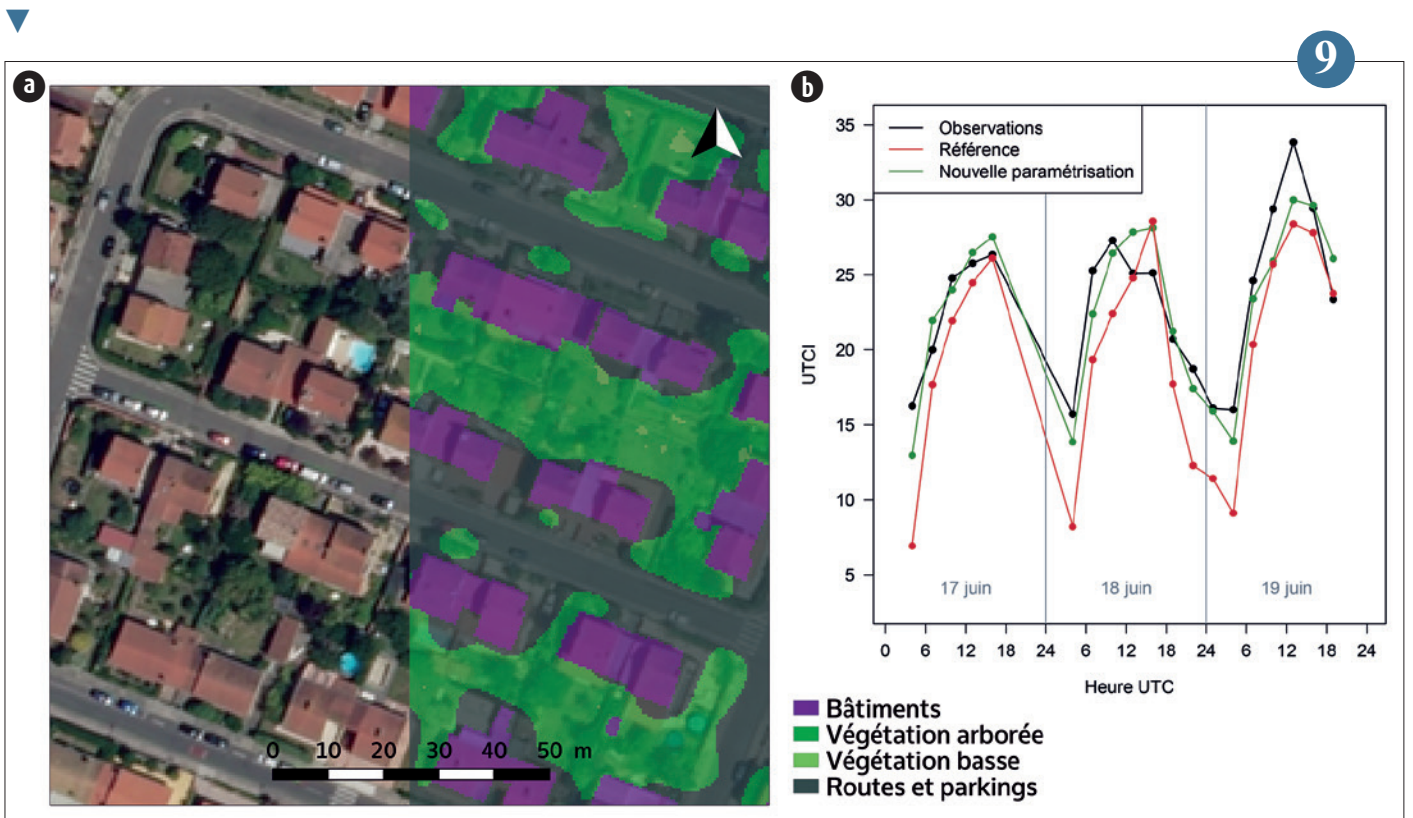
▲ Hauteurs de neige observées (noir) et modélisées à Bessans situé dans la vallée de Haute Maurienne à 1710 m d'altitude. Les courbes représentent les simulations forcées par différents jeux de données de précipitations :  
 - analyse SAFRAN (orange) ;  
 - analyse MESCAN sans la méthode de correction de biais (rouge) ;  
 - analyse MESCAN avec la méthode de correction de biais (bleu) ;  
 - ébauche de MESCAN issu d'AROME 1.3 km (jaune).



8

▲ Comparaison des différents termes du bilan d'eau : évapotranspiration (ET), précipitations (P) et variation du contenu en eau du sol (WG) pour les périodes du 22 mars au 4 avril 2017 (a), et du 17 juillet au 9 août 2017 (b). Les termes observés sont en rouge, ceux modélisés par le modèle AROME en bleu.

a) Ortho-photo d'une partie du quartier résidentiel simulé (gauche) et occupation du sol détaillée, établie à partir de la BD-TOPO de l'IGN et des images satellitaires Pléiades (droite).  
 b) Évolution du niveau de confort thermique (UTCI, Universal Thermal Comfort Index) mesuré et simulé pour un quartier résidentiel de Toulouse (Papus), avec et sans la nouvelle paramétrisation de végétation arborée. Mesures issues de la campagne EUREQUA printemps 2014.



9

## Influence de la morphologie urbaine et du climat régional sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain estival des villes françaises

L'îlot de chaleur urbain est défini comme la différence de température entre une ville et sa campagne avoisinante. Il peut atteindre une intensité de 5 à 10 K, surtout la nuit, et dégrader le confort thermique et la santé des habitants. L'Intensité de l'Îlot de Chaleur Urbain (IICU) est typiquement plus élevée pour les villes plus grandes, dans les zones urbaines plus minéralisées et lors de situations météorologiques avec peu de vent et peu de nébulosité. L'IICU dépend aussi de facteurs géographiques comme la distance au littoral et la présence de relief.

L'objectif de l'étude est d'analyser l'influence de facteurs de morphologie urbaine et du climat régional sur l'IICU nocturne estival pour un ensemble de villes françaises. La morphologie urbaine est caractérisée à partir des Zones Climatiques Locales (LCZ), typologies définies par Stewart et Oke (2012), le climat régional par les types de climat en France selon Joly *et al.* (2010). L'îlot

de chaleur de 42 agglomérations urbaines est simulé avec le modèle de climat urbain TEB couplé au modèle à moyenne échelle Méso-NH pour une situation météorologique estivale favorable à son développement. Les IICU simulées (voir figure) varient entre 7 K au centre de Paris et ~2 K au centre de villes de taille moyenne proches du littoral Atlantique et Méditerranéen. Les LCZ expliquent ~40 % de la variabilité de l'IICU. L'IICU dépend aussi du type de climat, et est plus faible dans le climat méditerranéen, océanique et de montagne, surtout suite aux brises de mer et de montagne. Il est plus fort dans la zone à climat semi-continental.

Par la suite, des analyses similaires seront faites pour d'autres situations météorologiques et l'interaction entre l'ICU et la consommation énergétique liée au chauffage sera quantifiée.

10

## Prévision en Afrique de l'Ouest aux échelles infra-saisonniers dans le cadre du projet CREWS-Burkina

Le programme CREWS lancé lors de la COP21 vise à renforcer les systèmes d'information et d'alerte précoce dans les pays les plus vulnérables. CREWS-Burkina Faso est un projet pilote pour la zone climatique du Sahel financé par la Banque Mondiale pour une durée de 3 ans (2018 à 2020), et coordonné par l'OMM, dans lequel Météo-France s'est vu confié le développement de la composante prévision saisonnière à infra-saisonniers.

Pour les échelles infra-saisonniers Météo-France exploite actuellement les prévisions d'ensemble à 45 jours du CEPMMT en utilisant essentiellement la pluie prévue, malgré de faibles scores de prévision. A partir de travaux de recherche amont dans le cadre des projets AMMA et MISVA, l'idée poursuivie dans le projet est double : améliorer les prévisions mensuelles des pluies en s'appuyant sur des variables mieux prévues que les pluies qui conditionnent leur occurrence comme l'eau « précipitable » ou le vent en moyenne troposphère, et renforcer le réseau d'observation sur cette région mal documentée pour évaluer les prévisions.

Lors de cette première année du projet, un atelier d'échange entre l'ANAM et Météo-France a débouché sur la mise en place de briefings hebdomadaires durant la saison

des pluies 2018 permettant une première évaluation des produits de prévisions existants et des jeux d'observations disponibles. En particulier un réseau de 150 stations automatiques sur le Burkina Faso a été mis en place par l'ANAM. L'estimation des pluies au sol (cf. fig.) confirment souvent les structures de grande échelle vues par satellite, comme les deux poches sèches au sud-ouest et nord-est du Burkina. Cette étape de validation des données pluviométriques est essentielle puisqu'elle servira de base à l'évaluation des prévisions et des produits développés dans le cadre du projet. Le développement de nouveaux diagnostics est en cours, avec l'objectif de les mettre à disposition sur le site internet dédié pour la saison 2019.

12

## Formation de brouillard par affaissement de stratus

Les brouillards ont un impact sociétal important en perturbant fortement les transports aériens, routiers ou maritimes. Bien que relativement fréquents, les brouillards formés par affaissement de stratus sont les plus difficiles à prévoir, et les moins explorés jusqu'à présent. Pour améliorer la prévision de ces phénomènes, il est essentiel de progresser sur la compréhension des processus mis en jeu.

Plusieurs épisodes d'affaissement de stratus se sont produits au cours des campagnes de mesure menées durant les automnes 2015 et 2016 à la station atmosphérique de l'Observatoire Pérenne de l'Environnement de l'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) à Houdelaincourt (Meuse). Sur les 20 épisodes recensés d'octobre à décembre 2016, 10 ont conduit à la formation de brouillard au sol.

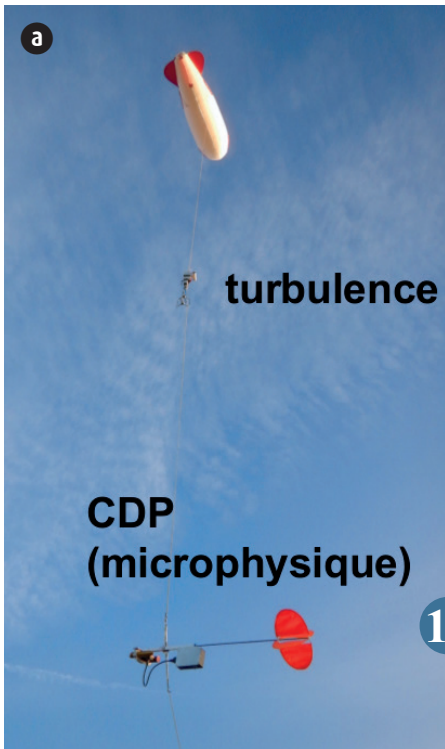
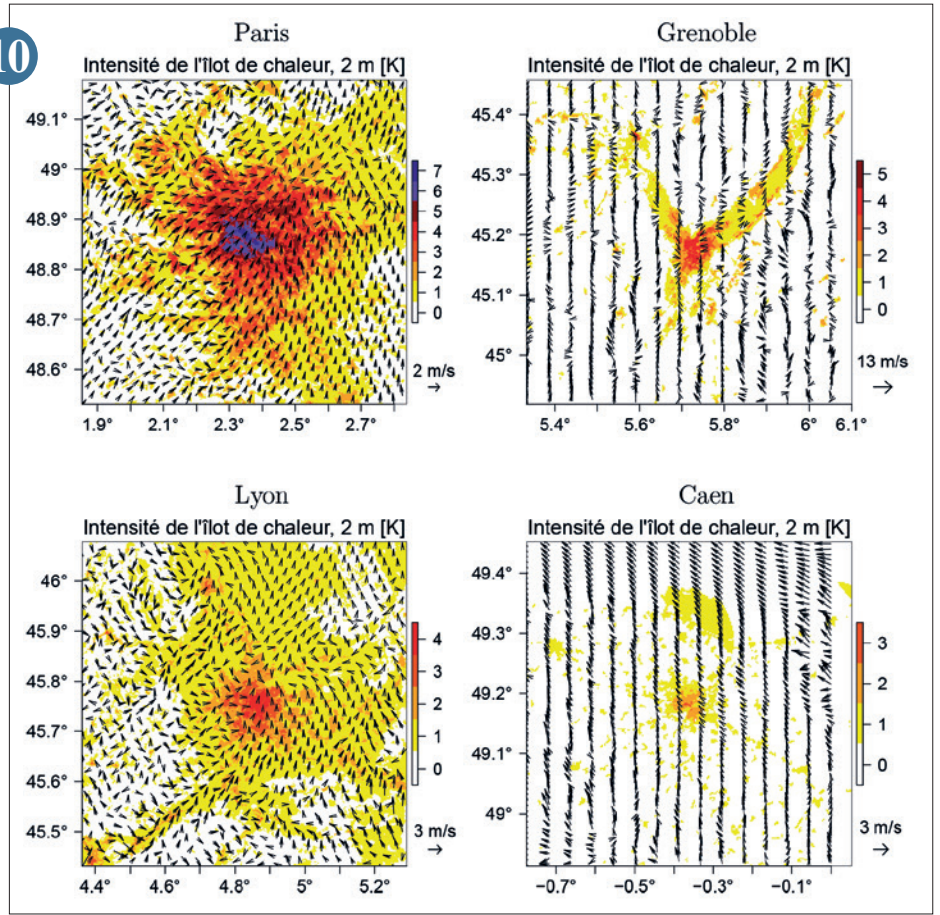
L'épisode de la nuit du 01 au 02/12/2016 a été échantillonné avec le ballon captif du CNRM (cf. figure a) équipé de la version spécialement adaptée d'une sonde microphysique CDP (Cloud Droplet Probe) qui permet de mesurer la distribution dimensionnelle des gouttelettes d'eau entre 2 et 50  $\mu\text{m}$  de diamètre. La figure b montre l'évolution de la hauteur de la base du stratus mesurée par un télémètre, ainsi que les valeurs du contenu en eau liquide obtenues par le CDP le long de la trajectoire du ballon. On observe que le stratus, situé à environ 300 m au-dessus du sol à 18h UTC, s'est affaissé au cours de la nuit en plusieurs étapes avant la formation de brouillard au sol de 6h à 10h avec une épaisseur pouvant atteindre 250 m. Ce phénomène s'est accompagné d'une évolution extrêmement complexe de la structure verticale de la couche limite atmosphérique : au stratus relativement épais ont ainsi succédé plusieurs couches nuageuses à différentes altitudes entrecoupées d'air clair.

Une simulation numérique à haute résolution réalisée avec le modèle Méso-NH est en cours d'analyse pour mieux comprendre les processus mis en jeu. L'étude préliminaire des bilans montre que les processus d'advection semblent cruciaux pour alimenter le stratus et pour favoriser l'ascension du sommet et l'affaissement de sa base.

11

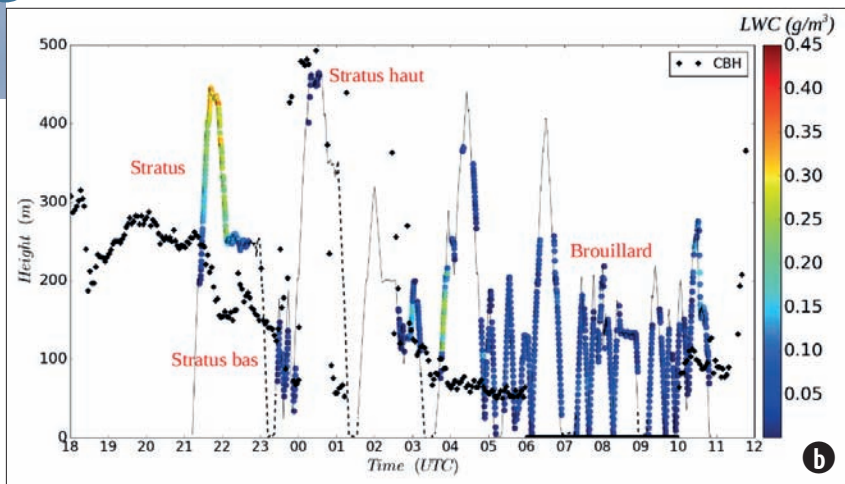
Intensité de l'îlot de chaleur urbain estival nocturne lors d'une situation météorologique favorable au développement d'un fort îlot de chaleur urbain pour une sélection de villes françaises.

10



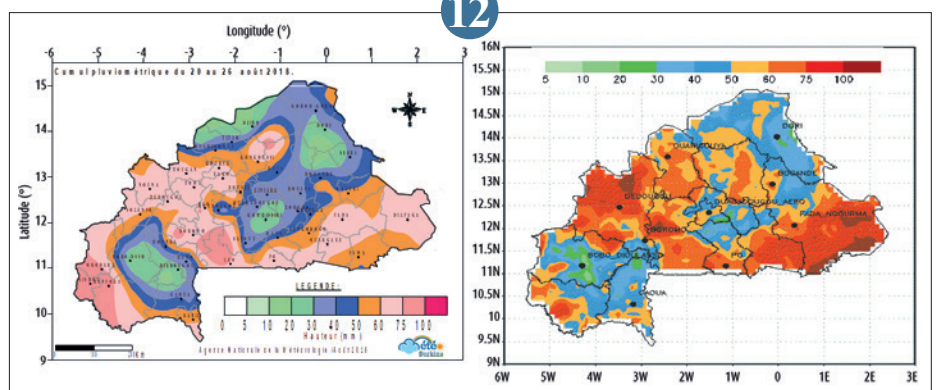
11

a) La charge utile sous le ballon captif : sonde turbulente pour la mesure du vent à haute fréquence et CDP pour la microphysique nuageuse.  
 b) Évolution temporelle de la hauteur de la base des nuages mesurée par un télémètre (losanges noirs) au cours de la nuit du 01 au 02 décembre 2016. Les valeurs moyennées sur une minute du contenu en eau liquide obtenues par le CDP (points en couleur) sont superposées sur la trajectoire du ballon (ligne grise ou tireté lorsque la batterie du CDP est vide).



Précipitations observées par le réseau de stations automatiques de surface de l'ANAM (gauche) comparées à l'estimation satellite ARC2 (droite), pour la semaine du 20 au 26 août 2018.

12



# Climat

Le projet international d'inter-comparaison CMIP6 vise à étudier les biais des modèles, la réponse du climat aux forçages, la variabilité, la prévisibilité et le changement climatiques. D'une ampleur sans précédent, il alimentera de nombreuses études scientifiques et le 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC (prévu en 2021).

Le CNRM a développé 3 modèles de résolution et complexité différentes en collaboration avec le CERFACS pour participer à 17 des 21 projets optionnels de CMIP6. Ces différents modèles couplés résultent du couplage des modèles ARPEGE-Climat V6 (atmosphère), Surfex V8 (surfaces continentales), CTRIP (fleuves), Nemo 3.6 (océan) et Gelato 6 (glace de mer) par le coupleur Oasis3-MCT. CNRM-CM6-1 et CNRM-CM6-1-HR ont respectivement une résolution d'environ 100 et 50 km. Le modèle de système Terre CNRM-ESM2-1 regroupe en plus toutes les composantes du système Terre maîtrisées au CNRM dont le cycle du carbone global, les aérosols troposphériques interactifs et la chimie stratosphérique (figure a). L'ensemble de simulations réalisées avec ces 3 modèles permettra de mieux comprendre le rôle de la résolution ou de la complexité dans les incertitudes des projections climatiques futures.

Parmi les premiers résultats qui se dégagent, on peut noter que CNRM-CM6-1 simule le climat et le réchauffement planétaire observés sur la période récente de manière plus réaliste encore que son prédécesseur utilisé pour CMIP5. La sensibilité à l'équilibre du nouveau modèle à une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est nettement plus forte, ce qui se traduit par un réchauffement mondial accru d'environ 1°C pour le scénario RCP8.5 par rapport à l'ancienne version. Plusieurs autres modèles internationaux ont un comportement similaire, ce qui reste à comprendre. Par ailleurs, le système Terre CNRM-ESM2-1 simule un réchauffement légèrement plus faible que CNRM-CM6-1 (figure b), notamment en raison de différences dans la représentation de la végétation.

Au-delà, la production massive de données pour CMIP6 permettra d'alimenter de nouvelles études de régionalisation sur la métropole et les outremer. Il faut souligner aussi que l'effort de modélisation mené pour CMIP6 sert également le thème de la prévision saisonnière et les services associés, dans la mesure où le nouveau système 7, qui sera opérationnel fin 2019 s'appuiera sur la version haute résolution de CNRM-CM6-1.

1

## Diagnostic, étude et modélisation du climat, de la saison au siècle

### Interactions climat / feux de biomasse dans l'Atlantique Sud-Est

La représentation des interactions aérosol-nuage-rayonnement reste l'une des grandes incertitudes pour l'étude du climat à l'échelle régionale et globale. Dans l'Atlantique Sud-Est, pendant la période de Mai à Octobre, les feux de biomasse intenses localisés en Afrique Centrale génèrent de fortes concentrations en particules atmosphériques. Ces panaches sont ensuite transportés sur la région de l'Atlantique Sud-Est caractérisée par la présence de nuages bas stratiformes. Localisés au-dessus de ces nuages, ces aérosols peuvent entraîner un forçage radiatif positif au sommet de l'atmosphère (réchauffement), de signe contraire à celui généralement exercé par

les aérosols (refroidissement), et qui reste très difficile à représenter dans les modèles de climat.

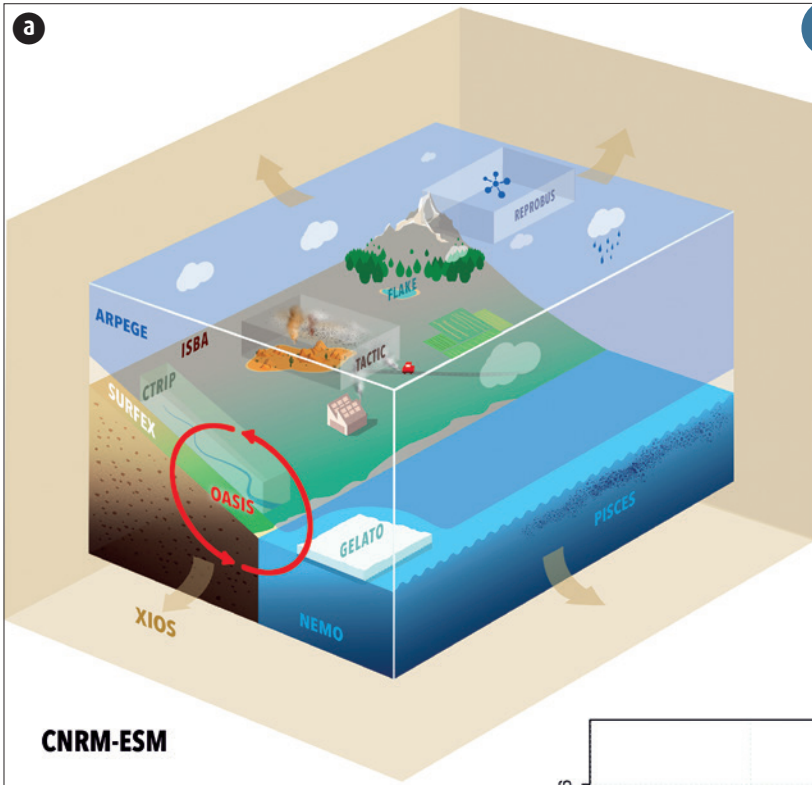
Cette question scientifique a été abordée à l'aide du modèle ALADIN-Climat en prenant en compte de manière rigoureuse les propriétés optiques des particules de feux de biomasse. Des simulations ont été réalisées pour les étés 2016 et 2017, qui correspondaient aux campagnes de mesures AEROCLO-sA (FR), ORACLES (US) et CLARIFY (UK) pour lesquelles des avions de recherche étaient déployés.

Ces simulations ont indiqué un transport des aérosols principalement entre 2 et 4 km d'altitude au-dessus de l'Atlantique, en

accord avec les observations aéroportées. Même si le modèle ALADIN-Climat sous-estime la fréquence des stratocumulus sur cette région, il permet de simuler un forçage radiatif positif au sommet de l'atmosphère, compris en +20 et +40 W.m<sup>-2</sup> à l'échelle régionale avec de forts contrastes entre le continent et la région océanique (figure). La prochaine étape de ce travail va consister à aborder l'impact des aérosols sur les propriétés (contenu en eau et albédo) des nuages bas.

2

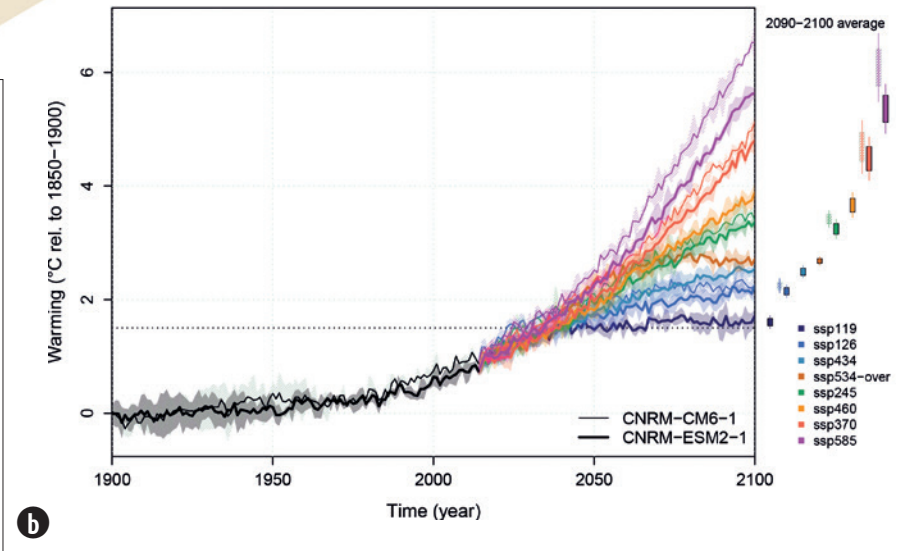




1

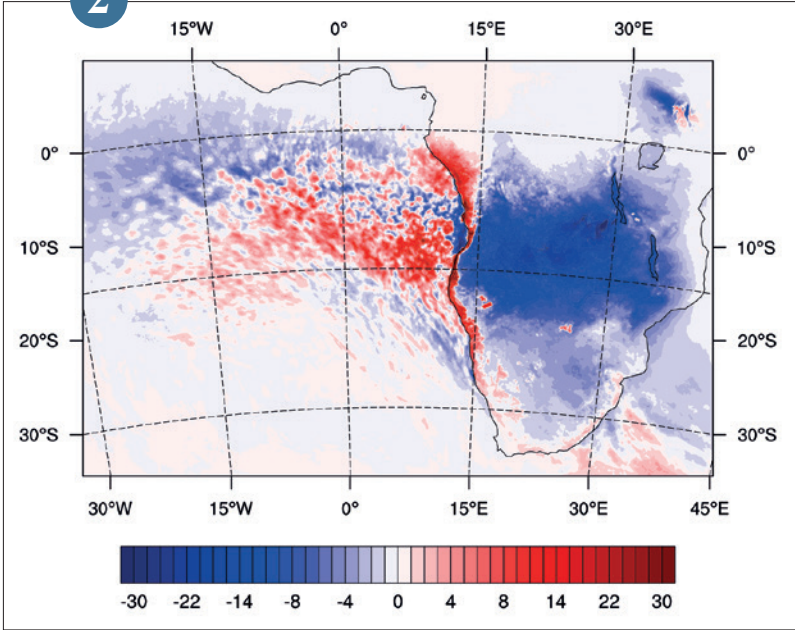
a) Le modèle de Système Terre, incluant ses composantes physiques.  
 b) Changement de température à 2 m par rapport à la période 1850-1900 (moyenne d'ensemble) simulé par CNRM-CM6-1 (trait fin) et CNRM-ESM2-1 (trait fort) pour la période historique 1900-2014 (courbe en noir), et divers scénarios futurs (courbes en couleur), du plus sobre en émissions de gaz à effet de serre (SSP119) au plus intense (SSP585).  
 Les régions ombrées représentent la dispersion des ensembles de simulations autour de la moyenne d'ensemble.

CNRM-ESM



b

2



Forçage radiatif direct (visible) exercé par les aérosols de feux de biomasse au sommet de l'atmosphère (en condition de ciels nuageux) pour la période de Septembre 2016.

## Adaptation à la France de la méthode de descente d'échelle ADAMONT

Il existe aujourd'hui un besoin fort de disposer de projections climatiques régionalisées à haute résolution spatiale et temporelle pour mettre en œuvre des modèles d'impact dans les domaines de la ressource en eau, de la biologie ou de l'énergie par exemple et préciser les diagnostics sectoriels et territorialisés.

La méthode ADAMONT, développée par Météo-France, est une méthode de descente d'échelle et d'ajustement de biais de scénarios climatiques régionaux utilisant une correction quantile-quantile par rapport à un jeu d'observations ou de ré-analyses et la prise en compte de types de temps. Elle permet d'obtenir des scénarios débiaisés continus au pas de temps horaire pour les variables de surface de température et humidité à 2 m, vitesse du vent à 10 m, rayonnement solaire (direct et diffus) et infrarouge, pluie et neige.

Développée par le CNRM, cette chaîne élaborée pour les massifs alpins et pyrénéens, a été adaptée à l'échelle de la France avec pour ré-analyse de référence SAFRAN-France. Elle a été appliquée à certains scénarios climatiques régionaux du projet EUROCORDEX (voir <http://euro-cordex.net/>). Elle a permis de produire des jeux de données couvrant l'ensemble du XX<sup>e</sup> siècle pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5.

Ces données descendues d'échelle ont notamment servi à alimenter des modèles hydrologiques dont SURFEX-ISBA-MODCOU pour des études d'impact sur les débits de la Meuse dans le cadre du projet CHIMERE21. D'autres applications à l'échelle de l'Europe et à l'échéance saisonnière sont en cours.

Un travail d'analyse et d'évaluation des performances de cette méthode est en cours. Les données débiaisées seront prochainement mises à disposition de la communauté scientifique sur le portail DRIAS.

3

## Nouvelles simulations hydrologiques sur le nord-est de la France dans le cadre du projet CHIMERE21

Le projet CHIMERE21, financé par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et associant Irstea, EDF, l'Université de Lorraine et Météo-France, a pour objectif de quantifier l'impact du changement climatique sur les étiages du bassin de la Meuse. Une attention toute particulière est portée à la quantification des incertitudes issues de différentes sources (scénarios climatiques, modèles de climat, descente d'échelle, modélisation hydrologique).

Les outils numériques pour mener ce travail sont alimentés par les résultats de modèles de la base EUROCORDEX, dans laquelle des projections issues de 5 associations de modèles globaux et régionaux ont été sélectionnées. Ces données ont été utilisées pour réaliser une descente d'échelle permettant de générer les paramètres météorologiques utilisés par les modèles hydrologiques.

Deux descentes d'échelle ont été mises en œuvre, dont une par Météo-France (méthode

ADAMONT, voir article précédent). Elles vont permettre de réaliser des simulations hydrologiques avec 3 modèles hydrologiques, dont le modèle SIM2 de Météo-France.

Afin de s'assurer de la qualité des résultats, des simulations hydrologiques de la période historique (1950-2005 ou 1970-2005) ont été réalisées et comparées aux débits analysés. Les premières simulations des débits de la Meuse en climat futur ont été menées avec SIM2 (voir figure) et vont être complétées dans les prochains mois.

Les partenaires du projet disposeront bientôt d'un ensemble de données et d'outils permettant de simuler les débits de la Meuse jusqu'à la fin du siècle. En croisant ces résultats et approches, ils vont pouvoir qualifier les incertitudes et ainsi mieux aider les gestionnaires dans leur processus de prise de décision face aux enjeux climatiques.

4

## Sensibilité des méthodes de spatialisation climatologique à la densité du réseau d'observation

Le réseau d'observations pluviométriques de Météo-France est en train d'évoluer considérablement. Les stations manuelles du Réseau Climatologique d'Etat, tenu par des bénévoles, comprenant environ 2300 postes pluviométriques, sont vouées à disparaître dans un futur relativement proche. Environ 700 d'entre elles seront remplacées par des stations automatiques. La densité spatiale des observations pluviométriques quotidiennes va donc baisser très nettement. Il importe donc d'évaluer l'impact de ces choix sur les productions climatologiques.

Les prochaines normales climatologiques, couvrant la période 1991-2020, vont être calculées en 2021. Les normales spatialisées de référence de Météo-France à résolution 1 km sont construites actuellement avec la méthode Aurelhy qui s'appuie sur les séries d'observations des stations les plus longues et les plus complètes. Le nombre de ces séries longues et continues va chuter nettement.

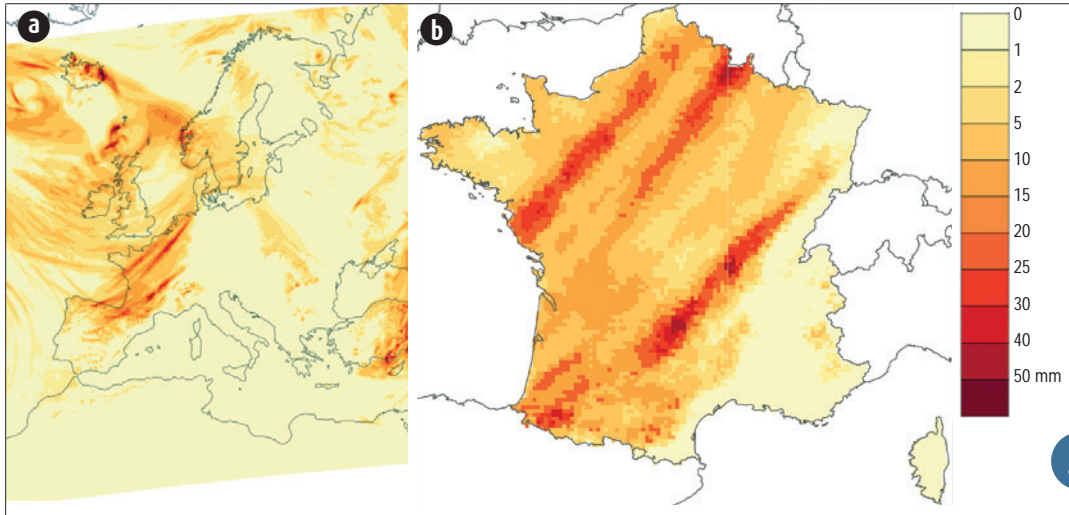
Une nouvelle production de champs spatialisés de précipitations quotidiennes à résolution kilométrique et sur des séries chronologiques longues (60 ans) a été mise en place par la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (projet Prescilia : PRÉcipitations Spatialisées Contraintes par une Initialisation Aurelhy). Cette spatialisation au pas de temps quotidien permet de réaliser, par agrégation, des

produits climatologiques à tous les pas de temps : mensuels, annuels décennaux, trentennaires.

Ce produit Prescilia pourra tirer parti de toutes les observations quotidiennes disponibles sur la période 1991-2020 et donc, potentiellement permettre de constituer une climatologie à partir d'une meilleure densité d'observations que n'aurait pu le permettre la méthode Aurelhy.

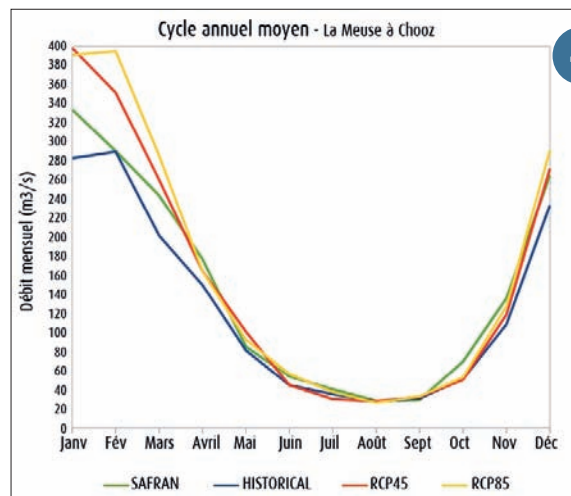
Une étude de sensibilité à la densité du réseau d'observation a été conduite afin de comparer les performances de Prescilia et d'Aurelhy au pas de temps climatologique dans un exercice artificiel de réduction du réseau d'observation. Une simulation de la disparition des stations manuelles bénévoles a été réalisée sur une période de 4 ans par tirage au sort. Les performances de Prescilia et d'Aurelhy ont été évaluées par rapport à un ensemble de 1400 stations de référence dans une série d'exercices de validation croisée par lots sur la période 2001-2010 dans les conditions du réseau complet actuel, d'un réseau simulé en réduction progressive et d'un réseau simulé futur réduit. Cette étude a montré les avantages de la méthode Prescilia pour constituer les prochaines normales 1991-2020.

5



a) Précipitations totales quotidiennes en mm simulées par le modèle CNRM-ALADIN5.3 utilisant à ses limites CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 pour la journée du 30 mars 2092, scénario RCP8.5.  
 b) Même champ de précipitations totales en mm, débiaisées et à la résolution 8 km x 8 km après application de la méthode ADAMONT sur la journée du 30 mars 2092. Même échelle de couleurs pour les 2 champs.

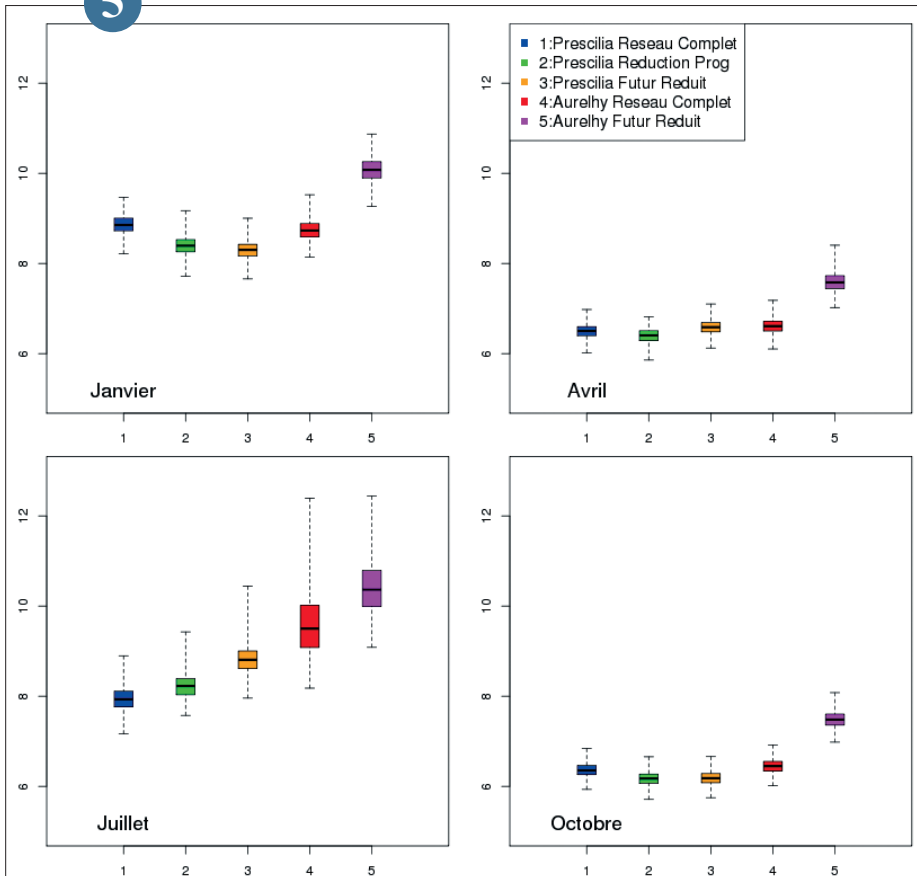
3



4

Cycle annuel moyen des débits mensuels de la Meuse à Chooz simulés avec la ré-analyse SAFRAN (période 1979-2008, en bleu) et les scénarii produits avec le couple CNRM-ALADIN53 / CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 pour la période historique (1950-2004, en vert) et la période future (2005-2100) sous l'hypothèse RCP4.5 (en rouge) et RCP 8.5 (en jaune).

5



Erreur relative absolue moyenne (en %) pour 1400 stations de validation en validation croisée par lots pour 5 expériences sur la période 2001-2010 (1 : Prescilia réseau complet ; 2 : Prescilia réseau réduction progressive ; 3 : Prescilia réseau futur réduit ; 4 : Aurelhy réseau complet ; 5 : Aurelhy réseau futur réduit). Aurelhy réseau futur réduit donne toujours les plus mauvaises performances.

## Reconstitution de longues séries d'enneigement dans les Pyrénées pour le diagnostic du changement climatique

Le projet Clim'Py contribue au développement de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique et notamment son géo-portail (<https://www.opcc-ctp.org/fr/geoportal>), en documentant les évolutions du climat passé et futur sur les Pyrénées, notamment en termes d'enneigement.

Plusieurs approches sont mises en œuvre et combinées pour caractériser les évolutions de l'enneigement : les séries in situ, la simulation physique du manteau neigeux ainsi que la télédétection (données des satellites MODIS et SENTINEL).

Météo-France contribue à ce projet en mobilisant les expériences complémentaires du CEN pour la modélisation du manteau neigeux, de la DCSC et de la DIRSO pour l'analyse des séries climatologiques et du changement climatique.

Un inventaire des séries de hauteur de neige disponibles sur la chaîne a permis d'identifier une soixantaine de séries de plus de 10 ans sur le versant français et espagnol, dont plus de 20 séries d'une durée supérieure à 30 ans pouvant être utilisées pour l'analyse des tendances climatiques.

Ces séries, généralement issues du réseau nivo-météorologique concernent la période du 1<sup>er</sup> décembre au 30 avril avec une présence des données parfois irrégulière

selon l'ouverture des stations de ski. Une action originale de contrôle et de reconstitution des données a été réalisée à partir d'une version du modèle de neige CROCUS intégrant un module d'assimilation des hauteurs de neige aux postes.

Une évaluation de la méthode sur 7 séries de test a permis de montrer la performance et de documenter les incertitudes. Une climatologie complète de l'enneigement sur le Massif a été produite, et des indicateurs climatologiques ont été calculées pour caractériser l'enneigement : hauteur moyenne mensuelle ou sur la saison, nombre de jours au-dessus de différents seuils.

Du fait d'une forte variabilité annuelle à décennale de l'enneigement sur la chaîne, l'analyse des tendances climatologiques a montré une grande dépendance des tendances aux dates de début et de fin des séries (voir figure). Le seul résultat robuste semble être la baisse de l'enneigement en fin de saison (mois d'avril), tandis que la profondeur temporelle maximum de 35 ans s'avère trop courte pour capter significativement le signal des effets du réchauffement climatique.

6

## Contribution aux actions de Data Rescue dans le cadre de Copernicus C3S

Le programme européen Copernicus Climate Change Service C3S soutient la coordination et l'harmonisation des activités et des pratiques de sauvetage des données anciennes climatologiques (Data Rescue) au niveau mondial. Dans le cadre du contrat C3S/311a, 14 partenaires, dont Météo-France, se sont associés pour développer un service ayant pour objectifs de faciliter les actions de sauvetage de données anciennes climatologiques in situ : le C3S Data Rescue Service (C3S DRS).

Le portail de ce Service fournira des informations sur les activités de sauvetage en cours et sur les données déjà récupérées (*metadata registry*), ainsi que des outils et un guide pour accompagner toutes les étapes du travail de sauvetage de données anciennes.

Météo-France contribue à l'alimentation du *metadata registry*, participe à la rédaction du guide sur les bonnes pratiques en matière de sauvetage des données et à l'enquête annuelle sur les activités de sauvetage.

Depuis cette année, les principales actions de valorisation des archives climatologiques des fonds de Météo-France et des Archives nationales (Phares et sémaphores 1879-1930, Polynésie française 1935-1980 et Océan Indien occidentale) peuvent être suivies sur le portail international pour le sauvetage des données (I-DARE). Chaque action est géographiquement répertoriée et son avancement régulièrement actualisé.

Pour en savoir plus sur le C3S Data Rescue Service :

<https://insitu.copernicus.eu/news/the-c3s-data-rescue-service>

et <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/gdj3.56>

8

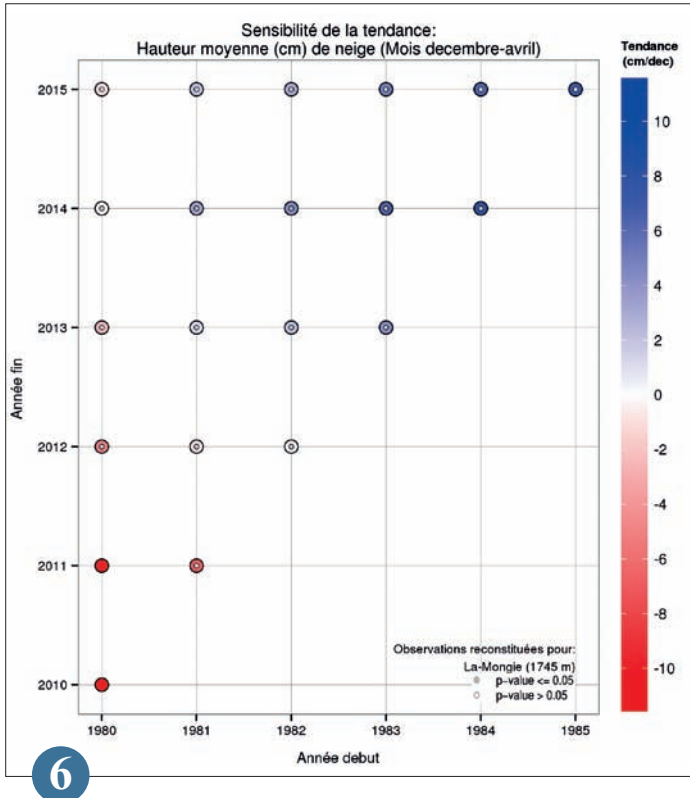
## Impact des aquifères sur la sensibilité climatique dans CNRM-CM6

Les eaux souterraines constituent environ 30 % des réserves d'eau douce utilisable par l'Homme. Elles sont par ailleurs susceptibles d'influer sur l'état de l'atmosphère au travers des échanges d'eau avec les réservoirs de surface. C'est pourquoi le modèle de climat de Météo-France, CNRM-CM6, s'est récemment doté d'un schéma d'aquifères, devenant le premier modèle de climat global à inclure une représentation 3D des eaux souterraines.

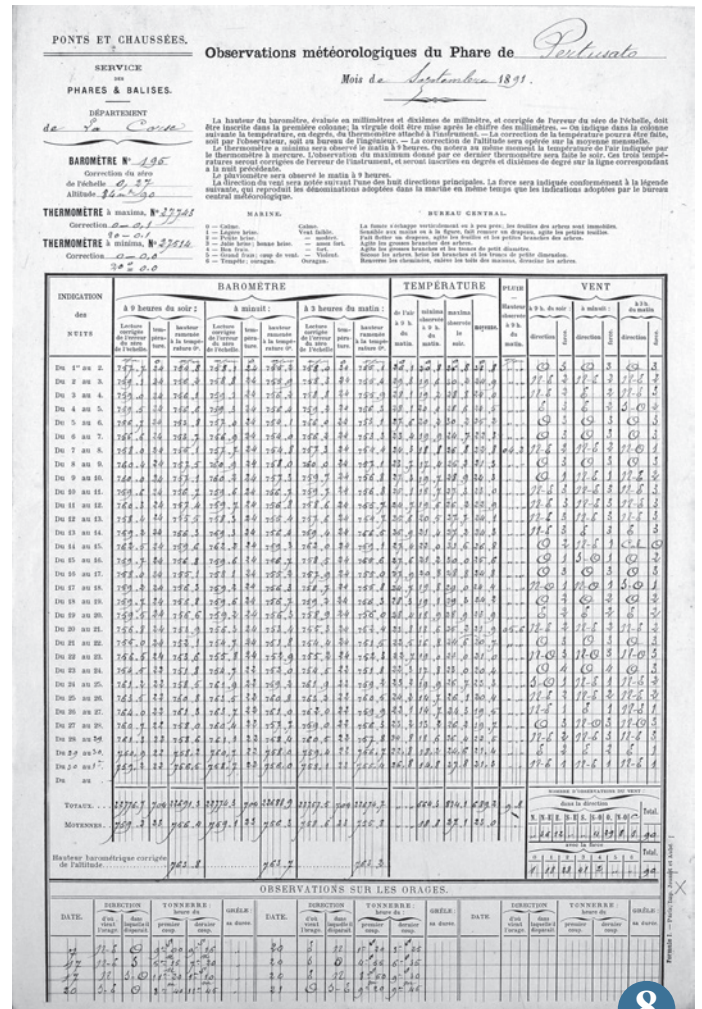
L'ajout de ce schéma n'a pas montré d'effet significatif en climat présent, mais il n'en va pas de même dans un climat plus chaud, comparable à ce qu'il pourrait advenir à l'horizon 2100. Nous nous sommes intéressés à l'impact de la présence d'aquifères sur la « *sensibilité climatique* », c'est-à-dire sur la réponse du modèle à un quadruplement brutal de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique par rapport au niveau préindustriel. Nous avons montré que localement (en Ukraine et Europe de l'Est), les aquifères pouvaient atténuer de 1° à 2° C l'augmentation des températures maximales journalières, ce qui correspond à 20 % du signal de changement climatique sur cette région. Ce résultat s'explique par un accroissement du stock d'eau souterraine dû à des précipitations plus importantes en hiver et au printemps. En été, la nappe phréatique se trouve ainsi plus proche de la surface qu'en climat préindustriel et peut ainsi refroidir l'air par évapotranspiration, alors que sans aquifère, le surplus d'eau dans le sol s'est entièrement évaporé à la fin du printemps.

La mise en évidence de cette rétroaction plaide pour la nécessité de représenter les aquifères dans les modèles globaux de climat, ce qui permettra également d'affiner la compréhension des évolutions de hauteurs de nappe en climat futur.

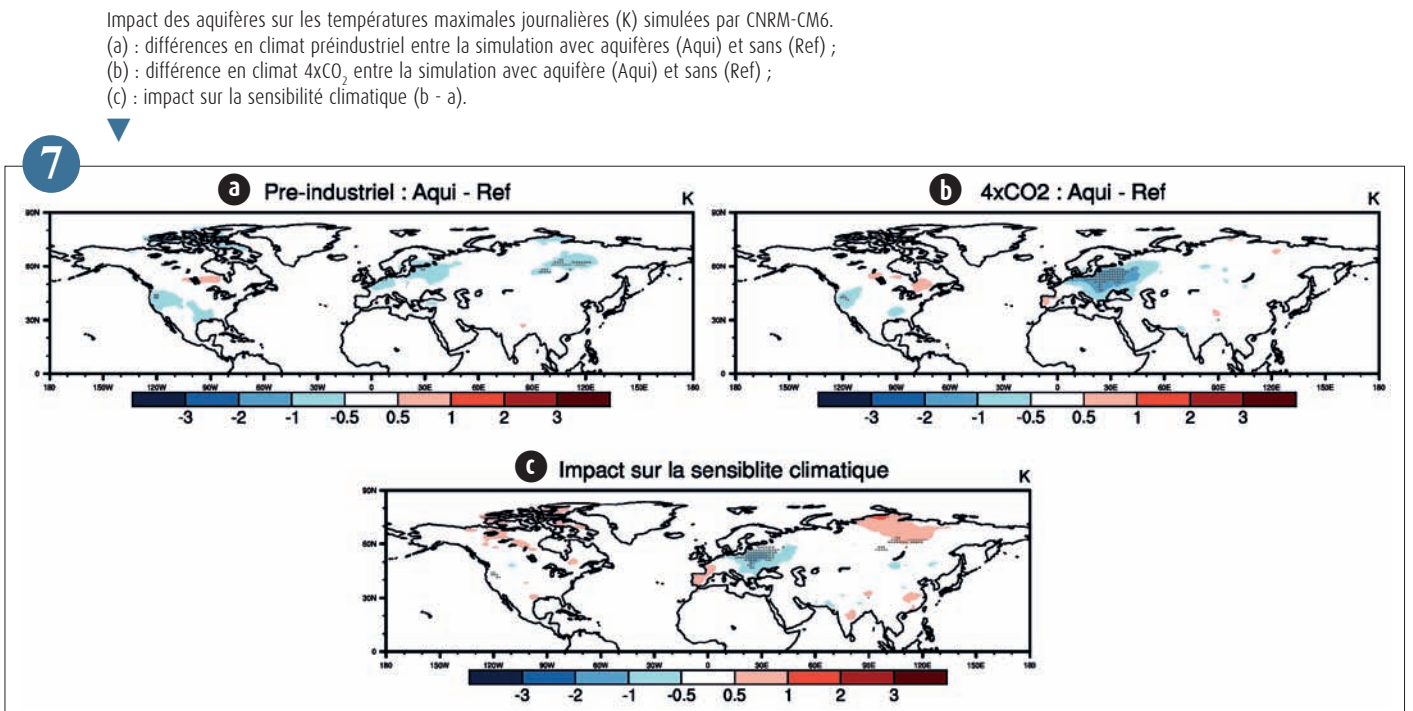
7



Sensibilité de la tendance de la hauteur de neige moyenne de décembre à avril selon la date de début ou fin prise en compte pour la série de La Mongie (1745 m) dans les Pyrénées. Les tendances positives sont en bleu et négatives en rouge. En rond plein, les tendances significatives selon le test de Mann Kendall (p value de 0,05).



Observations météorologiques du phare de Pertusato (Corse), septembre 1891.



Impact des aquifères sur les températures maximales journalières (K) simulées par CNRM-CM6. (a) : différences en climat préindustriel entre la simulation avec aquifères (Aqui) et sans (Ref) ; (b) : différence en climat 4xCO<sub>2</sub> entre la simulation avec aquifère (Aqui) et sans (Ref) ; (c) : impact sur la sensibilité climatique (b - a).

## Rôle de l'humidité du sol dans une prévision saisonnière d'été

La variabilité du climat estival de plusieurs régions des moyennes latitudes est influencée par le contenu en eau du sol superficiel. Dans ces régions, incluant l'Europe du sud, les anomalies d'humidité du sol ont un fort impact sur les échanges d'énergie et d'eau entre la surface continentale et l'atmosphère, et donc sur les températures et les précipitations. Cependant, la prise en compte de ces anomalies d'humidité du sol dans les conditions initiales des prévisions saisonnières ne se traduit que par une amélioration modeste et localisée des prévisions, pour la saison d'été.

Afin de mieux évaluer le rôle potentiel de l'humidité des sols en termes de prévisibilité saisonnière, des expériences idéalisées ont été réalisées à partir de deux modèles de climat régionaux, ALADIN et RACMO sur le domaine Euro-CORDEX à 0.22° de résolution. Elles consistent, pour chacun de ces modèles, en des simulations d'ensemble initialisées des saisons d'été de la période 1993-2012, au cours desquelles on impose quotidiennement une eau du sol issue de pseudo-observations. Ces expériences ('SOIL') sont comparées à des simulations de contrôle ('CTRL') dans lesquelles l'humidité du sol évolue librement. La figure met en évidence l'augmentation significative des corrélations entre précipitations estivales observées et simulées lorsque l'humidité du sol est prescrite.

Cette amélioration, qui se manifeste aussi pour les températures et le rayonnement solaire incident, concerne également des régions d'Europe très septentrionales. La concordance des résultats entre les deux modèles suggère que l'humidité du sol peut contribuer à améliorer les prévisions estivales au-delà des régions méridionales préalablement identifiées.

9

## Production et diffusion « sans couture » des projections climatiques CMIP6

La contribution du CNRM à la 6<sup>e</sup> édition du programme CMIP est essentielle, tant pour la réalisation de sa mission statutaire d'étude du climat que pour sa visibilité internationale. Au plan pratique, elle revêt une complexité et une ampleur inégalées : réaliser plus de 200 simulations, telles que spécifiées par 17 volets du programmes, et totalisant plus de 24 000 années simulées, le tout avec 3 configurations majeures de ses modèles de climat : deux configurations en mode couplé océan-atmosphère (dont une forte résolution spatiale : 50 km pour l'atmosphère), et une en mode "système-terre" (représentant en sus le cycle du carbone, la chimie atmosphérique et les aérosols) ; s'y ajoutent aussi des configurations en mode "sans océan", "océan seul" et "continents seuls". La complexité est liée à trois facteurs :

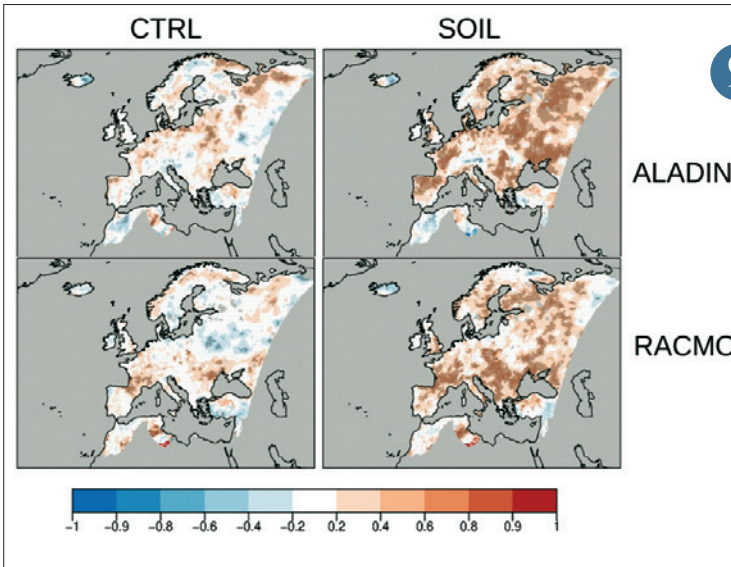
- la spécification du détail des variables qui doivent être simulées, qui varie pour chaque année de chaque simulation, par une base de données complexe, la "Data Request" de CMIP6 ;
- les quantités, finesse et variété des métadonnées descriptives, que le programme impose d'associer aux données ;
- le caractère spécifique du système de diffusion de données ('nœud' ESGF) prescrit par le programme CMIP6.

Le CNRM a très tôt adressé ces défis en :

- investissant dans un nœud ESGF dimensionné à un volume de 2 Peta-octets, et dans l'expertise pour l'exploiter ;
- développant une chaîne de production de simulations basée sur 3 composantes majeures : l'environnement ECLIS de réalisation des simulations, la bibliothèque Xios de l'IPSL, et un module "dr2xml" de traduction de la "Data Request" en configuration de Xios. Cette chaîne permet une production sans couture de résultats à la norme CMIP6.

Ceci a permis au CNRM d'être parmi les tous premiers centres à diffuser massivement ses résultats, en temps utile pour le prochain rapport du GIEC, et d'accroître ainsi sa capacité à valoriser sa position mondiale en simulation climatique.

10



9

ALADIN

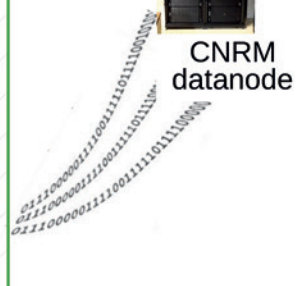
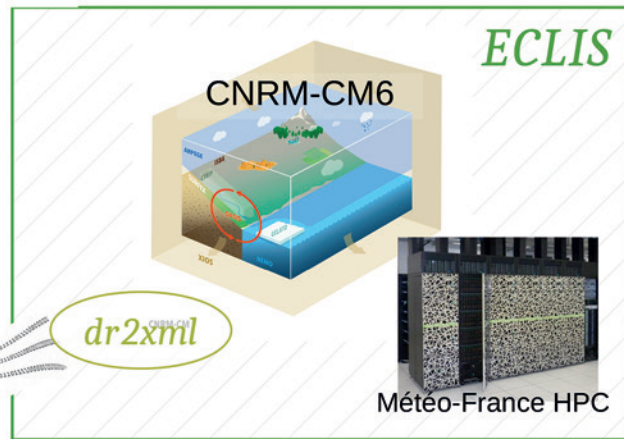
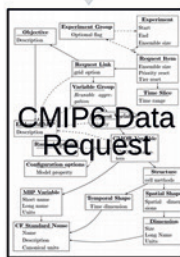
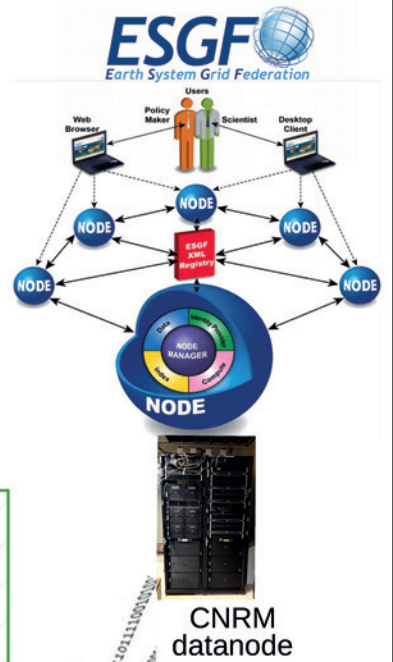
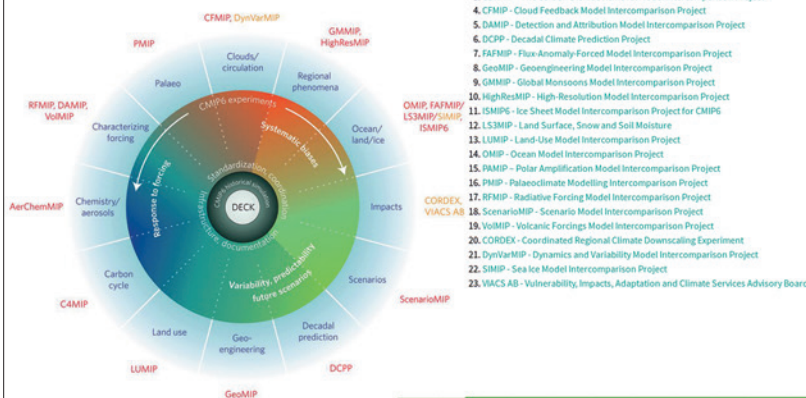
RACMO

Corrélation des précipitations de la saison Juin-Juillet-Août entre la moyenne d'ensemble des simulations et les observations EOBS, sur la période 1993-2012.

# WCRP CMIP6

World Climate Research Programme

10



Les 23 sous-programmes de CMIP6 (acronymes en rouge, noms en vert) ont alimenté une base de données complexe (Data Request) qui spécifie les résultats à produire. L'environnement Eclis orchestre à la fois son interprétation par l'outil dr2xml en directives pour la composante Xios des modèles de climat, et la production des résultats sur le centre de calcul de Météo-France. Cette chaîne alimente directement (sans autre post-traitement) un nœud de données, propre au CNRM, du système mondial ESGF de diffusion de données relatives au climat, et ce pour plus de 200 simulations et 24 000 années de climat simulé.

## Impacts et adaptation

### Comment définir un événement extrême singulier ?

Dans le but de mieux appréhender un événement extrême observé, il est courant d'en pratiquer une analyse rétrospective, visant à décrire cet événement particulier (e.g. ses échelles caractéristiques : durée, étendue) et à le qualifier (e.g. évaluer sa probabilité d'occurrence). Dans un contexte de climat changeant, cette analyse rétrospective peut même s'enrichir de diagnostics d'attribution, décrivant l'éventuelle contribution humaine à l'événement étudié.

La définition de l'événement extrême est primordiale dans ce type d'analyse. A titre d'exemple, la canicule de l'été 2003 a parfois été décrite comme un événement d'une dizaine de jours, au début du mois d'août, sur une ville ou une région d'intérêt, et parfois comme un événement couvrant l'ensemble de l'été (juin-juillet-août) sur toute l'Europe de l'ouest.

Afin de définir objectivement un événement extrême singulier, nous proposons de rechercher systématiquement en quoi cet événement est-il particulièrement extrême.

On évalue donc sa probabilité d'occurrence (en prenant en compte autant que possible le changement climatique), pour une vaste gamme de périodes de temps et de domaines spatiaux (figure). La plus petite valeur trouvée nous indique la période de temps et le domaine spatial sur lesquels cet événement a été le plus remarquable. Appliquée à la canicule de l'été 2003, cette méthode identifie un événement d'une durée de 8 jours au début du mois d'août, couvrant un petit domaine (~500 km) autour de Paris. Les résultats suggèrent également que cette méthode évite de biaiser les résultats d'attribution, qui sont souvent très sensibles à l'échelle spatio-temporelle retenue.

Cette approche offre l'avantage de pouvoir être généralisée à n'importe quelle variable et/ou type d'événement, incluant par exemple les précipitations, le vent, etc. Elle présente de ce point de vue un intérêt certain pour le suivi climatique.

11

### Impacts directs et indirects du SIOD sur l'activité cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien

Grace à l'imagerie satellitaire, il est possible d'effectuer un suivi continu des systèmes dépressionnaires tropicaux évoluant dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien (30E-90E 0S-40S) depuis la saison 1998/1999. Ces observations permettent notamment d'évaluer la variabilité interannuelle de l'activité cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien (SOOI) et ses liens potentiels avec la variabilité climatique dans les tropiques (El Niño/La Niña, dipôle de l'Océan Indien, dipôle subtropical de l'Océan Indien).

Des travaux récents, basés sur les mesures d'ACE (Accumulated Cyclone Energy) issues des ré-analyses du CMRS-cyclone de La Réunion, montrent que l'activité cyclonique durant la première partie des saisons 1998/1999, 2005/2006, 2010/2011 et 2016/2017 s'était révélée particulièrement faible (cf. figure). Cette faible activité coïncide avec l'occurrence des événements positifs de dipôle subtropical de l'Océan Indien (ou SIOD) les plus forts observés au cours de ces 20 dernières années (cf. figure) - un événement positif du dipôle subtropical de l'Océan Indien se distingue par des températures de surface de l'océan plus élevées que la normale au sud-est de Madagascar et plus basses que la normale à l'ouest de côtes australiennes.

L'analyse des données de colonne totale de vapeur d'eau, déduites de mesures GNSS, et

des ré-analyses du CEP (ERA-Interim) montrent que ces événements semblent être associés à un environnement plus sec que la normale sur le centre et l'ouest du bassin (ouest de 80° E) pendant le trimestre décembre-février. Cette anomalie sèche est également associée à une anomalie de circulation de grande échelle caractérisée par une subsidence renforcée sur l'ouest de l'Océan Indien à partir du mois d'octobre. Cette subsidence a pour effet de modifier le champ de vent en surface (alizés renforcés au nord de 20° S) et d'annihiler le flux trans-équatorial durant la première partie de la saison cyclonique. L'association de cette anomalie sèche et de la faible convergence de basse couche semble expliquer la faiblesse de l'activité cyclonique lors de ces quatre saisons. On peut également observer que l'activité cyclonique dans la partie centrale du Pacifique sud présente une activité anormalement élevée l'année précédant chacun de ces quatre événements de forts SIOD positifs. L'étude du lien entre l'activité cyclonique dans le bassin sud-ouest de l'Océan Indien et les autres bassins de l'hémisphère Sud, qui semble important lors de ces quatre événements, pourrait aider à l'obtention de prévisions saisonnières plus précises.

13

### Évolution climatique des canicules océaniques en Méditerranée

Des épisodes anormalement chauds ont été observés dans l'océan au cours des dernières décennies avec des impacts écologiques et socio-économiques importants. Ces événements, appelés « canicules océaniques » (ou Marine Heatwaves en anglais), se superposent au réchauffement climatique de long-terme et peuvent survenir dans les zones côtières ou en pleine mer. Ils entraînent des changements visibles dans les écosystèmes marins et les pêcheries.

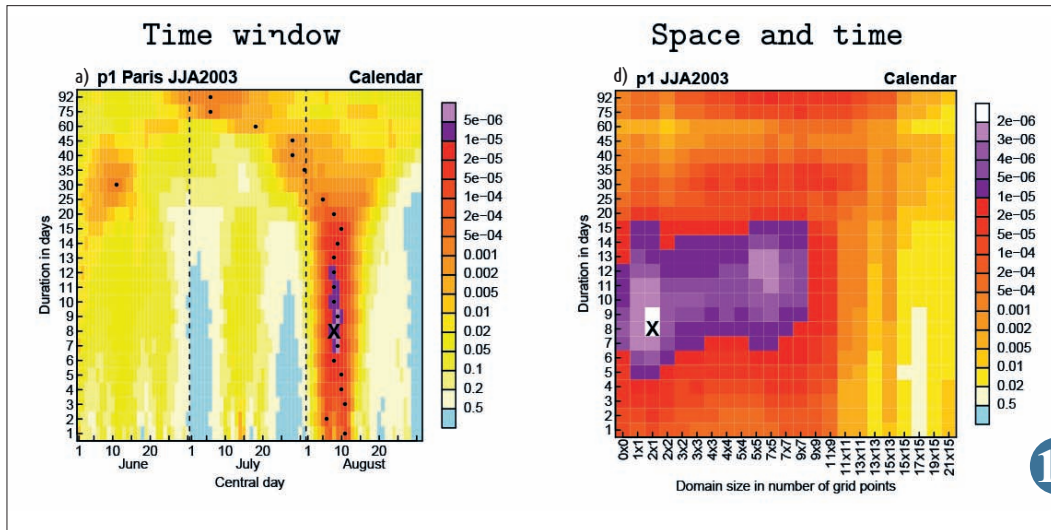
Une augmentation de leur fréquence a été observée à la surface de l'océan au cours du dernier siècle et les projections futures du changement climatique suggèrent des événements plus intenses et plus longs au cours du XXI<sup>e</sup> siècle.

Le cas des canicules océaniques en Méditerranée, pourtant une région clé bien identifiée pour le réchauffement climatique futur, a pour le moment été peu décrit. Pour étudier pour la première fois cette évolution en Méditerranée, nous avons utilisé des observations satellites ainsi que l'ensemble Med-CORDEX ([www.medcordex.eu](http://www.medcordex.eu)) de modèles régionaux de climat à haute résolution et couplés dans une approche multi-scénarios.

En réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), les événements deviennent plus forts et plus intenses dans le scénario RCP8.5 que dans le scénario RCP2.6 (cf. fig.). En particulier, dans le scénario RCP8.5 à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, les simulations projettent au moins une canicule océanique par an, jusqu'à 4 mois plus longues et 4 fois plus intenses que dans le climat actuel (HIST). Leur extension spatiale maximale passerait de 40 % en moyenne aujourd'hui à presque 100 % de la mer Méditerranée et des événements comparables à la canicule océanique observée en 2003 deviendraient alors la norme. Le scénario RCP8.5 poursuit la tendance actuelle alors que le scénario RCP2.6 est le plus proche des limites définies par les accords de Paris sur le climat et serait le seul à pouvoir limiter l'aggravation des canicules océaniques en Méditerranée.

12



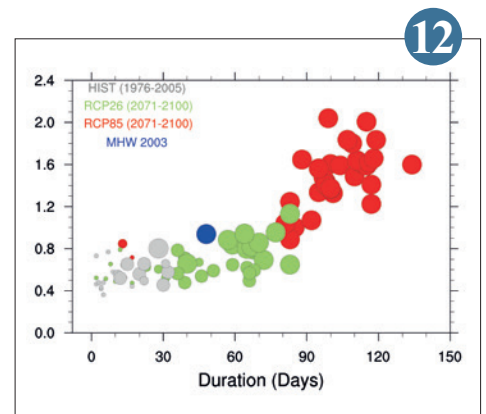


11

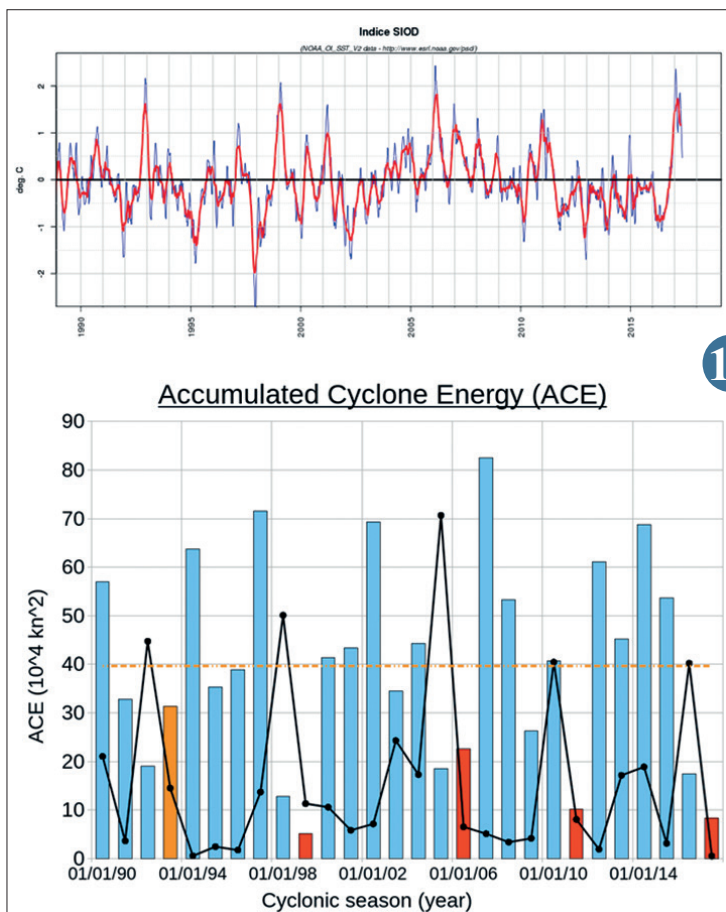
▲ Probabilité d'occurrence de la canicule 2003 à Paris, calculée pour différentes périodes de temps et domaines spatiaux différents. Les valeurs correspondent à la probabilité (estimée à partir de l'ensemble des observations disponibles) d'observer une température plus basse que celle effectivement observée en 2003 ; on cherche à maximiser cette valeur pour identifier l'échelle à laquelle l'événement est le plus rare.

Gauche : on explore tout d'abord le choix de la période de temps, via sa date (centre de la période de temps, du 1<sup>er</sup> juin au 31 août, axe des abscisses) et sa durée (axe des ordonnées, en jours), sur le point de grille de Paris ; la valeur la plus forte est trouvée pour un événement de 8 jours, début août.

Droite : on explore ensuite différents domaines spatiaux (taille du domaine en abscisse, chaque unité correspond à un carré de 2.5° x 2.5°, tous les domaines incluent Paris) et temporels (durée en ordonnée, en jours), en cherchant toujours l'événement le plus rare.



▲ Évolution des canicules océaniques pour la mer Méditerranée entre le climat présent et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle dans le modèle du CNRM de l'ensemble Med-CORDEX. La simulation historique (HIST) est en gris, le scénario à haute émission de GES est en rouge (RCP85) et celui à basse émission en vert (RCP26). La canicule océanique observée en 2003 est représentée par la bulle bleue. La taille des bulles correspond à l'extension spatiale maximale de chaque événement en % de la surface de la mer Méditerranée.



▲ En haut, évolution de l'indice du SIOD entre 1990 et 2017 en degrés Celsius (°C). En bas, évolution de l'ACE pour le bassin S001 (barres) entre le 15 novembre de l'année n-1 et le 28 février de l'année n, évolution de l'ACE à l'est de 180°E pour le Pacifique Sud entre le 1<sup>er</sup> novembre de l'année n-1 et le 1<sup>er</sup> mai de l'année n (courbe noire). La courbe en pointillé orange représente la moyenne de l'ACE du 15 novembre au 28 février sur la période 1990-2017. Les barres rouges représentent les années avec un fort événement positif SIOD.

## Agriculture : atténuer le changement climatique en utilisant des cultures intermédiaires

En Europe, les surfaces cultivées représentent environ 20 % des terres et connaissent de longues périodes de sol nu entre deux cultures. Dans une étude parue dans un numéro spécial d'Environmental Research Letters consacré au changement climatique, Carrer *et al.* (2018) ont quantifié l'atténuation climatique qui pourrait être obtenue en ajoutant des cultures ou couverts intermédiaires pendant ces périodes d'inter-cultures. En utilisant des données satellitaires sur toute l'Europe, ils ont analysé l'évolution de l'albédo – c'est-à-dire la fraction d'énergie solaire renvoyée par une surface – des parcelles agricoles suite à des simulations d'introduction de cultures intermédiaires (figure a).

Au total, les effets cumulés du stockage de carbone, de la réduction des besoins en engrais et d'augmentation d'albédo permettraient de compenser près de 7 % des émissions annuelles de GES du secteur

agricole et forestier en Europe, en prenant les émissions de l'année 2011 comme référence. L'effet albédo serait compris entre 10 et 13 % de cet effet total. Les pays européens qui ont le plus fort potentiel d'atténuation via l'effet albédo sont dans l'ordre la France, la Bulgarie, la Roumanie et l'Allemagne (figure b).

La viabilité de cette solution en comparaison à d'autres techniques de géo-ingénierie reste à être évaluée au regard des rétroactions possibles au niveau climatique et écologique, des contraintes économiques et de critères éthiques. Elle aurait pour avantages d'être à tout moment réversible et de pouvoir être mise en place progressivement.

14

## Adaptation de la chaîne de prévision saisonnière hydrologique au nouveau modèle Météo-France système 6

Depuis le printemps 2018, le modèle opérationnel de prévision saisonnière de Météo-France (Météo-France système 6) est utilisé par la DCSC pour produire des prévisions saisonnières hydrologiques sur la France.

Cette chaîne de prévision est issue de travaux de recherche (thèse de Stéphanie Singla en 2012). Elle a ensuite bénéficié, dans le cadre du projet européen EUPORIAS, d'un travail approfondi de conception et d'évaluation des produits d'aide à la décision. Ce « co-design », en partenariat avec des utilisateurs comme l'EPTB Seine Grands Lacs (gestionnaire des grands barrages de Seine), a débouché sur la mise en place d'une prévision saisonnière d'indicateurs hydrologiques, réactualisée chaque mois.

Les états initiaux des prévisions (notamment le stock nival, le niveau des nappes souterraines, l'humidité des sols, les débits) sont fournis par la chaîne d'analyse SAFRAN-SURFEX-MODCOU, également opérée par la DCSC, et largement utilisé depuis de nombreuses années pour le suivi de la ressource en eau. La prévisibilité hydrologique provient en partie de ces conditions initiales, parfois jusqu'à plusieurs semaines, voire plusieurs mois d'échéance. Parmi les variables disponibles en sortie

de la chaîne de prévision, on peut citer en premier lieu le débit. Les scores de prévisions montrent pour certains bassins, en période favorable (au moment de la fonte printanière pour les bassins de montagne par exemple), une bonne prévisibilité à plusieurs mois d'échéance. De telles prévisions de débits peuvent être un outil précieux pour la gestion de la ressource, par exemple la programmation de la vidange des barrages en saison d'étiage. La prévision de l'humidité des sols ou de l'évolution du stock nival offre des opportunités qu'il reste à exploiter.

À partir de cette chaîne « temps réel », plusieurs améliorations techniques sont envisagées, telles que l'introduction de prévisions moyenne échéance et/ou mensuelle en début de simulation, l'application d'une méthode de descente d'échelle plus évoluée ou l'utilisation d'autres modèles de prévisions saisonnières. Le projet MEDSCOPE sera quant à lui l'occasion de tester une chaîne similaire sur d'autres régions en Europe. Enfin il ne faut pas oublier le travail important de pédagogie et d'accompagnement qui reste nécessaire auprès des utilisateurs, pour que ces produits soient le support d'un véritable service climatique.

16

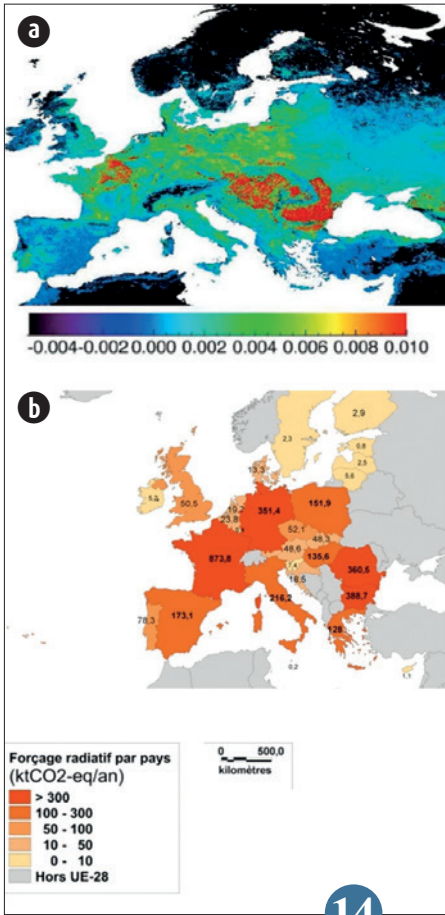
## Prévisions saisonnières des ressources en eau souterraine en France

Le projet AQUI-FR vise à permettre un suivi et une prévision de la ressource en eau souterraine en France. Pour cela, cette initiative rassemble des applications hydrogéologiques régionales à l'état de l'art afin de simuler quotidiennement les niveaux des nappes souterraines en utilisant les volumes d'eau drainés et ruisselés de la plateforme de modélisation de surface SURFEX.

La prévisibilité en hydrologie a déjà été démontrée pour les débits des cours d'eau, qui s'améliorait avec la prise en compte des aquifères (notamment pour leur soutien à l'étiage). Grâce aux prévisions des conditions atmosphériques du modèle de climat ARPEGE système 6, il est possible de prévoir l'état des aquifères à l'horizon de 6 mois. Une initialisation au printemps ou en début d'hiver permet ainsi d'anticiper respectivement les risques potentiels de sécheresse ou de crue par remontée des nappes. Ces prévisions comportent plusieurs scénarios (ou membres) donnant lieu à autant de scénarios en sortie. Grâce à ce faisceau de possibilités et à un historique de simulations (ou ré-analyse REA) sur une période de re-jeu (1993-2016, période de hindcast), les niveaux des nappes sont convertis en indicateurs piézométriques standardisés (SPLI, figure a) permettant de caractériser un état hydrogéologique plutôt sec ou plutôt humide jusqu'à 6 mois d'échéance. Une comparaison avec des mesures terrain (OBS) montre une bonne performance de la prévision saisonnière d'ensemble (PSE) en période de basses eaux (figure b).

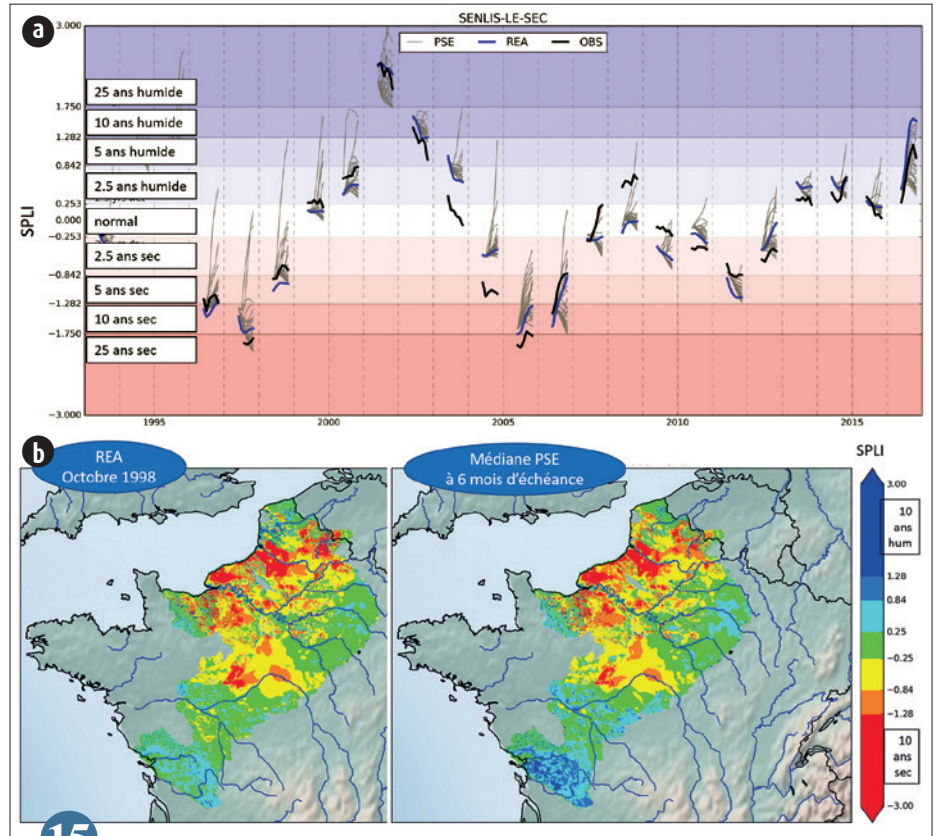
Ces prévisions sont en cours d'évaluation et la plateforme AQUI-FR continue d'évoluer par l'ajout de nouvelles modélisations régionales.

15



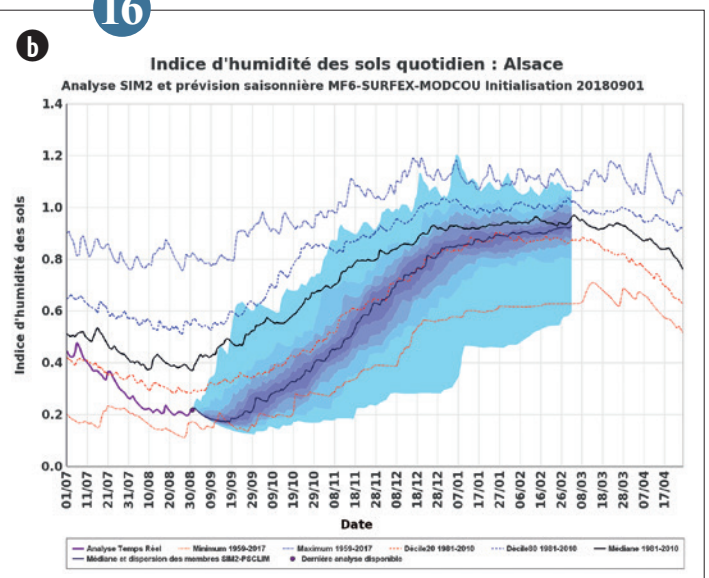
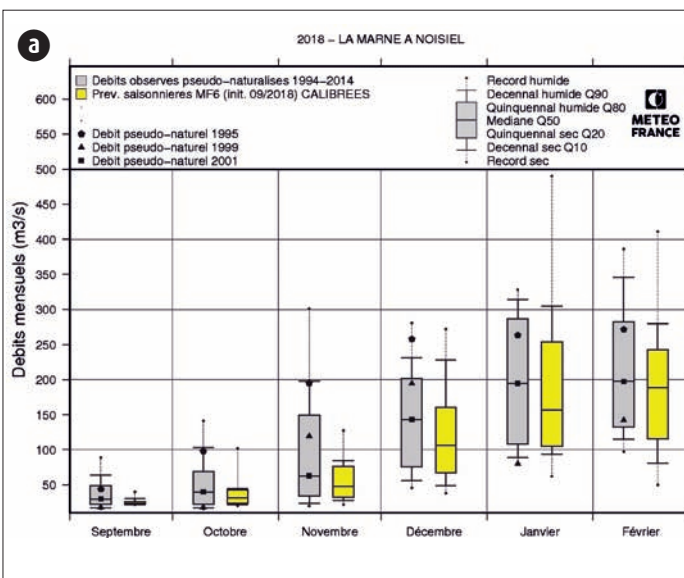
14

▲ Cartes représentant (a) l'augmentation annuelle de l'effet réfléchissant (dit albédo) suite à l'introduction de cultures intermédiaires et (b) le potentiel d'atténuation climatique lié à l'augmentation d'albédo des surfaces agricoles via l'introduction des CI (en milliers de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an pour chaque pays de l'UE-28).



15

▲ a) Chronique de l'indicateur du niveau des nappes (SPLI) de la station piézométrique de Senlis-le-Sec dans la Somme entre mai et octobre de 1993 à 2016 venant des observations (OBS), de l'historique simulé (REA) et de la prévision saisonnière à échéance 6 mois (PSE).  
b) Répartition spatiale des SPLI d'octobre 1998 sur la France provenant de la simulation historique (REA, à gauche) et de la médiane des prévisions saisonnières après 6 mois avec une initialisation en mai (à droite).



16

▲ a) Prévision saisonnière de débits moyens mensuels à la station de Noisiel sur la Marne, initialisée au 1<sup>er</sup> septembre 2018 pour la période septembre-février. Pour chaque mois de prévision, l'historique des débits mensuels est représentée en gris (variabilité interannuelle sur la période 1991-2014), la prévision en jaune (dispersion des prévisions, provenant de la prévision d'ensemble du modèle Météo-France Système 6).  
b) Prévision saisonnière d'humidité des sols pour la région Alsace, initialisée au 1<sup>er</sup> septembre 2018 pour la période septembre-février, à partir de la prévision d'ensemble du modèle Météo-France Système 6.

# Chimie, aérosols et qualité de l'air

Le service Copernicus Atmosphere (CAMs) est devenu opérationnel en 2015 et fournit aux utilisateurs, de façon ouverte et gratuite, des données sur la composition de l'atmosphère (aérosols, gaz réactifs et gaz à effet de serre) sur le globe à 50 km de résolution et sur l'Europe à 10 km. Météo-France coordonne la production opérationnelle "Régionale" (à l'échelle de l'Europe) de CAMs, et développe les services associés en s'appuyant sur les activités de recherche en modélisation de la chimie atmosphérique et des processus de surface liés. Deux chaînes opérationnelles MOCAGE traitent le domaine Europe, dont une avec assimilation, et une troisième alimente la plate-forme nationale Prév'Air de prévision de la qualité de l'air sur la France aux côtés de l'INERIS. Météo-France a par ailleurs pour mission de prévoir la dispersion d'espèces dangereuses et polluantes dans l'atmosphère sur le territoire national (chaîne « MOCAGE-accident ») mais aussi sur le domaine Europe-Afrique en tant que Centre Météorologique Régional Spécialisé de l'Organisation Météorologique Mondiale. Une autre version de MOCAGE peut être activée pour fournir de l'information sur des rétro-panaches liés à d'éventuels essais nucléaires. Météo-France exerce également la responsabilité de VAAC (Volcanic Ash Advisory Center) pour le suivi des panaches volcaniques sur une grande zone couvrant l'Europe continentale, l'Afrique, le Moyen-Orient et l'Ouest de l'Asie jusqu'à l'Inde.

L'établissement continuera à améliorer ses services en s'appuyant sur les progrès de la recherche en composition atmosphérique et des modèles. Cela passe notamment par la compréhension des processus physico-chimiques en jeu, comme ce fut par exemple le cas cette année sur la base des analyses des observations issues de la campagne Passy-2015. Côté modélisation en ligne, des activités ont notamment porté sur la prise en compte du dépôt sec des gaz dans au sein de C-IFS-MOCAGE. Concernant l'assimilation, des travaux prometteurs démontrent l'apport du réseau de lidars de Météo-France sur la prévision des cendres volcaniques et de la qualité de l'air à travers une chaîne quasi-opérationnelle tournant au CNRM. Enfin, des travaux finalisés cette année ont prouvé l'apport du nouvel imageur FCI du futur satellite MeteoSat 3e génération sur la prévision d'un épisode de pollution aux particules.

1

## Dépôt sec des gaz dans l'IFS : vers une approche intégrée

Dans le cadre du grand programme européen Copernicus Atmosphere Monitoring Service, le CNRM contribue au développement du modèle C-IFS. C-IFS est la version du modèle de prévision météorologique IFS du CEPMMT qui décrit la composition chimique.

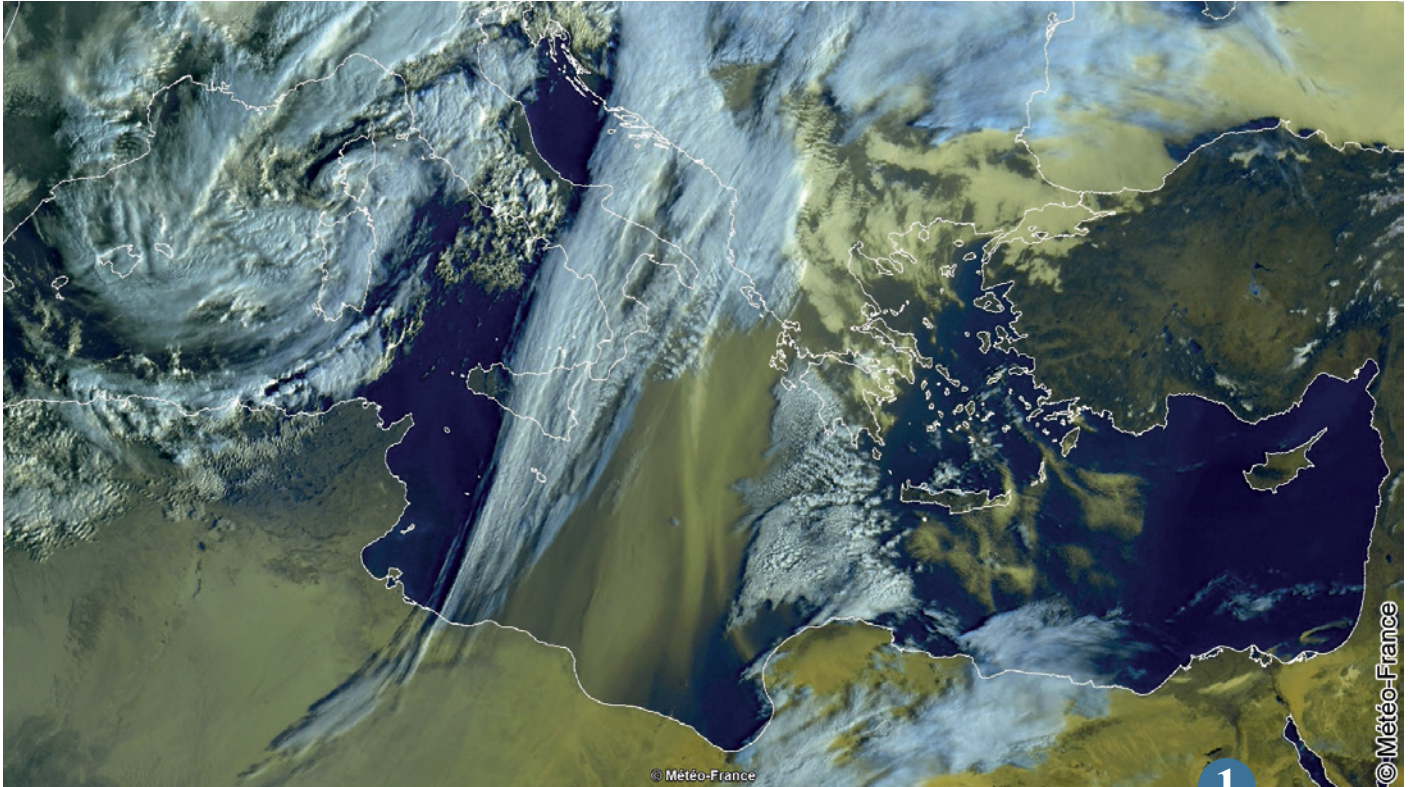
Près du sol, un des processus déterminant les concentrations des gaz dans l'atmosphère, incluant les polluants nocifs pour la santé, est le dépôt dit « sec ». Il correspond à l'absorption des constituants chimiques par les sols, la végétation, les bâtiments, la mer, ... Il dépend des caractéristiques de la surface, des composés chimiques et des conditions météorologiques. Pour

représenter ce processus dans C-IFS, des climatologies, décrivant les dépôts moyens, étaient utilisées jusqu'ici. Elles avaient été calculées au CNRM en utilisant un modèle indépendant. Des travaux récents réalisés par le CNRM et le CEPMMT ont permis d'intégrer dans C-IFS le calcul des variations instantanées du dépôt sec. Cela a été testé avec deux schémas chimiques, celui opérationnel de C-IFS et celui du modèle MOCAGE du CNRM. Les résultats ont été évalués sur un an par comparaison avec des mesures de dépôt et de concentrations de polluants près de la surface. L'impact du changement réalisé est

positif sur le dépôt sec, en particulier pour représenter ses variations jour-nuit comme illustré sur la figure. Il est moins marqué sur les concentrations, d'autres processus intervenant en plus du dépôt sec sur les quantités de polluants dans l'air.

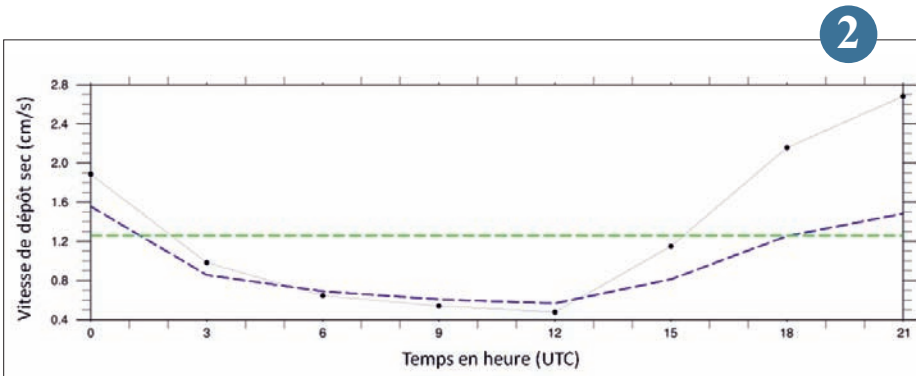
Ce travail a permis de montrer l'importance de la prise en compte des variations instantanées du dépôt sec dans C-IFS, mais aussi d'évaluer les incertitudes associées au modèle de dépôt utilisé. Il servira de base pour de futures améliorations.

2



1

▲ Image du satellite METEOSAT10, le 29/02/2016 à 07h00 UTC  
 Sur le flanc est d'un système dépressionnaire marqué sur la Corse, de forts vents de secteur sud arrachent des sables du désert saharien et les transportent sur des centaines de kilomètres jusqu'aux côtes grecques.



2

▲ Vitesse de dépôt sec en fonction de l'heure de la journée. Comparaison entre les observations d'une station située aux USA (points noirs), les résultats de C-IFS utilisant une climatologie pour le dépôt sec (vert) et ceux utilisant un calcul intégré (en bleu).

## Circulations à fine échelle dans la vallée de l'Arve et impacts sur la qualité de l'air hivernal

Les vallées alpines urbanisées sont régulièrement confrontées à des épisodes de pollution particulaire lors de conditions anticycloniques hivernales. Ces épisodes se développent du fait de la conjonction de l'augmentation des émissions et de la stratification thermique de l'atmosphère qui inhibe le mélange vertical et isole l'atmosphère locale de la dynamique de grande échelle. Le transport et la dispersion des polluants deviennent alors principalement pilotés par les écoulements locaux d'origine thermique qui ne sont que partiellement représentés par les modèles de PNT.

Le déploiement d'un lidar Doppler à balayage durant la campagne Passy-2015 a permis la cartographie 3D de ces écoulements dans le bassin de Passy (Haute-Savoie) qui représente l'un des points noirs de la pollution hivernale en France. La combinaison observations/simulations numériques haute-résolution a mis en exergue le rôle des circulations locales vis-à-vis des disparités dans la

distribution spatiale des polluants. En journée, les échanges de masse s'opèrent préférentiellement entre les segments de vallée les plus ensoleillés laissant les zones ombragées faiblement ventilées. La nuit, la convergence des flux issus des vallées tributaires et l'orographie locale induisent une structure des écoulements très cisaillée. Ces caractéristiques tendent à limiter la ventilation dans les secteurs du bassin qui se trouvent être les plus pollués. En outre, le couvert neigeux joue un rôle important sur la dispersion des polluants en favorisant la mise en place de cellule de circulation secondaire.

Les caractéristiques à fine échelle des champs orographiques et de l'état de la surface apparaissent donc comme des paramètres clés pour la prévision de la dispersion des polluants en zone de relief.

3

## Quel apport du futur imageur FCI sur MeteoSat 3<sup>e</sup> Génération pour prévoir la pollution de l'air en Europe ?

La 3<sup>e</sup> génération des satellites MeteoSat, prévue d'être lancée à partir de 2021, mettra à la disposition de la communauté météorologique des données d'une richesse sans précédent. L'imageur FCI (Flexible Combined Imager), à bord de MeteoSat 3<sup>e</sup> Génération, a été conçu en particulier pour la détection des aérosols. Dans le cadre d'une thèse cofinancée par Thalès Alenia Space et Météo-France, nous avons ainsi quantifié l'apport potentiel de FCI pour la surveillance de la pollution aux particules en Europe. L'étude s'est surtout focalisée sur le canal VIS04, dont la longueur d'onde centrale (444 nm) est la plus courte de tous les canaux et dont le potentiel de détection des particules fines est *a priori* le plus fort.

L'étude a consisté à développer et mettre en œuvre des expériences des simulations de systèmes d'observation à l'aide du modèle de chimie-transport MOCAGE. A partir d'une configuration de référence de MOCAGE, des observations synthétiques représentatives du canal VIS04 de FCI ont été générées. Ces observations synthétiques sont ensuite assimilées dans une autre configuration de MOCAGE : les différences entre une simulation sans assimilation et une simulation avec assimilation permettent de quantifier l'apport de l'assimilation des données FCI/VIS04.

La figure montre ainsi l'apport de l'assimilation pendant un épisode de pollution printanier aux particules qui couvrait l'Europe de l'Ouest. Grâce à l'assimilation des données du canal VIS04, les concentrations de particules à la surface sont nettement amplifiées et se rapprochent de la référence. Grâce à l'assimilation de FCI/VIS04, on améliore la représentation de l'intensité et de l'étendue spatiale de l'épisode de pollution.

Ces travaux ont permis d'identifier le potentiel du futur imageur FCI et ainsi de nous préparer à assimiler ces futures données dans les modèles de Météo-France, dès leur arrivée.

5

## Rôle du réseau lidar d'aérosol de Météo-France pour améliorer les prévisions des cendres volcaniques et de qualité de l'air

L'assimilation des produits d'aérosols est une thématique importante pour Météo-France avec de multiples applications allant de la prévision de la qualité de l'air jusqu'à la prévision des cendres volcaniques dans le cadre des responsabilités de Météo-France en tant que VAAC (*Volcanic Ash Advisory Centre*).

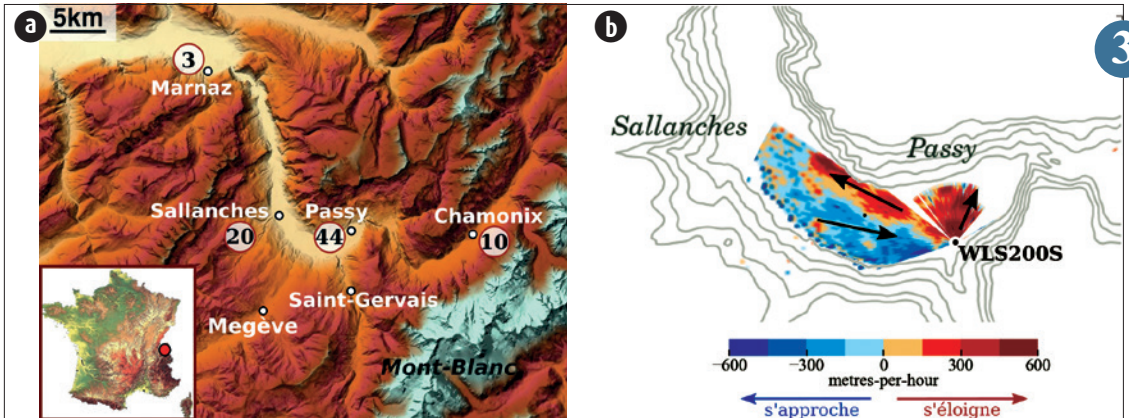
À cet effet, suite à l'éruption du volcan islandais de 2010 qui a provoqué de fortes perturbations du trafic aérien sur l'Europe, Météo-France a décidé d'installer un réseau de lidars MPL sur le territoire français pour détecter et quantifier le transport de l'aérosol volcanique en cas d'éruption majeure. Le CNRM a développé également une chaîne d'assimilation en mode pré-opérationnel capable d'assimiler les observations issues de ce réseau afin d'améliorer la représentation de la distribution tridimensionnelle des différents types d'aérosols, y compris l'aérosol volcanique. À terme, cette chaîne d'assimilation doit passer en opérationnel et servira à alimenter le modèle MOCAGE-Accident en cas d'éruption volcanique.

Afin d'illustrer la capacité de l'assimilation des différents jeux de données à améliorer la représentation de l'aérosol volcanique au

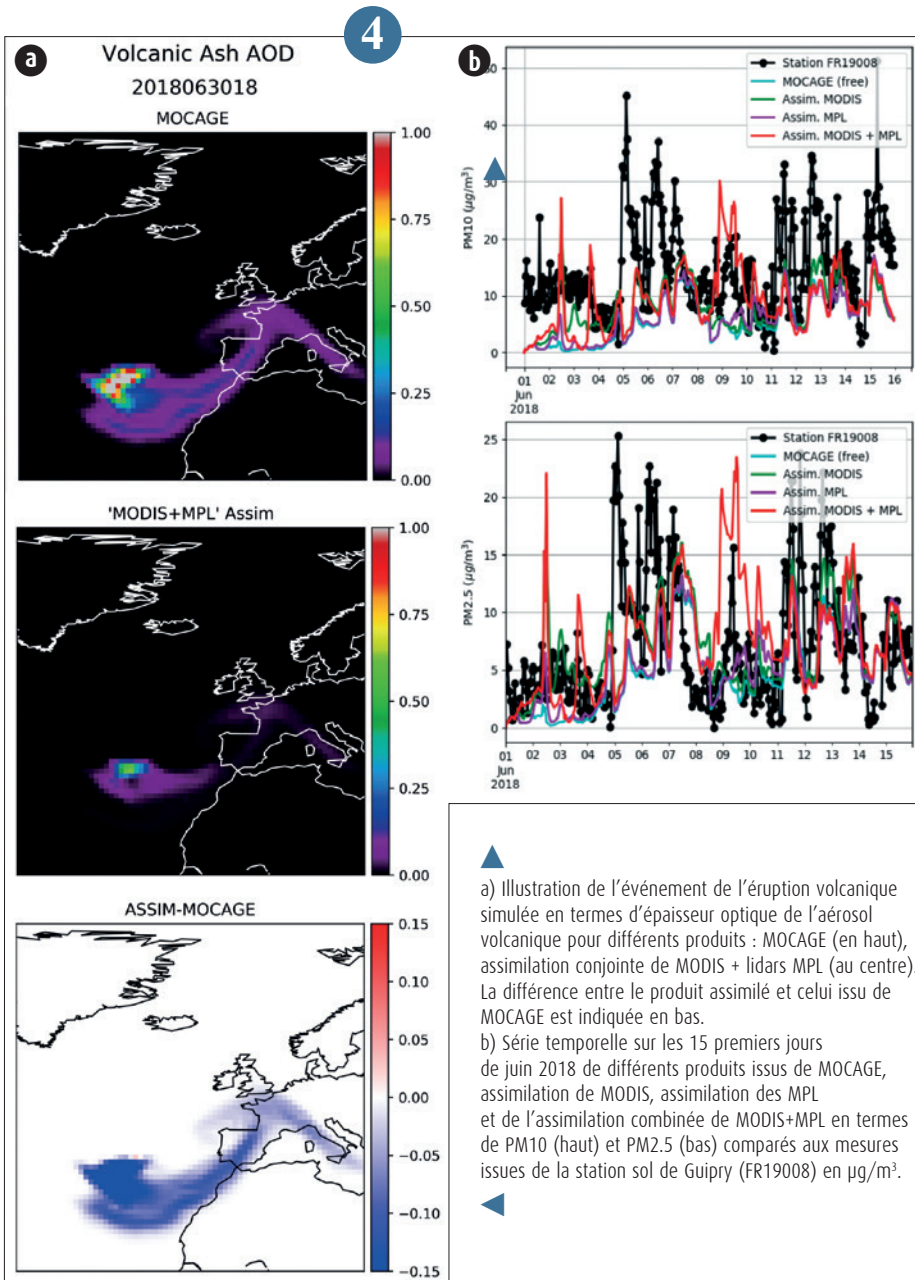
sein du modèle MOCAGE, une simulation d'une éruption volcanique sur l'île Terceira (Açores) a été réalisée. Le début de l'éruption a été simulé le 28/06/2018 à 09 h 30. La figure (a) montre l'épaisseur optique de l'aérosol volcanique issue du modèle MOCAGE et celle issue de l'assimilation combinée de l'imageur MODIS avec les mesures du réseau MPL. La différence entre les deux champs, l'un modélisé et l'autre assimilé, montre la capacité de l'assimilation à améliorer la dispersion du panache volcanique.

Un autre cas d'étude (réaliste) lié à la prévision de la qualité de l'air est présenté sur la figure (b). Cette dernière montre les séries temporelles des concentrations de particules à la surface (PM10 et PM2.5 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) au-dessus de la station de Guipry (FR19008) issues de différents produits durant les premiers 15 jours de juin 2018. Cette figure met en évidence l'amélioration de la prévision de la qualité de l'air en termes des PMs en utilisant l'assimilation simultanée de MODIS et du réseau lidar MPL.

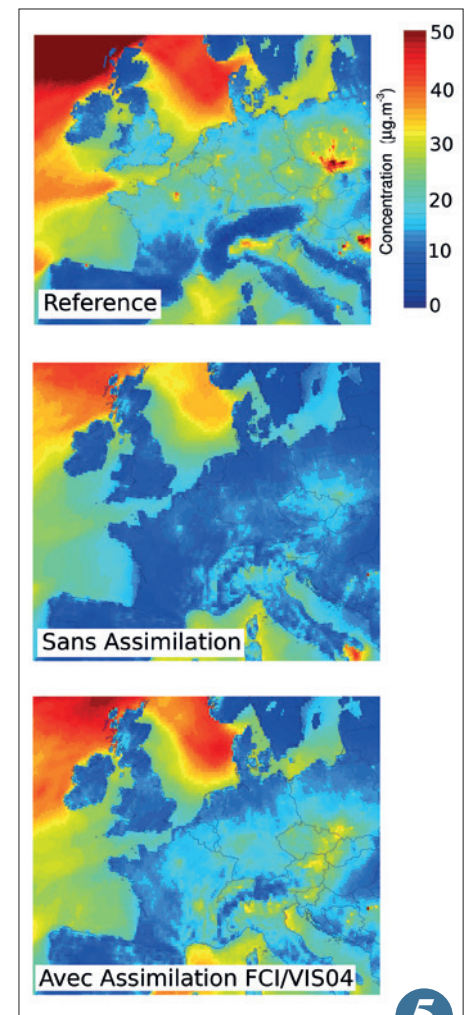
4



▲ a) Villes principales situées dans la vallée de l'Arve avec le bassin de Passy et sa forme atypique de serpe au centre de la figure. Les nombres de jours de dépassement du seuil réglementaire de concentration en PM10 sont reportés dans les cercles, la valeur critique à ne pas dépasser étant de 35 jours/an (données fournies par Atmo Auvergne Rhône-Alpes).  
 b) Champ journalier moyen de vitesse radiale déterminé à partir du lidar Doppler à balayage (WLS200S) lors d'une journée anticyclonique stable typique des épisodes de pollution particulaire hivernaux.



▲ a) Illustration de l'événement de l'éruption volcanique simulée en termes d'épaisseur optique de l'aérosol volcanique pour différents produits : MOCAGE (en haut), assimilation conjointe de MODIS + lidars MPL (au centre). La différence entre le produit assimilé et celui issu de MOCAGE est indiquée en bas.  
 b) Série temporelle sur les 15 premiers jours de juin 2018 de différents produits issus de MOCAGE, assimilation de MODIS, assimilation des MPL et de l'assimilation combinée de MODIS+MPL en termes de PM10 (haut) et PM2.5 (bas) comparés aux mesures issues de la station sol de Guipry (FR19008) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



▲ Concentration moyenne (en  $\mu\text{g}.\text{m}^{-3}$ ) de particules fines (de diamètre inférieur à 10 microns, PM10) pendant l'épisode de pollution du 6 au 15 mars 2014. En haut : simulation MOCAGE de référence, d'où sont issues les observations satellitaires synthétiques FCI/VIS04 qui sont assimilées. Au Centre : simulation MOCAGE sans et avec (en bas) l'assimilation des observations satellitaires synthétiques FCI/VIS04. On voit que l'assimilation permet se rapprocher de la référence et donc d'améliorer sensiblement les concentrations de PM10.

# Neige

La neige est un des matériaux naturels les plus fascinants à la surface de la Terre. Elle occupe une place majeure dans le fonctionnement du système climatique à l'échelle planétaire, et joue un rôle central à l'échelle régionale, contribuant notamment à la régulation de la disponibilité des ressources en eau. En montagne, la neige est une composante clef gouvernant le fonctionnement des écosystèmes et des systèmes socio-économiques dans le domaine de l'énergie, de l'agriculture et du tourisme. Elle est également responsable des avalanches et est impliquée dans d'autres risques naturels.

Météo-France, notamment le Centre d'Etudes de la Neige (CEN, Météo-France – CNRS, CNRM), conduit des recherches pour mieux comprendre et prévoir l'évolution du manteau neigeux en montagne. En 2018, plusieurs avancées majeures ont été concrétisées, valorisées et transférées pour des applications opérationnelles. Le modèle SYTRON, bâti en complément de la chaîne de prévision de l'enneigement, tient compte explicitement des effets du transport de neige par le vent. Son évaluation a fait l'objet d'une publication scientifique et les résultats de ce modèle sont désormais à la disposition des services opérationnels de prévision. L'assimilation de données satellitaires dans les modèles de manteau neigeux est amenée à jouer un rôle croissant, permettant de limiter l'effet des erreurs de modélisation, provenant des erreurs d'estimation des conditions météorologiques et des limites des modèles de neige eux-mêmes. Une nouvelle étape a été franchie vers la mise au point d'un outil d'assimilation de données de réflectances optiques dans le modèle Crocus. Le CEN a coordonné une évaluation internationale des performances de plusieurs outils de caractérisation de la neige via la pénétration d'une pointe conique dans la neige. Ce travail a été complété par une analyse mécanique détaillée, combinant des approches de physique des matériaux, de traitement du signal et d'expérience de terrain et en laboratoires.

1

## Analyse du signal mesuré par un pénétromètre électronique dans la neige

Le test de pénétration du cône consiste à mesurer la force nécessaire à l'enfoncement vertical d'une perche à embout conique dans la neige. Il est couramment utilisé pour caractériser l'hétérogénéité verticale du manteau neigeux avec la sonde de battage, notamment dans le réseau d'observation nivo-météorologique de Météo-France et ses partenaires sur le terrain.

Les pénétromètres électroniques tels que le SnowMicroPenetrometer permettent aujourd'hui de mesurer, à haute résolution verticale, la résistance de la neige dont les fluctuations contiennent des informations sur sa microstructure. Remonter à ces

informations requiert un modèle d'inversion et la connaissance des mécanismes mis en jeu. Une hypothèse courante est de considérer que la résistance macroscopique résulte des ruptures fragiles des ponts de glace. À partir de cette hypothèse, nous avons proposé un nouveau modèle d'inversion de type processus de Poisson non homogène qui tient compte du régime transitoire de pénétration (figure a). Pour évaluer les hypothèses maîtresses de ce modèle, nous avons conduit des expériences qui consistaient à imager la structure 3D d'échantillons de neige par tomographie X avant et après un test de pénétration (figure b). Nous avons ainsi

pu relier la densité de contact entre grains mesurée par tomographie à celle dérivée du signal de résistance. En outre, par des méthodes de suivi de grains et de corrélation d'images, nous avons reconstruit le champ de déformation induit par la présence du cône (figure b) et ainsi déterminé comment l'extension de la zone déformée dépendait du type de neige.

À terme, ces études pourraient permettre de dériver, de manière objective, la stratigraphie du manteau neigeux à partir d'une mesure de terrain simple et rapide.

2

## Assimilation d'images satellites (MODIS) pour la simulation d'ensemble du manteau neigeux

Météo-France développe et exploite un système de simulation du manteau neigeux en support à la prévision du risque d'avalanche à l'échelle des massifs montagneux français. Cependant ces simulations pâtissent de nombreuses erreurs et incertitudes qui limitent leur usage par les prévisionnistes. Afin d'atténuer ce problème, une approche double est proposée : une modélisation d'ensemble, pour rendre compte de ces erreurs de modélisation, et l'assimilation de données satellites afin de les réduire. Pour ce faire, l'utilisation des images MODIS

(visible/proche infra-rouge) est actuellement l'une des pistes privilégiées.

En effet, ces données permettent d'observer tous les jours (en l'absence de nuage) et avec une résolution adaptée aux zones de relief (250 m) les propriétés de surface (réflectance) du manteau neigeux et ainsi de mieux contraindre des variables d'état du modèle Crocus telles que le contenu en impuretés absorbantes de la neige et surface spécifique, une variable qui est liée à l'état de la neige de surface. Afin d'évaluer le potentiel d'assimilation de telles données,

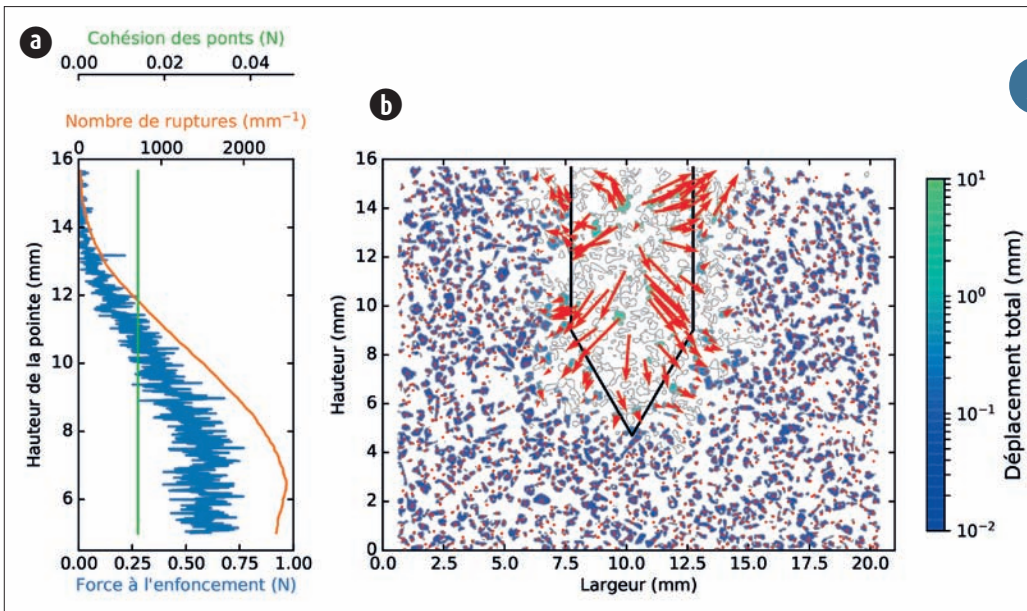
une comparaison de séries temporelles de réflectances simulées par l'ensemble et observées par MODIS a été menée durant l'hiver 2016-2017 dans le massif des Grandes-Rousses (Alpes Centrales) (figure 1). On note des corrélations élevées (0.7-0.9) entre ces séries temporelles, fortement influencées par la chronologie des épisodes neigeux. Cependant, un fort biais négatif de MODIS (identifié par comparaison avec des données Sentinel 2) empêche une assimilation directe. Ce biais peut être éliminé en calculant des rapports de réflectance dans les différentes





1

Site d'observation du « Col de Porte ».



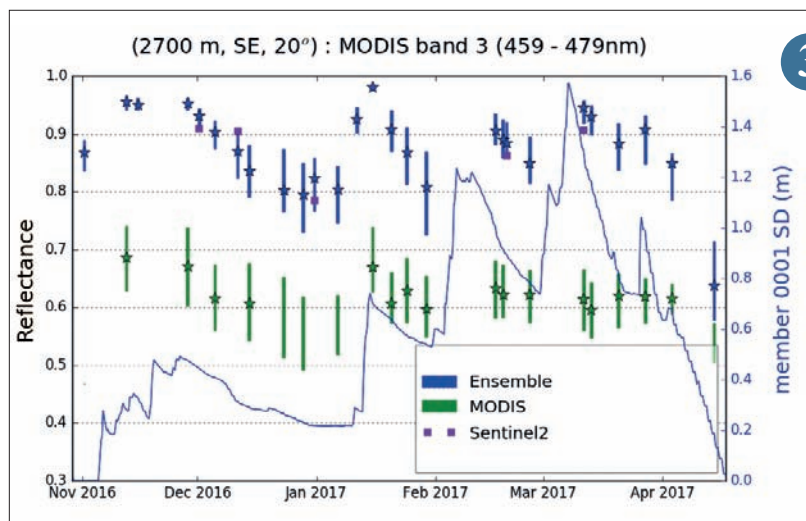
2

Lames d'eau 6h Panthere (a) et avec application de la nouvelle méthode utilisant la prévision AROME-PI (b) calculées entre 18h le 03/03/2017 et 0 h UTC le 04/03/2017 pour le radar de Bordeaux (domaine de 255 km de rayon). Les cumuls observés par les pluviomètres sont indiqués par des disques de couleur.

Séries temporelles de réflectances (460 nm) du manteau neigeux simulées par l'ensemble (quartiles en bleu, médianes en étoile) et observées par MODIS (idem, vert) et Sentinel 2 (médianes, violet), ainsi que la hauteur de neige (SD) simulée par le premier membre de l'ensemble (courbe bleue) dans le massif des Grandes-Rousses à 2700 m, exposition Sud-Est et 20 degrés de pente, durant l'hiver 2016-2017.

bandes MODIS. Cela pourrait permettre de tirer parti de la richesse de l'information observée tout en s'affranchissant de ce biais des données brutes. Ceci laisse présager que les observations MODIS pourront dans un avenir proche être assimilées dans le modèle Crocus avec un impact positif.

3



3

# Développement d'un système opérationnel pour la simulation du transport de neige par le vent en montagne (SYTRON)

Le transport de la neige par le vent influence fortement l'évolution du risque d'avalanche et doit être pris en compte dans la préparation des bulletins quotidiens d'estimation du risque d'avalanche. Afin de mieux prévoir ce phénomène et ses conséquences, un système opérationnel pour la simulation du transport de neige par le vent en montagne, nommé SYTRON, a été déployé depuis le début de l'hiver 2016/2017. Il complète la chaîne opérationnelle de prévision du risque d'avalanche SAFRAN-SURFEX/ISBA-Crocus-MEPRA.

SYTRON simule l'évolution du manteau neigeux sur les différents massifs montagneux français. Il combine des informations sur l'intensité et la direction du vent, ainsi que sur les propriétés physiques simulées de la neige en surface, pour déterminer l'occurrence du transport de la neige par le vent et les quantités de neige redistribuées entre les différents versants. SYTRON fournit des prévisions

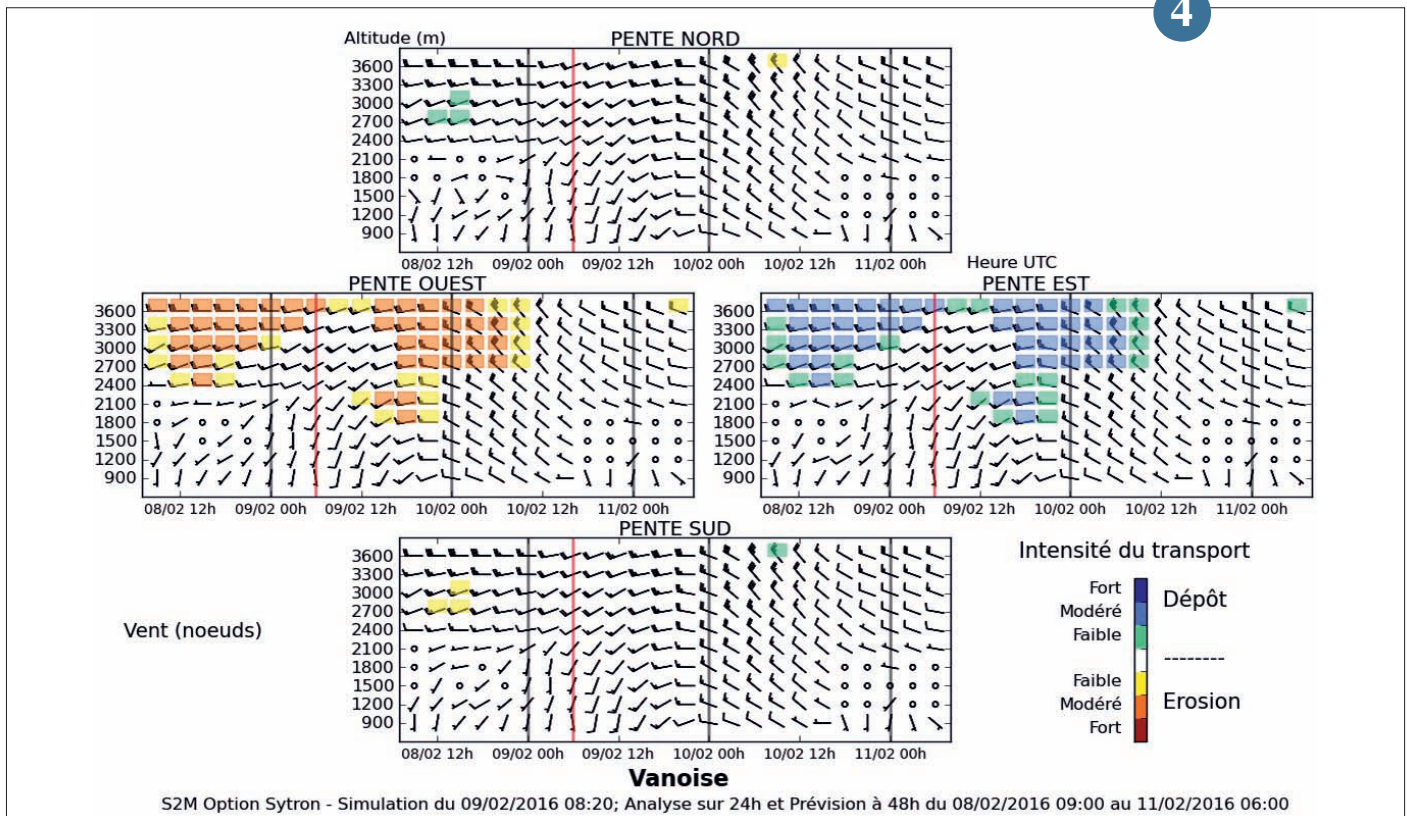
jusqu'à 48 h d'échéance pour chaque massif montagneux des Alpes, des Pyrénées et de Corse. Ces prévisions sont disponibles par bande d'altitude et pour différentes expositions. Des graphiques de synthèse par massif mis à jour quotidiennement sont fournis aux prévisionnistes (cf. figure).

Les résultats de SYTRON ont été évalués pour l'hiver 2015/2016 à partir de 11 stations mesurant le transport de neige par le vent dans les Alpes. Cette évaluation a montré une capacité satisfaisante du système à déterminer l'occurrence des épisodes de transport par massif avec notamment un faible taux de fausse alarme. L'augmentation de la résolution dans les futurs systèmes de modélisation du manteau neigeux, permettra de mieux représenter la forte variabilité spatiale et temporelle du transport de neige par le vent en zone de montagne.

Exemple de graphiques issus du système SYTRON montrant l'information mise à disposition des prévisionnistes le 9 Février 2016 pour le massif de la Vanoise dans les Alpes. Cette figure représente pour les quatre orientations principales (Nord, Est, Sud et Ouest) l'évolution du vent par bande d'altitude de 300 m sur une période de 72 h : 24 heures d'analyse avant le 9 Février 06 h et 48 heures de prévisions après cette date. L'intensité du transport de neige par le vent est représentée sur une échelle de couleur à 4 niveaux (érosion en rouge, accumulation en bleu).

4

4



# Océanographie

Les interactions entre l'océan et l'atmosphère sont fortes et jouent à toutes échelles de temps et d'espace. À l'interface entre ces milieux couplés se déroulent des événements extrêmes à fort impact pour les activités humaines, lorsque le dialogue entre l'air et l'eau est à la tempête ou au cyclone. Le couplage importe aussi tout autant sur ces événements marquants que sur les évolutions lentes du système climatique, pour lequel l'océan joue le rôle de porteuse basse fréquence.

Pour capturer ces phénomènes, détecter les tendances, analyser les processus qui les gouvernent, considérer l'interface ne suffit pas : il faut s'élever dans la complexité des nuées et, en même temps, plonger dans les abysses salés.

Météo-France travaille par conséquent avec ses partenaires spécialisés en océanographie à mieux connaître et documenter l'univers marin, les interfaces air-mer et océan-continent. Les approches sont multiples mais, comme toujours en géosciences, elles reposent fortement sur l'observation et sur la modélisation numérique.

Surcotes, cyclones, états de mer extrêmes, tempêtes, sont autant de termes qui parlent non seulement aux marins et acteurs maritimes, mais désormais à tous nos concitoyens : chaque nouvel événement météorologique appelle des questions sur la dérive climatique ; circulation thermohaline, réchauffement des eaux, mesures fiducielles sont d'autres termes qui apparaissent dans les travaux présentés ici, qui montrent que les météorologues abordent la planète dans sa complexité, prenant en compte les différents compartiments de ce qu'il convient d'appeler le « système Terre ».

1



1

▲  
Vagues et mer forte : Côte ouest près de la pointe de la Castagna, au sud du golfe d'Ajaccio.  
© Lapujade Alain - Météo-France

## Prévision de surcotes pour les Petites Antilles et la 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, le modèle hydrodynamique de prévision de surcotes pour les Petites Antilles et la Guyane a été amélioré au cours de l'année 2018. La nouvelle version intègre un solveur barotrope plus performant, une nouvelle bathymétrie à 500 m, spécifiquement réalisée par le SHOM. Elle dispose en outre d'un nouveau calcul de la tension de vent, suivant la paramétrisation de Pond et Pickard, plus adaptée aux conditions extrêmes des ouragans. Les enregistrements des marégraphes de Marigot à Saint-Martin et de Barbuda lors du passage de l'ouragan Irma le 6 septembre 2017 ont été utilisés, ainsi que le forçage du modèle AROME Tropiques du réseau de 18 h du 5 septembre 2017, pour optimiser le calcul du terme source dû au vent en conditions cycloniques. La figure montre l'apport significatif de la nouvelle version du modèle dans le calcul de la surcote à Marigot. Ce recalage du modèle a été rendu possible grâce à l'existence de mesures exploitables et d'un forçage atmosphérique très fidèle produit par le modèle opérationnel AROME Tropiques, même si le vent maximal reste sous-estimé et la pression au centre un peu surestimée.

2

## Utilisation d'une climatologie du modèle pour des diagnostics d'événements de vagues intenses

Nous étudions la sensibilité de la prévision des phénomènes de fortes vagues affectant la côte Atlantique de l'Europe de l'ouest, occasionnant parfois des reculs très importants du trait de côte.

Lorsqu'un modèle de vagues prévoit un événement d'une telle intensité, l'incertitude associée doit pouvoir être documentée. Dans cette étude, nous étudions le comportement du modèle de vagues MFWAM, forcé par le modèle d'ensemble atmosphérique global PEARP qui comporte 35 membres. Une base de données de prévisions rétrospectives de MFWAM forcé par PEARP est disponible sur une période de 10 années. Grâce à cette référence appelée aussi *climatologie* du modèle, il est possible de comparer la distribution des valeurs des différents membres d'une prévision d'ensemble de vagues avec la distribution des valeurs de la *climatologie* pour mesurer le caractère inhabituel de cette prévision.

Ce calcul d'Extreme Forecast Index (EFI) est particulièrement sensible à l'échantillonnage de la base de prévisions de référence. Dans le cas de la tempête Eleanor du 2 janvier 2018, nous montrons l'impact sur les EFI de la fréquence de répétition des prévisions de

la *climatologie*, généralement supérieure à 1 jour et de sa période de recouvrement de 10 ans, avec et sans l'hiver 2013-2014 marqué par un grand nombre de tempêtes intenses.

La figure montre des valeurs très fortes d'EFI calculées pour une fréquence de 4 jours et sans l'hiver *record*. L'étendue des valeurs supérieures à 0,9 montre bien l'occurrence d'un phénomène très inhabituel. Lorsqu'on augmente la fréquence de la *climatologie* à 1 jour en ajoutant l'hiver 2013-2014, on réduit les valeurs d'EFI de façon significative, jusqu'à un ratio de 10 %. Les zones de plus fortes valeurs d'EFI, sont plus localisées et plus pertinentes en terme d'impact prévu. Dans le cas des phénomènes extrêmes, l'utilisation d'une *climatologie* d'un modèle probabiliste améliore l'information produite par la prévision, d'autant plus si l'on maximise la représentativité de cette *climatologie*.

3

## Assimilation de nouvelles observations satellite par les modèles de vagues

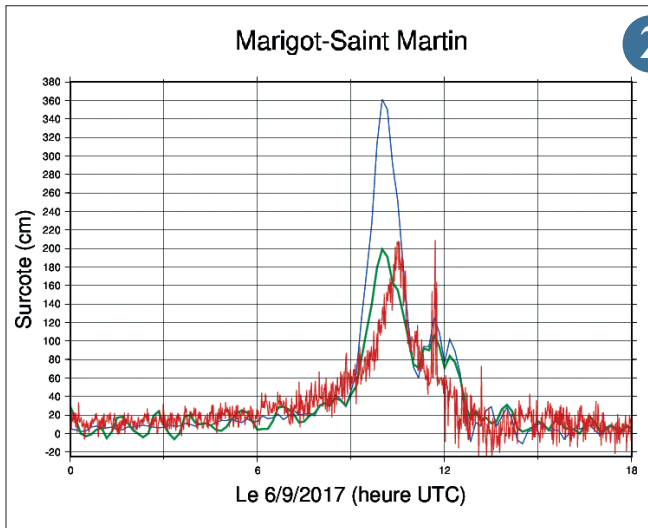
Afin d'assurer une amélioration continue de la prévision opérationnelle de l'état de la mer, l'assimilation des données dans le modèle MFWAM est mise à jour régulièrement avec l'arrivée de nouvelles observations de vagues. L'utilisation de ces données satellitaires de vagues contribue d'une manière significative à corriger les erreurs de forçage fourni par le système atmosphérique.

La mission satellitaire altimétrique Sentinel-3A du programme spatial européen Copernicus est en exploitation opérationnelle depuis mai 2018 assurant ainsi des paramètres intégrés de vagues de plus en plus précis à la surface des océans. Le modèle MFWAM assimile les hauteurs de vagues issues de l'altimètre S3A pour les configurations globales et aussi les déclinaisons régionales pour l'outre-mer et l'Europe. En 2019, Sentinel-3B va rejoindre la constellation altimétrique et améliorer ainsi la couverture des données sur tous les bassins océaniques. Depuis le lancement du satellite franco-chinois CFOSAT le

29 octobre 2018, nous travaillons dans le cadre de la phase Calibration/Validation sur l'assimilation des nouvelles données de l'instrument SWIM. Ce dernier permet à la fois de fournir la hauteur de vagues au nadir et aussi les spectres directionnels de vagues suivant plusieurs angles d'incidence à la surface de l'océan.

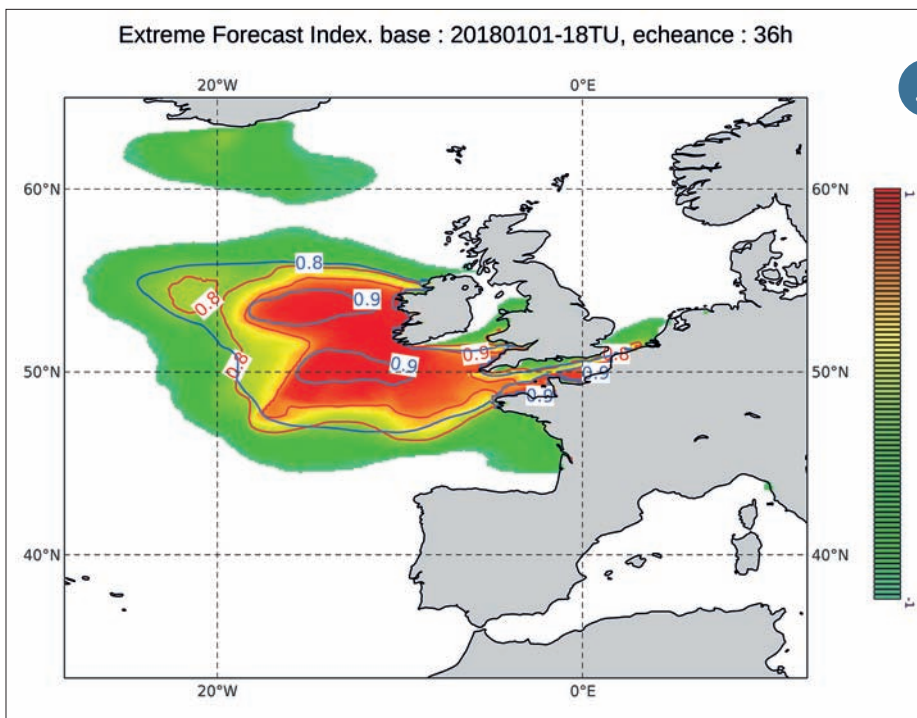
Les premiers résultats de l'assimilation sont très prometteurs et montrent un impact significatif sur les paramètres intégrés de l'état de la mer dans les périodes d'analyse et de prévision, comme l'illustre la figure. Pendant cette phase de vérification, l'instrument SWIM va être calibré et le traitement des données sera mis à jour, assurant une meilleure qualité des spectres de vagues observés. Cette étape contribuera à diminuer les rejets de spectres de vagues en entrée du processus d'assimilation et par conséquent à améliorer l'impact de l'analyse du modèle MFWAM.

4



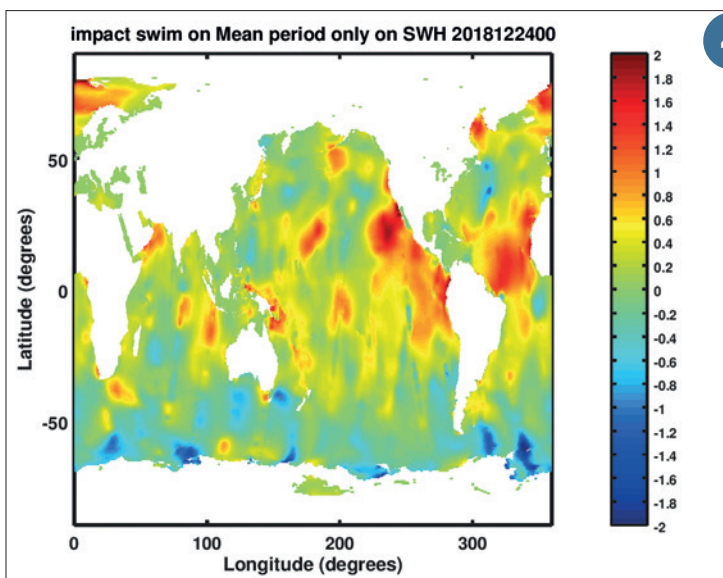
2

Comparison entre la surcote mesurée (trait rouge) et la surcote modélisée (trait bleu pour l'ancienne version, trait vert pour la nouvelle version) à Marigot (nord de Saint Martin dans les Petites Antilles) pour le 6 septembre 2017, jour du passage d'Irma. Les deux versions du modèle sont ici forcées par le vent et la pression atmosphérique de surface au pas de temps horaire du modèle AROME Tropiques de Météo-France du réseau de production du 5 septembre 2017 à 18 h UTC.



3

Les plages de couleurs désignent les valeurs de l'Extreme Forecast Index (compris entre -1 et 1). En rouge, les isolignes 0,8 et 0,9 de cet indice dans le cas d'un climat du modèle échantillonné sur 10 années, sans l'hiver 2013-2014, à une fréquence de quatre jours. En bleu, les isolignes de mêmes valeurs dans le cas d'un climat correspondant à une fréquence d'un jour et avec l'hiver 2013-2014.



4

Différence de période moyenne de vagues (en seconde) issus des tests de modèle MFWAM avec et sans assimilation des données de vagues de CFOSAT le 24 décembre 2018 à 0:00 UTC. Les valeurs négative et positive de l'incrément d'analyse indiquent respectivement une surestimation et une sous-estimation des périodes de vagues.

## Où a lieu la plongée des eaux de la circulation thermohaline méditerranéenne ?

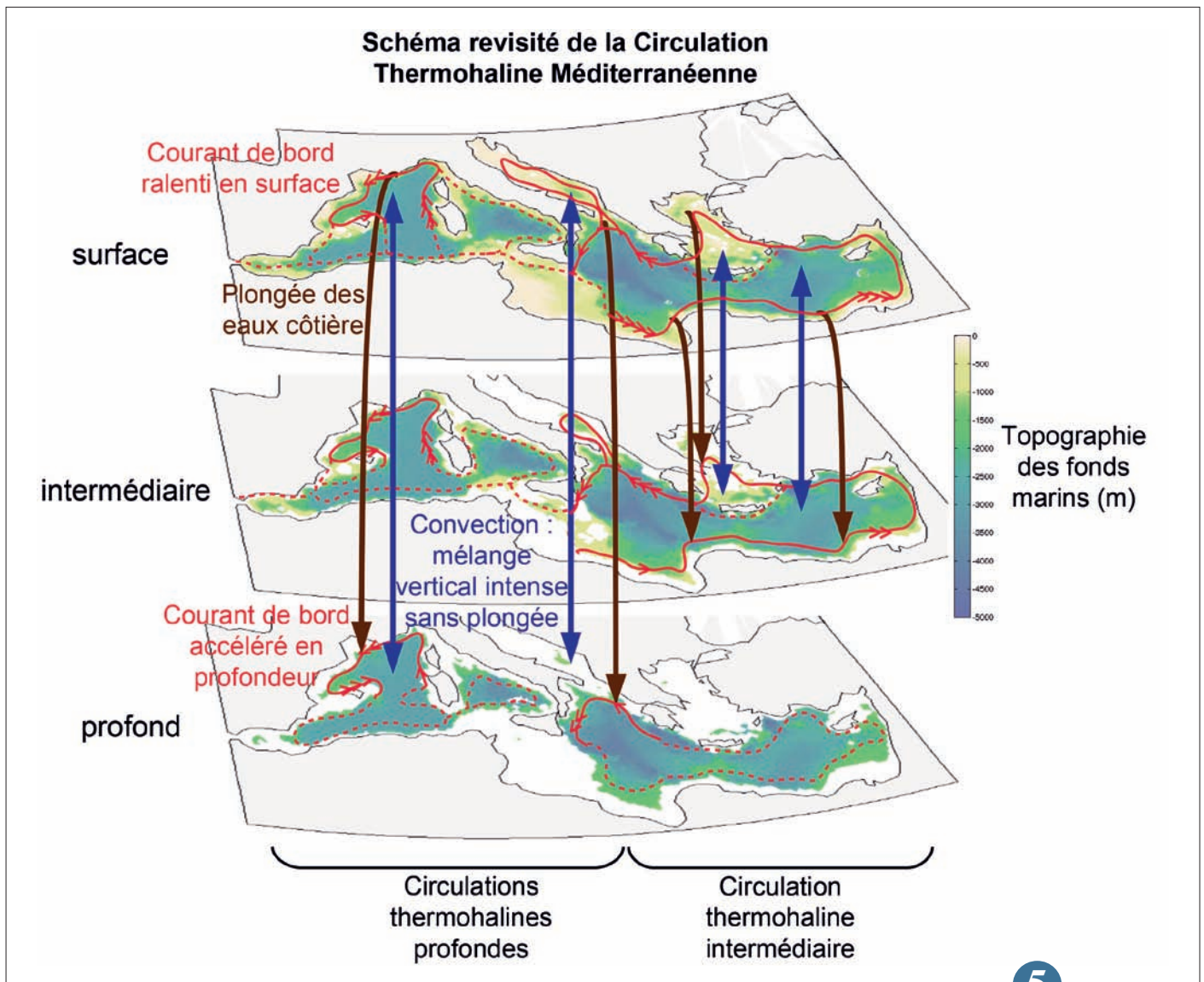
Depuis plus d'un demi-siècle, les études scientifiques ont montré la présence d'une circulation dite *thermohaline* en mer Méditerranée, à l'instar de l'océan planétaire dont elle peut être considérée, toutes proportions gardées, comme un modèle réduit. Cette circulation, qualifiée de "tapis roulant" océanique, est mise en mouvement par les différences de densité de l'eau de mer, c'est-à-dire de température (*thermo*) et de salinité (*haline*). À l'échelle du globe, elle a un rôle climatique clé puisqu'elle transporte vers les pôles les eaux

chaudes de surface qui s'enfoncent en se refroidissant. Si sa vitesse venait à diminuer, son rôle de tampon donc d'atténuateur du réchauffement climatique en serait réduit d'autant.

Observé depuis les années 50, le réchauffement de la Méditerranée s'est récemment accéléré dans des proportions plus importantes que le reste de l'océan global, accompagné d'une salinisation de ses eaux profondes. Analyser sa sensibilité au réchauffement global et comprendre sa circulation est donc fondamental,

notamment la localisation des zones, rares et réduites, de convection océaniques, *i.e.* de plongée des eaux selon la vision communément admise.

Notre équipe a eu l'idée de croiser les sorties d'un modèle numérique de la mer Méditerranée et d'observations au large des côtes françaises pour déterminer où et comment a lieu cette plongée des eaux. Les résultats obtenus la situent à proximité de la côte, loin des zones de convection, localisées, elles, au large. Par notre étude, de nouvelles zones clés de



▲ Schéma revisité de la circulation thermohaline méditerranéenne

Sous l'effet des échanges d'eau et de chaleur en surface, la Circulation Thermohaline Méditerranéenne se caractérise par une entrée d'eau en surface et une sortie en profondeur de son unique point de communication avec l'océan global : le détroit de Gibraltar. Les zones de convection, historiquement vues comme le siège de la plongée des eaux de cette circulation, ne sont en fait qu'un lieu de mélange vertical entre les masses d'eau de surface et profondes. A l'inverse, les courants de bord, présents dans presque tout le bassin, interagissent avec la côte et sont le siège principal de cette plongée des eaux. Ainsi, à mesure que les courants de bord s'enfoncent, ils s'affaiblissent en surface et s'intensifient en profondeur. On ne représente ici que les trois principales circulations thermohalines, deux profondes et une intermédiaire, le reste de la circulation en tirets n'étant pas détaillé.

plongée des eaux sont révélées le long des côtes françaises, libyennes (les moins bien observées du bassin), égyptiennes et en mer Égée, certaines très distantes des sites de convection. Plus précisément, l'analyse physique montre le rôle déterminant joué par la rotation terrestre, qui interdit toute plongée des eaux loin de la côte. Cette contrainte, aussi durable que notre planète, implique que les zones de convection ne seront jamais le siège de plongée des eaux, contrairement à la vision qui prévalait jusqu'à maintenant. Nos résultats modifient ainsi la vision traditionnelle d'un "tapis roulant" s'enfonçant dans des zones de convection pour la remplacer par l'image d'un "anneau côtier plongeant" (cf. illustration).

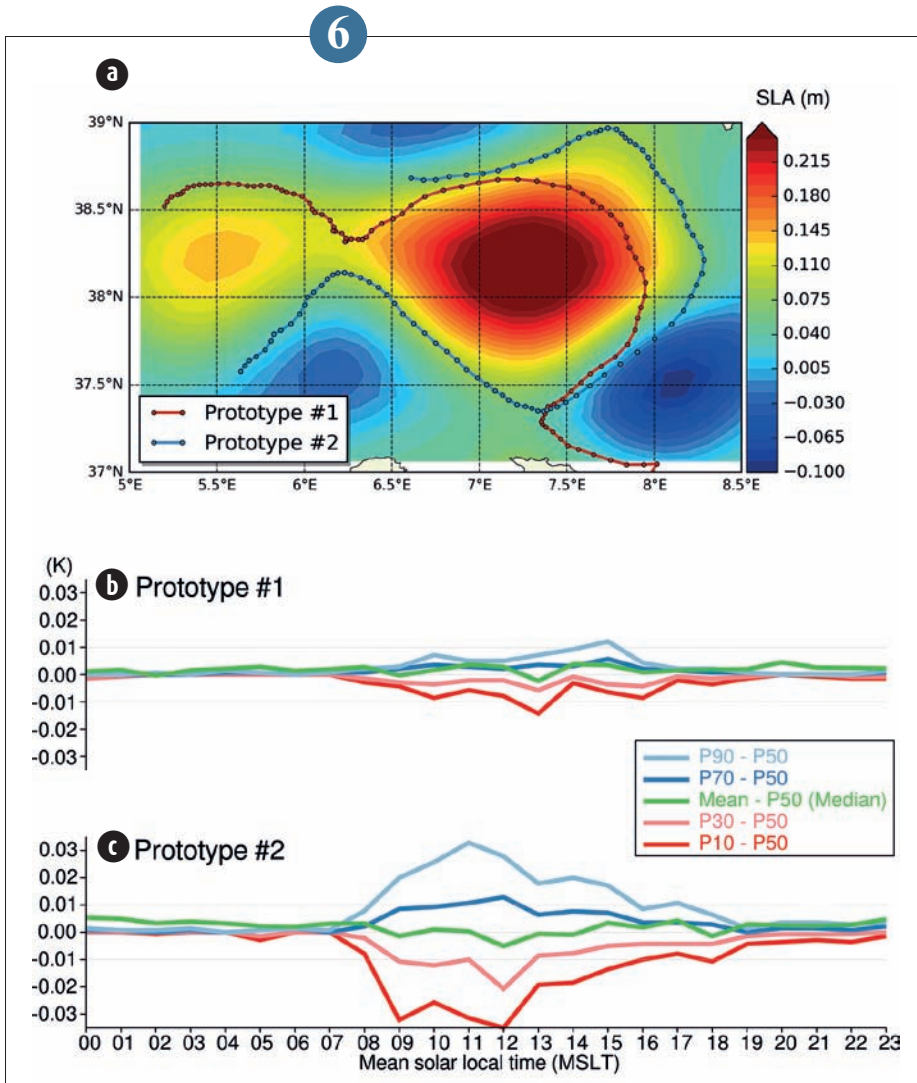
5

## Bouée dérivante de nouvelle génération pour une mesure fiducielle de référence de la température de surface de la mer

Le lancement du premier satellite Copernicus de la série Sentinel-3 en 2016 a inauguré une nouvelle ère : le suivi avec une précision et une résolution inégalées de la température de surface de la mer. Le radiomètre embarqué répond à des spécifications plus avancées que ses prédécesseurs. Atteindre le niveau de performance spécifié pour les inversions de mesures du radiomètre requiert alors, pour l'étalonnage et la validation, des moyens d'observations in situ plus précis. Une bouée dérivante de nouvelle génération a été développée dans le cadre d'un projet Copernicus initié par EUMETSAT. Elle s'appuie sur le standard international de bouée dérivante lagrangienne avec baromètre, à laquelle est adjoind un capteur de référence pour la température de la mer, mesurant aussi la pression d'immersion. Les mesures horaires, collectées en quelques minutes via la constellation Iridium, renseignent aussi sur la variabilité de surface.

L'innovation majeure est le raccordement à la chaîne d'étalonnage, à quatre étapes du cycle de vie de la bouée. Le capteur employé est étalonné en laboratoire de métrologie. Après intégration, la bouée est vérifiée par ce même laboratoire. A la mise à l'eau de la bouée, une mesure co-localisée est effectuée par un instrument de précision, lui aussi étalonné régulièrement en laboratoire. Quand la bouée est récupérée en fin de vie, le capteur est de nouveau vérifié en laboratoire pour estimer une dérive potentielle. Même si toutes les bouées ne subiront pas toutes ces étapes (seule la première étant obligatoire), ce protocole permettra d'établir si ces bouées peuvent être in fine qualifiées comme fournissant des mesures fiducielles de référence. Deux prototypes ont été déployés à ce jour, 100 bouées seront mises à l'eau d'ici 2021.

6



(a) Trajectoires des deux bouées prototypes entre le 29 mai 2018 et le 13 juin 2018 en Mer Méditerranée, superposées sur une carte d'anomalies du niveau de la mer sur la même période.  
 (b) Sur cette même période, écarts moyens entre des percentiles de la distribution des mesures sur 5 minutes échantillonnées à 1 Hz et la médiane de la distribution, en fonction de l'heure solaire, pour la première bouée.  
 (c) Idem pour la seconde bouée.  
 La première bouée évolue à proximité de tourbillons, où les eaux de surface sont bien mélangées, tandis que la seconde bouée évolue plus loin des tourbillons ; les distributions de températures de surface de la mer alors observées indiquent une surface plus stratifiée verticalement (la bouée oscillant et le capteur de température échantillonnant ainsi différents niveaux sous la couche de surface). Ces différences sont importantes à prendre en compte lors de la comparaison avec les inversions des mesures par radiomètre embarqué sur satellite.

# Techniques, campagnes et produits d'observation

Prévoir les nuages et les précipitations est un enjeu pour les services météorologiques. D'une taille inférieure à la résolution des modèles, les nuages mettent en œuvre des mécanismes chaotiques ou à effet de seuil. Il est difficile de prévoir exactement leurs caractéristiques morphologiques, leur effet sur l'ensoleillement, quand ils vont précipiter, où, et en quelle quantité. C'est questions sont pourtant cruciales, comme nous le rappellent les inondations de l'Aude en octobre 2018. De nombreux travaux sont donc menés pour mieux caractériser les nuages, à l'échelle globale depuis l'espace, ou en pénétrant et en suivant des nuages à l'aide de drones, ou bien encore en étudiant leur activité électrique, mesurable opérationnellement et assimilable par un modèle. L'observation en temps réel par les radars des réseaux opérationnels peut fournir des estimations de « lame » d'eau dont on améliore sans cesse la qualité.

Avec AEOLUS, l'Europe s'est dotée du premier satellite capable de mesurer le profil vertical du vent partout sur le globe, du sol jusqu'à la basse stratosphère, avec pour objectif d'améliorer les prévisions météorologiques, notamment sous les Tropiques. Plusieurs satellites français et européens (MERLIN, MicroCarb, IASI-NG) vont par ailleurs être lancés et mesureront la concentration en gaz à effet de serre. Ces missions sont préparées par des campagnes de mesures, qui servent également à valider la qualité des modèles de qualité de l'air, moins bien fournis en données d'observations que les modèles météorologiques.

De plus en plus de données opportunes sont acquises par des capteurs connectés. Un nouvel exemple, original, nous est donné avec l'équipement de tortues par un centre de biologie marine de La Réunion qui devrait fournir des informations précieuses et peu coûteuses sur le couplage entre l'océan et l'atmosphère dans cette région cyclonique.

Si la récupération et l'exploitation des données acquises par les radiosondes pendant leur redescente sur terre existent depuis longtemps dans le monde de la recherche, elles sont récentes pour la prévision. Elles devraient permettre de mieux valoriser les radiosondages opérationnels pour un surcoût négligeable.

1

## Techniques et produits d'observation

### Utilisation des profils verticaux de réflectivité simulés par le modèle AROME pour l'amélioration de la lame d'eau radar

Convertir la réflectivité mesurée par les radars à l'altitude du faisceau en taux de précipitation au niveau du sol est un véritable défi.

Aujourd'hui, pour la production de la lame d'eau opérationnelle Panthere, cette transformation se fait grâce à un profil vertical de réflectivité simplifié estimé à partir des données radar volumiques et utilisé indifféremment sur tout le domaine radar. Cette technique montre ses limites notamment lorsque la structure verticale des précipitations est très variable sur la région (ex : en amont et en aval d'un front).

La nouvelle méthode développée tire pleinement profit de l'information issue du modèle de prévision immédiate AROME-

PI, et notamment de sa capacité à simuler des profils de précipitation réalistes. Cette fois, on cherche à reconstruire le profil de précipitation en chaque point du domaine radar. Pour cela, en un pixel radar donné, les données de réflectivités observées sont comparées à un jeu de profils simulés (à échéance +3 h) dans son voisinage. Le taux de précipitation associé au profil simulé le plus en accord avec l'observation est ainsi sélectionné pour le calcul de la nouvelle lame d'eau.

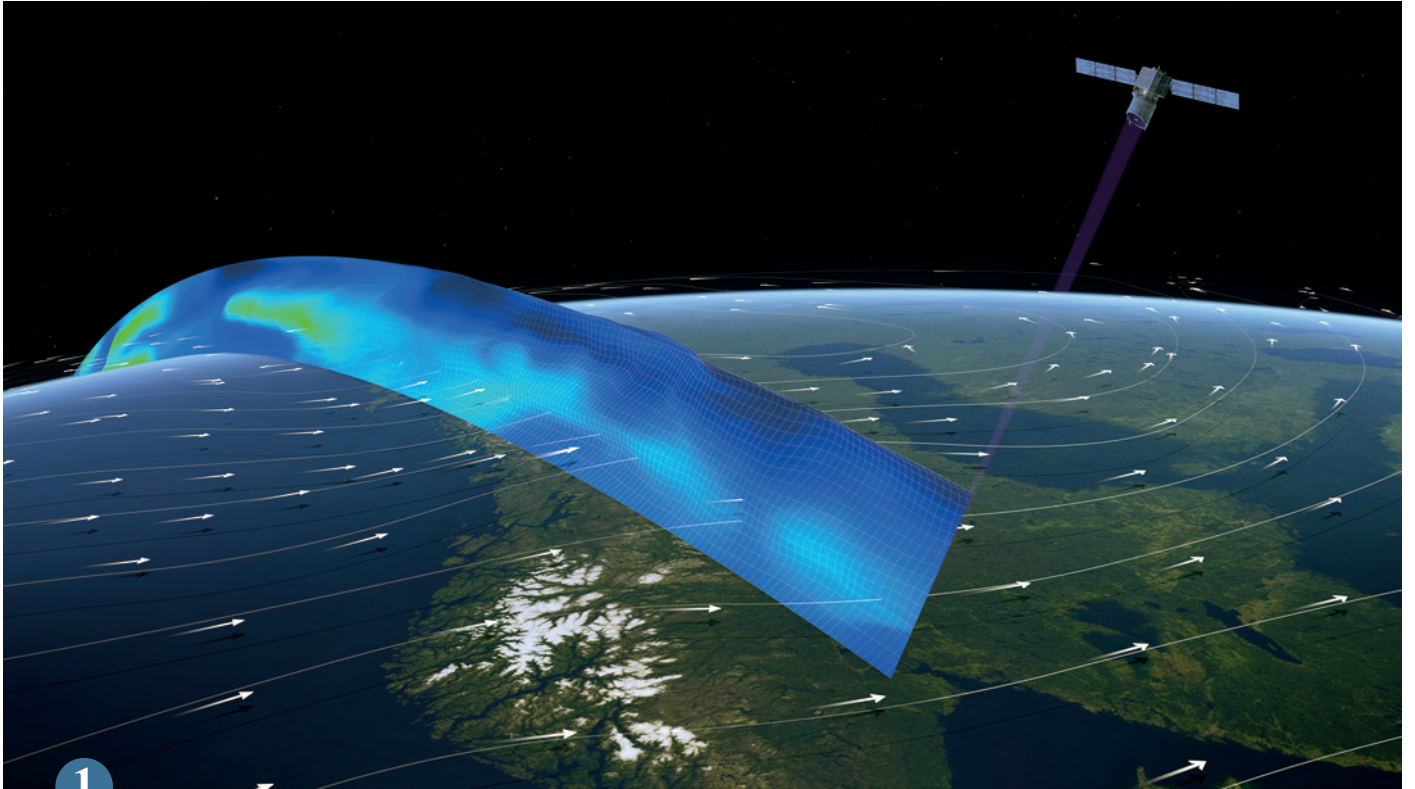
Les premiers résultats obtenus notamment sur l'épisode pluvieux du 3 mars 2017 sont très prometteurs (cf. figure). Les lames d'eau obtenues avec la nouvelle méthode sont en bien meilleur accord avec celles mesurées

par les pluviomètres. L'utilisation de données simulées permet de mieux appréhender l'évaporation des précipitations (virgates) sous le faisceau radar à l'Est ainsi que les plus forts cumuls observés près des Pyrénées.

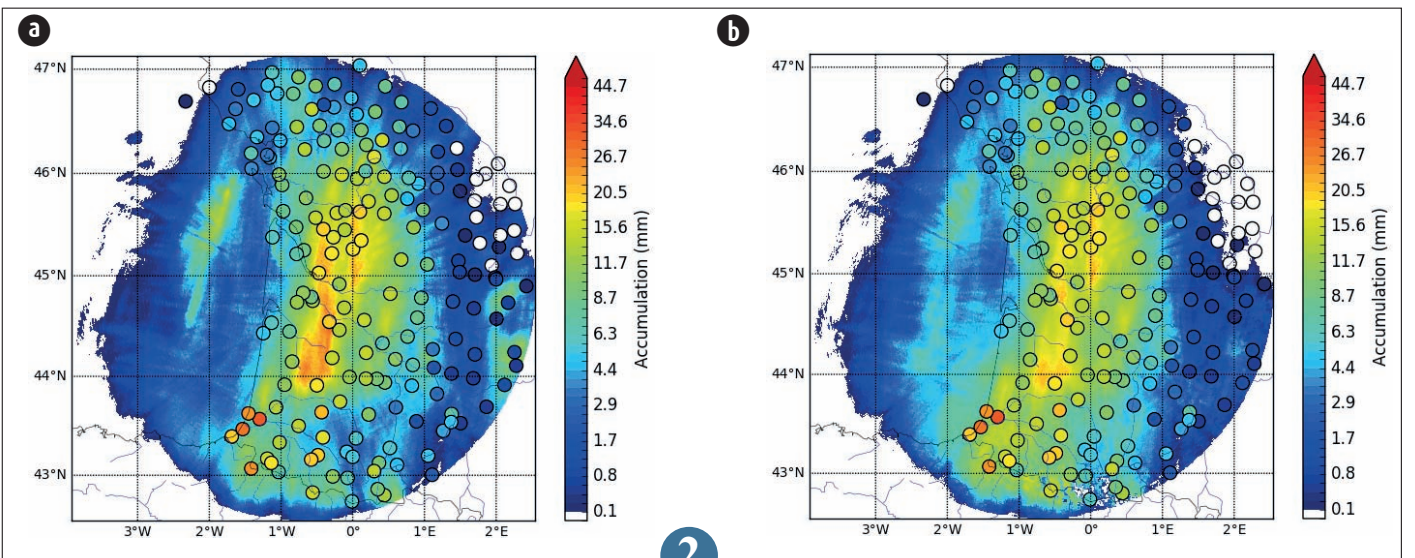
La prochaine étape du travail vise à transposer et adapter la méthode aux zones de montagne où les masques sont nombreux et la variabilité des profils de précipitation plus importante.

2





▲ Vue d'artiste du lidar vent spatial AEOLUS (lancé le 23 août 2018) sondant l'atmosphère. © ESA



▲ Lames d'eau 6 h Panthere (a) et avec application de la nouvelle méthode utilisant la prévision AROME-PI (b) calculées entre 18 h le 03/03/2017 et 0 h UTC le 04/03/2017 pour le radar de Bordeaux (domaine de 255 km de rayon). Les cumuls observés par les pluviomètres sont indiqués par des disques de couleur.

## Restitution de la microphysique des nuages à l'échelle globale à partir des satellites météorologiques géostationnaires

Les radiomètres imageurs des satellites météorologiques géostationnaires de dernière génération (MSG, Himawari8, GOES16/17) comportent des canaux dans le visible, proche infrarouge et infrarouge permettant de cartographier la microphysique des nuages. Il est donc possible d'obtenir à haute fréquence temporelle une couverture mondiale de la phase thermodynamique et taille des gouttes et cristaux de glace au sommet des nuages, ainsi que le contenu en eau ou en glace de ces nuages.

Le Centre de Météorologie Spatiale est engagé dans le projet SAF NWC financé par EUMETSAT pour développer des modules logiciels permettant d'identifier les nuages et d'en restituer hauteur et microphysique pour l'ensemble des satellites météorologiques géostationnaires. La méthode développée pour la microphysique nuageuse repose sur une méthode de seuillage de bandes spectrales infrarouges (pour le calcul la phase), et de comparaison des mesures à des simulations (basées sur le modèle DISORT) en particulier dans des bandes du proche-infrarouge qui présentent des sensibilités à la phase (eau/glace) et la taille

des particules nuageuses. La validation est effectuée en utilisant des mesures spatiales des instruments actifs de l'A-Train (radar CPR sur CloudSat et Lidar CALIOP sur CALIPSO).

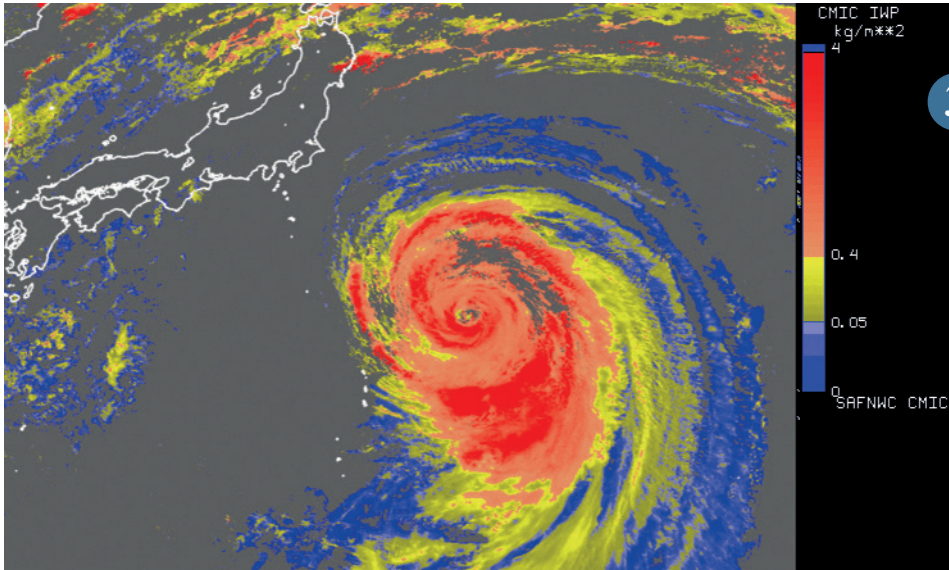
Ce logiciel développé au sein du SAF NWC est utilisé par le Centre de Météorologie Spatiale pour cartographier les propriétés macro et microphysiques des nuages à l'échelle mondiale. La figure illustre la restitution du contenu intégré en glace lors du passage du typhon Atsani au large du Japon le 23 Août 2015 à 2 h UTC. Ces produits, largement utilisés par Météo-France, sont également mis à disposition de la communauté scientifique française.

3

## Doubler le nombre de radiosondages à moindre coût : le radiosondage à la descente

En dépit des progrès réalisés dans l'observation par satellite, le réseau mondial de radiosondages garde le statut privilégié de colonne vertébrale du système d'observation de l'atmosphère. Mais les coupes budgétaires parviennent à diminuer ce réseau puisque ce mode d'observation reste cher (entre 100 et 300 € par sondage). Dans ce contexte, la collecte d'observation à la descente de la sonde permet d'augmenter fortement le nombre d'observations, à surcoût quasi nul en terrain plat. L'Allemagne et la Finlande produisent des messages de ce type depuis plus d'un an avec du matériel Vaisala. L'assimilation 4D des radiosondages, en tenant compte de la pente réelle effectuée par la sonde à la montée et à la descente, permettrait de réellement tirer parti de ces données nouvelles, à condition que la qualité soit au rendez-vous. Matériel et logiciels étant optimisés pour la mesure à la montée, la qualité n'est pas garantie à la descente. CNRM/GMAP a procédé au monitoring des données disponibles sur plusieurs semaines au printemps 2018. Les données à la montée servent de référence. La comparaison au modèle ARPÈGE montre une qualité équivalente en troposphère, particulièrement si la vitesse est réduite par un parachute. En stratosphère, si la température est moins bonne, le vent semble étonnamment meilleur à la descente qu'à la montée. Ce constat découle d'une confiance excessive dans le modèle. On sait d'expérience que les vents modèles sont de qualité modeste en stratosphère. La forte vitesse de chute et les algorithmes de lissage y produisent des mesures de vent trop uniformes. Si les fabricants de sondes n'adaptent pas leurs systèmes à cette nouvelle pratique, une partie des données de sondage à la descente seront peu utiles en PNT.

4

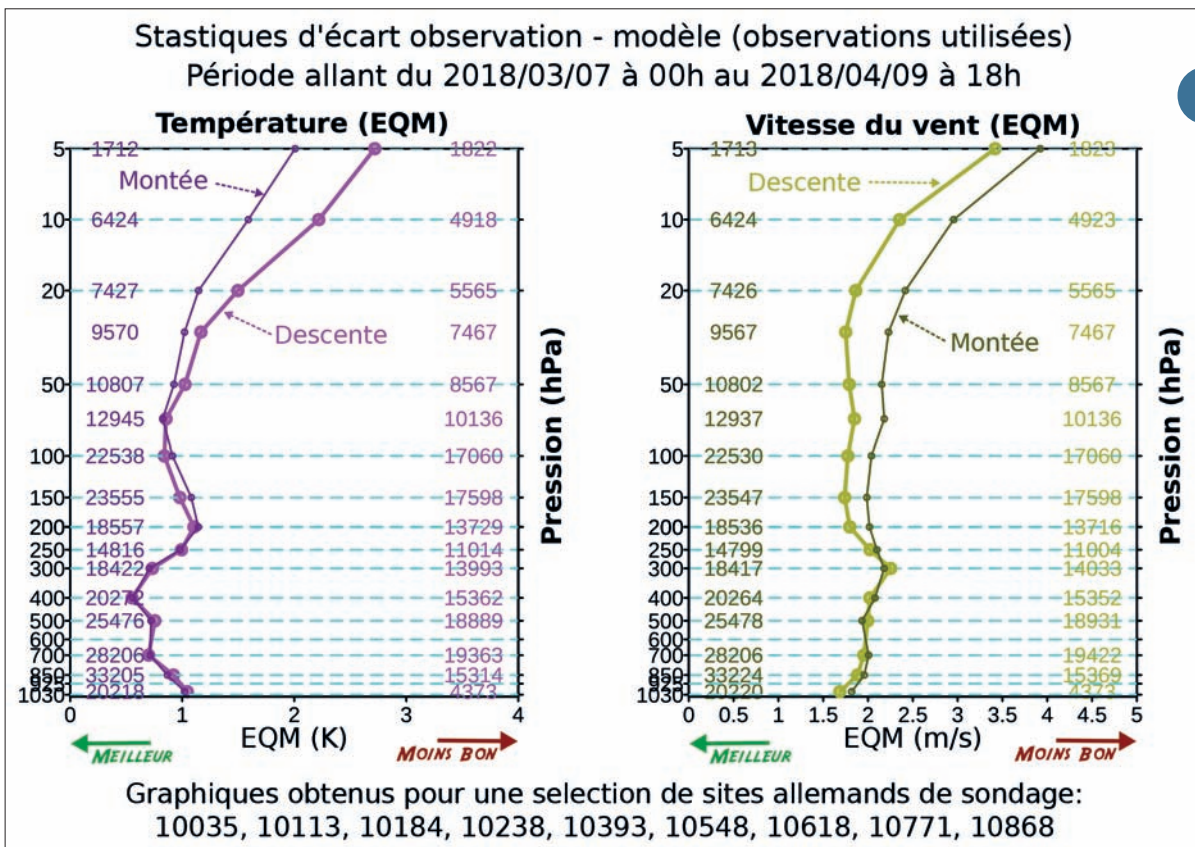


3

Exemple de cartographie du contenu en glace des nuages avec l'imagerie AHI du satellite Himawari 8  
Le typhon Atsani au large du Japon  
23 Août 2015 à 02 h UTC

Les courbes représentent une estimation de la distance entre les observations de température et de vent et le modèle (référence dans le cas présent) en fonction de la pression atmosphérique.  
La partie supérieure représente la stratosphère, en dessous la troposphère. Les courbes de montée (fines et sombres) sont très similaires aux courbes de descente (épaisses et claires) dans la troposphère. Ce n'est pas le cas en stratosphère où les écarts montée/descente sont marqués et opposés entre température et vents.

4



## Premières données du lidar vent spatial AEOLUS

Le lidar vent spatial AEOLUS a été mis en orbite le 22 Août 2018. Mission Earth-Explorer de l'Agence Spatiale Européenne, AEOLUS constitue une première mondiale. Le développement du lidar a duré une quinzaine d'années au cours desquelles de nombreuses difficultés techniques ont dû être résolues. Le CNRM est impliqué dans le développement du segment sol de la mission depuis 2004 avec la mise au point des processeurs de calibration, L2A (propriétés optiques des aérosols) et L2B (vents). Les premières mesures de vent sont arrivées 10 jours après le lancement à l'issue d'une longue phase de mise en route. La qualité des mesures de vent, produit principal de la mission, a été très vite évaluée par des comparaisons avec les vents analysés par le modèle du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme. Les mesures présentent un biais de l'ordre de 1m/s, et une précision de 2 à 3 m/s sur la voie de détection Mie dédiée aux aérosols, et 4-5m/s sur la voie de détection Rayleigh (molécules). Un important travail a dû être mené sur la calibration instrumentale pour arriver à ce niveau. Il n'est pas terminé, le biais doit encore être réduit. L'évaluation de l'apport des mesures de vent à la prévision météorologique est en cours au CEPMMT et au CNRM. Les premiers résultats sont prometteurs (impact positif) et devront être confirmés dans la durée. L'assimilation des propriétés optiques des aérosols, produits secondaires de la mission – est à l'étude. Le CNRM est impliqué dans le maintien opérationnel de la mission d'une durée nominale de 3 ans.

5

## Campagnes de mesures

### Une intrusion stratosphérique détectée à partir des mesures de la campagne aéroportée GLAM Comparaison à des résultats de modèle et analyses

Les intrusions stratosphériques sont des descentes, dans la troposphère, d'air stratosphérique pauvre en H<sub>2</sub>O mais riche en O<sub>3</sub>. Un critère de détection repose sur une tropopause dynamique, comme utilisé par Tyrlis en 2014 pour établir une climatologie et typologie des intrusions selon leur profondeur de pénétration en région Méditerranéenne à partir des ré-analyses ERA-INTERIM (1979-2012).

Ici, on explore les mesures d'espèces chimiques à courte (O<sub>3</sub>, CO) et longue durées de vie (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) de la campagne aéroportée GLAM du projet CHARMEX durant laquelle une intrusion stratosphérique a été identifiée le 10 août 2014 à 08hTU à 300 hPa, 33°N et 28-29°E. L'intrusion se distingue par des anomalies positives d'O<sub>3</sub> (+50ppbv) et CO<sub>2</sub> (+4ppmv) associées à des anomalies négatives de CO (-20ppbv) et CH<sub>4</sub> (-40ppbv). Cet air a donc antérieurement transité dans la troposphère puisque le CO<sub>2</sub> n'est pas à son minimum (figure 1) comme dans de

l'air purement stratosphérique. Analyses (MERRA2 et CAMS), modèle (MOCAGE) et mesures GLAM sont en accord. Ainsi, les coupes méridiennes issues de MERRA2 fournissent le contour de cette intrusion via la tropopause dynamique (fixée à 2 PVU, figure 2a) et fort gradient d'O<sub>3</sub> (figure 2b). MOCAGE décrit une intrusion pénétrante pauvre en CO (figure 3). Enfin, CAMS suggère une pénétration plus profonde intensément pauvre en CH<sub>4</sub> (figure 4a) mais pas en CO<sub>2</sub> (figure 4b). L'intrusion est formée à proximité du courant jet, et sa pénétration est ici favorisée par les branches descendantes des cellules de Hadley (Mousson Africaine) et Walker (Mousson Asiatique).

Ces intrusions sont essentielles à prendre en compte dans les bilans chimiques et études de tendances en raison de leur fréquence et persistance en zone Méditerranéenne et des anomalies induites.

6

### Le projet STORM (Sea Turtles for Ocean Research and Monitoring)

STORM est un programme exploratoire initié en 2018 par le LACy et le Centre d'Étude et de Découverte des Tortues Marines (CEDTM) de La Réunion dans le cadre du programme de recherche européen INTERREG-V « ReNovRisk-Cyclones et Changement Climatique ». Il vise à utiliser, pour la première fois en région tropicale, des tortues marines (TM) équipées de capteurs environnementaux pour étudier les propriétés de la couche de mélange océanique.

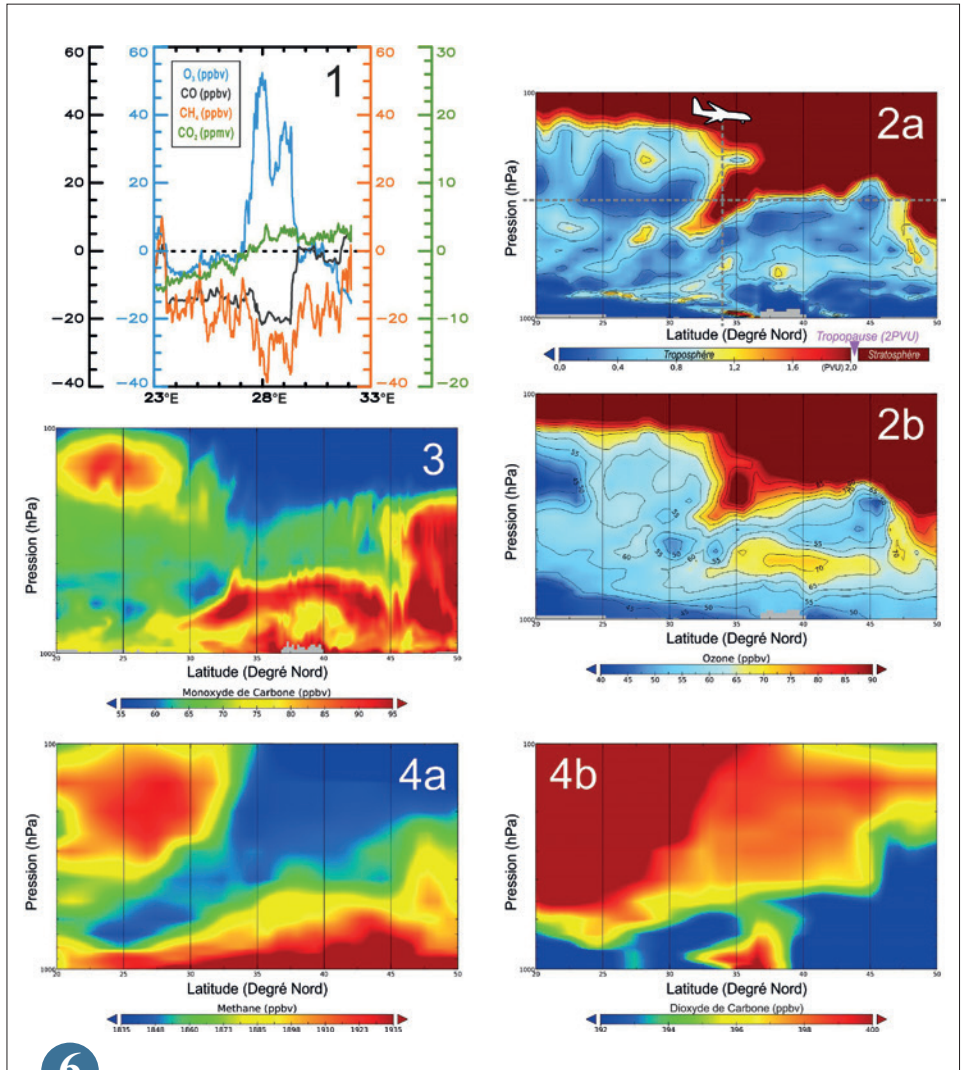
A partir de janvier 2019, une douzaine de tortues caouannes (capturées dans des filets de pêche ou blessées par des bateaux près de La Réunion), seront équipées de balises Argos et de capteurs in situ (température, salinité, pression) par le CEDTM, puis relâchées dans l'océan depuis La Réunion. Bien que le déploiement de balises Argos sur des TM soit courant chez les biologistes marins pour étudier les routes migratoires et le comportement de diverses espèces de TM à travers le monde, l'originalité et l'unicité de STORM réside dans sa capacité à surveiller en parallèle les propriétés de l'océan jusqu'à plusieurs centaines de mètres

sous la surface. Les TM pouvant parcourir plusieurs milliers de kilomètres par an (voir figure), des profils spatialement explicites de la température de surface de la mer (SST) et des profils hydrographiques seront obtenus sur une grande partie de l'océan Indien sans aucune intervention humaine, et transmis en temps réel par télémesure satellitaire. Les données recueillies serviront à évaluer la performance des modèles couplés atmosphère-océan (composante océanique et interactions OA) à diverses échelles spatio-temporelles. La possibilité d'assimiler les données transmises par les TM dans les modèles océaniques régionaux pour améliorer la description de la CMO et les interactions OA dans les systèmes couplés sera également étudiée. STORM contribuera par ailleurs à la promotion de la culture scientifique par le biais de collaborations avec des dizaines d'écoles primaires de La Réunion (« programme adopte une tortue ») pour sensibiliser le public à la question du changement climatique.

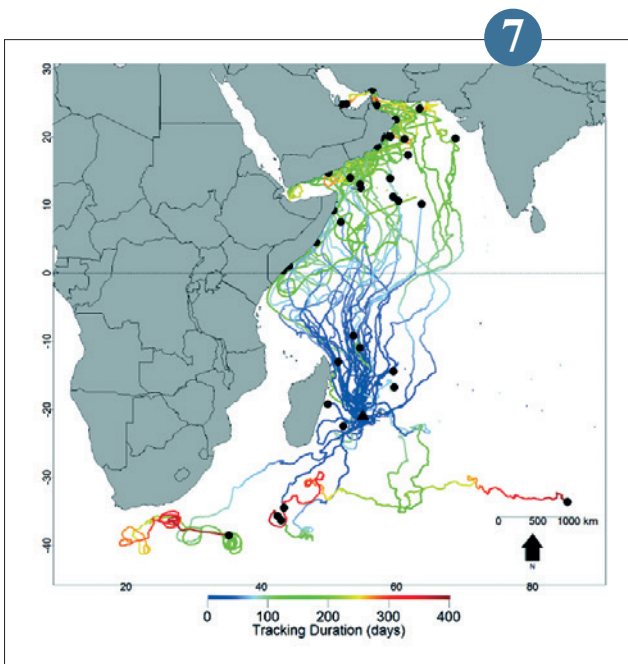
7

Le satellite AEOLUS a été installé sur le cône de fixation sur la fusée VEGA. La coiffe va bientôt se refermer.

© ESA



Anomalies d'O<sub>3</sub>, CO, CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> mesurées à 300 hPa pendant la campagne aéroportée GLAM (1). Coupes méridiennes à 28-29°E (incluant la position instantanée des mesures avion) de la tropopause dynamique fixée à 2 PVU (MERRA2, 2a) et concentrations en O<sub>3</sub> (MERRA2, 2b), CO (MOCAGE, 3), CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub> (CAMS, 4a et 4b).



Carte de suivi spatio-temporel d'une vingtaine de tortues Caouannes équipées de balises Argos relâchées de La Réunion pendant le projet COCA-LOCA (D'après Mayeul et al. 2014 : The spatial ecology of juvenile loggerhead turtles (*Caretta caretta*) in the Indian Ocean sheds light on the « lost years » mystery. Mar. Biol. 161, 1835-1849).

## Traquer les gaz à effet de serre en avion et en ballon pour préparer de futures missions spatiales

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le méthane ( $\text{CH}_4$ ) sont les deux principaux gaz à effet de serre émis par les activités humaines. En 2018, l'initiative MAGIC a débuté. Son but : mieux connaître la concentration des gaz à effet de serre et leur répartition dans l'atmosphère au moyen de campagnes multi-instrumentées annuelles. Elle s'appuie sur SAFIRE qui met à disposition des scientifiques son Falcon 20 qui mesure in-situ les concentrations de gaz, la température, l'humidité et le vent entre 0 et 11 km d'altitude. MAGIC repose également sur l'expertise du CNES et du CNRS dans le déploiement de ballons météorologiques depuis les Landes et le Loiret. Lors de deux campagnes en janvier et mai 2018, au total, deux avions de recherche, dix-neuf lâchers de sondes atmosphériques sous ballons, quatre sites instrumentés du réseau ICOS et une dizaine d'instruments de mesure de la concentration des gaz ont été déployés pour cette expérience inédite.

Elle améliorera la connaissance sur les gaz à effet de serre en particulier dans la haute troposphère et la stratosphère, la plupart des réseaux de mesure existant ne réalisant que des mesures à la surface. Elle prépare aussi les futures missions spatiales françaises pour le suivi des gaz à effet de serre annoncées lors de la COP21 à Paris : Merlin pour la mesure du méthane, MicroCarb pour la mesure du dioxyde de carbone et IASI-NG pour la mesure de la composition atmosphérique et du climat.

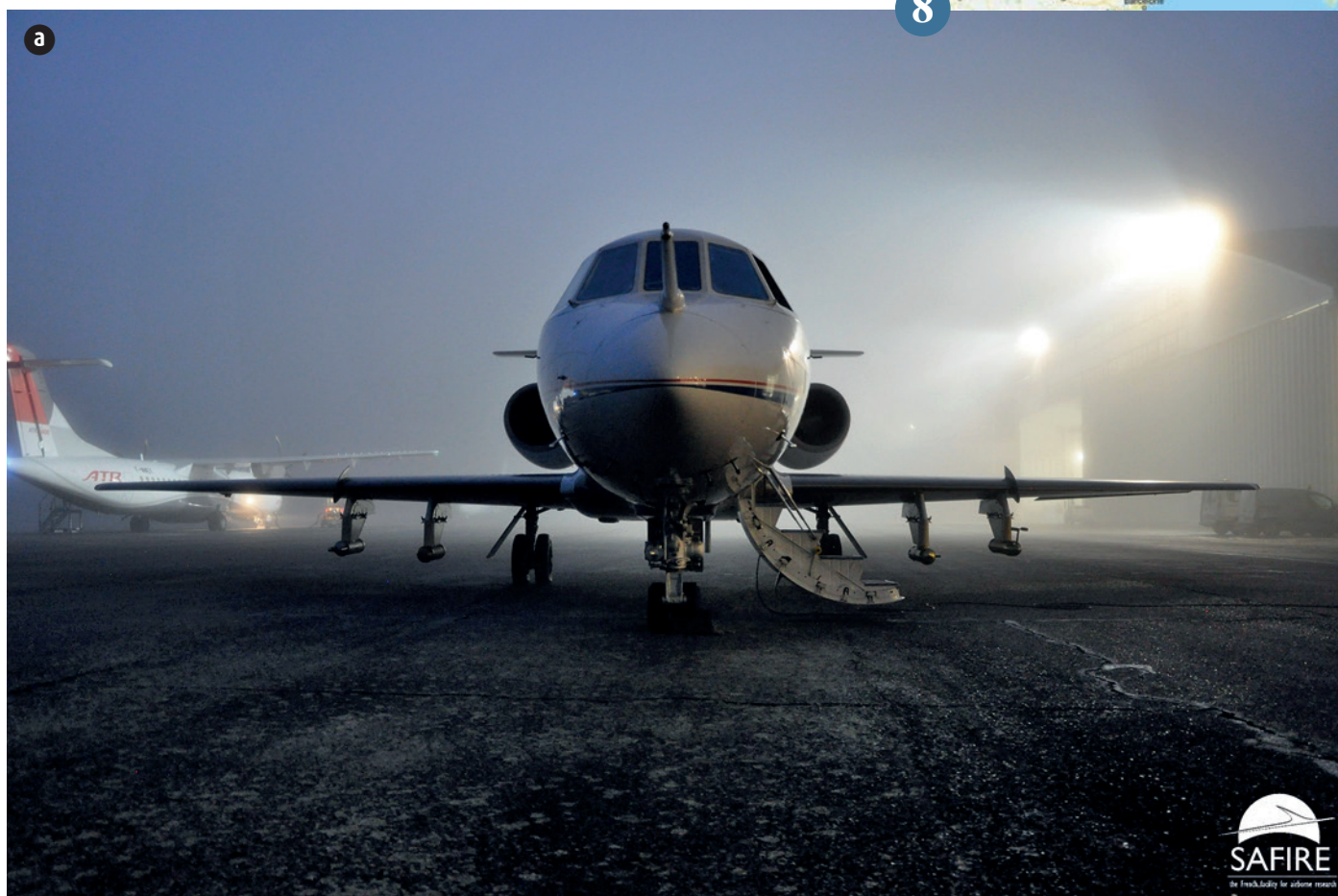
En mai 2018, une coopération étroite avec le Centre allemand pour l'aéronautique et l'astronautique (DLR) a permis un vol conjoint entre le Falcon 20 de SAFIRE et l'avion HALO du DLR et de bénéficier de la complémentarité entre les instruments de mesure embarqués dans les deux vecteurs.

8

b) Plan de vol.  
© SAFIRE



a) Le Falcon 20 de Safire avant son décollage pour le vol de mesures.  
© SAFIRE / Jean-Christophe Canonici



## SAFIRE à la poursuite des orages dans le ciel méditerranéen

Les scientifiques sont encore loin de connaître et de comprendre tous les phénomènes associés aux éclairs et leurs liens avec les nuages d'orage. Le projet ANR-16-CE04-0005EXAEDRE (EXploiting new Atmospheric Electricity Data for Research and the Environment, coordonné par le Laboratoire d'Aérodynamique, CNRS/ Université Toulouse III – Paul Sabatier) vise d'une part à améliorer les connaissances des différents processus microphysiques, dynamiques et électriques des nuages d'orages qui conduisent au déclenchement et à la propagation d'un éclair, et d'autre part à quantifier le bénéfice de l'information « éclair » pour des applications de suivi des orages en temps réel et l'amélioration des prévisions météorologiques en assimilant la donnée « éclair » dans les modèles de prévision numérique du temps.

Le volet expérimental du projet EXAEDRE s'articule autour d'observations déjà collectées durant le programme HyMeX et des mesures de l'activité électrique réalisées par le réseau SAETTA de détection tridimensionnelle des éclairs depuis 2014 en Corse dans le cadre de la Plateforme CORSiCA d'Observations Atmosphériques et le réseau opérationnel Météorage ; il s'appuie également sur le développement de nouveaux détecteurs d'éclairs, et sur une campagne de terrain en Corse. Durant l'année 2018, SAFIRE a ainsi assuré la préparation puis la réalisation des vols instrumentés du projet EXAEDRE depuis la base aérienne de Solenzara en Corse. En un mois, le Falcon 20 de Safire a accumulé des données uniques, fruit de la collaboration entre laboratoires de recherche scientifique et de développement aéronautique et spatial comme d'industriels.

9



- ®▶
- a) Atterrissage sous la pluie pour le Falcon 20 de Safire après sa mission au milieu des éclairs.  
© CNRS / C. Fresillon
  - b) Vue de l'avant du Falcon 20 de Safire à proximité d'une « enclume » de cumulonimbus.  
© SAFIRE / D. Duchanoy
  - c) La caméra située à l'avant du Falcon 20 a capturé l'impact d'un éclair sur sa perche anémométrique.  
© SAFIRE

# Recherche et aéronautique

---

Dans le cadre de son investissement en recherche et développement sur les phénomènes météorologiques impactant l'aéronautique, l'établissement Météo-France a poursuivi en 2018 ses activités pour une modélisation des phénomènes au sol (sur aéroport) et en altitude. L'amélioration de la prévision du brouillard ou des plafonds bas reste d'actualité, pour répondre aux besoins des opérateurs sur aéroport, par exemple pour le déclenchement de procédures LVP (Low Visibility Procedures). Le projet IniTAF dont l'objectif est de fournir des initialisations de TAF, a vu la mise au point d'une nouvelle méthodologie de génération de ces ébauches et bénéficiera rapidement des améliorations de la prévision des phénomènes qui impactent les aéroports.

Parmi les phénomènes d'altitude, la turbulence et la convection ont fait l'objet d'un focus particulier cette année, y compris dans le cadre d'un des projets de déploiement SESAR. L'information d'altitude des sommets des nuages convectifs est particulièrement utile à l'aviation qui évolue sur les trois dimensions spatiales. De même, les usagers aéronautiques souhaitent pouvoir anticiper les conséquences de phénomènes à risque tels que les orages ; ainsi les travaux d'estimation de la probabilité de déclenchement de la convection auront un débouché certain. Météo-France a aussi poursuivi ses autres activités dans le cadre du programme SESAR, projets de déploiement ou SESAR2020, avec un fort investissement dans la conception et le développement du futur système d'échange d'information météorologique en conformité avec l'environnement SWIM, et avec la contribution au développement des futurs services et produits harmonisés à l'échelle de l'Europe.

1

---

## Traitement de profils verticaux issus du modèle AROME par des méthodes d'apprentissage - application à la prévision du plafond nuageux aéronautique

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

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

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

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

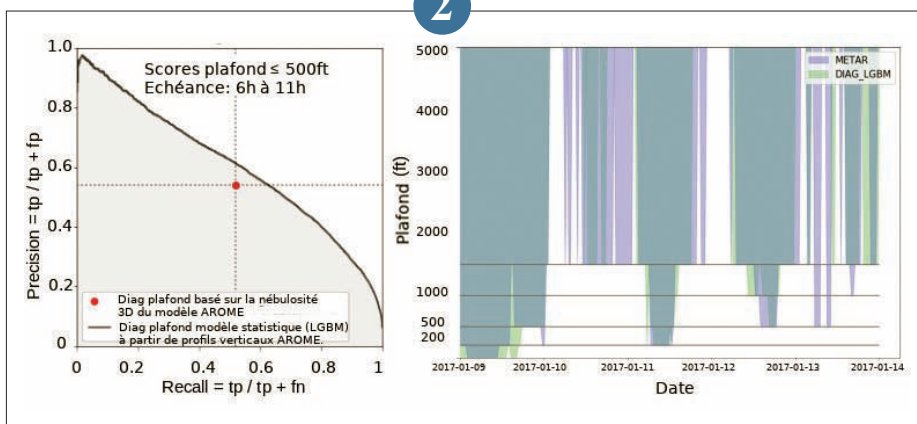
grand nombre de prédicteurs. Des scores sont calculés pour chaque modèle. Ils sont ensuite comparés aux scores des prévisions du plafond issues de la persistance et d'un diagnostic directement extrait du champ de nébulosité tridimensionnelle du modèle AROME. Cette validation est complétée par l'analyse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

2





La prévision de la convection permet d'anticiper les manœuvres d'évitement de nuages convectifs (ici, de nuit). © JPC VAN HEIJST



A gauche : Scores rappel/précision pour la détection des événements de plafond aéronautiques - 500 ft. En rouge : score obtenu pour un diagnostic de plafond aéronautique standard basé sur le paramètre de nébulosité 3D du modèle AROME. En noir : courbe des couples rappel/précision obtenus avec une méthode d'apprentissage basée sur la production d'un ensemble d'arbres de décisions (LGBM - Light Gradient Boosting Method). A droite : Série temporelle du 9 janvier 2017 au 14 janvier 2017 pour l'aéroport Paris CDG. Comparaison des données METAR aux résultats du diagnostic obtenu par méthode d'apprentissage LGBM sur une durée de 5 jours.

## Projet IniTAF - une méthodologie pour l'initialisation des TAF

Dans le cadre de sa mission statutaire d'appui météorologique au trafic aérien, Météo-France fournit des messages réglementaires TAF (prévisions d'aérodrome) élaborés par des prévisionnistes. Le projet IniTAF a pour objectif de fournir des initialisations de TAF, de manière à permettre aux prévisionnistes aéronautiques de se concentrer sur le soutien à l'utilisateur final, notamment lors de situations météorologiques critiques (formation de brouillard, neige, etc.), et d'accompagner le processus décisionnel. Le modèle méso-échelle AROME de Météo-France fournit les paramètres nécessaires à l'initialisation des TAF. Les travaux portent sur la mise au point d'un algorithme capable d'établir un TAF à partir de paramètres météorologiques échantillonnés toutes les heures. La complexité technique de la rédaction des TAF provient de la nécessité de représenter au mieux les variations de la situation météorologique dans le temps avec un nombre limité de groupes d'évolution. Une approche globale multi-paramètres est donc nécessaire.

Ainsi, une nouvelle méthodologie de génération de TAF basée sur l'analyse des états stables et transitoires est conçue. L'initialisation des TAF est évaluée par comparaison aux METARs.

3

## Amélioration de la prévision de turbulence aéronautique au travers d'une combinaison d'indices

Pour des raisons de sécurité et de confort pour les passagers, les pilotes cherchent à éviter les zones turbulentes. L'arrivée des EFB (Electronic Flight Bag) à bord des avions permet de disposer pendant le vol, sur la trajectoire de l'avion, d'informations concernant les zones prévues de turbulence. Cette fonctionnalité renforce les attentes des pilotes sur le niveau de précision de la prévision.

De nombreux indices de turbulence existent dans la littérature, chacun apportant des informations complémentaires sur la situation. Le travail mené vise à sélectionner les indices et à les combiner au mieux. Pour cela, les indices calculés sur ARPEGE (résolution horizontale de 0,25° - résolution verticale native du modèle) sont convertis en EDR (Eddy Dissipation Rate) à partir d'une climatologie de valeurs observées d'EDR (mesures avion). Plusieurs méthodes de sélection/comboinaison d'indices sont alors explorées parmi lesquelles la régression logistique et les forêts aléatoires. Un premier

travail est effectué sur le domaine des États-Unis où nous disposons d'observations issues de rapports de pilotes et de mesures d'EDR en vol. La méthodologie est ensuite appliquée à l'Europe.

Les scores obtenus permettent de démontrer l'intérêt de calculer les diagnostics de turbulence avec la résolution verticale native du modèle ARPEGE. Les scores démontrent aussi une amélioration des performances lorsque plusieurs indices de turbulence sont combinés entre eux.

4

## Diagnostic sur le sommet des nuages convectifs

Dans le secteur de la météorologie aéronautique, la prévision des orages demeure un enjeu important aussi bien pour la production expertisée rendue par les prévisionnistes que pour la fourniture de produits novateurs aux usagers externes (projets AeroCom et SESAR2020).

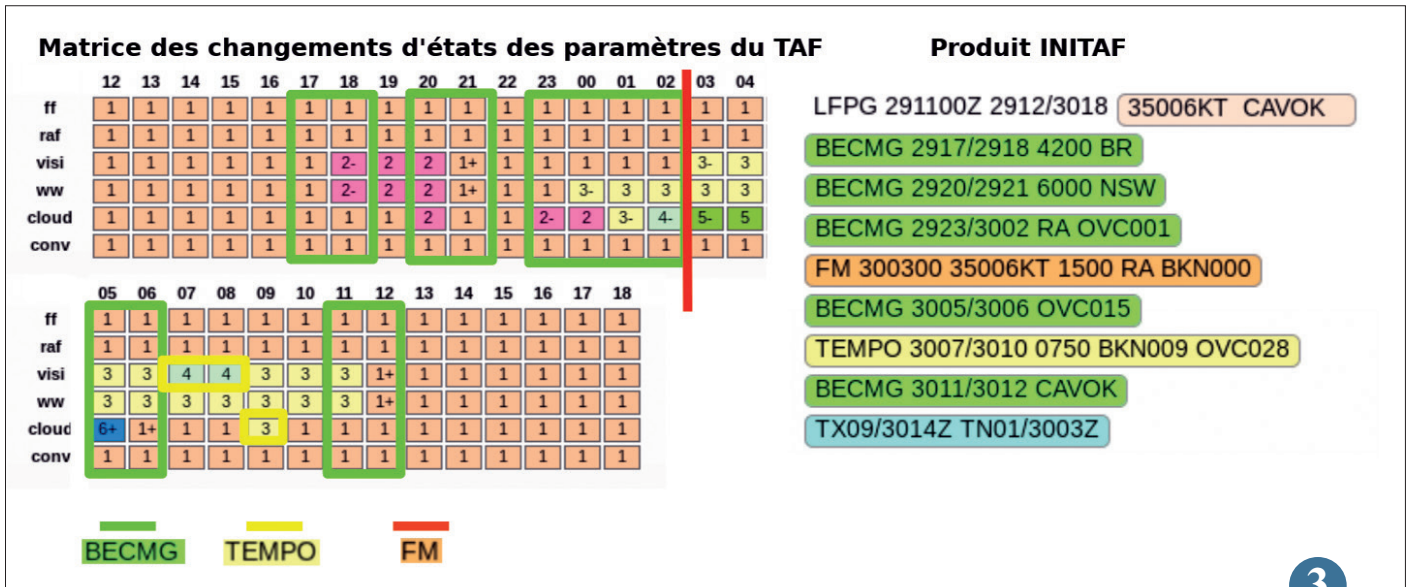
Pour assurer la sécurité des vols, les pilotes doivent éviter ces cumulonimbus, sources de grêle, de givrage par cristaux de glace (accident du vol Rio-Paris en 2009), etc... Dans un contexte d'augmentation du trafic, toute modification de routes peut engendrer des surcapacités du contrôle aérien et des retards entraînant des coûts supplémentaires. Il est donc important de fournir aux différents usagers une information précise sur la localisation 3D de ces nuages aussi bien présente que future. Si des outils fournissent déjà une information de qualité en quasi temps réel (par exemple avec le RDT), prévoir dans les prochaines heures la position précise des orages sur le globe reste un challenge.

Les modèles numériques de prévision du temps à échelle mondiale ne permettent pas de simuler les orages du fait d'une résolution spatiale encore trop lâche. Des paramétrisations, dites "schémas de convection", permettent néanmoins

d'en simuler les effets, tels que les précipitations ou la nébulosité. À partir de cette paramétrisation dans le modèle français ARPEGE, il est possible de calculer la hauteur des nuages convectifs de grande extension et d'en produire un nouveau diagnostic.

La prévision des orages étant fortement sensible aux erreurs de modélisation, une prévision probabiliste utilisant plusieurs membres du modèle devrait pouvoir améliorer la prévisibilité de ce nouveau diagnostic.

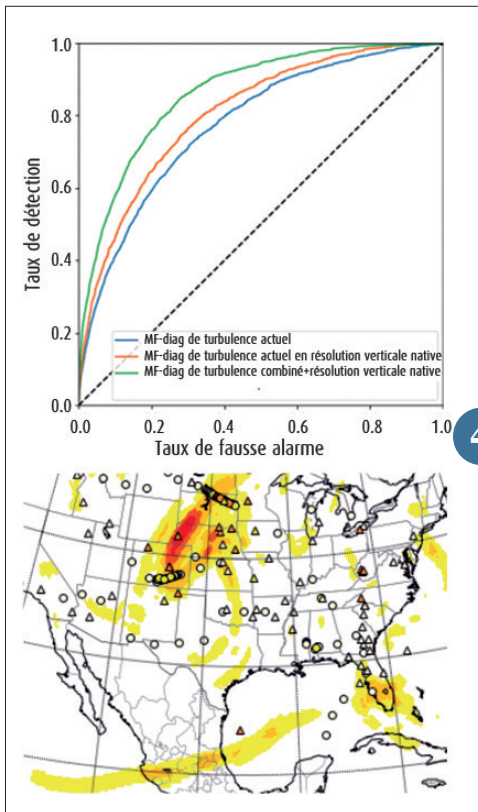
5



3



Matrice des changements significatifs des paramètres météorologiques entrant dans la composition du TAF (gauche). L'analyse des états stables et transitoires de cette matrice fournit un TAF initialisé (droite). Les évolutions de type BECMG, TEMPO et FROM sont représentées respectivement en vert, jaune et orange.



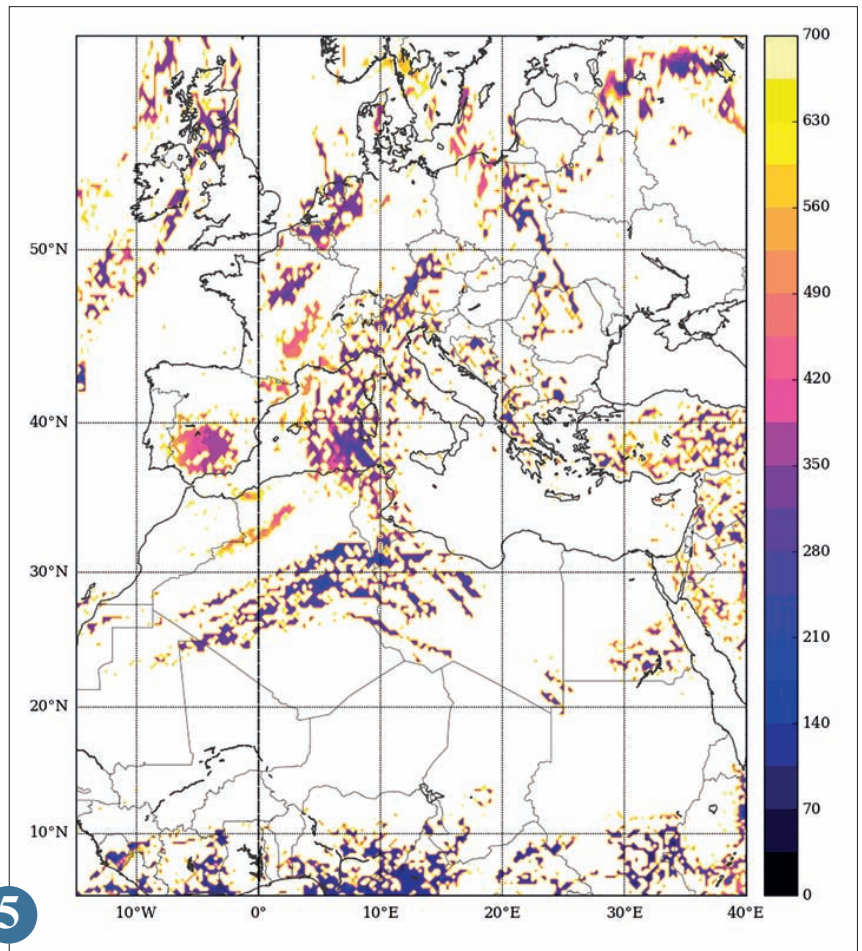
4



En haut : Courbes de performance (ROC) pour la détection d'événements de turbulence modérée ou sévère avec différents diagnostics calculés à partir du modèle ARPEGE 0.25° (1 an de données 2017 - réseau 00 UTC - échéances 12-15-18 - Observations : EDR in-situ). Le diagnostic de turbulence opérationnel à Météo-France est représenté en bleu, le même diagnostic de turbulence calculé avec la résolution verticale native du modèle est représenté en orange, et le diagnostic combiné est représenté en vert.

En bas : Exemple d'application du diagnostic combinés sur un domaine US le 30 avril 2017 à 15 UTC au FL340. Plages de couleurs : diagnostic de turbulence. Symboles : observations (triangles/reports de pilotes, cercles/EDR in-situ). Couleurs : blanc → turbulence non significative, de jaune à rouge → turbulence modérée à sévère).

Pression des sommets des nuages convectifs (en hPa) - Modèle ARPEGE.



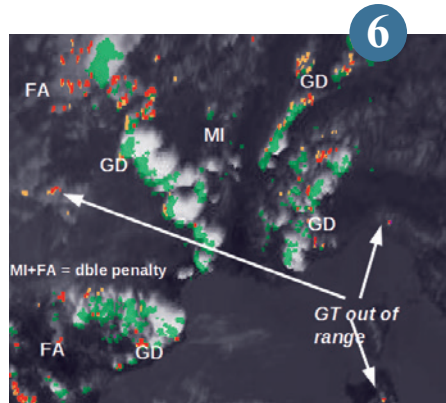
5

## CI (Convection Initiation), un produit satellite pour estimer la probabilité de déclenchement de la convection

Le produit est développé par Météo-France dans le cadre du SAF Prévision Immédiate. L'objectif du produit est de déterminer la probabilité d'un pixel nuageux de se développer en orage dans un intervalle 0-30', 0-60' ou 0-90'. Le logiciel de CI version 2018 a été livré fin 2018 et il viendra compléter un autre produit Météo-France développé dans le cadre du SAF : le RDT qui décrit les systèmes déjà développés.

La version 2018 de la CI est largement améliorée par rapport à la précédente (v2016) : meilleur réglage des données d'entrée (température de brillance, différence de température de brillance et leurs tendances), utilisation de la microphysique nuageuse, meilleure propagation des pixels concernés par une potentielle activité convection. Les critères d'intérêts sont classés en trois catégories : l'extension verticale du nuage, le temps passé sous 0°C par une partie du nuage, la croissance du sommet du nuage. Le produit final est utile pour les prévisionnistes et l'aviation, même s'il comporte des fausses alarmes et des non-détections quand il est comparé à une vérité terrain de type radar. Ces fausses alarmes et non-détections sont parfois géographiquement très proches, ce qui illustre le problème de la double peine en vérification.

Ce produit permettra d'étendre l'horizon tactique de ce phénomène très dangereux pour l'aviation.



▲ Satellite MSG (canal 10.8 µm) et cumuls des échos radar convectifs (en vert) pendant une demi-heure (seuils de 30 dBZ). Pixels CI pour les prochaines 30 minutes associés à des probabilités de 0-25 % (orange), 25-50 % (orange foncé), 50-75 % (rouge) et 75-100 % (magenta). FA=fausse alarme, GD= Good Detection, MI=miss (non détection). FA et MI côte à côte illustrent le problème de la double peine en vérification. Les zones GT (Ground Truth, vérité terrain) out of range (hors des limites) indiquent qu'il y a un signal radar mais que la convection ne s'est pas développée complètement dans l'intervalle de 30'.

6

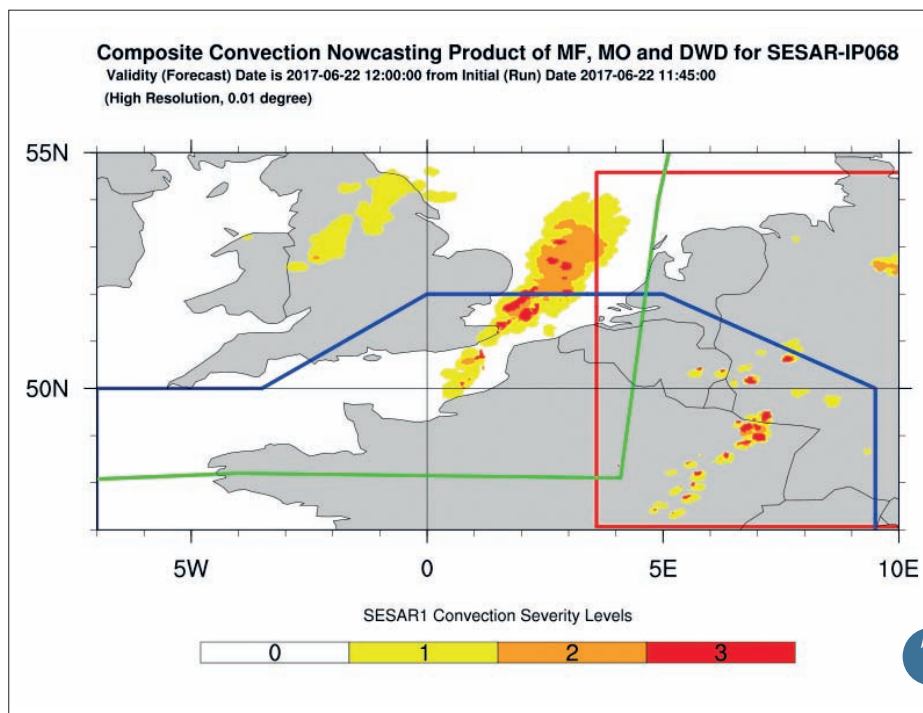
## Développement d'un produit harmonisé de convection dans le projet « SESAR Déploiement »

Le nombre de passagers dans les vols commerciaux en Europe devrait doubler entre 2012 et 2035, passant de 0.7 à 1.4 milliards. L'Union Européenne a initié le projet SESAR en 2004. Le but était de répondre à des besoins technologiques dans le cadre du développement du ciel unique européen. Météo-France a participé à plusieurs projets SESAR, dont 3 sont en cours. La phase actuelle, « SESAR Déploiement », a des visées opérationnelles. Météo-France y contribue sur différents points : le portail d'accès aux services météorologiques à destination des usagers aéronautiques (MET-GATE), la production de deux produits harmonisés de convection (prévision immédiate et probabiliste), la contribution à d'autres produits harmonisés (turbulence, givrage et phénomènes hivernaux), ainsi que la réalisation d'un composite européen de mosaïques radar.

En ce qui concerne la convection, le produit harmonisé est utilisé pour signaler le niveau de sévérité le plus élevé au-dessus d'un lieu donné, quel que soit le nombre de contributeurs, afin de maximiser la détection des petites structures très convectives. Sur la figure est illustrée, pour la partie prévision immédiate, une prévision sans couture à partir de trois contributions différentes. Une estimation de la hauteur du sommet des nuages est également produite.

Ce produit de convection est conçu pour donner aux compagnies aériennes, aux aéroports et aux ANSPs une meilleure connaissance de la convection à proximité des aéroports, dans les TMAs. Cela facilitera la prise de décision tactique, la sécurité et améliorera la gestion de l'espace aérien.

7



▲ Zoom sur les domaines d'intersection des contributions des services météorologiques français anglais et allemands pour la prévision immédiate harmonisée de la convection (échéance +15 minutes à partir du réseau de 11:45 du 22/6/2017). Les niveaux de sévérité utilisés pour la convection harmonisée vont de 0 (pas de convection) à 3 (convection sévère). Les traits bleus, rouge et vert sont les limites des productions françaises, anglaises et allemandes.

7

# Annexes

## Liste des Publications Scientifiques 2018

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

- Adam, O., F. Brient et al., 2017 : Regional and seasonal variations of the double-ITCZ bias in CMIP5 models: *Climate Dynamics*, Volume: 51, Issue: 1-2, Pages: 101-117, Doi : 10.1007/s00382-017-3909-1. Published: JUL 2018.
- Adam, O., T. Schneider and F. Brient (2017). Regional and seasonal variations of the double-ITCZ bias in CMIP5 models. *Climate Dynamics*, Volume: 51, Issue: 1-2, Pages: 101-117, DOI: 10.1007/s00382-017-3909-1. Published: JUL 2018.
- Akritidis, D., Katragkou, E., Zanis, P., Pytharoulis, I., Melas, D., Flemming, J., Inness, A., Clark, H., Plu, M., and Eskes, H., 2018: A deep stratosphere-troposphere ozone transport event over Europe simulated in CAMS global and regional forecast systems: analysis and evaluation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume: 18, Issue: 20, Pages: 15515-15534, Doi: 10.5194/acp-18-15515-2018. Published: OCT 29 2018.
- Albergel, C., Dutra, E., Munier, S., Calvet, J.-C., Munoz-Sabater, J., de Rosnay, P., and Balsamo, G., 2018 : ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations: which one performs better? *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume: 22, Issue: 6, Pages: 3515-3532, Doi: 10.5194/hess-22-3515-2018. Published: JUN 28 2018.
- Alonso-González, E., J. López-Moreno, J., S. Gascoin, M. García-Valdecasas Ojeda, A. Sanmiguel-Valladolid, F. Navarro-Serrano, J. Revuelto, A. Ceballos, M. J. Esteban-Parra and R. Essery, 2018: Daily gridded datasets of snow depth and snow water equivalent for the Iberian Peninsula from 1980 to 2014. *Earth System Science Data*, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 303-315, Doi: 10.5194/essd-10-303-2018, Published: FEB 2018.
- Andrey-Andrés J., N. Fourrié, V. Guidard, R. Armante, P. Brunel, C. Crevoisier, B. Tournier : A simulated observation database to assess the impact of the IASI-NG hyperspectral infrared sounder. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume: 11, Issue: 2, Pages: 803-818, Doi: 10.5194/amt-11-803-2018. Published: FEB 9 2018.
- Antic, J. and A. Ribes, 2018 : Hurricanes Albert and Esteban: statistical analysis of a perfect 3-year return period event, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, in press.
- Auguste, F., G. Réa, R. Paoli, C. Lac, V. Masson and D. Cariolle, 2018: Implementation of an Immersed Boundary Method in the Meso-NH model: Applications to an idealized urban-like environment. See here.
- Bador, M., M. Donat, O. Geoffroy, L. Alexander, 2018: "Assessing the robustness of future extreme precipitation intensification in the CMIP5 ensemble". *Bulletin of the American Meteorological Society*, Journal of Climate, Volume: 31, Issue: 16, Pages: 6505-6525, Doi: 10.1175/JCLI-D-17-0683.1. Published: AUG 2018.
- Balsamo, G., A. August-Panareda, C. Albergel, G. Arduini, A. Beljaars, J. Bidlot, N. Bousserez, S. Bousseta, A. Brown, R. Buizza, C. Buontempo, F. Chevallier, M. Choulga, H. Cloe, M. Cronin, M. Dahoui, P. de Rosnay, P. Dirmeyer, E. Dutra, M. B. E., P. Gentne, H. Hewitt, S. Keeley, Y. Kerr, S. Kumar, C. Lupu, J.-F. Mahfouf, J. McNorton, S. Meehl, K. Mogensen, J. Munoz-Sabater, R. Orth, F. Rabier, R. Reichle, B. Ruston, F. Pappenberger, I. Sandu, S. I. Seneviratne, S. Teitsh, I. F. Trigo, R. Uijlenhoet, N. Wedi, R. West, S. Woolway, & X. Zeng (2018): Satellite and in-situ observations for advancing global Earth surface modelling: a review. *Remote Sensing*, Volume : 10, Issue: 12, Article Number: 2038, Doi: 10.3390/rs10122038. Published: DEC 2018.
- Barbier, J., F. Guichard, F. Couvreur, D. Bouniol, R. Roehrig, 2017: Detection of intraseasonal large-scale heat waves: Characteristics and historical trends during the Sahelian Spring: *Journal of Climate*, Volume: 31, Issue: 1, Pages: 61-80, Doi: 10.1175/JCLI-D-17-0244.1. Published: JAN 2018.
- Batté, L., C. Ardilouze and M. Déqué, 2018 : Forecasting West African Heat Waves at Subseasonal and Seasonal Time Scales. *Monthly Weather Review*, Volume: 146, Issue: 3, Pages: 889-907, Doi: 10.1175/MWR-D-17-0211.1. Published: MAR 2018.
- Behera, A. K., E. D. Rivièrre, V. Maréchal, J.-F. Rysman, C. Claud, G. Seze, N. Amarouche, M. Ghysels, S. Khaykin, J.-P. Pommereau, G. Held, J. Burgalat and G. Durry, Modelling the TTI at the continental scale for a wet season: An evaluation of the BRAMS mesoscale model using TRO-Pico campaign and measurements from airborne and spaceborne sensors. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume: 123, Issue: 5, Pages: 2491-2508, Doi: 10.1002/2017JD027969. Published: MAR 16 2018.
- Benedetto R., Girolamo, P., Suma, D., Flamant, C., Bousquet, O., Cacciani, M., Stelitano, D.,: Two-year operation of the lidar 1200: from fine-scale tropospheric structures to lower stratospheric water vapor detection. *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, 2018, The 28th International Laser Radar Conference (ILRC 28), Bucharest 2017, 176, pp.08010. Doi: 10.1051/epjconf/201817608010.
- Beniston, M., D. Farinotti, M. Stoffel, L. M. Andreassen, E. Coppola, N. Eckert, A. Fantini, F. Giacomoni, C. Hauck, M. Huss, H. Huwald, M. Lehning, J.-I. López-Moreno, J. Magnusson, C. Marty, E. Morán-Tejeda, S. Morin, M. Naaim, A. Provenzale, A. Rabatel, D. Six, J. Stötter, U. Strasser, S. Terzago and C. Vincent, 2018: The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, Volume: 12, Pages: 759-794, https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018, Published: MAR 2018.
- Berre, L.,: Simulation and diagnosis of observation, model and background error contributions in data assimilation cycling. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: Pages: Doi: 10.1002/qj.3454. Published : 27 November 2018.
- Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Béranger, K., C. Lebeau-pin Brossier, 2018: Lagged effects of the Mistral wind on heavy precipitation through ocean-atmosphere coupling in the region of Valencia. *Climate Dynamics*, Volume: 51, Issue: 3, Special Issue: SI, Pages: 969-983, Doi: 10.1007/s00382-016-3153-0. Published: AUG 2018.
- Bittencourt, GD., Bresciani, C., Pinheiro, DK., Bageston, JV., Schuch, NJ., Bencherif, H., Leme, NP., Peres, LV.,: A major event of Antarctic ozone hole influence in southern Brazil in October 2016: an analysis of tropospheric and stratospheric dynamics. *Annales Geophysicae*, Volume: 36, Issue: 2, Pages: 415-424, Doi: 10.5194/angeo-36-415-2018. Published: MAR 16 2018.
- Blechschmidt, A.-M., Arteta, J., Coman, A., Curier, L., Eskes, H., Foret, G., Gielen, C., Hendrick, F., Maréchal, V., Meleux, F., Parmentier, J., Peters, E., Pinardi, G., PETERS, A. J. M., Plu, M., Richter, A., Sofiev, M., Valdebenito, Á. M., Van Roozendaal, M., Vira, J., Vlemmix, T., and Burrows, J. P.: Comparison of tropospheric NO2 columns from MAX-DOAS retrievals and regional air quality model simulations, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, https://doi.org/10.5194/acp-2016-1003, in review, 2017.
- Borderies M., O. Caumont, C. Augros, É. Bresson, J. Delanoë, V. Ducrocq, N. Fourrié, T. Le Bastard and M. Nuret: Simulation of W-band radar reflectivity for model validation and data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 144, Issue: 711, Pages: 391-403, Part: B. Doi: 10.1002/qj.3210. Published: JAN 2018.
- Boukachaba, N., V. Guidard and N. Fourrié: Toward an improved assimilation of IASI over continents in the convective scale AROME France Model. *Tellus*.
- Bourgeois, D. Bouniol, F. Couvreur, F. Guichard, J. Marsham, L. Garcia-Carreras, C. Birch and D. Parker, 2018: Characteristics of mid-level clouds over West Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 144, Issue: 711, Pages: 426-442, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3215. Published: JAN 2018.
- Bouttier, F. et L. Raynaud, 2018: Clustering and selection of boundary conditions for limited area

ensemble prediction. Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 144, Issue: 717, Pages: 2381-2391, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3304. Published: OCT 2018.

Bresciani, C., Bittencourt, GD., Bageston, JV., Pinheiro, DK., Schuch, NJ., Bencherif, H., Leme, NP., Peres, LV.,: Report of a large depletion in the ozone layer over southern Brazil and Uruguay by using multi-instrumental data. Annales Geophysicae, Volume: 36, Issue: 2, Pages: 405-413, Doi: 10.5194/angeo-36-405-2018. Published: MAR 16 2018.

Bresson, E., Arbogast, P., Aouf, L., Paradis, D., Kortcheva, A., Bogatchev, A., Galabov, V., Dimitrova, M., Morvan, G., Ohl, P., al.... On the improvement of wave and storm surge hindcasts by downscaled atmospheric forcing: application to historical storms. Natural Hazard And Earth System Sciences, Volumes: 18, Issue: 4, Pages: 997-1012, Doi: 10.5194/nhess-18-997-2018. Published: APR 4 2018.

Brocchi, V., Krysztofiak, G., Catoire, V., Guth, J., Marécal, V., Zbinden, R., El Amraoui, L., Dulac, F., and Ricaud, P.: Intercontinental transport of biomass burning pollutants over the Mediterranean Basin during the summer 2014 ChArMEx-GLAM airborne campaign. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 9, Pages: 6887-6906, Doi: 10.5194/acp-18-6887-2018. Published: MAY 16 2018.

Carrer, D., Pique, G., Ferlicocq, M., Ceamanos, X., Deschia, E., 2018: What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. Environmental Research Letters, Volume: 13, Issue: 4, Article Number: 044030, Doi: 10.1088/1748-9326/aab650. Published: APR 2018 .

Cattiaux, J. and A. Ribes, 2018: Defining single extreme weather events in a climate perspective, Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 99, Issue: 8, Pages: 1557-1568, Doi: 10.1175/BAMS-D-17-0281.1. Published: AUG 2018.

Chan, S. K., R. Bindlish, P. O'Neill, T. Jackson, E. Njoku, S. Dunbar, J. Chaubell, J. Piepmeier, S. Yueh, D. Entekhabi, A. Collander, F. Chen, M. H. Cosh, T. Caldwell, J. Walker, A. Berg, H. McNairn, M. Thibeault, J. Martínez-Fernández, F. Uldall, M. Seyfried, D. Bosch, P. Starks, C. Hollifield Collins, J. Prueger, R. van der Velde, J. Asanuma, M. Palecki, E. E. Small, M. Zreda, J.-C. Calvet, W. T. Crow, and Y. Kerr: Development and assessment of the SMAP enhanced passive soil moisture product, Remote Sensing of Environment, Volume: 204, Pages: 931-941, Doi: 10.1016/j.rse.2017.08.025. Published: JAN 2018.

Cohen, Y., Petetin, H., Thouret, V., Marécal, V., Josse, B., Clark, H., Sauvage, B., Fontaine, A., Athier, G., Blot, R., Boulanger, D., Cousin, J.-M., and Nédélec, P.: Climatology and long-term evolution of ozone and carbon monoxide in the upper troposphere-lower stratosphere (UTLS) at northern midlatitudes, as seen by IAGOS from 1995 to 2013. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 8, Pages: 5415-5453, Doi: 10.5194/acp-18-5415-2018. Published: APR 20 2018.

Condom, T., M. Dumont, L. Mourre, J. E. Sicart, A. Rabatel, A. Viani and A. Soruco, 2018: Technical note: A low-cost albedometer for snow and ice measurements - theoretical results and application on a tropical mountain in Bolivia. Geoscientific

Instrumentation, Methods and Data Systems, Volume: 7, Issue: 2, Pages: 169-178, Doi: <https://doi.org/10.5194/gi-7-169-2018>, Published: JUN 2018.

Coopmann, O., V. Guidard, N. Fourrié, M. Plu. "Assimilation of IASI ozone-sensitive channels in preparation for an enhanced coupling between Numerical Weather Prediction and Chemistry Transport Models". Journal of Geophysical Research - Atmosphere, Volume: 123, Issue: 21, Pages: 12452-12473, Doi: 10.1029/2017JD027901. Published: NOV 16 2018.

Crispel, P. and G. Roberts, 2018: All-sky photogrammetry techniques to georeference a cloud field. Atmospheric Measurement Techniques, Volume: 11, Issue: 1, Pages: 593-609, Doi: 10.5194/amt-11-593-2018. Published: JAN 31 2018.

Dahman, I., Arbogast, P., Jeannin, N., et Benammar, B.,: Rain attenuation prediction model for satellite communications based on the Meteo-France ensemble prediction system PEARP. NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES, Volume: 8, Issue: 12, Pages: 3327-3341. Published: DEC 18 2018.

Daniel, M., A. Lemonsu, V. Vigié, 2018: "Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate". Urban Climate, Volume: 23, Special Issue: SI, Pages: 287-308, Doi: 10.1016/j.uclim.2016.11.001. Published: MAR 2018.

Davaze, L., A. Rabatel, Y. Arnaud, P. Sirguey, D. Six, A. Letreguilly and M. Dumont, 2018: Monitoring glacier albedo as a proxy to derive summer and annual surface mass balances from optical remote-sensing data. The Cryosphere, Volume: 12, Issue: 1, Pages: 271-286, Doi: 10.5194/tc-12-271-2018, Published: JAN 2018.

De Munck, C., Lemonsu A., Masson V., Le Bras J., and Bonhomme M., 2018: Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. Urban Climate, Volume: 23, Special Issue: SI, Pages: 260-286, Doi: 10.1016/j.uclim.2017.01.003. Published: MAR 2018 23.

Dixit V.V., O. Geoffroy, and S. Sherwood, 2018: Control of ITCZ width by lowlevel radiative heating from upper level clouds - in aquaplanet simulations. Geophysical Research Letters, Volume: 45, Issue: 11, Pages: 5788-5797, Doi: 10.1029/2018GL078292. Published: JUN 16 2018.

Domine, F., G. Gauthier, V. Vionnet, D. Fauteux, M. Dumont and M. Barrere, 2018: Snow physical properties may be a significant determinant of lemming population dynamics in the high Arctic. Arctic Science, Doi: <https://doi.org/10.1139/AS-2018-0008>, Published: SEP 2018.

Duffourg F., K.-O. Lee, V. Ducrocq, C. Flamant, P. Chazette and P. Di Girolamo, 2018: Role of moisture patterns in the backbuilding formation of HyMeX IOP13 heavy precipitation systems. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 144, Issue: 710, Pages: 291-303, Part: A, Doi: 10.1002/qj.3201. Published: JAN 2018.

Duruiseau, F, Chambon P, Wattrelot E, Barreyat M, Mahfouf JF. Assimilating cloudy and rainy observations from SAPHIR on-board Megha-Tropiques within the ARPEGE global model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

Edouard, S., Vincendon, Beatrice., Ducrocq, V., 2018 : Ensemble-based flash-flood modelling: Taking into account hydrodynamic parameters and initial soil moisture uncertainties. Journal of Hydrology, Volume : 560, Pages : 480-494, Doi : 10.1016/j.jhydrol.2017.04.048. Published : MAY 2018.

El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J.P., Al-Yaari, A., Al Bitar, A., Albergel, C. and Calvet, J.-C, 2018 : Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 Soil Moisture Products at Sites in Southwestern France. Remote Sensing, Volume : 10, Issue : 4, Article Number : 569, Doi : 10.3390/rs10040569. Published : APR 2018.

Emery, C. M., A. Paris, S. Biancamaria, A. Boone, S. Calmant, P.-A. Garambois, and J. Santos da Silva, 2018 : Large-scale hydrological model river storage and discharge correction using a satellite altimetry-based discharge. Hydrology And Earth System Sciences, Volume : 22, Issue : 4, Pages : 2135-2162, Doi : 10.5194/hess-22-2135-2018. Published : APR 6 2018.

Federico S., R. Claudia Torcasio, E. Avolio, O. Caumont, M. Montopoli, L. Baldini, G. Vulpiani, and S. Dietrich, 2018 : The impact of lightning and radar data assimilation on the performance of very short term rainfall forecast for two case studies in Italy, NHES.

Filippi, J.-B., Bosseur, F., Mari, C., et Lac, C. : Simulation of a Large Wildfire in a Coupled Fire-Atmosphere Model. Atmosphere, Volume: 9, Issue: 6, Article Number: 218, Doi : 10.3390/atmos9060218. Published: JUN 2018.

Flamant, C., P. Knippertz, A. Fink, A. Akpo, B. Brooks, C. Chiu, H. Coe, S. Danuor, M. Evans, G. Jegede, N. Kalthoff, A. Konare, C. Lioussé, F. Lohou, C. Mari, H. Schlager, A. Schwarzenboeck, B. Adler, L. Amekudzi, J. Ayree, M. Ayoola, A. Batenburg, G. Bessardon, S. Borrmann, J. Brito, K. Bower, F. Burnet, V. Catoire, A. Colomb, C. Denjean, K. Fosu-Amankwah, P. Hill, J. Lee, M. Lothon, M. Maranan, J. Marsham, R. Meynadier, J. Ngamini, P. Rosenberg, D. Sauer, V. Smith, G. Stratmann, J. Taylor, C. Voigt, and V. Yoboue, 2017 : The Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa field campaign : Overview and research highlights. Bull. Amer. Meteor. Soc., doi : 10.1175/BAMS-D-16-0256.1, 2018.

Foucart, B., Sellegri, K., Tulet, P., Rose, C., Metzger, JM., Picard, D., : High occurrence of new particle formation events at the Maïdo high-altitude observatory (2150 m), Reunion (Indian Ocean). Atmospheric Chemistry And Physics, Volume : 18, Issue : 13, Pages : 9243-9261, Doi : 10.5194/acp-18-9243-2018. Published : JUL 3 2018.

Frenay, 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. Lambert, 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, Volume: 18, Issue: 10, Pages: 7041-7056, DOI: 10.5194/acp-18-7041-2018. Published: MAY 23 2018 .

Gaillardet, J., I. Braud, F. Hankard, S. Anquetin, O. Bour, N. Dorfliger, J.R. de Dreuzy, S. Galle, C. Galy, S. Gogo, L. Gourcy, F. Habets, F. Laggoun, L. Longuevergne, T. Le Borgne, F. Naaim-Bouvet, G. Nord, V. Simonneaux, D. Six, T. Tallec, C. Valentin, G. Abril, P. Allemand, A. Arènes, B. Arfib, L. Arnaud, N.

- Arnaud, P. Arnaud, S. Audry, V. B. Comte, C. Batiot, A. Battais, H. Bellot, E. Bernard, C. Bertrand, H. Bessière, S. Binet, J. Bodin, X. Bodin, L. Boithias, J. Bouchez, B. Boudevillain, I. B. Moussa, F. Branger, J. J. Braun, P. Brunet, B. Caceres, D. Calmels, B. Cappelaere, H. Celle-Jeanton, F. Chabaux, K. Chalikakis, C. Champollion, Y. Copard, C. Cotel, P. Davy, P. Deline, G. Delrieu, J. Demarty, C. Dessert, M. Dumont, C. Emblanch, J. Ezzahar, M. Estèves, V. Favier, M. Faucheux, N. Filizola, P. Flammarion, P. Floury, O. Fovet, M. Fournier, A. J. Francez, L. Gandois, C. Gascuel, E. Gayer, C. Genthon, M. F. Gérard, D. Gilbert, I. Gouttevin, M. Grippa, G. Gruau, A. Jardani, L. Jeanneau, J. L. Join, H. Jourde, F. Karbou, D. Labat, Y. Lagadeuc, E. Lajeunesse, R. Lastennet, W. Lavado, E. Lawin, T. Lebel, C. Le Bouteiller, C. Legout, Y. Lejeune, E. Le Meur, N. Le Moigne, J. Lions, A. Lucas, J. P. Malet, C. Marais-Sicre, J. C. Maréchal, C. Marlin, P. Martin, J. Martins, J. M. Martinez, N. Massei, A. Mauclerc, N. Mazzilli, J. Molénat, P. Moreira-Turcq, E. Mougou, S. Morin, J. N. Ngoupayou, G. Panthou, C. Peugeot, G. Picard, M. C. Pierret, G. Porel, A. Probst, J. L. Probst, A. Rabatel, D. Raclot, L. Ravanel, F. Rejiba, P. René, O. Ribolzi, J. Riotte, A. Rivière, H. Robain, L. Ruiz, J. M. Sanchez-Perez, W. Santini, S. Sauvage, P. Schoeneich, J. L. Seidel, M. Sekhar, O. Sengtaheuanghoung, N. Silvera, M. Steinmann, A. Soruco, G. Tallec, E. Thibert, D. V. Lao, C. Vincent, D. Viville, P. Wagnon and R. Zitouna, 2018. OZCAR: The French Network of Critical Zone Observatories, Vadose Zone Journal, Volume: 17, Number:1, Doi: <https://doi.org/10.2136/vzj2018.04.0067>.
- Gao, Z., Bresson R., Qu Y., Milliez M., de Munck C. and Carissimo B., 2018: High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse. Urban Climate, Volume: 23, Special Issue: SI, Pages: 114-130, Doi: 10.1016/j.uclim.2016.11.002. Published: MAR 2018 3.
- Garrigues, S., A. Boone, B. Decharme, A. Oliosio, C. Albergel, J. Calvet, S. Moulin, S. Buis, and E. Martin, 2018: Impacts of the Soil Water Transfer Parametrization on the Simulation of Evapotranspiration over a 14-Year Mediterranean Crop Succession. Journal of Hydrometeorology, Volume: 19, Issue: 1, Pages: 3-25, Doi: 10.1175/JHM-D-17-0058.1. Published: JAN 2018.
- Gelati, E., Decharme, B., Calvet, J.-C., Minvielle, M., Polcher, J., Fairbairn, D., and Weedon, G. P., 2018: Hydrological assessment of atmospheric forcing uncertainty in the Euro-Mediterranean area using a land surface model. Hydrological and Earth System Sciences, Volume: 22, Issue: 4, Pages: 2091-2115, Doi: 10.5194/hess-22-2091-2018. Published: APR 5 2018.
- Gilet, J.-B., Plu, M., Joly, A., et Arbogast, P.: The occurrence density of tracked tropopause coherent structures around intensifying mid-latitude surface cyclones. Journal of Atmospheric Sciences. 74, Issue 10, 451-3471.
- Gustafsson, N., Janjić, T., Schraff, C., Leuenberger, D., Weissmann, M., Reich, H., Brousseau, P., Montmerle, T., Wattrelot, E., Bučánek, A., Mile, M., Hamdi, R., Lindskog, M., Barkmeijer, J., Dahlbom, M., Macpherson, B., Ballard, S., Inverarity, G., Carley, J., Alexander, C., Dowell, D., Liu, S., Ikuta, Y. and Fujita, T. (2018), Survey of data assimilation methods for convective-scale numerical weather prediction at operational centres. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 144 Issue: 713 Pages: 1218-1256 Part: B. Published: APR 2018 Doi: 10.1002/qj.3179.
- Guth, J., Marécal, V., Josse, B., Arteta, J., and Hamer, P.: Primary aerosol and secondary inorganic aerosol budget over the Mediterranean Basin during 2012 and 2013. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 7, Pages: 4911-4934, Doi: 10.5194/acp-18-4911-2018. Published: APR 11 2018.
- Hadad, D., Baray, J.L., Montoux, N., Van Baelen, J., Freville, P., Pichon, J.M., Bossier, P., Ramonet, M., Kwok, C.Y., Begue, N., al... Surface and Tropospheric Water Vapor Variability and Decadal Trends at Two Supersites of CO-PDD (Cézeaux and Puy de Dôme) in Central France. Atmosphere, Volume: 9, Issue: 8, Article Number: 302, Doi: 10.3390/atmos9080302. Published: AUG 2018.
- Hagenmuller, P., A. van Herwijnen, C. Pielmeier and H.-P. Marshall, 2018: Evaluation of the snow penetrometer Avatech SP2. Cold Regions Science and Technology, Volume: 149, Pages: 83-94, Doi: 10.1016/j.coldregions.2018.02.006, Published: MAY 2018.
- Hall, S. R., Ullmann, K., Prather, M. J., Flynn, C. M., Murray, L. T., Fiore, A. M., Correa, G., Strode, S. A., Steenrod, S. D., Lamarque, J.-F., Guth, J., Josse, B., Flemming, J., Huijnen, V., Abraham, N. L., and Archibald, A. T.: Cloud impacts on photochemistry: building a climatology of photolysis rates from the Atmospheric Tomography mission. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 22, Pages: 16809-16828, Doi: 10.5194/acp-18-16809-2018. Published: NOV 28 2018.
- Hoarau, T., Barthe, C., Tulet, P., Claeys, M., Pinty, J.P., Bousquet, O., Delanoë, J., Vie, B., Impact of the Generation and Activation of Sea Salt Aerosols on the Evolution of Tropical Cyclone Dumile, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, Volume: 123, Issue: 16, Pages: 8813-8831, DOI: 10.1029/2017JD028125. Published: AUG 27 2018.
- Hoarau, T., J-P Pinty and C Barthe, 2018: A representation of the collisional ice break-up process in the two-moment microphysics LIMA v1.0 scheme of Meso-NH. See here.
- Illingworth, A. J., Bataglia A., Bradford J., Forsythe M., Joe P., Kollias P., Lean K., Lori M., Mahfouf J.-F., Mello S., Midhassel R., Munro Y., Nicol J., Pothast R., Rennie M., Stein T. H., M., Tanelli S., Tridon F., Walden C. J., & M. Wolde (2018): WIVERN: A new satellite concept to provide global in-cloud winds, precipitation and cloud properties, Bulletin of American Meteorology Society, Volume: 99, Issue: 8, Pages: 1669-1687, Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0047.1. Published: AUG 2018.
- Jaidan, N., ElAmraoui, L., Attié, J.-L., Ricaud, P., and Dulac, F., 2018: Future changes in surface ozone over the Mediterranean Basin in the framework of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment (ChArMEX). Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 13, Pages: 9351-9373, Doi: 10.5194/acp-18-9351-2018. Published: JUL 4 2018.
- Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P. I., Pterros, F. and Nabat, P., 2018 : Long-term series of surface solar radiation at Athens, Greece. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 18, Issue: 4, Pages: 2395-2411, Doi: 10.5194/acp-18-2395-2018. Published: FEB 19 2018.
- Kévin, L., Portafaix, T., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Bencherif, H., Morel, B., Pazmino, A., Metzger, J.M., Auriol, F., Deroo, C., Duflot, V., Goloub, P., and Charles, N. Long, C.N. : Ultraviolet radiation modelling from ground-based and satellite measurements on Reunion Island, southern tropics. Atmospheric Chemistry And Physics, Volume : 18, Issue : 1, Pages: 227-246, Doi: 10.5194/acp-18-227-2018. Published: JAN 9 2018.
- Kohno, N., Dube, S.K., Entel, M., Fakhruddin, S.H.M., Greenslade, D., Leroux, M.D., Rhome, J., Thu, N.B.,: RECENT PROGRESS IN STORM SURGE FORECASTING. Tropical Cyclone Research and Review, Volume: 7, Issue: 2, Pages : 128-139, Doi: 10.6057/2018TCRR02.04. Published: MAY 15 2018.
- Kokhanovsky, A., M. Lamare, B. Di Mauro, G. Picard, L. Arnaud, M. Dumont, F. Tuzet, C. Brockmann and J. E. Box, 2018: On the reflectance spectroscopy of snow. The Cryosphere, Volume: 12, Pages: 2371-2382, Doi: 10.5194/tc-12-2371-2018, Published: JUL 2018.
- Krinner, G., Derksen, C., Essery, R., Flanner, M., Hagemann, S., Clark, M., Hall, A., Rott, H., Brutel-Vuilmet, C., Kim, H., Ménard, C. B., Mudryk, L., Thackeray, C., Wang, L., Arduini, G., Balsamo, G., Bartlett, P., Boike, J., Boone, A., Chéruy, F., Colin, J., Cuntz, M., Dai, Y., Decharme, B., Derry, J., Ducharme, A., Dutra, E., Fang, X., Fierz, C., Ghattas, J., Gusev, Y., Haverd, V., Kontu, A., Lafaysse, M., Law, R., Lawrence, D., Li, W., Marke, T., Marks, D., Ménégoz, M., Nasonova, O., Nitta, T., Niwano, M., Pomeroy, J., Raleigh, M. S., Schaedler, G., Semenov, V., Smirnova, T. G., Stacke, T., Strasser, U., Svenson, S., Turkov, D., Wang, T., Wever, N., Yuan, H., Zhou, W. and Zhu, D., 2018: ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. Geoscience Model Development, Volume: 11, Issue: 12, Pages: 5027-5049, Doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-5027-2018>.
- Krysztofiak, G., V. Catoire, P. D. Hamer, V. Marécal, C. Robert, A. Engel, H. Bönsch, K. Grossman, B. Quack, E. Atlas and K. Pfeilsticker, 2018: Evidence of convective transport in tropical West Pacific region during SHIVA experiment. Atmospheric Science Letters, Volume: 19, Issue: 1, Article Number: UNSP e798, Doi: 10/1002/asl.798. Published: JAN 2018.
- Kurzrock, F., Cros, S., Chane-Ming, F., Otkin, J., Hutt, A., Linguet, L., Lajoie, G., Potthast, R., A Review of the Use of Geostationary Satellite Observations in Regional-Scale Models for Short-term Cloud Forecasting. Meteorologische Zeitschrift, Berlin, Volume: 27, Issue: 4, Pages: 277-298, Doi: 10.1127/metz/2018/0904. Published: 2018.
- Lac, C., Chaboureaud, J.-P., Masson, V., Pinty, J.-P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.-M., Colin, J., Couvreux, F., Cuxart, J., Delautier, G., Dauhut, T., Ducrocq, V., Filippi, J.-B., Gazen, D., Geoffroy, O., Gheusi, F., Honnert, R., Lafore, J.-P., Lebeaupin Brossier, C., Libois, Q., Lunet, T., Mari, C., Maric, T., Mascart, P., Mogé, M., Molinié, G., Nuissier, O., Pantillon, F., Peyrillé, P., Pergaud, J., Perraud, E., Pianezze, J., Redelsperger, J.-L., Ricard, D., Richard, E., Riette, S., Rodier, Q., Schoetter, R., Seyfried, L., Stein, J., Suhre, K., Taufour, M., Thouron, O., Turner, S., Verrille, A., Vié, B., Visentin, F., Vionnet, V., and Wautelet, P., 2018: Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. Geoscientific Model Development, Volume : 11, Issue : 5, Pages: 1929-1969, Doi : Published: MAY 29 2018 .

- Lac, C., Chaboureaud, P., Masson, V., Pinty, P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., al... : Temperature inter-comparison effort in the framework of Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment – Special Observation Period (HyMeX-SOP1). *Geoscientific Model Development, Copernicus Publ*, 2018, pp.1929-1969. Doi: 10.5194/gmd-2017-297.
- Lac, C., J.-P. Chaboureaud, V. Masson, P. Tulet, J. Escobar, C. Augros, S. Bieilli, O. Caumont, J. Colin, F. Couvreur, G. Delautier, V. Ducrocq, R. Honnert, J.-P. Lafore, C. Lebeaupin Brossier, Q. Libois, O. Nuissier, P. Peyrillé, J. Perraud, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, O. Pergaud, E. Thouren, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, V. Vionnet and al. 2018: Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development, Volume: 11, Issue: 5, Pages: 1929-1969, Doi: 10.5194/gmd-11-1929-2018. Published: MAY 29 2018.*
- Lamy, K., Portafaix, T., Josse, B., Brogniez, C., Godin-Beekmann, S., Benchérif, H., Revell, L., Akiyoshi, H., Bekki, S., Hegglin, M., Jöckel, P., Kirner, O., Marecal, V., Morgenstern, O., Stenke, A., al... : Ultraviolet Radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, European Geosciences Union, In press, Doi: 10.5194/acp-2018-525.*
- Lancz, D., Balázs Szintai, Rachel Honnert : Modification of shallow convection parametrization in the gray zone in a mesoscale model, *Boundary-layer Meteorology, Volume: 169, Issue: 3, Pages: 483-503, Doi: 10.1007/s10546-018-0375-1. Published: DEC 2018.*
- Langford, AO., Alvarez, Rj., Brioude, J., Evan, S., Iraci, LT., Kirgis, G., Kuang, S., Leblanc, T., Newchurch, MJ., Pierce, RB., al... Coordinated profiling of stratospheric intrusions and transported pollution by the Tropospheric Ozone Lidar Network (TOLNet) and NASA Alpha Jet experiment (AJAX): Observations and comparison to HYSPLIT, RAQMS, and FLEXPART. *Atmospheric Environment, Volume: 174, Pages: 1-14, Doi: Published: FEB 2018.*
- Larrosa, EG., Keckhut, ., Baray, JL., Nakaema, WM., Veremes, H., Landulfo, E., Dionisi, D., Khaykin, S., Ravetta, F.: Long-Range Transport of Water Channelized through the Southern Subtropical Jet: Atmosphere, Volume: 9, Issue: 10, Article Number: 374, Doi : 10.3390/atmos9100374. Published: OCT 2018.
- Larue, F., A. Royer, D. De Sève, A. Roy, G. Picard, V. Vionnet and E. Cosme, 2018 : Simulation and assimilation of passive microwave data using a snowpack model coupled to a calibrated radiative transfer model over North–Eastern Canada. *Water Resources Research, Volume: 54, Pages: ??, Doi: 10.1029/2017WR022132, Published: JUN 2018.*
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Nojiri, Y., Padin, X. A., Pregon, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijck, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehle, S., and Zhu, D., 2018: Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data, Volume: 10, Issue: 1, Pages: 405-448, Doi: 10.5194/essd-10-405-2018. Published: MAR 12 2018.*
- Leroux, D.J., Calvet, J.C., Munier, S., Albergel, C., 2018: Using Satellite-Derived Vegetation Products to Evaluate LDAS-Monde over the Euro-Mediterranean Area. *REMOTE SENSING Volume: 10. Issue: 8. Article Number: 1199. Published: AUG 2018.*
- Leroux, MD., Meister, J., Mekies, D., Dorla, AL., Caroff, P.: A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems : Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, Volume: 5, Issue: 4, Pages: 1021-1041, Doi: 10.1175/JAMC-D-17-0094.1. Published: APR 2018.*
- Leroux, MD., Wood, K., Elsberry, RL., Cayan, EO., Es Hendricks, E., Kucas, M., Otto, P., Rogers, R., Sampson, B., Yu, ZF. *Tropical Cyclone Research and Review Volume: 7 Issue: 2 Pages: 85-105, Doi: 10.6057/2018TCRR02.02. Published: MAY 15 2018.*
- López-Moreno, J. I., F. Navarro-Serrano, C. Azorín-Molina, P. Sánchez-Navarrete, E. Alonso-González, I. Rico, E. Morán-Tejada, S. Buisan, J. Revuelto, M. Pons, and S.M. Vicente-Serrano, 2018: Air and wet bulb temperature lapse rates and their impact on snowmaking in a Pyrenean ski resort. *Theoretical and Applied Climatology, Volume: 132, Pages: 1-13, Doi: 10.1007/s00704-018-2448-y, Published: MAR 2018.*
- Mallet, PE., Pujol, O., Brioude, J., Evan, S., Jensen, A.: Marine aerosol distribution and variability over the pristine Southern Indian Ocean. *Atmospheric Environment, Volume: 182, Pages: 17-30, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.03.016. Published: JUN 2018.*
- Marquet, P. and Th. Dauhut, 2018: Reply to “Comments on ‘A Third-Law Isentropic Analysis of a Simulated Hurricane’”. *Journal of the Atmospheric Sciences, Volume: 75, Issue: 10, Pages : 3735-3747, Doi: 10.1175/JAS-D-18-0126.1. Published: OCT 2018. Vol.75, N°10, p.3735-3747.*
- Marquet, P., J.-F. Mahfouf and D. Holdaway (2018): Definiton of the moist-air available enthalpy (exergy) norm: a comparison with existing “moist energy norms”. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (soumis).*
- Masson, T., M. Dumont, M. D. Mura, P. Sirguey, S. Gascoin, J.-P. Dedieu and J. Chanussot, 2018: An Assessment of Existing Methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data. *Remote Sensing, Volume: 10, Issue: 4, Pages: 619, Doi: 10.3390/rs10040619, Published: APR 2018.*
- Masson, T., M. Dumont, M. D. Mura, P. Sirguey, S. Gascoin, J.-P. Dedieu and J. Chanussot, 2018: An Assessment of Existing Methodologies to Retrieve Snow Cover Fraction from MODIS Data. *Remote Sensing, Volume: 10, Issue: 4, Pages: 619, Doi: 10.3390/rs10040619, Published: APR 2018.*
- Masson, V., Lemonsu A. and Voogt J., 2018: The 9th International Conference on Urban Climate. *Urban Climate, Volume: 23, Special Issue: SI, Pages: 1-7, Doi: 10.1016/j.uclim.2017.07.007. Published: MAR 2018 23.*
- Mede, T., Chambon, G., Hagenmuller, P., & Nicot, F. (2018). A medial axis based method for irregular grain shape representation in DEM simulations. *Granular Matter, Volume: 20, Doi: https://doi.org/10.1007/s10035-017-0785-7, Published: APR 2018.*
- Meloni, D., di Sarra, A., Brogniez, G., Denjean, C., De Silvestri, L., Di Iorio, T., Formenti, P., Gómez-Amo, J. L., Gröbner, J., Kouremeti, N., Liuzzi, G., Mallet, M., Pace, G., and Sferlazzo, D. M.: Determining the infrared radiative effects of Saharan dust: a radiative transfer modelling study based on vertically resolved measurements at Lampedusa. *Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 18, Issue: 6, Pages: 4377-4401, Doi: 10.5194/acp-18-4377-2018. Published: MAR 29 2018.*
- Meloni, D., di Sarra, A., Brogniez, G., Denjean, C., De Silvestri, L., Di Iorio, T., Formenti, P., Gómez-Amo, J. L., Gröbner, J., Kouremeti, N., Liuzzi, G., Mallet, M., Pace, G., and Sferlazzo, D. M.: Determining the infrared radiative Saharan dust: a radiative transfer modelling study based on vertically resolved effects of measurements at Lampedusa. *Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 18, Issue: 6, Pages: 4377-4401, Doi: 10.5194/acp-18-4377-2018. Published: MAR 29 2018.*
- Mercier F., Gürol S., Jolivet P., Michel Y. and Montmerle T : 2018a: Block Krylov methods for accelerating ensembles of variational data assimilations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, TY Volume: 144, Issue : 717, Pages: 2463-2480, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3329. Published: OCT 2018.*
- Mercier, F., Michel, Y., Montmerle, T , Gürol S. and P. Jolivet : 2018b : Speeding up the ensemble data assimilation system of the limited area model of Météo France using a Block Krylov algorithm. Accepted for publication in *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.*
- Michel, Y.: Revisiting Fisher’s approach to the handling of horizontal spatial correlations of the observation errors in a variational framework. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, AL Volume: 144, Issue : 716, Pages: 2011-2025, Part : A, Doi: 10.1002/qj.3249. Published: OCT 2018.*
- Michel, Y. and S. Guedj: Correlated observation errors in a variational framework, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.*
- Montmerle, T., Michel Y., Arbogast E., Ménétrier B. and P. Brousseau, 2018: A 3D Ensemble Variational Data Assimilation Scheme for the limited area AROME model: formulation and preliminary results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 144, Issue: 716 , Pages: 2196-2215, Part: A, Doi: 10.1002/qj.3334. Published: OCT 2018.*
- Mudryk, L. R., C. Derksen, S. Howell, F. Laliberté, C. Thackeray, R. Sospedra-Alfonso, V. Vionnet, P.J. Kushner and R. Brown, 2018: Canadian snow and sea ice: historical trends and projections. *The Cryosphere, Volume: 12, Pages: 1157-1176, Doi: 10.5194/tc-12-1157-2018, Published: MAR 2018.*
- Munier, S., D. Carrer, C. Planque, F. Camacho, C. Albergel, and J.-C. Calvet : Satellite Leaf Area Index: global scale analysis of the tendencies per vegetation type over the last 17 years. *Remote*



- Sensing, Volume: 10, Issue: 3, Article Number: 424, Doi: 10.3390/rs10030424. Published: MAR 2018 10.
- Muñoz-Sabater, J.; de Rosnay, P.; Albergel, C.; Isaksen, I., 2018: Sensitivity of Soil Moisture Analyses to Contrasting Background and Observation Error Scenarios. *Water*, Volume: 10, Issue: 7, Article Number: 890, Doi: 10.3390/w10070890. Published: JUL 2018.
- Nicolet, G., N. Eckert, S. Morin and J. Blanchet, 2018: Assessing climate change impact on the spatial dependence of extreme snow depth maxima in the French Alps. *Water Resources Research*, Volume: 54, Doi: <https://doi.org/10.1029/2018WR022763>, Published: OCT. 2018.
- Obermann-Hellhund A., D. Conte, S. Somot, C.Z. Torma, B. Ahrens B., 2017 : Mistral and Tramontane wind systems in regional and global climate simulations from 1950 to 2100. *Climate Dynamics*, Volume: 50, Issue : 1-2, Pages: 693-703, Doi: 10.1007/s00382-017-3635-8, pp.1-11. Published: JAN 2018.
- Orbe, C., D. H. Yang, W. Waugh, G. Zeng, O. Morgenstern, D. E. Kinnison, J.-F. Lamarque, S. Tilmes, D. A. Plummer, J. F. Scinnoca, B. Josse, V. Marécal, P. Jockel, L. D. Oman, S. E. Strahan, M. Deushi, T. Y. Tanaka, K. Yoshida, H. Akiyoshi, Y. Yamashita, A. Stenke, L. Revell, T. Sukhodolov, E. Rozanov, G. Pitari, D. Visionsi, K. A. Stone, and R. Schofield, Large-scale tropospheric transport in the Chemistry-Climate-Initiative (CCMI) simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume: 18, Issue: 10, Pages: 7217-7235, Doi: 10.5194/acp-18-7217-2018. Published: MAY 25 2018.
- Osinski, R. and F. Bouttier, 2017: Short-range probabilistic forecasting of convective risks for aviation based on a LAF-ensemble approach. *Meteorological Applications*, Volume: 25, Issue: 1, Pages: 105-118, Doi: 10.1002/met.1674. Published : JAN 2018.
- Pianezze, J., Barthe, C., Bielli, S., Tulet, P., Jullien, S., Cambon, G., Bousquet, O., Claeys, M., Cordier, E., A New Coupled Ocean-Waves-Atmosphere Model Designed for Tropical Storm Studies: Example of Tropical Cyclone Bejisa (2013-2014) in the South-West Indian Ocean. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Volume: 10, Issue: 3, Pages: 801-825, Doi: 10.1002/2017MS001177. Published: MAR 2018.
- Pineau-Guillou, L., F. Ardhuin, M.-N. Bouin, J.-L. Redelsperger, B. Chapron, J.R. Bidlot and Y. Quilfen, 2018: Strong winds in a coupled wave-atmosphere model during a North Atlantic storm event: evaluation against observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 144, Issue: 711, Pages: 317-332, Part: B, Doi: 10.1002/qj.3205. Published: JAN 2018.
- Planton, Y., A. Voltaire, H. Giordani, G. Caniaux, Main processes of interannual variability of the atlantic cold tongue, *Climate Dynamics*, Volume: 50, Issue: 5-6, Pages: 1495-1512, Doi: 10.1007/s00382-017-3701-2. Published: MAR 2018.
- Price, J. D., S. Lane, I. A. Boutle, D. K. E. Smith, T. Bergot, C. Lac, L. Duconge, J. McGregor, A. Kerr-Munslow, M. Pickering, and R. Clark, 2018: LANFEX: A Field and Modeling Study to Improve Our Understanding and Forecasting of Radiation Fog. *Bulletin of American Meteorology Society*, vol 99.
- Queno, L., V. Vionnet, F. Cabot, D. Vreccout and I. Dombrowski-Etchevers, 2018: Forecasting and modelling ice layer formation on the snowpack due to freezing precipitation in the Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*, Volume: 146, Pages: 19-31, Doi: 10.1016/j.coldregions.2017.11.007, Published: FEB 2018.
- Raynaud, L., Touze, B., et Arbogast, P., Detection of Severe Weather Events in a High-Resolution Ensemble Prediction System Using the Extreme Forecast Index (EFI) and Shift of Tails (SOT). *Weather And Forecasting*, Volume: 33, Issue: 4, Pages : 901-908, Doi: 10.1175/WAF-D-17-0183.1. Published: AUG 2018.
- Renard J-B, F. Dulac, P. Durand, Q. Bourgeois, C. Denjean, D. Vignelles, B. Couté, M. Jeannot, N. Verdier, and M. Malle, 2018: In situ measurements of desert dust particles above the western Mediterranean Sea with the balloonborne Light Optical Aerosol Counter/sizer (LOAC) during the ChArMEx campaign of summer 2013. *Atmospheric Chemistry And Physics*, Volume: 18, Issue: 5, Pages: 3677-3699, Doi : 10.5194/acp-18-3677-2018. Published: MAR 13 2018.
- Réveillet, M., D. Six, C. Vincent, A. Rabatel, M. Dumont, M. Lafaysse, S. Morin, V. Vionnet and M. Litt, 2018: Relative performance of empirical and physical models in assessing the seasonal and annual glacier surface mass balance of Saint-Sorlin Glacier (French Alps). *The Cryosphere*, Volume: 12, Pages: 1367-1386, Doi: <https://doi.org/10.5194/tc-12-1367-2018>, Published: APR 2018.
- Revuelto, J., G. Lecourt, M. Lafaysse, I. Zin, L. Charrois, V. Vionnet, M. Dumont, A. Rabatel, D. Six, T. Condom, S. Morin, A. Viani and P. Sirguey, 2018: Multi-Criteria Evaluation of Snowpack Simulations in Complex Alpine Terrain Using Satellite and In Situ Observations. *Remote Sensing*, Volume: 10, Issue: 8, Page: 1171, Doi: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/8/1171>, Published: JUL 2018.
- Ricaud, P., R. Zbinden, V. Catoire, V. Brocchi, F. Dulac, E. Hamonou, J.-C. Canonici, L. El Amraoui, S. Massart, B. Pignatelli, U. Dayan, P. Nabat, J. Sciare, M. Ramonet, M. Delmotte, A. di Sarra, D. Sferlazzo, T. Di Iorio, S. Piacentino, P. Cristofanelli, N. Mihalopoulos, G. Kouvarakis, M. Pikridas, C. Savvides, R. Mamouri, A. Nisantzi, D. Hadjimitsis, J.-L. Attié, H. Ferré, P. Theron, Y. Kangah, N. Jaidan, J. Guth, P. Jacquet, S. Chevrier, C. Robert, A. Bourdon, J.-F. Bourdinot, J.-C. Etienne, G. Krysztofak, P. Theron, 2018: The GLAM Airborne Campaign over the Mediterranean Basin. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume: 99, Issue: 2, Pages: 361-380, Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0226.1. Published: FEB 2018.
- Richon, C., Dutay, J.-C., Dulac, F., Wang, R., Balkanski, Y., Nabat, P., Aumont, O., Desboeufs, K., Laurent, B., Guieu, C., Raimbault, P., Beuviel, 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, Volume: 163, Special Issue: SI, Pages: 21-39, Doi: 10.1016/j.pocean.2017.04.009. Published: APR 2018.
- Roca, R., Dejus, M., Chambon, P., Cloché, S., Capderou, M., 2018: The Megha-Tropiques mission after 7 years in space. Soumis pour publication dans le livre "Satellite Precipitation Measurement" aux éditions Springer.
- Roca, R., Guérou, A., Junca R., Chambon, P., Gosset, M., Cloché, S., Schröder, M., 2018: Merging the infrared fleet and the microwave constellation for Tropical Hydrometeorology (TAPEER) and global climate monitoring (GIRAFE) applications. Soumis pour publication dans le livre "Satellite Precipitation Measurement" aux éditions Springer.
- Roca, R., Taburet, N., Lorant, E., Chambon, P., Alcoba, M., Brogniez, H., Cloché, S., Dufour, C., Gosset, M., Guilloteau, C., 2017: Quantifying the contribution of the Megha-Tropiques mission to the estimation of daily accumulated rainfall in the Tropics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 144, Issue: S1, Pages 49-63, Doi: 10.1002/qj.3327. Published: 29 juin 2018.
- Rogers, R., Cheung, K., Russel, R., Elsberry, Kohno, N., Leroux, MD., Otto, P.: The World Meteorological Organization's Fourth International Workshop on Tropical Cyclone Landfall Processes (IWTC-LP-IV): A Summary. *Tropical Cyclone Research and Review*, Volume: 7, Issue: 2, Pages: 77-84, Doi: 10.6057/2018TCRR02.01. Published: MAY 15 2018.
- Schafner, A., Craig, G., Wernli, H., Arbogast, P. Doyle, J.D., James, D., McTaggart-Cowan, R. Methven, J., Riviere, G., Ament, F., Boettcher, M., Al... . The North Atlantic Wave guide and Downstream Impact Experiment. *Bulletin of the American Meteorology Society*, Volume: 99, Issue: 8, Pages: 1607-1637, Doi: 10.1175/BAMS-D-17-0003.1. Published: AUG 2018.
- Schön, P., F. Naaïm-Bouvet, V. Vionnet and A. Prokop, 2018: Merging a terrain-based parameter with blowing snow fluxes for assessing snow redistribution in alpine terrain. *Cold Regions Science and Technology*, Volume: 155, Pages: 161-173, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.08.002>, Published: NOV 2018.
- Séférian R., M. Rocher, C. Guivarch, J. Colin, 2018: Constraints on biomass energy deployment in mitigation pathways : the case of water scarcity. *Environmental Research Letters*, Volume: 13, Issue: 5, Article Number: 054011, Doi: 10.1088/1748-9326/aabcd7. Published: MAY 2018.
- Séférian, R., Berthet, S. & Chevallier, M., 2018: Assessing the decadal predictability of land and ocean carbon uptake. *Environmental Research Letters*, Volume: 45, Issue: 5, Pages: 2455-2466, Doi: 10.1002/2017GL076092. Published: MAR 16 2018.
- Séférian, R., S. Baek, O. Boucher, J.-L. Dufresne, B. Decharme, D. Saint-Martin and R. Roehrig, 2017: An interactive ocean surface albedo scheme (OSAv1.0): formulation and evaluation in ARPEGE-Climate (V6.1) and LMDZ (V5A) : Geoscientific Model Development, Volume: 11, Issue: 1, Pages: 321-338, Doi : 10.5194/gmd-11-321-2018. Published: JAN 23 2018.
- Seneviratne S., J. Rogelj, R. Séférian and al., 2018: The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 °C warming. *Nature*, Volume: 558, Issue: 7708, Pages: 41-49, Doi: 10.1038/s41586-018-0181-4. Published: JUN 7 2018.
- Skiles, S. M., M. Flanner, J. M. Cook, M. Dumont and T. H. Painter, 2018: Radiative forcing by light-absorbing particles in snow. *Nature Climate Change*, Doi: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0296-5>.
- Somot, S; Houpert, Loic; Sevault, Florence; Testor, P. ; Bosse, A.; Taupier-Letage, I; Bouin, MN ; Waldman, R; Cassou, C; Sanchez-Gomez, E, 2018: Characterizing, modelling and understanding the climate variability of the deep water formation in

the North-Western Mediterranean Sea. *Climate Dynamics*, Volume: 51, Issue: 3, Special Issue: SI, Pages: 1179-1210, Published: AUG 2018.

Stavropoulos-Laffaille X., K. Chancibault, J.-M. Brun, A. Lemonsu, V. Masson, A. Boone and H. Andrieu, 2018: Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment - Geoscientific Model Development, 11, 4175-4194.

Su, Z., W. Timmermans, Y. Zeng, J. Schulz, V. O. John, R. A. Roebeling, P. Poli, D. Tan, F. Kaspar, A. Kaiser-Weiss, E. Swinnen, C. Toté, H. Gregow, T. Manninen, A. Riihelä, J.-C. Calvet, Y. Ma, and J. Wen: An overview of European efforts in generating climate data records. *Bulletin of American Meteorological Society*, Volume: 99, Issue: 2, Pages: 349-359, Doi: 10.1175/BAMS-D-16-0074.1. Published: FEB 2018.

Taufour, M., Vie, B., Augros, C., Boudevillain, B. Delanoe, J. Delautier, G. Ducrocq, V. Lac, C. Pinty, JP. Et Schwarzenbock, A. : Evaluation of the two-moment scheme LIMA based on microphysical observations from the HyMeX campaign Quarterly *Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 144 Issue: 714 Pages: 1398-1414 Part: A DOI: 10.1002/qj.3283 Published: JUL 2018.

Techel, F., C. Mitterer, E. Ceaglio, C. Coléou, S. Morin, F. Rastelli and R. S. Purves, 2018 : Spatial consistency and bias in avalanche forecasts – a case study in the European Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume: 18, Issue: 10, Pages: 2697-2716, Doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2697-2018>, Published: OCT 2018.

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. Smolčková, 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. *Geoscientific Model Development*, Volume: 11, Pages: 257-281, Doi: 10.5194/gmd-11-257-2018. Published: 18 Jan 2018.

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: *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Volume: 123, Issue: 3, Pages: 1745-1776, Doi: 10.1002/2016JC012671. Published: MAR 2018.

Thibert, E., P. Dkengne Sielenou, V. Vionnet, N. Eckert and C. Vincent, 2018: Causes of glacier melt extremes in the Alps since

1949. *Geophysical Research Letters*, Volume: 45, Doi: 10.1002/2017GL076333, Published: JAN 2018.

Tohir, AM., Portafaix, T., Sivakumar, V., Bencherif, H., Pazmino, A., Begue, N.,: Variability and trend in ozone over the southern tropics and subtropics. *Annales Geophysicae*, Volume : 36, Issue: 2, Pages: 381-404, Doi: 10.5194/angeo-36-381-2018. Published: MAR 16 2018.

Touzeau, A., A. Landais, S. Morin, L. Arnaud and G. Picard, 2018: Numerical experiments on vapor diffusion in polar snow and firn and its impact on isotopes using the multi-layer energy balance model Crocus in SURFEX v8.0. *Geoscientific Model Development*, Volume: 11, Issue: 6, Pages: 2393-2418, Doi: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2393-2018>, Published: JUN 2018.

Tramblay, Y., Jarlan L., Hanich L., Somot S. (2017) Future scenarios for surface water resources availability in North African dams: *Water Resources Management*, Volume: 32, Issue: 4, Pages: 1291-1306, Doi: 10.1007/s11269-017-1870-8. Published: MAR 2018.

Van Weverberg, K., C. J. Morcrette, J. Petch, S. A. Klein, H.-Y. Ma, C. Zhang, S. Xie, Q. Tang, W. I. Gustafson Jr, Y. Qian, L. K. Berg, Y. Liu, M. Huang, M. Ahlgrimm, R. Forbes, E. Bazile, R. Roehrig, J. Cole, W. Merryfield, W.-S. Lee, F. Cheruy, L. Mellul, Y.-C. Wang, K. Johnson, M. M. Thieman. CAUSES: Attribution of Surface Radiation Biases in NWP and Climate Models near the U.S. Southern Great Plains. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume: 123 Issue: 7 Pages: 3612-3644. Doi: 10.1002/2017JD027188 Published: APR 16 2018.

Venturini, MS., Bageston, JV., Caetano, NR., Peres, LV., Bencherif, H., Schuch, NJ.,: Mesopause region temperature variability and its trend in southern Brazil: *Annales Geophysicae*, Volume: 36, Issue: 2, Pages: 301-310, Doi: 10.5194/angeo-36-301-2018. Published: MAR 5 2018.

Vérèmes, H., Payen, G., Keckhut, P., Duflo, V., Baray, JL., Cammas, JP., Leclair de Bellevue, J., Posny, F., Evan, S., Metzger, JM., Marquestaut, N., al... : Ultraviolet Radiation modelling using output from the Chemistry Climate Model Initiative. *EPJ Web of Conferences, EDP Sciences*, 2018, The 28th International Laser Radar Conference (ILRC 28), Bucharest 2017, 176, pp.05015. Doi: 10.1051/epjconf/201817605015.

Verfaillie, D., M. Lafaysse, M. Déqué, N. Eckert, Y. Lejeune and S. Morin, 2018: Multi-components ensembles of future meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps. *The Cryosphere*, Volume: 12, Pages: 1249-1271, Doi: 10.5194/tc-12-1249-2018, Published: APR 2018.

Viani, A., T. Condom, C. Vincent, A. Rabatel, B. Bacchi, J. E. Sicart, J. Revuelto, D. Six and I. Zin, 2018. Glacier-wide summer surface mass balance reconstruction: hydrological balance applied on Argentière and Mer de Glace drainage basins (Mont

Blanc, France). *Journal of Glaciology*, Volume: 64, Issue: 243, Pages: 119-131, Doi: <https://doi.org/10.1017/jog.2018.7>, Published: FEB 2018.

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 Sensing*, Volume: 10, Issue: 1, Article Number: 21, Doi: 10.3390/rs10010021. Published: JAN 2018.

Vincent C., M. Dumont, D. Six, F. Brun, G. Picard and L. Arnaud, 2018 : Why do the dark and light ogives of Forbes bands have similar surface mass balances ? *Journal of Glaciology*, Volume: 64, Pages: 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1017/jog.2018.12>, Published: APR 2018.

Vionnet, V., G. Guyomarc'h, M. Lafaysse, F. Naaim-Bouvet, G. Giraud and Y. Deliot, 2018: Operational implementation and evaluation of a blowing snow scheme for avalanche hazard forecasting. *Cold Regions Science and Technology*, Volume: 147, Pages: 1-10, Doi: 10.1016/j.coldregions.2017.12.006, Published: MAR 2018.

Xueref, R., I., Dieudonne, E., Vuillemin, C., et al.: Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO<sub>2</sub> in the Paris megacity area : *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume: 18, Issue: 5, Pages: 3335-3362, Doi: 10.5194/acp-18-3335-2018. Published: MAR 7 2018.

Yano J.-I., M. Z. Ziemian'ski, M. Cullen, P. Termonia, J. Onvlee, L. Bengtsson, A. Carrassi, R. Davy, A. Deluca, S. L. Gray, V. Homar, M. Köhler, S. Krichak, S. Michaelides, V. T. J. Phillips, P. M. M. Soares, and A. Wyszogrodzki, 2018: Scientific Challenges of Convective-Scale Numerical Weather Prediction, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume: 99, Issue: 4, Pages: 699-710, Doi: 10.1175/BAMS-D-17-0125.1. Published: APR 2018.

Yano, J.-I., Andrew J. Heymsfield, and A. Bansemmer, 2018: Determination of the Ice Particle Size Distributions Using Observations as the Integrated Constraints, *Journal of the Atmospheric Sciences - Volume: 75, Number: 3 (March 2018)*.

Zhang, S., Calvet, J.-C., Darrozes, J., Roussel, N., Frappart, F., Bouhours, G.: Deriving surface soil moisture from reflected GNSS signal observations over a grassland site in southwestern France. *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume: 22, Issue: 3, Pages: 1931-1946. Doi: 10.5194/hess-22-1931-2018. Published: MAR 20 2018.

Zhu, YQ., Toon, OB., Kinnison, D., Harvey, VL., Mills, MJ., Bardeen, CG., Pitts, M., Begue, N., Renard, JB., Berthet, G., al... : Stratospheric Aerosols, Polar Stratospheric Clouds, and Polar Ozone Depletion After the Mount Calbuco Eruption in 2015. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, Volume: 123, Issue: 21, Pages: 12308-12331, Doi: 10.1029/2018JD028974. Published: NOV 16 2018.

## Publications 2018 dans des revues à comité de lecture hors DR

Andrey-Andres, J., Fourrié, N., Guidard, V., Armante, R., Brunel, P., Crevoisier, C., Tournier, B., 2018: A simulated observation database to assess the impact of the IASI-NG hyperspectral infrared sounder, *Atmospheric Measurement Techniques* 11(2), 803-818.

Aouf, L., A. Dalphiné, S. Law-Chune, Y. Drillet, The upgraded CMEMS global wave system: improvements and efficiency for ocean/waves coupling, *General Assembly EGU*, Avril 2018, Vienna, Austral.

Aouf, L., A. Dalphiné, R. Husson, S. Law-Chune, The assimilation of Sentinel-1A and 1B SAR wave spectra in the CMEMS global wave system. *Workshop ESA SEASAR*, Frascati, 7-10 Mai 2018.

- Aouf, L., A. Dalphinnet, Toward a more and more accurate wave forecasting system: Thanks to Altimetry. symposium 25 years of progress in radar altimetry, Ponta Delgada, 24-29 september 2018.
- Aouf, L., D. Hauser, C. Tison, B. Chapron : On the assimilation of multi-source of directional wave spectra from Sentinel-1A and 1B, and CFOSAT in the wave model MFWAM: Toward an operational use in CMEMS-MFC. Proceedings IGARSS 2018, Valencia, Spain.
- Aumann, H. H.; Chen, X.; Fishbein, E.; Geer, A.; Havemann, S.; Huang, X.; Liu, X.; Liuzzi, G.; DeSouza-Machado, S.; Manning, E. M.; Masiello, G.; Matricardi, M.; Moradi, I.; Natraj, V.; Serio, C.; Strow, L.; Vidot, J.; Wilson, R. C.; Wu, W.; Yang, Q. & Yung, Y. L. (2018), "Evaluation of Radiative Transfer Models With Clouds", *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(11), 6142-6157.
- Augros, C., Caumont, O., Ducrocq, V. and Gaussiat, N. (2018), Assimilation of radar dual-polarization observations in AROME model. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2018;144:1352-1368. doi:10.1002/qj.3269.
- Bresson, E., Philippe Arbogast, Lotfi Aouf, Denis Paradis, Anna Kortcheva, Andrey Bogatchev, Vasko Galabov, Marieta Dimitrova, Guillaume Morvan, Patrick Ohl, Boryana Tsenova, and Florence Rabier: On the improvement of wave and storm surge hindcasts by downscaled atmospheric forcing: application to historical storms, *Natural Hazards Earth System Sciences*, 18, 997-1012, 2018.
- Brönnimann, S., Allan, R., Atkinson, C., Buizza, R., Bulygina, O., Dahlgren, P., Dee, D., Dunn, R., Gomes, P., John, V.O., Jourdain, S., Haimberger, L., Hersbach, H., Kennedy, J., Poli, P., Pulliainen, J., Rayner, N., Saunders, R., Schulz, J., Sterin, A., Stickler, A., Titchner, H., Valente, M.A., Ventura, C. and Wilkinson, C. (2018), "Observations for Reanalyses". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, 1851-1866. doi:10.1175/BAMS-D-17-0229.1.
- Buizza, R., Poli, P., Rixen, M., Alonso-Balmaseda, M., Bosilovich, M.G., Brönnimann, S., Compo, G.P., Dee, D.P., Desiato, F., Doutriaux-Boucher, M., Fujiwara, M., Kaiser-Weiss, A.K., Kobayashi, S., Liu, Z., Masina, S., Mathieu, P., Rayner, N., Richter, C., Seneviratne, S.I., Simmons, A.J., Thépaut, J., Auger, J.D., Bechtold, M., Bertell, E., Dong, B., Kozubek, M., Sharif, K., Thomas, C., Schimanke, S., Storto, A., Tuma, M., Välsuö, I., and Vaselali, A. (2018), "Advancing Global and Regional Reanalyses". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, ES139-ES144. doi: 10.1175/BAMS-D-17-0312.1.
- Dalphinnet A., Aouf L., Husson R., Michaud H.: Impact of the SAR wind in regional wave model on the french Mediterranean sea, Workshop ESA SEASAR, Frascati, 7-10 Mai 2018.
- Dalphinnet A., Aouf, L., Osinski R., Michaud H.: High resolution coastal wave model for the West Indies under major hurricanes of 2017, symposium 25 years of progress in radar altimetry, Ponta Delgada, 24-29 sept 2018.
- Krien, Y.; Arnaud, G.; Cécé, R.; Ruf, C.; Belmadani, A.; Khan, J.; Bernard, D.; Islam, A. K. M. S.; Durand, F.; Testut, L.; Palany, P. & Zahibo, N. (2018), 'Can we improve parametric cyclonic wind fields using recent satellite remote sensing data?', *Remote Sensing* 2018(10), 1963.
- Lalouaux, P., de Boisseson, E., Balmaseda, M., Bidlot, J., Broennimann, S., Buizza, R., Dalhgren, P., Dee, D., Haimberger, L., Hersbach, H., Kosaka, Y., Martin, M., Poli, P., Rayner, N., Rustemeier, E. and Schepers, D. (2018), "CERA-20C: A coupled reanalysis of the twentieth century". *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 10, 1172-1195. doi: 10.1029/2018MS001273.
- Law-Chune, S., L. Aouf: Wave effects in global ocean modelling : parametrizations vs forcing from wave model. *Ocean Dynamics*, Topical collection, December 2018, Volume 68, Issue 12, pp 1739-1758.
- Legrand, S., P; de la Vallée, L.R. Hole, K.-F. Dagestad and P. Daniel, 2018: Towards NOOS-Drift, a multi-models ensemble system to assess and improve drift forecast accuracy, 4th GEO Blue Planet Symposium, Toulouse, France, 4-6 July 2018.
- Leroux, M., J. Meister, D. Mekies, A. Dorla, and P. Caroff, 2018: A Climatology of Southwest Indian Ocean Tropical Systems: Their Number, Tracks, Impacts, Sizes, Empirical Maximum Potential Intensity, and Intensity Changes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 57, 1021-1041, doi: 10.1175/JAMC-D-17-0094.1.
- Osinski, R.; Dalphinnet, A.; Aouf, L. & Palany, P. (2018), 'Estimation of the hundred year return level of the significant wave height for the French Guiana coast', *Brazilian Journal of Oceanography* 66(4), 325-334.
- Patou, M.; Vidot, J.; Riédi, J.; Penide, G. & Garrett, T. J. (2018), 'Prediction of the Onset of Heavy Rain Using SEVIRI Cloud Observations', *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57(10), 2343-2361.
- Picart, S. S.; Tandeo, P.; Autret, E. & Gausset, B. (2018), "Exploring Machine Learning to Correct Satellite-Derived Sea Surface Temperatures", *Remote Sensing* 10(2), 224.
- Poli, P. & Brunel, P. (2018), "Assessing reanalysis quality with early sounders Nimbus-4 IRIS (1970) and Nimbus-6 HIRS (1975)", *Advances in Space Research* 62(2), 245-264. doi:10.1016/j.asr.2018.04.022.
- Saunders, R.; Hocking, J.; Turner, E.; Rayer, P.; Rundle, D.; Brunel, P.; Vidot, J.; Roquet, P.; Matricardi, M.; Geer, A.; Bormann, N. & Lupu, C. (2018), "An update on the RTTOV fast radiative transfer model (currently at version~12)", *Geoscientific Model Development* 11(7), 2717-2737.
- Sauvage, C.; Brossier, C. L.; Ducrocq, V.; Bouin, M.-N.; Vincendon, B.; Verdecchia, M.; Taupier-Letage, I. & Orain, F. (2018), "Impact of the representation of the freshwater river input in the Western Mediterranean Sea", *Ocean Modelling* 131, 115-131.
- Su, Z., Timmermans, W., Zeng, Y., Schulz, J., John, V.O., Roebeling, R.A., Poli, P., Tan, D., Kaspar, F., Kaiser-Weiss, A.K., Swinnen, E., Toté, C., Gregow, H., Manninen, T., Riihelä, A., Calvet, J., Ma, Y. and Wen, J. (2018), "An Overview of European Efforts in Generating Climate Data Records". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99, 349-359. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0074.1.
- Verron, J., P. Bonnefond, L. Aouf, et al : The Benefits of the Ka-Band as Evidenced from the SARAL/AltiKa Altimetric Mission: Scientific Applications. *Remote Sensing* 2018, 10, 163; doi: 10.3390/rs10020163.
- Yu, N., N. Gaussiat and P. Tabary, 2018, Polarimetric X-band weather radars for quantitative precipitation estimation in mountainous regions. *Q J R Meteorol Soc.* 2018; 144: 2603-2619. DOI: 10.1002/qj.3366.

## Thèses soutenues en 2018

- Abdel-Lathif, A., 2018 : Représentation de la convection par CNRM-CM6 dans le cadre de la campagne CINDY2011/DYNAMO, le 6 février 2018
- Borderies, M., 2018 : Assimilation de données de radar à nuages aéroporté pendant la campagne de mesures HyMeX, le 7 décembre 2018.
- Calmer, R., 2018: Vertical wind measurements using a 5-hole Probe with Remotely Piloted Aircraft for studying aerosol-cloud interactions, le 20 mars 2018.
- Cohen, Y., 2018 : Climatologies et tendances de l'ozone et du monoxyde de carbone dans l'UTLS, vues par les mesures IAGOS et le modèle MOCAGE, le 30 novembre 2018.
- Descheemaeker, M., 2018 : Capacité du capteur géostationnaire MTG-FCI à améliorer la prévision de la concentration des aérosols dans un modèle de chimie-transport, le 25 octobre 2018.
- Farouk, I, 2018 : Quelles approches pour l'assimilation des radiances nuageuses IASI en prévision numérique du temps ?, le 19 décembre 2018.
- Jaidan, D., 2018 : Étude des processus d'import et d'export de la pollution gazeuse et particulaire au-dessus du Bassin Méditerranéen dans le cadre du projet ChArMeX, le 5 février 2018.
- Léger, J., 2018 : Un modèle d'ascendance convective simple prenant en compte explicitement le terme de pression non-hydrostatique, le 6 décembre 2018.
- Morel, X., 2018 : Observations et modélisation in situ du carbone des sols boréaux et des émissions de méthane associées, le 28 juin 2018.
- Planque, C., 2018 : Observation satellitaire et modélisation de l'albédo des forêts sur le territoire français métropolitain : dynamiques temporelles et impacts radiatifs, le 7 février 2018.
- Plazzota, M., 2018 : Impacts de la gestion du rayonnement solaire sur le système Terre : rôle des boucles de rétroaction liées aux cycles du carbone et hydrologique, le 3 décembre 2018.
- Sabatier, T., 2018 : Circulations à fine échelle et qualité de l'air hivernal dans une vallée alpine urbanisée, le 28 novembre 2018.
- Taufour, M., 2018 : Validation et amélioration du schéma microphysique à deux moments LIMA à partir des observations de la campagne de mesures HyMeX, le 20 décembre 2018.

## Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2018

- Lemonsu, A., 2018 : Étude de climat urbain pour l'amélioration du cadre de vie et l'adaptation au changement climatique, le 19 mars 2018.

# Glossaire

## Organismes

<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	<b>JMA</b>	Japan Meteorological Agency
<b>AIEA</b>	Agence Internationale de l'Energie Atomique	<b>KNMI-TNO</b>	Royal Netherlands Meteorological Institute and Netherlands Organization for Applied Scientific Research
<b>ANAM</b>	Agence Nationale d'Agro-Météorologie du Burkina Faso	<b>MEEM</b>	Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer
<b>ANELFA</b>	Association Nationale d'Etude et de Lutte contre les Fléaux Atmosphériques	<b>MERCATOR-OCEAN</b>	Société Civile Française d'océanographie opérationnelle
<b>ANR</b>	Agence Nationale de la Recherche	<b>MetOffice</b>	United Kingdom Meteorological Office
<b>BEC</b>	Bureau d'Etudes et de Consultance	<b>MPI</b>	Max Planck Institut
<b>CDM</b>	Centre Départemental de la Météorologie	<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>CDMA</b>	Cellule de développement Météo-Air	<b>NCAR</b>	National Center for Atmospheric Research
<b>CEH</b>	Centre for Ecology and Hydrology	<b>NEC</b>	Nippon Electric Company
<b>CEMAGREF</b>	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)	<b>NIWA</b>	National Institute for Water and the Atmosphere (Nouvelle-Zélande)
<b>CEN</b>	Centre d'Etudes de la Neige	<b>NOAA</b>	National Ocean and Atmosphere Administration
<b>CEPMMT</b>	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme	<b>OACI</b>	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
<b>CERFACS</b>	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique	<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale
<b>CMM</b>	Centre de Météorologie Marine	<b>OMP</b>	Observatoire Midi-Pyrénées
<b>CMRS</b>	Centre Météorologique Régional Spécialisé	<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>CMS</b>	Centre de Météorologie Spatiale	<b>ONERA</b>	Office national d'études et de recherches aérospatiales
<b>CNES</b>	Centre National d'Études Spatiales	<b>OTRA-STAE</b>	Réseau Thématique de Recherche Avancée - Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace
<b>CNP</b>	Centre National de Prévision	<b>SCHAPI</b>	Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations
<b>DGA</b>	Délégation générale pour l'armement	<b>SHOM</b>	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
<b>DGPR</b>	Direction Générale de la Prévention des Risques	<b>SMHI</b>	Swedish Meteorological and Hydrological Institute
<b>DGSCGC</b>	Direction générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise	<b>UE</b>	Union Européenne
<b>EALAT</b>	Ecole de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre	<b>UKMO</b>	United Kingdom Meteorological Office
<b>EASA</b>	European Aviation Safety Agency, Agence Européenne de la Sécurité Aérienne	<b>VAAC</b>	Volcanic Ash Advisory Centre
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts	<b>Laboratoires ou unités de recherche / développement</b>	
<b>EEA</b>	Agence Environnementale Européenne	<b>3SR</b>	Laboratoire Sols – Solides – Structures – Rhéologie, UJF Grenoble / CNRS / Grenoble INP
<b>ENAC</b>	Ecole Nationale de l'Aviation Civile	<b>BRGM</b>	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
<b>ENM</b>	Ecole Nationale de la Météorologie	<b>CEREA</b>	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
<b>ESA</b>	European Space Agency	<b>CESBIO</b>	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
<b>ETNA</b>	Division Ecoulements Torrentiels, Neige et Avalanches du CEMAGREF	<b>CNRM</b>	Centre National de Recherches Météorologiques
<b>EUFAR</b>	Réseau européen d'infrastructures de recherche aéroportée pour les sciences environnementales et de la Terre	<b>CNRS</b>	Centre National de Recherches Scientifiques
<b>EUMETNET</b>	EUropean METeorological NETwork	<b>CRA</b>	Centre de Recherches Atmosphériques
<b>EUMETSAT</b>	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques	<b>DSO</b>	Direction des Systèmes d'Observation (Météo-France)
<b>FAA</b>	Federal Aviation Agency, Agence US de la Sécurité Aérienne	<b>GAME</b>	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique
<b>FAAM</b>	Facility for Airborne Atmospheric Measurements (United Kingdom)	<b>GSMA</b>	Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique, UMR 7331
<b>FMI</b>	Institut Finlandais de Météorologie	<b>IFSTAR</b>	CNRS Université de Reims Champagne Ardennes
<b>ICARE</b>	International Conference on Airborne Research for the Environment	<b>IGN</b>	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
<b>IFREMER</b>	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER	<b>IPSL</b>	Institut Géographique National
<b>INERIS</b>	Institut National de l'Environnement et des RISques	<b>LaMP</b>	Institut Pierre Simon Laplace
<b>INRIA</b>	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique	<b>LATMOS</b>	Laboratoire de Météorologie Physique
<b>INSU</b>	Institut National des Sciences de l'Univers	<b>LAVUE</b>	Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales
<b>IPEV</b>	Institut Paul Emile Victor	<b>LCP</b>	Laboratoire Architecture, Ville, Urbanisme, Environnement
<b>IRD</b>	Institut de Recherche pour le Développement	<b>LEGI</b>	Laboratoire Chimie et Procédés
<b>IRSTEA</b>	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (anciennement CEMAGREF)	<b>LGGE</b>	Laboratoire des écoulements physiques et industriels
<b>JAXA</b>	Japan Aerospace eXploration Agency	<b>LHSV</b>	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
		<b>LIRIS</b>	Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant
		<b>LISST</b>	Laboratoire d'Informatique en Image et Systèmes d'information
		<b>LMD</b>	Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires
		<b>LOCEAN</b>	Laboratoire de Météorologie Dynamique
		<b>LPCEE</b>	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
		<b>LPED</b>	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
			Laboratoire Population Environnement Développement

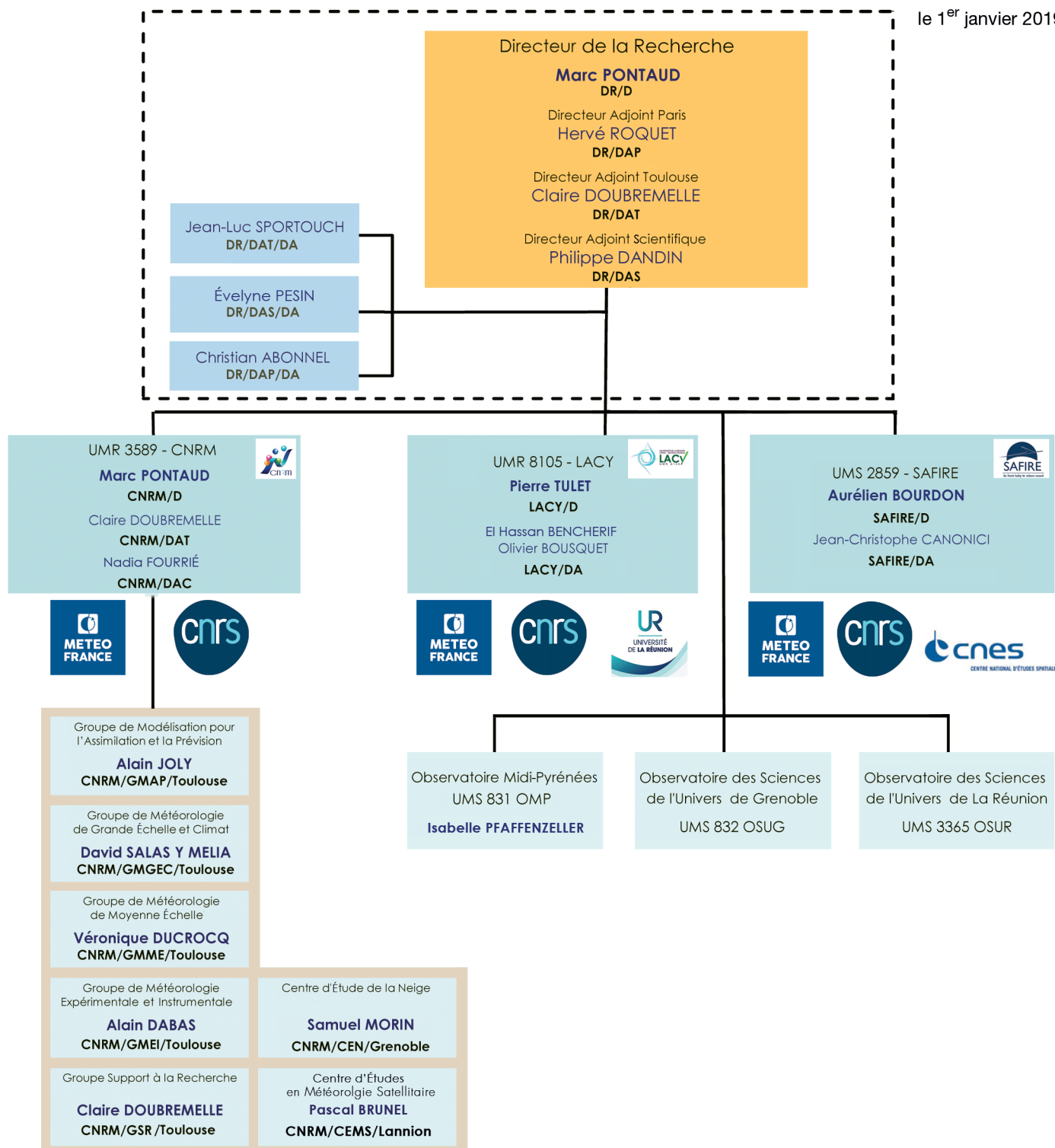
<b>LRA</b>	Laboratoire de Recherche en Architecture	<b>JERRA</b>	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses
<b>LSCE</b>	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement	<b>USAP</b>	United States Antarctic Program
<b>RIU</b>	Rhenish Institute for environmental research at the University of Cologne	<b>VOLTIGE</b>	Vecteur d'Observation de La Troposphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement
<b>SAFIRE</b>	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement	<b>WCRP</b>	World Climate Research Programme
<b>WUT</b>	Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)		
	<b>Programmes et projets nationaux et internationaux</b>		<b>Campagnes expérimentales</b>
<b>BACCHUS</b>	Impact of Biogenic versus Anthropogenic emissions on Clouds and Climate: towards a Holistic UnderStanding	<b>AMMA</b>	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
<b>BAMED</b>	BALloons in the MEDiterranean	<b>CAPITOU</b>	Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer
<b>C3AF</b>	Changement Climatique et Conséquences sur les Antilles Françaises	<b>CORDEX</b>	COordinated Regional climate Downscaling Experiment
<b>CHFP</b>	Climate Historical Forecasting Project	<b>EUREQUA</b>	Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUArtiers
<b>CHROME</b>	Couplage Hydrométéorologique RégiOnal Multi-Ensemble	<b>HAIC</b>	High Altitude and Ice Crystals ( <a href="http://www.haic.eu">www.haic.eu</a> )
<b>CIDEX</b>	Calibration and Icing Detection EXperiment	<b>MEGAPOLI</b>	Megacities : Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation
<b>CMIP</b>	Coupled Model Intercomparaison Project	<b>SMOSREX</b>	Surface MOnitoring of the Soil Reservoir EXperiment
<b>COPERNICUS</b>	European Earth observation system <a href="http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/">http://www.copernicus.eu/pages-principales/services/climate-change/</a>		<b>Autres sigles, abréviations ou acronymes</b>
<b>CREWS</b>	Climate Risk and Early Warning Systems	<b>AIRS</b>	Sondeur Infrarouge avancé
<b>CYPRIM</b>	projet Cyclogénèse et précipitations intenses dans la zone méditerranéenne	<b>ALADIN</b>	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational
<b>DYAMOND</b>	DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains	<b>ALIDS</b>	Interféromètre laser aéroporté pour mesurer la granulométrie des gouttes d'eau dans les nuages
<b>ERA-CLIM</b>	European Reanalysis of Global Climate Observations	<b>AMSR</b>	Advanced Microwave Scanning Radiometer
<b>ESURFMAR</b>	Eumetnet SURFace MARine programme	<b>AMSU</b>	Advanced Microwave Sounding Unit
<b>EUFAR2</b>	2nd projet EUFAR dans le cadre de 7e PCRD et 4e projet EUFAR depuis 2000	<b>AMSU-A</b>	Advanced Microwave Sounding Unit-A
<b>EUREQUA</b>	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.	<b>AMSU-B</b>	Advanced Microwave Sounding Unit-B
<b>EURO4M</b>	European reanalysis and observations for monitoring <a href="http://www.euro4m.eu/">http://www.euro4m.eu/</a>	<b>AMULSE</b>	Atmospheric Measurements by Ultra-Light SpEctrometer
<b>FEDER</b>	Fonds Européen de Développement Régional	<b>ANALYSE</b>	ANALyse Synoptique Graphique
<b>GeoMIP</b>	Geoengineering Model Intercomparison Project	<b>ANSP</b>	Air Navigation Service Provider
<b>GHRSSST</b>	International Group for High Resolution SST	<b>ANTILOPE</b>	ANALyse par spaTialisation hOraire des PrEcipitations
<b>GLOSCAL</b>	Global Ocean Surface salinity CALibration and validation	<b>ARAMIS</b>	Application Radar A la Météorologie Infra-Synoptique
<b>H2020</b>	Programme-cadre pour la recherche et l'innovation (2014-2020)	<b>ARGO</b>	Array for Real time Geostrophic Oceanography
<b>HOMONIM</b>	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins	<b>AROME</b>	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle
<b>HyMeX</b>	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment	<b>AROME-COMB</b>	AROME - COMBinaison
<b>IMAGINES</b>	Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels	<b>AROME-PERTOBS</b>	AROME (OBServations PERTurbées aléatoirement)
<b>IncREO</b>	Increasing Resilience through Earth Observation	<b>AROME-WMED</b>	Configuration AROME sur la Méditerranée occidentale
<b>LEFE</b>	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »	<b>ARPEGE</b>	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
<b>MACC</b>	Monitoring Atmospheric Composition and Climate	<b>AS</b>	Adaptations Statistiques
<b>METOP</b>	METeorological Operational Polar satellites	<b>ASAR</b>	Advanced Synthetic Arperture Radar
<b>MISVA</b>	Monitoring of IntraSeasonal Variability of Africa : <a href="http://misva.seddo.fr">misva.seddo.fr</a>	<b>ASCAT</b>	Advanced SCATterometer
<b>PCRD</b>	Programme Cadre de Recherche et de Développement	<b>ASTEX</b>	Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment
<b>PLUVAR</b>	Variabilité sub-saisonnière des pluies sur les îles du Pacifique Sud	<b>ATM</b>	Air Traffic Management - Contrôle du trafic aérien
<b>PNRA</b>	Programma Nazionale di Ricerca in Antartide	<b>ATMS</b>	Advanced Technology Microwave Sounder
<b>QUANTIFY</b>	Programme QUANTIFYing the climate impact of global and European transport systems	<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>RHYTMME</b>	Risques HYdro-météorologiques en Territoires de Montagnes et MEDiterranéens	<b>BAS</b>	British Antarctic Survey
<b>SCAMPEI</b>	Scénarios Climatiques Adaptés aux Montagnes : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes - projet de l'ANR coordonné par le CNRM	<b>BLLAST</b>	Boundary Layer Late Afternoon and Sunset Turbulence
<b>SESAR</b>	Single European Sky ATM Research	<b>BPCL</b>	Ballon Pressurisé de Couche Limite
<b>SMOS</b>	Soil Moisture and Ocean Salinity	<b>BSS</b>	Score probabiliste « Brier Skill Score »
<b>Suomi-NPP</b>	Programme américain de satellites météorologiques en orbite polaire	<b>CALIOP</b>	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
<b>THORPEX</b>	THe Observing system Research and Predictability EXperiment	<b>CALIPSO</b>	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
<b>TIREX</b>	Transfert des apprentissages de Retours d'EXpériences scientifiques pour le renforcement des capacités de réponse et d'adaptation individuelles et collectives dans un contexte de changement climatique	<b>CANARI</b>	Code d'Analyse Nécessaire à ARPEGE pour ses Rejets et son Initialisation
		<b>CAPE</b>	Convective Available Potential Energy
		<b>CAPRICORNE</b>	CARactéristiques PRIncipales de la COUveRture NuageusE
		<b>CARIBOU</b>	Cartographie de l'Analyse du RIsque de Brume et de brOUillard
		<b>CAROLS</b>	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
		<b>Cb</b>	Cumulonimbus
		<b>CFMIP</b>	Cloud Feedback Intercomparison Project
		<b>CFOSAT</b>	Chinese-French SATellite
		<b>ChArMeX</b>	Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment
		<b>C-IFS</b>	Composition - Integrated Forecasting System
		<b>CISMf</b>	Centre Inter-armées de Soutien Météorologique aux Forces
		<b>CLAS</b>	Couches Limites Atmosphériques Stables
		<b>CMC</b>	Cellule Météorologique de Crise
		<b>CMIP6</b>	6 <sup>e</sup> phase du Coupled Model Intercomparison Project

<b>CNRM-CM5</b>	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM	<b>ISBA - ES</b>	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
<b>CNRM-RCSM</b>	Regional Climate System Model	<b>ISBA-TOP</b>	Couplage du schéma de surface ISBA et d'une version « méditerranéenne » du modèle hydrologique TOPMODEL
<b>COP</b>	Contrat d'Objectifs et de Performances	<b>ISFC</b>	Indice de Segmentation de la Composante de Fourier
<b>COPAL</b>	COmmunity heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences	<b>ISIS</b>	Algorithme de suivi automatique des systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Météosat
<b>CPR</b>	Cloud Profiling Radar	<b>IWC</b>	Ice Water Content
<b>CrIS</b>	Cross-track Infra-Red Sounder	<b>LAI</b>	Leaf Area Index (indice foliaire)
<b>CROCUS</b>	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.	<b>Land-SAF</b>	LAND Satellite Application Facilities
<b>CTRIP</b>	CNRM-Total Routing Integrated Pathway	<b>LAURE</b>	Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
<b>DCSC</b>	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques	<b>LCCS</b>	Land Cover Classification System
<b>DCT</b>	Diffraction Contrast Tomography	<b>LES</b>	Large Eddy Simulation model
<b>DEM</b>	Discrete Element Method	<b>LISA</b>	Lidar SATellite
<b>DISORT</b>	Discrete Ordinates Radiative Transfer model	<b>4M</b>	Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques
<b>DMT</b>	Droplet Measurement Technologies	<b>Med-CORDEX</b>	Mediterranean Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
<b>DOA</b>	Département de l'Observation en Altitude	<b>MEDUP</b>	MEDiterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment
<b>DP</b>	Direction de la Production	<b>Megha-Tropiques</b>	Satellite franco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale
<b>DPI</b>	Droits de Propriété Intellectuelle	<b>MEPRA</b>	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche (modélisation)
<b>DPR</b>	Dual frequency Precipitation Radar	<b>MERSEA</b>	Marine EnviRonment and Security for the European Area
<b>DPrévi</b>	Direction de la Prévision	<b>MESCAN</b>	Combinaison de MESAN (nom du système suédois) et de CANARI
<b>DSI</b>	Direction des Systèmes d'Information (Météo-France)	<b>MESO-NH</b>	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique
<b>DSNA</b>	Direction des Services de la Navigation Aérienne	<b>MFWAM</b>	Météo-France WAve Model
<b>ECOCLIMAP</b>	Base de données de paramètres de surface	<b>MHS</b>	Microwave Humidity Sounder
<b>ECUME</b>	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates	<b>MISR</b>	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
<b>EGEE</b>	Etude du golfe de Guinée	<b>MNPCA</b>	Microphysique des Nuages et de Physico-Chimie de l'Atmosphère
<b>ENVISAT</b>	ENVIronmental SATellite	<b>MOCAGE</b>	MODélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)
<b>ERA</b>	European Re-Analysis	<b>MODCOU</b>	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.
<b>ESGF</b>	Earth System Grid Federation	<b>MODIS</b>	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)
<b>ESRF</b>	European Synchrotron Radiation Facility	<b>MoMa</b>	Méthodes Mathématiques pour le couplage modèles et données dans les systèmes non-linéaires stochastiques à grand nombre de degrés de liberté
<b>EUCLIPSE</b>	European Union Cloud Intercomparison, Process Study & Evaluation	<b>MOTHY</b>	Modèle Océanique de Transport d'HYdrocarbure
<b>FAB</b>	Fonctionnal Aerospace Block	<b>MRR</b>	Micro Rain Radars
<b>FABEC</b>	Functional Aerospace Block Europe Central	<b>MSG</b>	Météosat Seconde Génération
<b>FAR</b>	Fausse AleRte	<b>NAO</b>	North Atlantic Oscillation
<b>FSO</b>	Forecast Sensitivity to Observations	<b>NEMO</b>	Nucleus for European Modelling of Ocean
<b>FSOi</b>	Forecast Sensitivity to Observations-based impact	<b>NEMO-WMED36</b>	Configuration de NEMO sur la Méditerranée occidentale
<b>GABLS4</b>	Gewex Atmospheric Boundary Layer Study	<b>NSF</b>	Norges StandardiseringsForbund
<b>GELATO</b>	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean	<b>NWCSAF</b>	Satellite Application Facility for Nowcasting
<b>GEV</b>	Loi généralisée des valeurs extrêmes	<b>OASIS</b>	Ocean Atmosphere Sea Ice Soil
<b>GIEC</b>	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat	<b>OPIC</b>	Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection
<b>GMAP</b>	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision	<b>ORACLE</b>	Opportunités et Risques pour les Agro-écosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatiqueE, socio-économiques et politiques en France
<b>GMEI</b>	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale	<b>ORCHIDEE</b>	ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms
<b>GMME</b>	Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle	<b>OSCAT</b>	OCEANSAT-2 Scatterometer
<b>GMES</b>	Global Monitoring for Environment and Security	<b>OSTIA</b>	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis
<b>GNSS-R</b>	Global Navigation by Satellite System (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) – R pour « Réflectométrie »	<b>OTICE</b>	Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires
<b>GOES 16/17</b>	Satellites météorologiques géostationnaires américains	<b>PALM</b>	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
<b>GPM</b>	Global Precipitation Measurement	<b>PDO</b>	Pacific Decadal Oscillation
<b>GPP</b>	Gross Primary Production	<b>PEARO</b>	Prévision d'Ensemble AROME
<b>GPS</b>	Global Positioning System	<b>PEARP</b>	Prévision d'Ensemble ARPÈge
<b>GSMA</b>	Groupe de Spectrométrie Moléculaire et Atmosphérique	<b>PI</b>	Prévision Immédiate
<b>High IWC</b>	High Ice Water Content	<b>PN</b>	Prévision Numérique
<b>Himawari8</b>	Satellite météorologique géostationnaire japonais	<b>PNT</b>	Prévision Numérique du Temps
<b>HIRLAM</b>	High Resolution Limited Area Model	<b>POD</b>	PrObabilité de Détection
<b>HISCRIM</b>	High Spectral resolution Cloudy-sky Radiative Transfer Model	<b>POI</b>	Période d'Observation Intensive
<b>HSS</b>	Measurement of improvement of the forecast	<b>PRESYG</b>	PREvision Synoptique Graphique
<b>HTBS</b>	Haute Troposphère - Basse Stratosphère	<b>Prev'Air</b>	Plateforme nationale de la qualité de l'air
<b>HYCOM</b>	HYbrid Coordinate Ocean Model	<b>PREVIBOSS</b>	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.
<b>IAGOS</b>	In-service Aircraft for Global Observing System		
<b>IASI</b>	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge		
<b>IAU</b>	Incremental analysis update, mise à jour incrémentale par une analyse		
<b>IFS</b>	Integrated Forecasting System		
<b>IIR</b>	Infrared Imaging Radiometer		
<b>INDARE</b>	Indian Ocean Data Rescue Initiative		
<b>IPS</b>	Indice Piézométrique Standardisé		
<b>ISBA</b>	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère		
<b>ISBA-A-gs</b>	Modèle Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère, avec représentation de la photosynthèse et de la croissance de la végétation		

<b>Prévi-Prob</b>	Projet sur les prévisions probabilistes	<b>SOERE/GLACIOCLIM</b>	Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement : « Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat ».
<b>PSI</b>	Pollutant Standard Index	<b>SOP</b>	Special Observing Period
<b>PSR</b>	Plan Submersions Rapides	<b>SPC</b>	Service de Prévision des Crues
<b>PVM</b>	Particulate Volume Monitor	<b>SPI</b>	Standardized Precipitation Index (Indice de Précipitation Standardisé)
<b>PVs</b>	Tourbillon potentiel de l'air humide	<b>SPIRIT</b>	SPECTromètre Infra-Rouge In situ Toute altitude
<b>RADOME</b>	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu	<b>SPPT</b>	Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies
<b>RCP8.5</b>	8.5 W/m <sup>2</sup> Representative Concentration Pathway corresponding to a 8.5 W/m <sup>2</sup> radiative forcing at the end of the 21st century compared to preindustrial climate	<b>SSI</b>	Solar Surface Irradiance
<b>RDI</b>	Référent Départemental Inondation	<b>SSMI/S</b>	Special Sounder Microwave Imager/Sounder
<b>RDT</b>	Rapid Developing Thunderstorm	<b>SURFEX</b>	code de SURFace EXternalisé
<b>RHI</b>	Range Height Indicator (coupe verticale)	<b>SVP</b>	Surface Velocity Program
<b>ROC</b>	Relative Operating Characteristic curve	<b>SWI</b>	Soil Wetness Index
<b>RRTM</b>	Rapid Radiative Transfer Model	<b>SWIM</b>	Surface Wave Investigation and Monitoring
<b>RTI</b>	Recherche Technologie & Innovation	<b>SYMPOSIUM</b>	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
<b>RTTOV</b>	Radiative Transfer for TOVS	<b>TACTIC</b>	Tropospheric Aerosols for CLIMAte In CNRM
<b>SAF NWC</b>	Satellite Application Facility on support to Nowcasting	<b>TCU</b>	Towering Cumulus
<b>SAF NWP</b>	Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction	<b>TMA</b>	Terminal Manoeuvring Area
<b>SAF OSI</b>	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice	<b>TRL</b>	Technology Readiness Level
<b>SAFRAN</b>	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige	<b>TEB</b>	Town Energy Balance
<b>SAPHIR</b>	Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Intertropicale par Radiométrie	<b>TRIP</b>	Total Runoff Integrating Pathways
<b>SARA</b>	Spectroscopy by Amplified Resonant Absorption	<b>TSM</b>	Températures de Surface de la Mer
<b>SATOB</b>	Satellite Observation	<b>UHF</b>	Ultra-Haute Fréquence
<b>SCM</b>	Single-Column Model	<b>UNIBAC</b>	Modèle de précipitations
<b>SEVIRI</b>	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager	<b>VARPACK</b>	Current tool for diagnostic analysis in Meteo-France
<b>SFRI</b>	Système Français de Recherche et d'Innovation	<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>S2M</b>	SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus – MEPR	<b>VOS</b>	Voluntary Observing Ships
<b>SIM</b>	SAFRAN ISBA MODCOU	<b>WWLLN</b>	World Wide Lightning Location Network
<b>SIRTA</b>	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique	<b>Xios</b>	Librairie d'entrées-sorties pour modèles numériques
<b>SMOSMANIA</b>	Soil Moisture Observing System – Meteorological Automatic Network Integrated Application		
<b>SMT</b>	Système Mondial de Télécommunications		

# Organigramme de la Direction de la Recherche (DR)

le 1<sup>er</sup> janvier 2019



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





## Météo-France

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

## Direction de la Recherche

42, avenue Gaspard Coriolis  
31057 Toulouse Cedex 1 France  
Tél. : +33 (0) 5 61 07 93 70  
Fax : +33 (0) 5 61 07 96 00  
<http://www.urm-cnrm.fr>  
Mail : [contact@cnrm.meteo.fr](mailto:contact@cnrm.meteo.fr)



MINISTÈRE  
DE LA TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE  
ET SOLIDAIRE

Création DIRCOM

Météo-France est certifié ISO 9001  
par AFNOR Certification  
© Météo-France 2019  
Copyright juin 2019  
ISSN : 2116-438X

