

Rapport **Recherche**  
**2016**



# Rapport Recherche 2016



# Sommaire

---

## **Prévision numérique du temps** ● page 6

Modélisation et assimilation de données  
Prévision d'ensemble

## **Étude des processus** ● page 14

### **Climat** ● page 18

Étude du climat  
Évolution climatique  
Prévision saisonnière

## **Composition atmosphérique : aérosols, microphysique et chimie** ● page 28

## **Neige et hydrologie des surfaces continentales** ● page 34

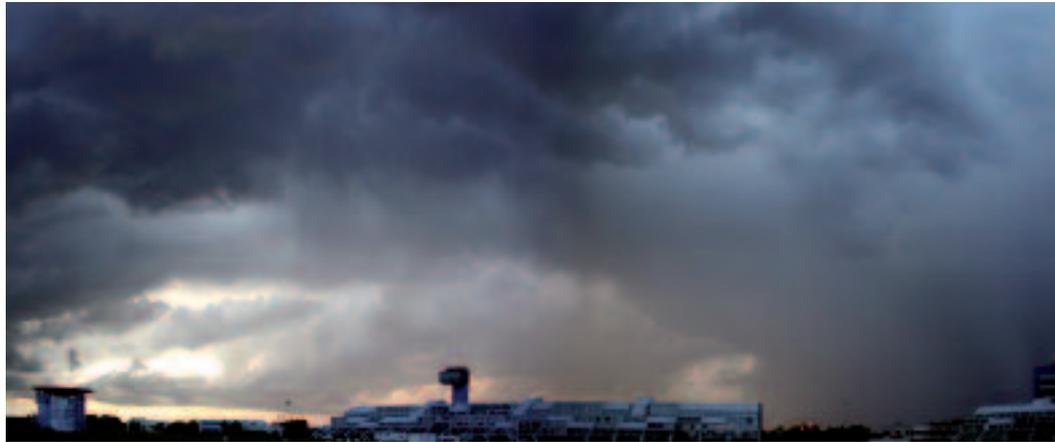
## **Océanographie** ● page 40

## **Techniques, campagnes et produits d'observation** ● page 44

### **Recherche et aéronautique** ● page 50

Les avions au service de la recherche météorologique  
La recherche météorologique au service de l'aviation

## **Annexes** ● page 56



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

L'année 2016 est une année de transition entre la fin du Contrat d'Objectifs et de Performance (COP) 2012-2016 et la construction du suivant, le COP 2017-2021. Pour le COP 2012-2016, le CNRM a honoré tous ses engagements avec la livraison de la version ensembliste du modèle régional AROME. Pour le suivant, les axes principaux de recherche y sont mis en avant avec des inflexions importantes prenant en compte les progrès attendus.

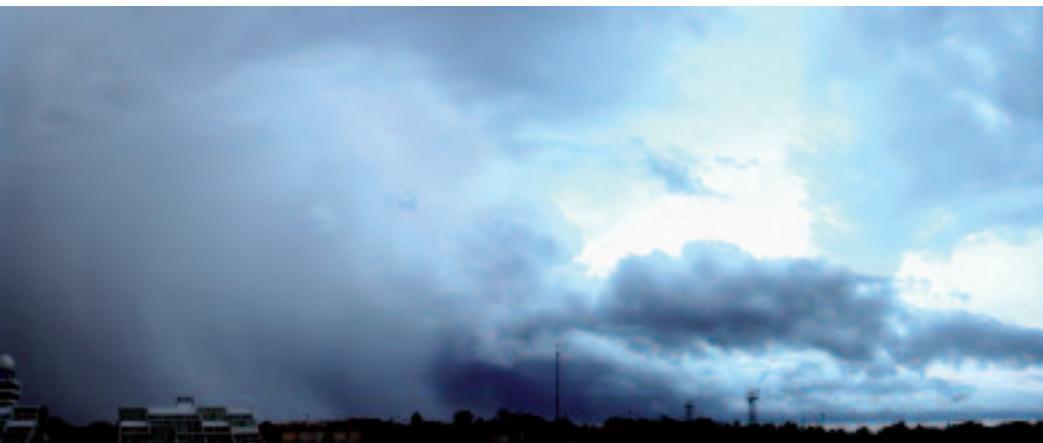
En termes de coopération internationale, le CEPMMT occupe toujours une place privilégiée, axée autour du modèle global Arpège/IFS. Le rapprochement avec les consortiums Aladin et HirLAM - au sein desquels se font les développements des modèles régionaux à haute résolution - est consolidé par leur renouvellement et l'objectif de les fusionner aux environs de 2020. Par ailleurs, Météo-France poursuit sa politique de participation active aux programmes d'Eumetsat et de l'ESA. On pense en particulier à la mise en opération prochaine d'ADM-Aeolus mais aussi à la préparation des futurs satellites MTG et EPS-SG qui embarqueront, en toute fin du nouveau COP ou au début du prochain, de nouveaux instruments à fort

potentiel. Météo-France poursuit également sa forte participation aux projets européens dont Copernicus.

Au niveau national, Météo-France renforce sa pleine implication dans la dynamique de la recherche. Cette dynamique se manifeste par des liens divers avec de nombreux acteurs dont le CNRS et AllEnv, également avec les Universités par le biais de nos accords conclus avec les Observatoires des Sciences de l'Univers à Toulouse (OMP), à Grenoble (OSUG) et prochainement avec La Réunion (OSU-R). L'établissement Météo-France a contribué à l'animation des Pôles de Données AERIS et THEIA, de Kalideos-Alpes sous l'égide du CNES, et a participé à la construction du Pôle du Système Terre, de l'IR ACTRIS-FR et de CLIMERI-France. Météo-France profite de la mise en place d'AERIS pour affirmer sa volonté de faciliter l'accès à ses données opérationnelles au monde de la recherche via ce nouveau pôle.

L'année 2016 a été marquée par la montée en puissance des deux hpc Bull de Météo-France (2x 2,5 Pflops) qui a permis en particulier la mise en œuvre de la prévision d'ensemble AROME. Il faut noter, dans ce contexte hpc, les travaux sur les cœurs dynamiques qui visent une plus grande scalabilité par rapport aux schémas actuels très performants mais possiblement moins bien adaptés aux architectures de plus en plus distribuées.

L'ensemble des principaux travaux conduits dans les deux UMR de Météo-France, le CNRM et le LACy, ainsi que dans les directions thématiques de l'établissement est détaillé dans le présent document. On peut néanmoins mentionner les axes majeurs que sont la



© Camille Luxen

prévision des évènements fortement précipitants, des cyclones ou du brouillard qui orientent des travaux sur la microphysique nuageuse, la couche limite stable, le couplage océan-atmosphère à méso-échelle. Des campagnes de mesures ont été organisées sur ces thèmes avec la mise en œuvre de dispositifs novateurs, comme les drones instrumentés développés au CNRM. Il faut également signaler l'aboutissement d'un nouveau schéma de convection qui traite les différentes échelles, schéma utilisé en modélisation climatique comme en prévision numérique du temps. Il faut aussi souligner l'aboutissement des travaux à méso-échelle pour l'outre-mer qui a permis la mise en opérationnel d'une version AROME pour chaque territoire ultra-marin.

Sur le plan de l'assimilation de données, au-delà de la préparation des futurs instruments spatiaux déjà mentionnés, d'importants travaux sont conduits sur un système d'assimilation d'ensemble à méso-échelle. C'est un choix stratégique de l'établissement dont on espère beaucoup tant cette approche permettra de prendre en compte la dimension temporelle dans le processus d'assimilation et les non-linéarités intrinsèques à notre système méso-échelle.

La prévision du risque d'avalanche prépare sa mutation vers la haute résolution et des travaux préparatoires, incluant l'utilisation de nouvelles données satellite en visible comme en micro-onde, ont donné des résultats positifs. Pour la prévision des états de la mer, de nombreux travaux, aboutis ou préparatoires, ont été conduits également en assimilation de données satellite, à partir de Sentinel-3, Sentinel-1A, Sentinel-1B et du satellite franco-

chinois CFOSAT. La prévision de la qualité de l'air s'enrichit de nouveaux composés allergènes, notamment sous l'impulsion du programme COPERNICUS, et se prépare à l'assimilation des aérosols à partir d'observations lidar et satellite.

Pour les aspects climat, en amont de l'accord de Paris, des chercheurs Météo-France se sont impliqués dans le cadre d'une initiative nationale sur les INDC (Intended Nationally Determined Contributions). Sous la houlette du GIEC, le CNRM a préparé sa participation au prochain exercice CMIP-6 avec une nouvelle version du système climatique CNRM-CM6 et un Système Terre incluant le cycle du carbone CNRM-ES. Le CNRM étudie aussi l'impact du changement climatique sur la composition chimique de l'atmosphère dans le cadre de projets internationaux avec des applications possibles sur la qualité de l'air et la santé. Pour la prévision saisonnière et sub-saisonnière, le système climatique

CNRM-CM6 est maintenant mis en œuvre, marquant ainsi la continuité de nos systèmes de modélisation des courtes échéances à méso-échelle jusqu'aux échelles climatiques globales.

Et puisqu'il faut regarder plus loin, des actions prospectives ont été initiées, notamment sur l'utilisation des informations fournies par les objets connectés, et sur l'utilisation et la valorisation des prévisions d'ensembles. Dans un tout autre domaine, le dossier de renouvellement de l'avion haute altitude de l'UMS Safire a été finalisé et sera un enjeu de 2017.

Cet éditorial n'a pas vocation à couvrir l'ensemble des actions de recherche de Météo-France mais les articles détaillés qui suivent sont passionnants et illustrent bien plus précisément cette activité recherche, essentielle à l'établissement. Ce rapport 2016 clôture le COP 2012-2016 et débute le nouveau contrat quinquennal 2016-2020 de l'UMR CNRM. La qualité des travaux rapportés ici est le résultat de la forte implication de tous les agents acteurs de la recherche à Météo-France, et tout particulièrement de mon prédécesseur, Philippe Bougeault, auquel j'adresse mes remerciements pour avoir suscité et porté ces stratégies scientifiques déterminantes pour notre l'établissement.



Marc Pontaud  
Directeur de la Recherche de Météo-France,  
Directeur du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)

# Prévision numérique du temps

Les articles des pages suivantes illustrent les réalisations principales en prévision numérique du temps (PNT) en phase avec la stratégie scientifique à plus long terme de Météo-France. L'utilisation, et même la conception, de nouveaux systèmes d'observation, tels que le lidar spatial ADM-Aeolus ou la possibilité d'un sondeur micro-ondes en orbite géostationnaire, rappellent qu'il n'y a pas de progrès possible dans une prévision à échelle fine sans une augmentation en proportion de la densité spatio-temporelle et de la diversité des observations assimilées. Une meilleure utilisation des données radar disponibles dans le domaine AROME est un axe important de progrès. Un objectif clé à moyen terme du groupe de recherche en PNT et en assimilation de données (AD) est d'améliorer l'utilisation des observations déjà disponibles pour les systèmes de prévision AROME déployés sur l'Europe de l'Ouest (prévision immédiate AROME-PI, prévision d'ensemble AROME-PE et système déterministe AROME) avec la mise au point et le déploiement d'une assimilation d'ensemble AROME. L'amélioration du réalisme du modèle de prévision est évidemment un autre axe de progrès. Quelques résultats récents concernant la paramétrisation de la turbulence sont présentés visant à améliorer la représentation des couches limites stables, un aspect également important dans l'amélioration des prévisions de nuages bas et des faibles visibilités. Plusieurs comparaisons récentes des noyaux dynamiques utilisés dans les modèles atmosphériques globaux, incluant le noyau dynamique du modèle IFS du CEPMMT sur lequel repose les schémas numériques des modèles ARPEGE et AROME, confirment que grâce à l'utilisation de pas de temps "longs" cette famille de cœur dynamique reste la plus efficace en terme de "temps de restitution", critère primordial pour la prévision opérationnelle du temps. Toutefois, ce résultat est obtenu au prix de performances relatives en terme de scalabilité de ces noyaux dynamiques. Si l'accroissement de la puissance de calcul continue d'évoluer essentiellement grâce à une plus grande parallélisation des calculs, il est possible que la situation s'inverse avec un avantage aux algorithmes plus scalables à "petits" de temps, y compris vis à vis du critère du "temps de restitution". Bien qu'il ne soit pas possible de savoir aujourd'hui quand, ni même si, cette inversion aura lieu, le groupe de recherche en PNT a posé les fondements d'un schéma numérique de repli résolvant les équations pleinement compressibles en coordonnée masse utilisées dans AROME au cas où le schéma actuel deviendrait objectivement moins efficace. Les articles suivants illustrent également la méthodologie d'évaluation de l'impact des observations sur la prévision. Ils montrent en outre que le département de la recherche de Météo-France contribue activement à la préparation d'une des ambitions clés du nouveau Contrat d'Objectifs et de Performance entre Météo-France et l'État, à savoir une utilisation massive des prévisions d'ensemble et la conception de services innovants basés sur les ensembles.

En parallèle de ces études amont, le groupe de recherche en PNT et en AD a été particulièrement impliqué dans la préparation de nouvelles versions du code intégré de prévision numérique, partagé avec le CEPMMT et les Consortia ALADIN et HIRLAM sur la prévision numérique à aire-limitée. Dans ce domaine, il faut rappeler que ce code est dans une phase de modernisation majeure. Bien que motivé à l'origine par la volonté de rénover l'assimilation de données, l'effort de rénovation du code conduit également à faciliter la parallélisation à mémoire partagée et à améliorer sa modularité. En accord avec le précédent Contrat d'Objectifs et de Performance, un ensemble de 5 systèmes AROME à résolution horizontale de 2.5 km et 90 niveaux verticaux en adaptation dynamique du modèle IFS est devenu opérationnel. Une autre réalisation majeure a été de finaliser la première version de l'ensemble de prévision AROME sur la chaîne opérationnelle de Météo-France. Toutes ces nouvelles déclinaisons d'AROME sont déployées à l'aide d'un nouveau système de scripts orienté objet, nommé Vortex. L'année s'est terminée avec l'installation d'une chaîne expérimentale dans l'environnement opérationnel incluant des versions améliorées des systèmes d'assimilation et de prévision ARPEGE et AROME. Un effort particulier a été porté sur le système global avec la mise en œuvre du modèle de surface SURFEX de Météo-France, déjà utilisé dans AROME et dans ARPEGE-Climat. Une autre évolution majeure d'ARPEGE est la représentation de tous les types de convection avec le schéma de nouvelle génération PCMT. Ce schéma introduit, grâce à un ensemble de nouvelles variables historiques, un cycle de vie de la convection qui résout naturellement et physiquement plusieurs faiblesses bien connus des schémas classiques diagnostiques de convection. Une expérience exceptionnellement longue d'un an a été réalisée pour évaluer cette nouvelle version du système ARPEGE grâce à la montée de niveau du supercalculateur réalisée cette année, mais également à l'implication des scientifiques du groupe. Les résultats montrent une amélioration significative, qui vient conforter la position actuelle du système ARPEGE fournissant la plus précoce et la meilleure prévision à 24h d'échéance sur l'Europe. Ces nouvelles versions seront complétées avec leurs versions ensemblistes au début 2017 et deviendront opérationnelles au printemps 2017.

1

## Modélisation et assimilation de données

### Conséquences physiques des mesures du nombre de Lewis turbulent

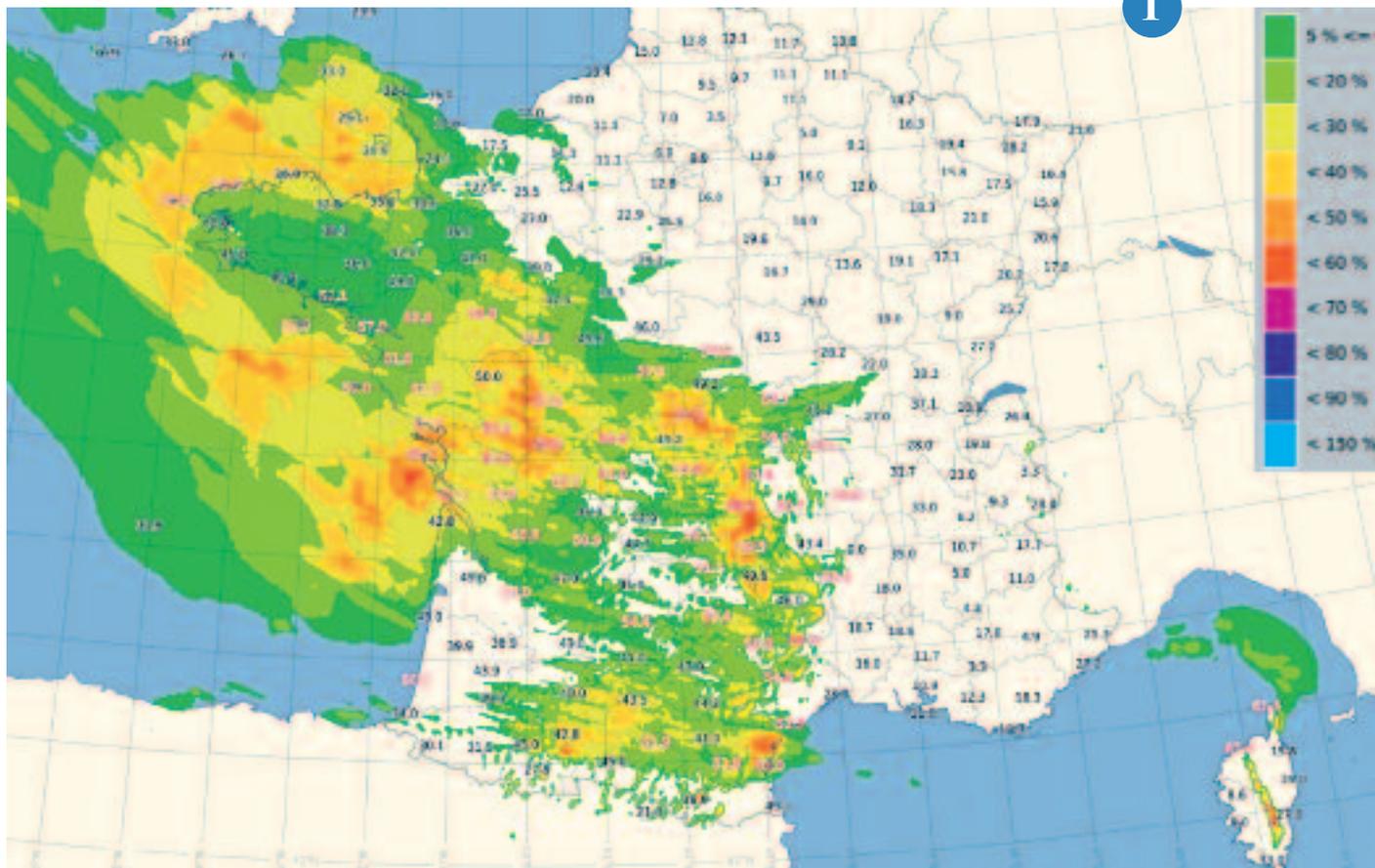
Cette étude consiste à confronter certaines hypothèses théoriques retenues dans les modèles de turbulence avec des données expérimentales issues, entre autres, des mesures de Météopole-Flux effectuées au CNRM.

Le nombre de Lewis est le rapport des nombres de Prandtl et de Schmidt, c'est donc le rapport des coefficients d'échanges pour la chaleur et pour l'humidité. Ce rapport est posé égal à l'unité dans les modèles de turbulence de l'atmosphère. Ceci permet de

faire plusieurs simplifications, et en particulier d'utiliser une version simplifiée de l'entropie de l'air humide.

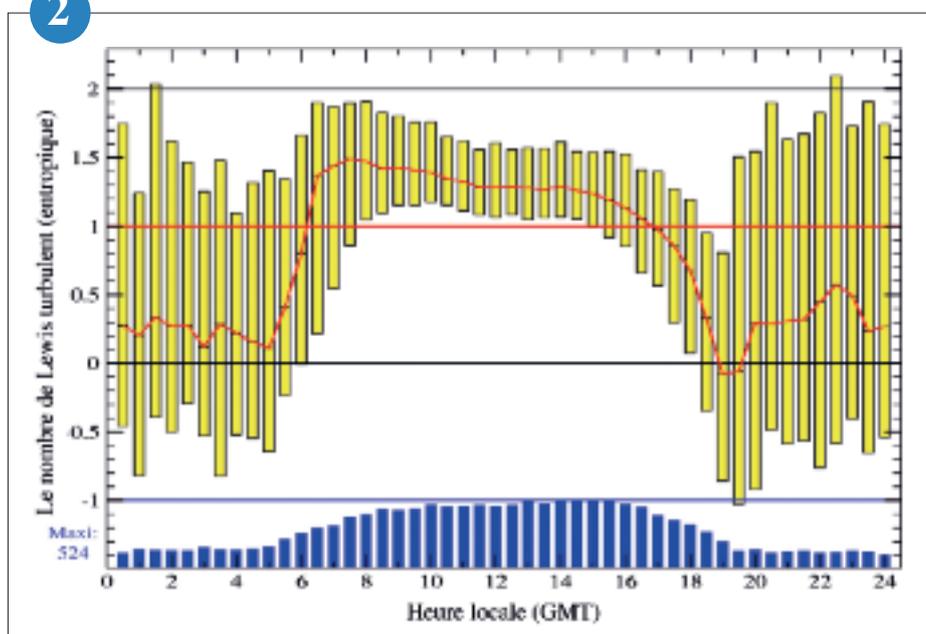
Il apparaît que le nombre de Lewis varie dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions thermodynamiques. La variation

1



▲ La probabilité d'occurrence de rafales maximales supérieures à 50 nœuds issue de la prévision d'ensemble AROME à 15h d'échéance pour le 6 mars 2017 à 12h TU lors de la tempête Zeus sur la France est représentée en plage de couleurs. Les valeurs des rafales maximales observées sont également pointées sur la carte.

2



▲ Variation au cours de la journée du nombre de Lewis turbulent basé sur l'entropie de l'air humide pour le site Météopole-Flux.

temporelle est illustrée ici en moyenne pour les années 2014 à 2016 et en fonction de l'heure de la journée (temps universel). Seules les meilleures observations ont été retenues (entre 100 et plus de 500 données semi-horaires, en bleu). Les boîtes jaunes représentent les étendues interquartiles, la courbe rouge indiquant la médiane. Le nombre de Lewis semble être maximum le matin, avec une baisse graduelle en journée

et avec des valeurs inférieures à l'unité la nuit. Ces résultats obtenus avec les données observées de Météopole-Flux ont déjà été confirmés par d'autres observations (mat instrumenté à Cabauw au Pays-Bas, campagnes de mesures océaniques utilisées pour ECUME, sorties de modèles LES utilisés comme laboratoire numérique). Ces observations seront confrontées aux modèles théoriques où le nombre de Lewis

est différent de l'unité, ce qui devrait permettre d'augmenter le réalisme de nos modèles de turbulence, car ils pourront utiliser une formulation plus exacte pour l'entropie de l'air humide.

2

## GABLS4 : un nouveau cas d'inter-comparaison pour les couches limites stables

L'inter-comparaison GABLS4 lancée durant l'été 2014, vise à étudier le comportement des paramétrisations physiques des modèles de prévision numérique en couche limite très stable ainsi que l'interaction de la couche limite de surface avec une surface à faible inertie thermique comme la neige (site web : <http://www.umr-cnrm.fr/aladin/meshtml/GABLS4/GABLS4.html>).

Cet exercice s'inscrit dans une dynamique initiée au milieu des années 2000 avec un premier cas simple et idéalisé en 2004, suivi de 2 autres exercices plus complexes terminés en 2011 et 2014. Ce quatrième volet, souhaité par la communauté internationale lors d'un workshop au Centre Européen, est organisé en collaboration avec le LGGE et utilise des données de température, vent, humidité et de flux turbulent disponibles à différents niveaux d'un mat de 45m situé à Dome C sur le plateau Antarctique.

Ce projet comporte en fait 3 inter-comparaisons de modèles : les modèles de neige, les modèles uni-colonne (SCM) et les modèles LES (Large Eddy Simulation) avec, pour les

deux derniers, deux protocoles : un au plus proche de la réalité avec des forçages variables dans le temps et la prise en compte du rayonnement afin de se comparer aux observations et éventuellement à des LES, et un idéalisé avec des forçages constants, sans rayonnement et sans humidité permettant à plus de groupes de participer avec leur modèle LES.

Finalement, près de 20 groupes contribuent à cet exercice. Les premiers résultats ont mis en évidence une très grande variabilité du flux de chaleur sensible simulé par les modèles ainsi qu'une hauteur du jet de basse couche (voir figure) en général trop élevée malgré la prescription d'une résolution verticale très fine. Un des objectifs pour 2017 sera de mieux quantifier les incertitudes des modèles LES (utilisés pour valider les SCM) dans les cas de très forte stabilité.

3

## Vers des schémas temporels explicites sur l'horizontale et implicites sur la verticale (HEVI) avec le système d'équations compressible d'AROME

La résolution numérique du système d'équations pleinement compressible pour la prévision du temps soulève de nombreuses questions, parmi lesquelles le choix des schémas de discrétisation temporelle à mettre en œuvre. Jusqu'alors, les schémas de discrétisation temporelle basés sur des techniques semi-implicites (SI) étaient les plus couramment employés, compte tenu de leur grande stabilité numérique. Cependant, avec l'émergence des calculateurs massivement parallèles à mémoire distribuée, l'efficacité de ces techniques est actuellement remise en question, car obtenue au prix de l'inversion d'un problème mathématique très gourmand en communications.

D'autres méthodes de discrétisation temporelle ont été explorées au sein du GMAP : elles s'appuient sur des approches de type

HEVI, qui s'affranchissent de la contrainte numérique imposée sur le pas de temps par la propagation verticale des ondes rapides. D'autre part, elles exploitent le paradigme voulant que chaque processeur de la machine ait un accès global à la colonne verticale du modèle numérique, assurant ainsi un minimum de communications.

Bien que la compétitivité en terme d'efficacité de ces schémas HEVI par rapport aux schémas SI soit encore à démontrer dans un contexte opérationnel, des tests réalisés sur des cas idéalisés ont mis en évidence leur capacité prédictive, ainsi que leur potentiel en terme de précision.

4

## Vers l'assimilation des variables radars polarimétriques dans les modèles à haute résolution

Les radars polarimétriques (DPOL) permettent d'accéder à de nouvelles informations sur les caractéristiques microphysiques des nuages précipitants et fournissent des données de meilleure qualité. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel de ces observations pour l'initialisation des modèles de prévision météorologique à haute résolution.

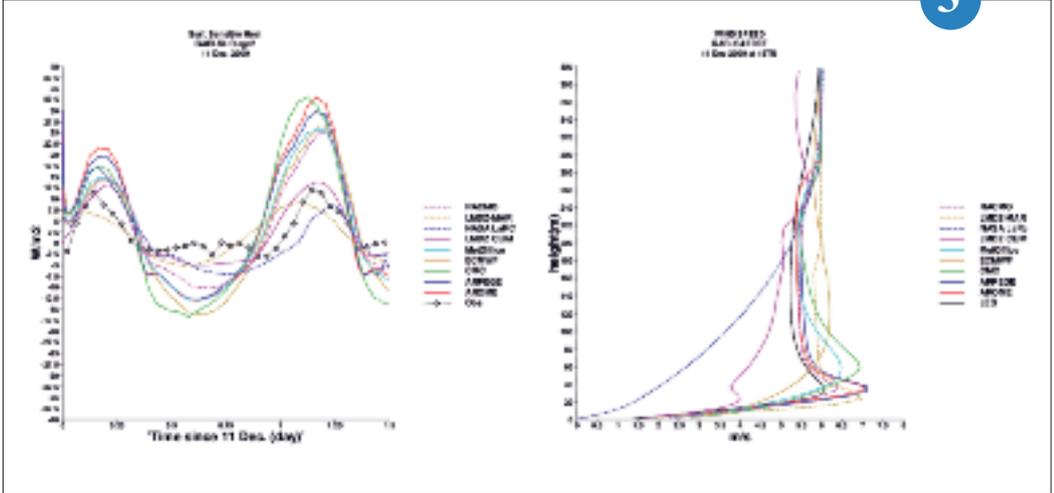
Des expériences d'assimilation de données DPOL ont été menées avec le modèle AROME et son système d'assimilation 3D-VAR. La méthode d'assimilation qui a été utilisée est dérivée de la méthode utilisée en opérationnel pour l'assimilation des réflectivités radar. Dans un premier temps, des pseudo-observations d'humidité relative sont restituées à partir des profils de réflectivité (Zhh) ou de phase différentielle spécifique (Kdp) grâce à une inversion Bayésienne 1D. Les profils d'humidité sont ensuite assimilés dans le système AROME 3D-VAR.

Différentes expériences d'assimilation ont été menées pour deux cas convectifs. L'impact de la correction d'atténuation a été évalué à partir de la comparaison de deux expériences utilisant seulement la réflectivité, sans (ZNocorr) ou avec (Z) correction d'atténuation. Dans l'expérience Z, des pseudo-observations d'humidité plus élevées ont pu être restituées, ce qui a permis de mieux humidifier les régions convectives dans l'analyse du modèle. L'impact de Kdp a été mis en évidence lorsque Zhh est affectée par des masques partiels du faisceau liés au relief. Dans ces conditions, l'expérience ZK permet de mieux humidifier les régions convectives dans l'analyse du modèle.

Globalement, les expériences ZNocorr, Z et ZK ont des performances similaires en termes de prévision de précipitations. Un nombre plus important de cas doit être examiné à l'avenir afin de confirmer l'apport des observations DPOL sur les prévisions.

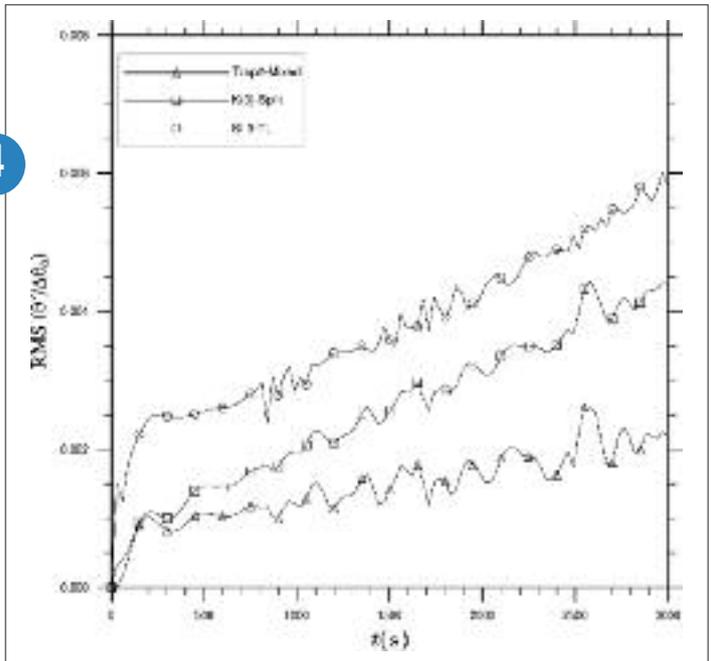
5

3



Simulation des modèles uni-colonne (en couleur).  
 Gauche : Flux de chaleur sensible en  $W/m^2$  ;  
 ligne noire en pointillé : flux observé.  
 Droite : Profil vertical de vent en  $m/s$  à 18 TU, référence en noir (LES).

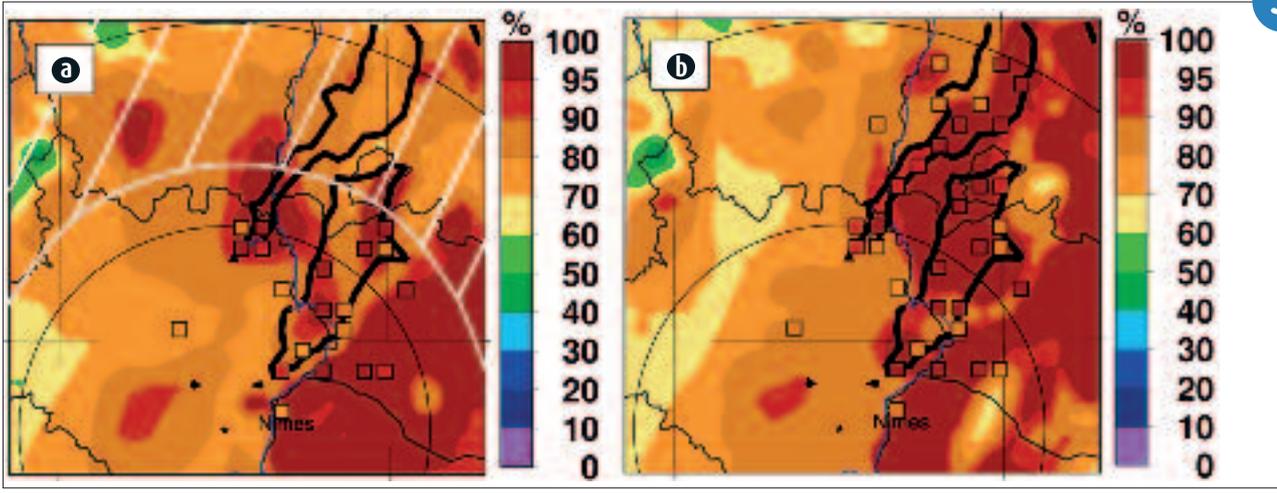
4



Erreurs quadratiques moyennes normalisées de la température potentielle des solutions numériques obtenues avec trois schémas temporels "SI", "time-split HEVI" et "Mixed Trap2(2,3,2) HEVI" par rapport à une solution analytique de référence dans le cadre d'une expérience non-hydrostatique de propagation horizontale d'une « bulle chaude ».

Pseudo-observations d'humidité relative (carrés) restituées par les expériences Z (a) et ZK (b), superposées à l'analyse d'humidité relative après assimilation des pseudo-observations correspondantes. Altitude d'environ 1600 m. 06 UTC le 24/09/2012. Les lignes noires indiquent les contours de réflectivités supérieures à 35 dBZ. Les cercles indiquent des distances de 50 et 100 km au radar de Nîmes. Dans la région hachurée en blanc sur l'image (a), les observations radar les plus proches de ce niveau d'altitude sont affectées par des masques partiels supérieurs à 10%.

5



## Apport potentiel d'un sondeur micro-ondes à bord d'un satellite géostationnaire pour les prévisions AROME

Pour des raisons technologiques, l'observation de la Terre dans le domaine des micro-ondes a jusqu'à présent été possible uniquement depuis les satellites défilants sur orbite basse. Sonder l'atmosphère dans ce domaine de fréquences à partir d'une orbite géostationnaire permettrait d'augmenter significativement la répétitivité temporelle de mesures informatives sur la vapeur d'eau, la température et les hydrométéores.

Des développements instrumentaux récents permettent d'envisager cette possibilité ; les observations acquises grâce au type de technologie envisagée sont cependant caractérisées par une précision radiométrique plus faible que celles actuellement disponibles depuis les satellites défilants. Une étude a été réalisée au CNRM en collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne afin d'évaluer l'apport potentiel de telles observations pour améliorer nos systèmes de prévision numérique du temps.

Aucune vraie observation n'étant disponible, ces expériences ont été réalisées dans un cadre entièrement simulé mais réaliste appelé OSSE (Observing System Simulation Experiment). L'impact de la précision radiométrique d'un tel instrument sur les prévisions du modèle AROME France a ainsi pu être testé. La figure montre une scène météorologique qui serait observée (a) avec un instrument dont la précision radiométrique est équivalente aux sondeurs actuellement en orbite, (b) avec un instrument à qualité radiométrique dégradée. Les résultats de nos expériences montrent qu'un futur géo-sondeur micro-ondes devra fournir des observations peu bruitées afin de compléter un système d'observation déjà dense et qui sera bientôt enrichi des données de la nouvelle génération des satellites géostationnaires européens.

6

## Impact des observations marines sur la qualité des prévisions

EUMETNET a financé des études afin de quantifier l'importance des observations à la surface de la mer (bateaux et bouées) sur la qualité des prévisions météorologiques. Dans sa participation, le CNRM a utilisé l'approche linéaire FSOi basée sur la sensibilité des prévisions aux observations dans ARPÈGE, sur une période de 21 mois (juillet 2013 à avril 2015), en se focalisant sur l'erreur de prévision à l'échéance 24 heures sur l'Europe et le proche Atlantique. La plupart des bouées ancrées ont été écartées de l'étude pour se focaliser sur l'impact des stations mobiles dont on utilise les observations de pression et de vent dans l'assimilation. Divers aspects de la FSOi ont été étudiés : sa dépendance à la latitude, aux régimes de temps ainsi que son lien avec la densité des observations. La répartition de l'impact entre bouées, navires (VOS) avec mesures automatiques ou mesures humaines ainsi que les contributions par paramètre ont été examinées.

7

La majorité des bouées dérivantes ne mesure pas le vent, mais leurs mesures de pression de surface sont réputées de meilleure qualité que celles des navires d'opportunité. Cela se retrouve dans l'impact des bouées qui domine très largement celui des navires. Mais navires et bouées sont complémentaires dans leur répartition côtière/haute mer.

En effet, les données de navire sont très nombreuses à proximité des côtes où se situent les routes maritimes. Les bouées sont très bien réparties dans l'ensemble du bassin nord-Atlantique, mais plus rares au sud et en Méditerranée. Ainsi, sur une large zone côtière Gascogne, une observation unitaire issue d'un navire contribue 10 fois moins qu'une observation de bouée, mais la plus forte densité des bateaux produit un impact cumulé qui revient à 50 % de celui des bouées.

## AEOLUS : la mission de lidar vent spatial de l'ESA bientôt en orbite

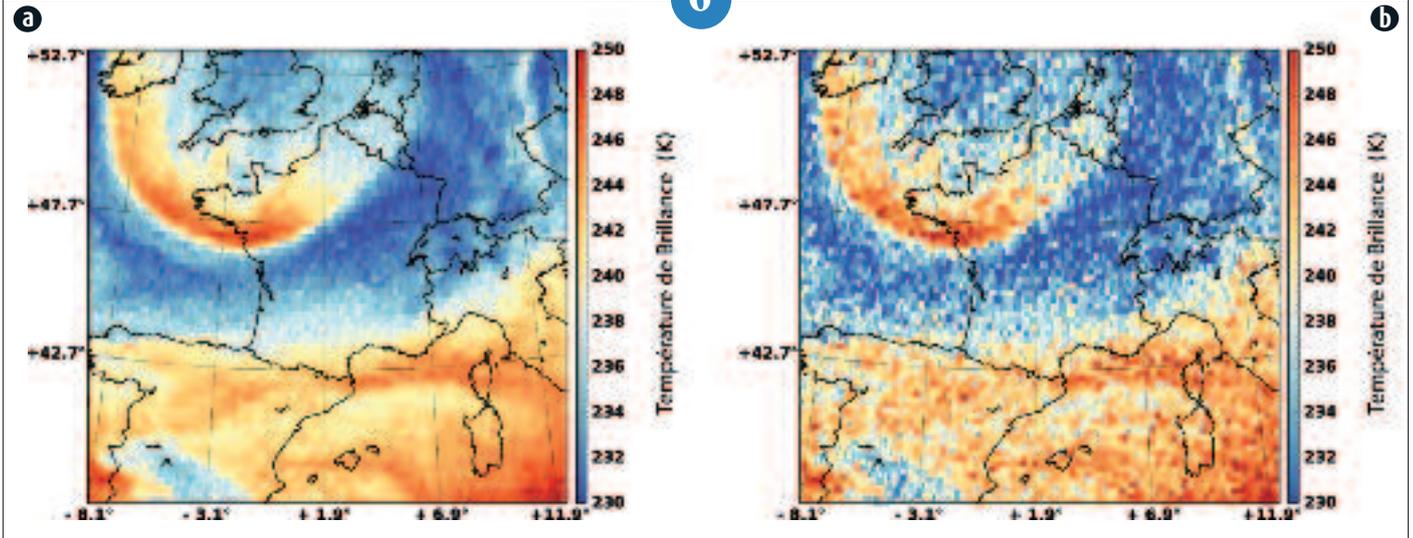
AEOLUS est la seconde « core mission » du programme « Earth-Explorer » de l'Agence Spatiale Européenne. Lancée à la fin des années 90, elle devrait franchir une étape clé à la fin de l'année 2017 avec le lancement depuis Kourou du premier lidar vent spatial de l'histoire.

Volant sur une orbite héliosynchrone basse de 7 jours de périodicité, le lidar mesurera la vitesse zonale du vent depuis le sol jusqu'à la basse stratosphère, avec une résolution verticale variable de 250m (couche limite) à 2km (basse stratosphère) et une résolution horizontale de 90km. Les données seront transmises via la station de réception de Svalbard et seront disponibles en moins de 1h30 en Europe. Elles seront mises à la disposition des centres de prévisions météorologiques qui souhaitent les assimiler. Grâce à ses deux voies de réception, le lidar (à haute résolution spectrale) permettra aussi de caractériser les propriétés optiques des aérosols et particules nuageuses sans a priori sur leur nature.

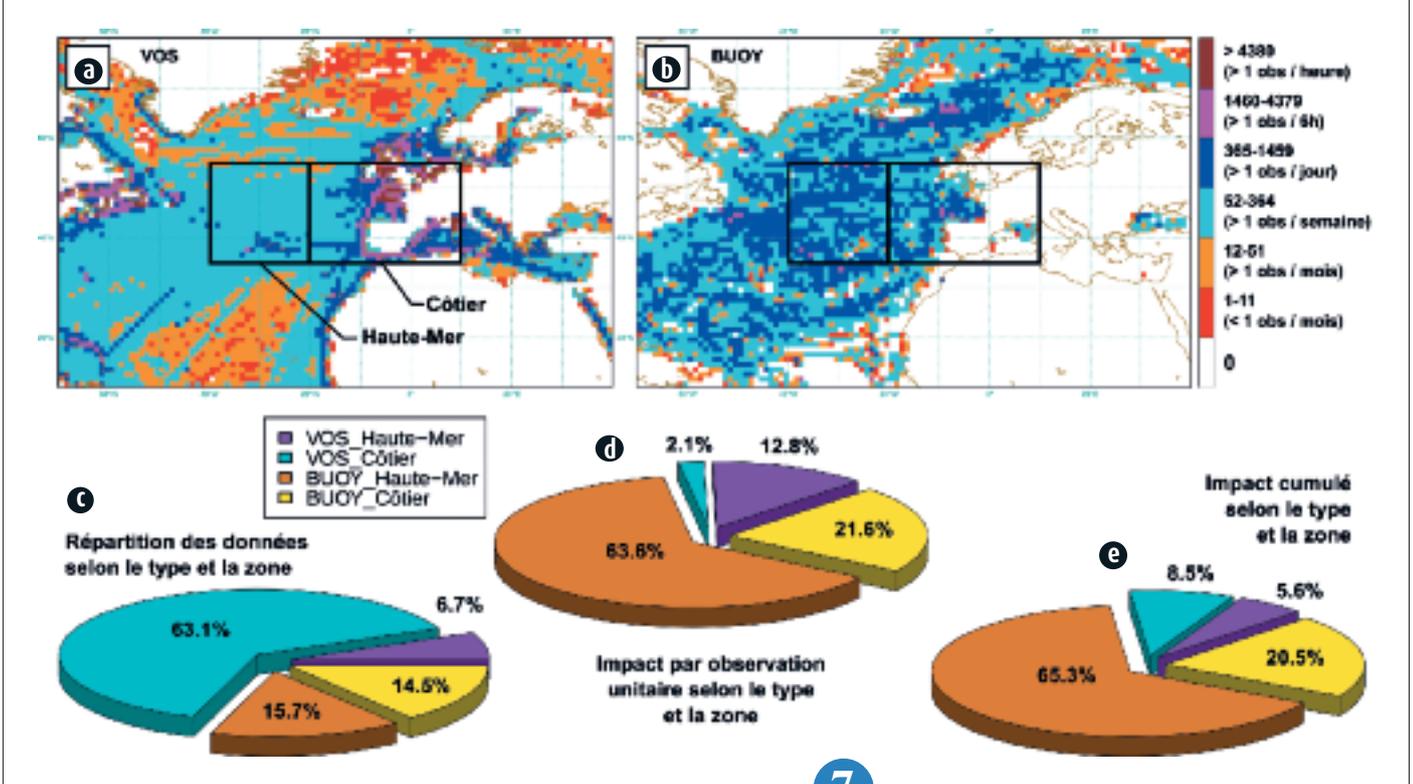
Des études sont en cours pour l'assimilation de ces données par les modèles de qualité de l'air dont MOCAGE à Météo-France. Le CNRM a pris une part active à la mise au point des algorithmes de traitement des signaux lidar pour la calibration du lidar et la restitution des mesures optiques et de vent et sera sur le pont en 2018 pour traiter les premières données réelles, faire évoluer les chaînes de traitement, et assimiler les produits.

8

6



Températures de brillance simulées à 183.31 +/- 0.2 GHz (bande d'absorption de la vapeur d'eau) pour le domaine AROME France le 2 Juillet 2015 à 12hUTC pour un instrument (a) de précision radiométrique similaire aux radiomètres disponibles à bord de satellites en orbite basse, (b) de précision radiométrique dégradée.



7

Répartition géographique des observations issues des navires (a) et des bouées (b) pour l'ensemble de l'échantillon. Les rectangles noirs montrent la délimitation des zones «Haute-Mer» et « Côtier » utilisées dans les diagrammes (c, d et e) de contributions relatives en nombre (c) en impact par observation unitaire (d) ou impact cumulé (e) des mesures des bouées et des navires.



8

Vue d'artiste du satellite AEOLUS pointant son faisceau laser vers l'atmosphère.

# Prévision d'ensemble

## Prévision d'ensemble des crues rapides méditerranéennes

Les crues rapides en région méditerranéenne peuvent être dévastatrices et meurtrières. Fréquentes en automne, elles sont dues à des pluies intenses qui affectent des bassins versants à réaction rapide. Prévoir la localisation et l'intensité des pluies ainsi que la réponse hydrologique de ce type de bassins constitue un défi.

Une approche intégrée météorologique et hydrologique est développée au CNRM pour prévoir le débit de rivières à réaction rapide : des champs de pluies prévus par le modèle météorologique de résolution kilométrique, AROME, sont utilisés en entrée du système ISBA-TOP, dédié à la simulation des crues rapides. Cette approche est affectée par différentes incertitudes. La plus forte provient des données de pluie utilisées en entrée du modèle hydrologique mais la connaissance de l'humidité initiale des sols et le modèle hydrologique, lui-même, sont entachés d'incertitude. Afin d'explorer et de hiérarchiser ces deux sources d'incertitude, une étude de sensibilité du modèle ISBA-TOP à ses paramètres hydrodynamiques et à son humidité initiale des sols a été menée. Elle met en évidence que les simulations de débit avec ISBA-TOP sont surtout sensibles à trois paramètres, sensibilité d'ailleurs fonction de l'état initial d'humidité des sols.

Un ensemble hydrologique est alors conçu en perturbant le champ d'humidité initiale et les trois paramètres sensibles. Cette version ensembliste du modèle ISBA-TOP, utilisant en entrée les précipitations prévues par les membres de la prévision d'ensemble AROME, constitue un système de prévision d'ensemble des débits qui considère les incertitudes à ses différents niveaux.

Les performances de ce système sont à évaluer notamment en traitant la question d'un biais sur les pluies prévues.

9

## Prévision de l'interruption satellite-sol

Les fréquences traditionnellement utilisées pour transmettre les données des satellites aux stations terrestres (de 2 à 14 GHz) sont saturées et ne peuvent plus satisfaire les besoins croissant en termes de débits de transmission. Les plus hautes fréquences offrant des capacités nettement supérieures grâce à l'utilisation de bandes de fréquences plus larges, les futurs programmes d'observation de la terre prévoient une migration vers les bandes de fréquence allant de 18 à 53 GHz. Or, la sensibilité des ondes aux effets troposphériques augmente avec la fréquence. D'importants affaiblissements du signal (jusqu'à plusieurs dizaines de db) sont donc à prévoir, principalement en présence de forte pluie. Des méthodes de compensation pour garantir une disponibilité acceptable doivent donc être mises en œuvre. Ces méthodes requièrent généralement une anticipation des conditions de propagation et donc des paramètres météorologiques. Un modèle statistique de prévision de l'atténuation troposphérique conditionnée par la pluie prévue par la prévision d'ensemble PEARP a été développé (voir figure) et réglé sur une année de transmission de données d'un satellite défilant vers une station terrestre localisée à Toulouse. Il est alors possible d'optimiser la communication au regard des conditions de propagation prévues. On a montré que l'anticipation des conditions atmosphériques permettait in fine d'augmenter la capacité moyenne du lien satellite-station terrestre d'environ 30 % lorsque le niveau de disponibilité requise est de 99.9 %.

10

## Un indice basé sur la prévision d'ensemble pour qualifier la prévision des événements extrêmes

L'objet de la prévision d'ensemble est d'échantillonner la densité de probabilité des paramètres atmosphériques. Le post-traitement de la prévision d'ensemble PEARP est un enjeu majeur pour son utilisation. Par exemple, on peut directement calculer une probabilité prévue de dépassement d'un seuil d'un paramètre météorologique, pour la prévision d'événements intenses, en comptant le nombre de membres vérifiant un tel critère. Cependant, la capacité d'un modèle d'ensemble à reproduire fidèlement les fréquences climatologiques d'un événement météorologique n'est pas acquise. Nous avons donc créé une référence, basée sur un re-jeu de prévisions d'un ensemble simplifié sur une période de 30 années, pour établir une climatologie du système ensembliste, à laquelle les prévisions d'ensemble opérationnelles peuvent être comparées. Le résultat de ce calcul est présenté par un indice, Extreme Forecast Index (EFI), qui compare la distribution de probabilité issue de l'ensemble à celle calculée à partir des prévisions rétrospectives. Validé sur les 50 tempêtes les plus fortes en France au cours des 30 dernières années (Boisserie et al. 2016), cet indice montre un intérêt concernant d'autres phénomènes extrêmes comme les épisodes de pluies intenses en Méditerranée. Un système expérimental de production systématique d'EFI de précipitations a été développé à l'intention des prévisionnistes de Météo France (cf. figure). Un indicateur restreint à la partie extrême des distributions de probabilités est ajouté, Shift of Tails (SOT), qui calcule l'écart de distribution au-delà de certains quantiles, 90, 95 % par exemple.

11

## Développement d'un ensemble d'assimilations pour AROME et la PEARO

La prévision du temps à échelle fine, pour les phénomènes dangereux comme le brouillard, les orages ou les rafales de vent, s'appuie sur le modèle de prévision AROME de Météo-France. L'ensemble d'assimilations AROME, en cours de développement, sera prochainement utilisé pour estimer les statistiques d'erreurs dans l'assimilation déterministe, mais également pour initialiser la prévision d'ensemble PEARO. L'ensemble d'assimilations et de prévisions AROME est basé sur un ensemble d'assimilations variationnelles où les observations sont explicitement perturbées. Ce schéma permet

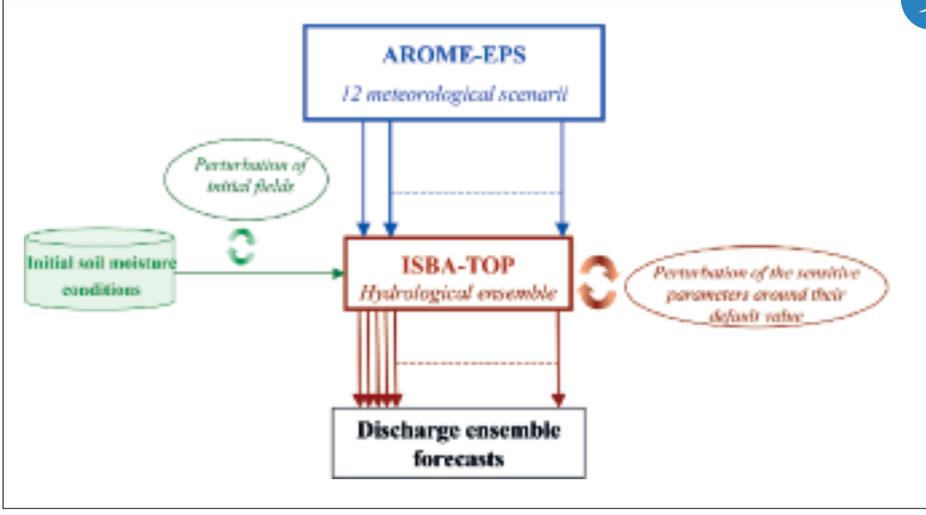
de mieux représenter le cycle des erreurs dans nos systèmes mais avec un coût de calcul important. Le GMAP a donc développé une version d'AROME à 3.8 km de résolution, afin de limiter le coût numérique d'un tel ensemble. Des schémas de perturbation sont à l'étude : par exemple, la température de surface de la mer est différente dans chaque membre. Pour améliorer la dispersion de l'ensemble, le GMAP a développé un schéma d'inflation novateur qui repose sur une comparaison de la dispersion de l'ensemble avec son erreur quadratique moyenne. Les statistiques d'erreurs

peuvent être calculées en temps réel sur l'ensemble et décrivent les variations spatiales et temporelles de l'incertitude (Figure). Elles ont bénéficié d'algorithmes de filtrage sophistiqués, destinés à minimiser l'erreur d'échantillonnage induite par la taille limitée de l'ensemble – 25 membres dans la version actuelle.

Les études actuelles visent à quantifier l'apport de cet ensemble d'assimilations à AROME et à la PEARO sur des périodes longues, pour une mise en opérationnel envisagée en 2018.

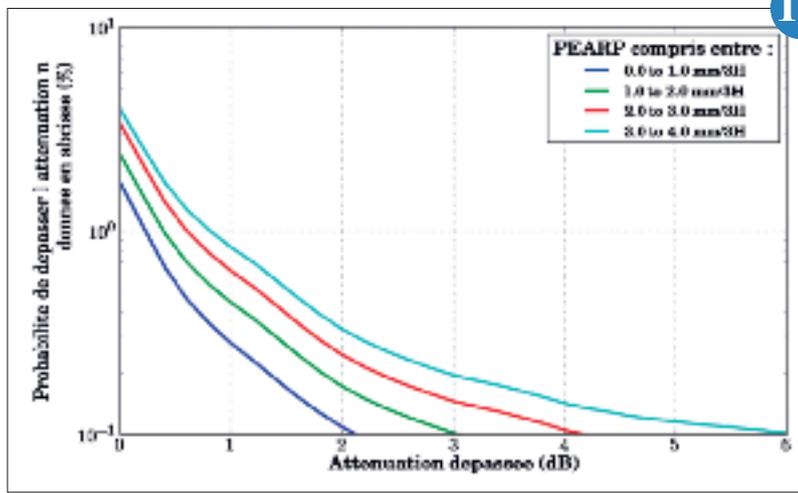
12

9



◀ Schéma du système de prévision d'ensemble des débits basé sur ISBA-TOP : prévision météorologique en bleu, modélisation hydrologique en ocre, état des sols en vert. Les incertitudes sont prises en compte à ces trois niveaux.

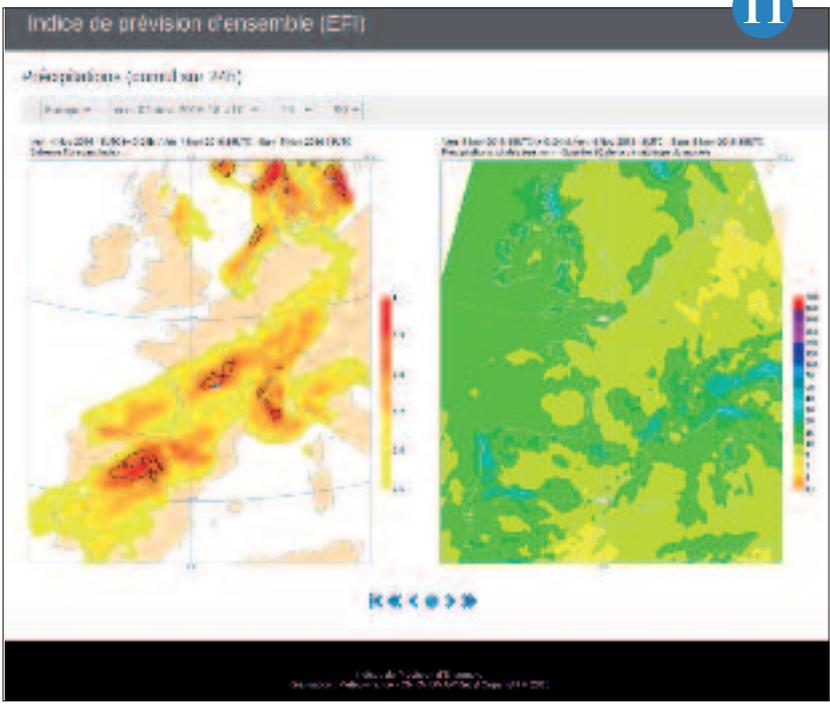
10



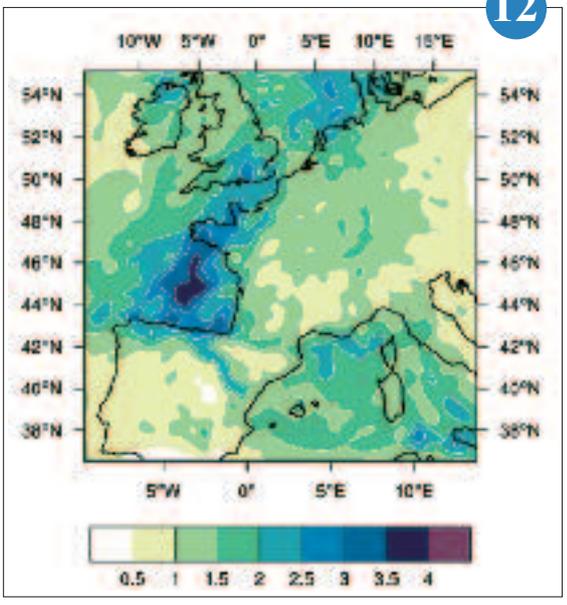
▶ Probabilité de dépassement d'un seuil d'atténuation pour différentes valeurs du seuil (en abscisse) et différents taux de précipitation prévus par le modèle ARPEGE.

Page de visualisation des EFI de PEARP.  
Plages colorées : valeurs d'EFI ; contours noirs : indice SOT.

11



12



▶ Écart-type d'erreur de vent (m/s) pour une prévision à 3 heures, issu de l'ensemble d'assimilations AROME, valable le 23 juin 2016 à 15H UTC, au sommet de la couche limite. La forte incertitude est liée dans ce cas au développement de structures orageuses violentes sur le Nord-Ouest de la France.

# Étude des processus

Les recherches conduites à Météo-France sur la connaissance des processus visent à progresser dans la compréhension des phénomènes atmosphériques et leurs interactions avec les surfaces, afin d'améliorer la prévision des phénomènes météorologiques à enjeux et de progresser dans la représentation des processus dans les modèles de prévision du temps et du climat. Quelques exemples d'étude de processus réalisés en 2016 sur les cyclones tropicaux de l'Océan Indien et sur les systèmes fortement précipitants en Méditerranée et en Afrique de l'Ouest sont présentés ci-après. L'exploitation des observations des campagnes de mesures et la modélisation à très haute résolution (de quelques mètres à quelques kilomètres) sont les approches privilégiées pour ces travaux. Les articles présentés ci-après montrent comment les observations spécifiques de la campagne BLLAST à l'été 2011 et de la campagne HyMeX à l'automne 2012 ont permis d'évaluer et de faire progresser la modélisation de la turbulence et des processus microphysiques pour le modèle AROME. L'année 2016 a aussi été marquée par la réalisation, pour la première fois à partir de conditions initiales réelles, de simulations à résolution horizontale hectométrique de situations météorologiques à forts enjeux : une situation de brouillard observée pendant la campagne LANFEX (Fig.) et des situations de pluies intenses de la campagne HyMeX. Ces simulations, une fois validées avec les observations des campagnes, vont servir de référence pour l'étude de l'impact des structures fines du relief sur les précipitations ou le brouillard et l'évaluation de la représentation des processus physiques dans les modèles de prévision du temps et du climat de Météo-France.

1

## Évaluation de l'énergie cinétique turbulente d'ARPEGE et d'AROME à partir des observations de la campagne BLLAST

La campagne BLLAST (Boundary-Layer Late Afternoon Sunset Turbulence) en Juin 2011 cherchait à étudier la transition de la phase diurne à la phase nocturne. Elle a permis d'obtenir de nombreuses observations caractérisant la couche limite. Nous avons utilisé ces observations pour évaluer les modèles opérationnels de Météo-France, le modèle à aire limitée AROME et le modèle global ARPEGE. Nous avons analysé la représentation des profils verticaux de température et d'humidité ainsi que l'évolution temporelle des variables près de la surface et des bilans d'énergie à la surface. Nous avons mis en évidence certains biais comme la surestimation des flux sensibles dans ARPEGE pour les mailles caractérisées par une végétation haute et la surestimation des flux latents dans AROME. AROME permet de mieux reproduire la structure verticale de la couche limite du fait d'une meilleure résolution verticale mais aussi via la meilleure représentation de la circulation associée à l'orographie des Pyrénées. Une attention particulière a été portée sur l'évaluation de l'énergie cinétique turbulente qui quantifie l'intensité de la turbulence.

La figure montre l'évolution temporelle de l'énergie cinétique turbulente observée (mesures du mâât, des mesures avions, mesures lidars et mesures sur ballon captif) et simulée à différents niveaux verticaux. Les deux modèles reproduisent l'ordre de grandeur et les variations spatiales de cette variable. AROME sous-estime cette variable à 8 m mais permet de mieux représenter la variabilité d'un jour à l'autre et au sein d'une journée. Ces travaux ont permis d'identifier les biais dans la représentation des processus de couche limite, en particulier dans l'intensité de la turbulence grâce aux observations de la campagne BLLAST.

2

## Évaluation du schéma microphysique à deux moments LIMA, dans Méso-NH et AROME

Les aérosols atmosphériques jouent un rôle essentiel dans le développement des systèmes nuageux, notamment grâce à leur capacité à servir de noyaux de condensation ou noyaux glaçogènes.

Le schéma microphysique à deux moments LIMA représente explicitement les interactions aérosols-nuages. Sa représentation des nuages et des précipitations est en cours d'évaluation dans Méso-NH, à l'aide des observations microphysiques détaillées de la campagne HyMeX. La combinaison de différents types d'observations (disdromètres, radars polarimétriques, aéroportées in-situ, etc.) fournit une description précise des nuages et des précipitations.

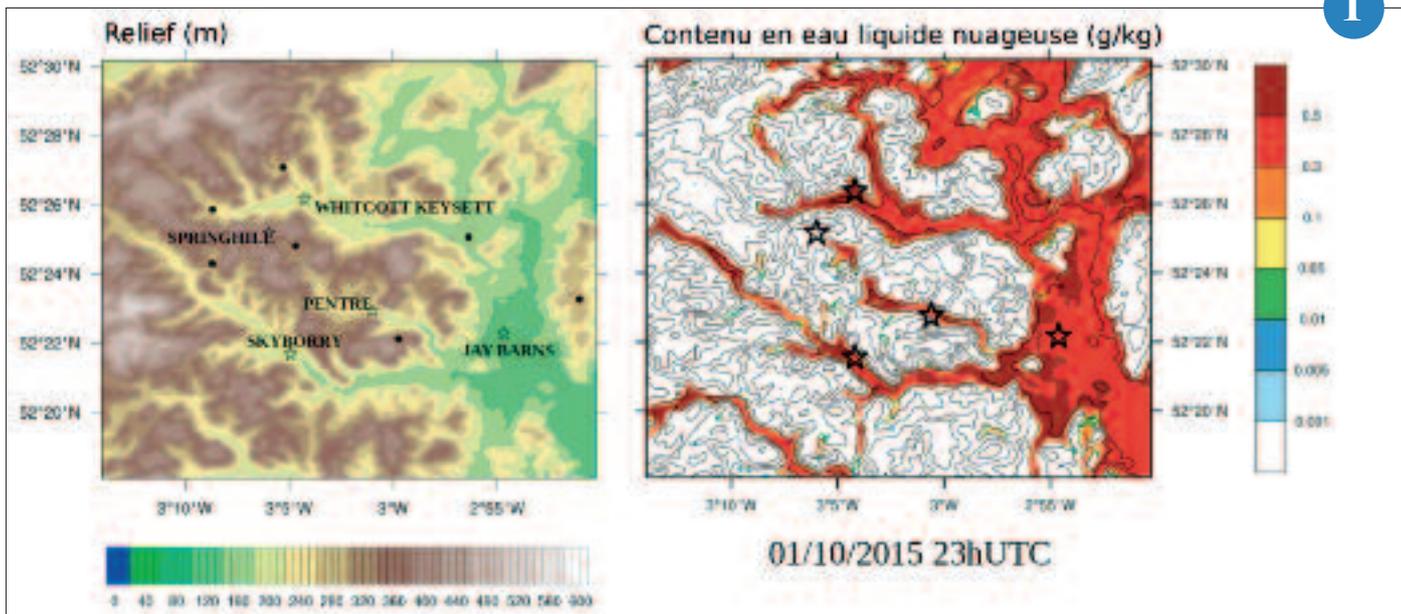
La comparaison avec ces observations montre que LIMA représente beaucoup mieux la variabilité des caractéristiques des nuages et précipitations que le schéma à un moment ICE3, opérationnel dans AROME (Fig.). Elle permet aussi d'identifier les biais du schéma (par ex. la surestimation des tailles de gouttes) et de proposer des pistes d'amélioration (relâcher une contrainte sur la distribution en taille des gouttes).

LIMA a également été introduit dans le modèle AROME, et testé sur deux périodes d'un mois en utilisant une initialisation homogène des aérosols. Les premiers résultats de cette évaluation statistique montrent d'une part un biais positif sur les fortes précipitations, et d'autre part un impact important de la concentration en aérosols sur les faibles précipitations.

L'originalité de LIMA est sa capacité à représenter une population d'aérosols réaliste. Une méthode d'initialisation des aérosols à partir des analyses MACC ou du modèle MOCAGE est donc en cours d'évaluation, tant pour les études de processus que dans l'optique de la future utilisation de LIMA dans le modèle opérationnel.

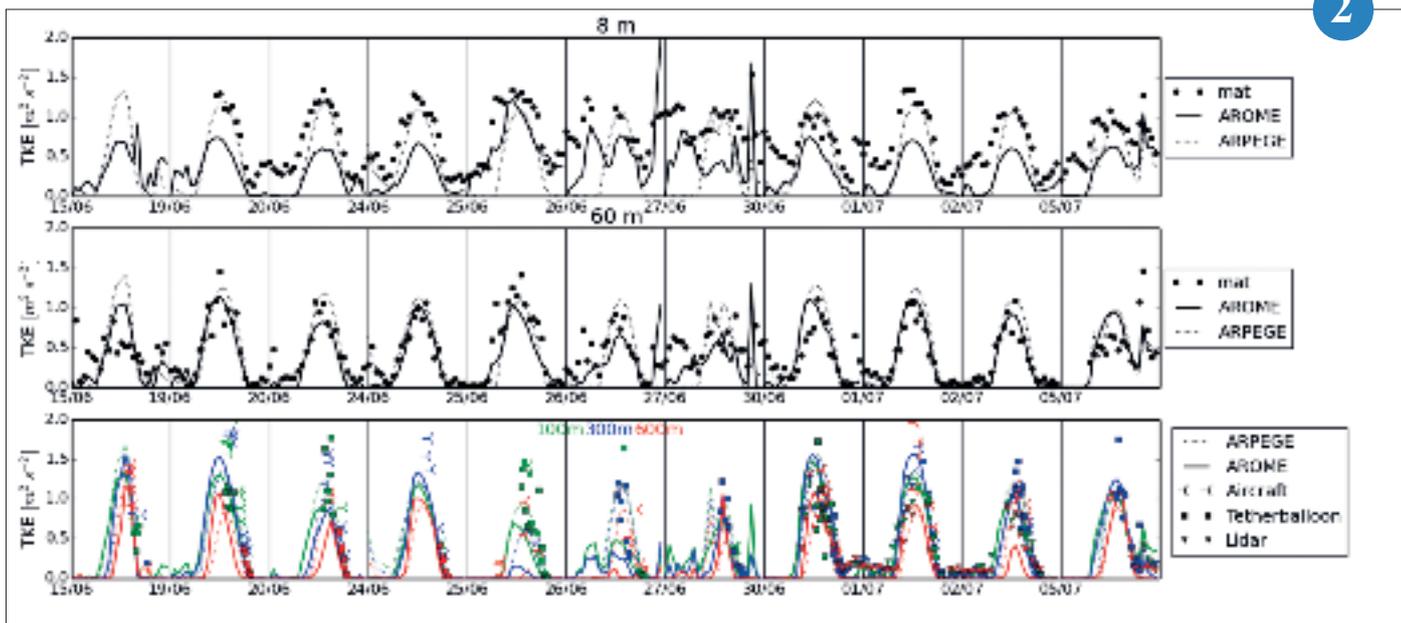
3

1



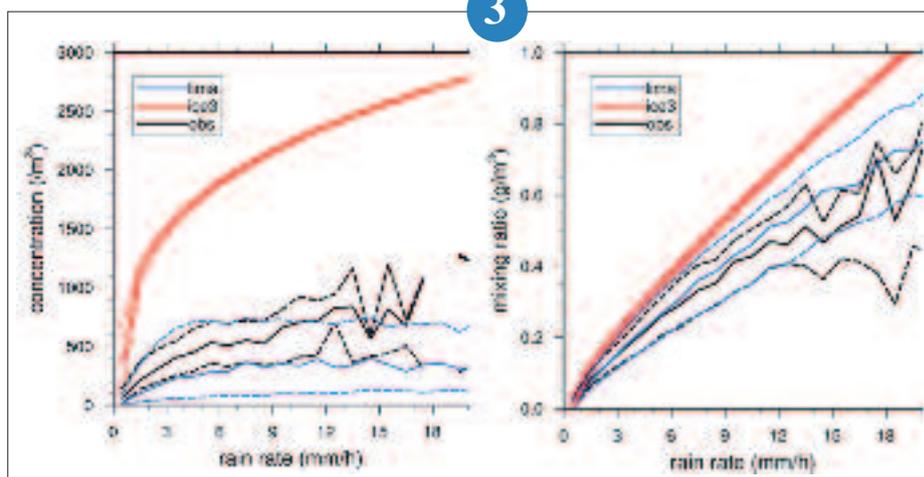
Simulation Méso-NH à 100 m de résolution horizontale d'une situation de brouillard de la campagne LANFEX qui a eu lieu dans une région vallonnée de l'ouest de l'Angleterre. A gauche : relief du modèle ; à droite : eau liquide nuageuse (en couleurs) superposée au relief (isolignes). La très haute résolution permet de représenter le brouillard qui se forme préférentiellement dans les vallées étroites et la plaine comme dans les observations.

2



Évolution temporelle de l'énergie cinétique turbulente à 8m (en haut), 60m (au milieu) et 100m, 300m ou 500m (en bas) observée par stations synoptiques, mâts de mesures, avions de recherche, lidars doppler ou ballons captifs ou simulée par AROME et ARPEGE pour les différentes périodes d'observations intensives durant la campagne BLLAST.

Moyenne (trait plein) et quartiles (tirets) de la concentration (gauche) et du rapport de mélange (droite) de la pluie en fonction du taux de précipitation, pour la POI 16 d'HyMeX (26/10/2012). LIMA (bleu) est plus proche des observations des disdromètres (noir) et en représente mieux la variabilité qu'ICE3 (rouge).



## Analyse du cas extrême de pluie à Ouagadougou le 1<sup>er</sup> septembre 2009

L'Afrique est régulièrement affectée par des événements météorologiques extrêmes à fort impact. Un défi important est de mieux comprendre ces événements, d'étudier leur prédictibilité et de les prévoir pour en atténuer l'impact. Pour le relever, le programme THORPEX de l'OMM a sélectionné pour l'Afrique de l'Ouest l'événement extrême de pluie qui a frappé Ouagadougou (Burkina Faso) le 1<sup>er</sup> septembre 2009 avec un record absolu enregistré de 263 mm, occasionnant d'importants dégâts matériels et humains. En collaboration avec les prévisionnistes du Sénégal (ANACIM), une analyse multi-échelle détaillée de ce cas extrême a été menée. Il s'est produit durant une période très active d'une vingtaine de jours, avec le passage d'un train d'ondes d'est combiné à une forte et large anomalie humide initiée sur l'Afrique de l'Est. Le passage de la 1<sup>ère</sup> onde conduit à l'amplification de la seconde et à son déferlement, puis à la formation d'un tourbillon

humide maintenant de fortes précipitations. Contrairement aux lignes de grains, ce système n'est pas associé à un courant de densité et se propage plus lentement, permettant de forts cumuls de précipitation (Figure). A plus grande échelle, l'interaction entre plusieurs ondes équatoriales (Kelvin, Rossby et mixte Rossby-Gravité) est mise en évidence, favorisant l'occurrence de cet événement. Cette étude a été complétée par des simulations AROME à très haute résolution pour étudier la formation et la propagation de ce tourbillon humide et son interaction avec l'activité convective. Par ailleurs une analyse statistique a été menée sur l'ensemble des événements extrêmes de pluie observés sur le Sahel ouest confirmant certains résultats obtenus sur l'événement survenu à Ouagadougou.

4

## Pluies intenses méditerranéennes : processus convectifs et rôle des structures d'humidité (cas de la PO13 d'HyMeX)

Les régions méditerranéennes sont régulièrement touchées par des épisodes de fortes pluies. Des quantités de pluie importantes (souvent plus de 100mm en 12h) tombent sur de petits bassins versants et causent des crues rapides dévastatrices. La prévision de ces phénomènes météorologiques majeurs demande de la précision à la fois dans le temps et dans l'espace. Cela nécessite de bien connaître les processus physiques impliqués et de les représenter correctement dans les modèles numériques de prévision. La campagne de mesure HyMeX et sa SOP1 à l'automne 2012 a vu le déploiement de nombreux instruments permettant d'observer finement les systèmes fortement précipitants et leur environnement météorologique. Le 14/10/2012 (PO13), un jet de basses couches dirige vers les côtes de la région PACA une masse d'air marine chaude et humide surmontée par une couche d'air sec (4-7 g/kg au-dessus de la couche limite et 1-2 g/kg dès 2500m). La convection se développe sur les premiers reliefs et se décale lentement sur les côtes puis en mer.

Des simulations numériques de cet épisode ont été effectuées avec le modèle de recherche Mésos-NH à 2,5 km de résolution horizontale. Les observations de la campagne HyMeX montrent le réalisme des systèmes précipitants simulés et des processus convectifs associés. Une partie des précipitations s'évapore dans la couche d'air sec. Le refroidissement associé est canalisé dans les vallées et s'écoule peu à peu vers les côtes décalant les ascendances convectives du fond des vallées vers la mer. L'inversion des vents dans les vallées associée à un refroidissement marqué est similaire dans la simulation et dans les observations. Des simulations quasi-LES sont en cours pour étudier à fine échelle l'organisation ainsi que les processus dynamiques, turbulents et microphysiques de ces systèmes convectifs.

5

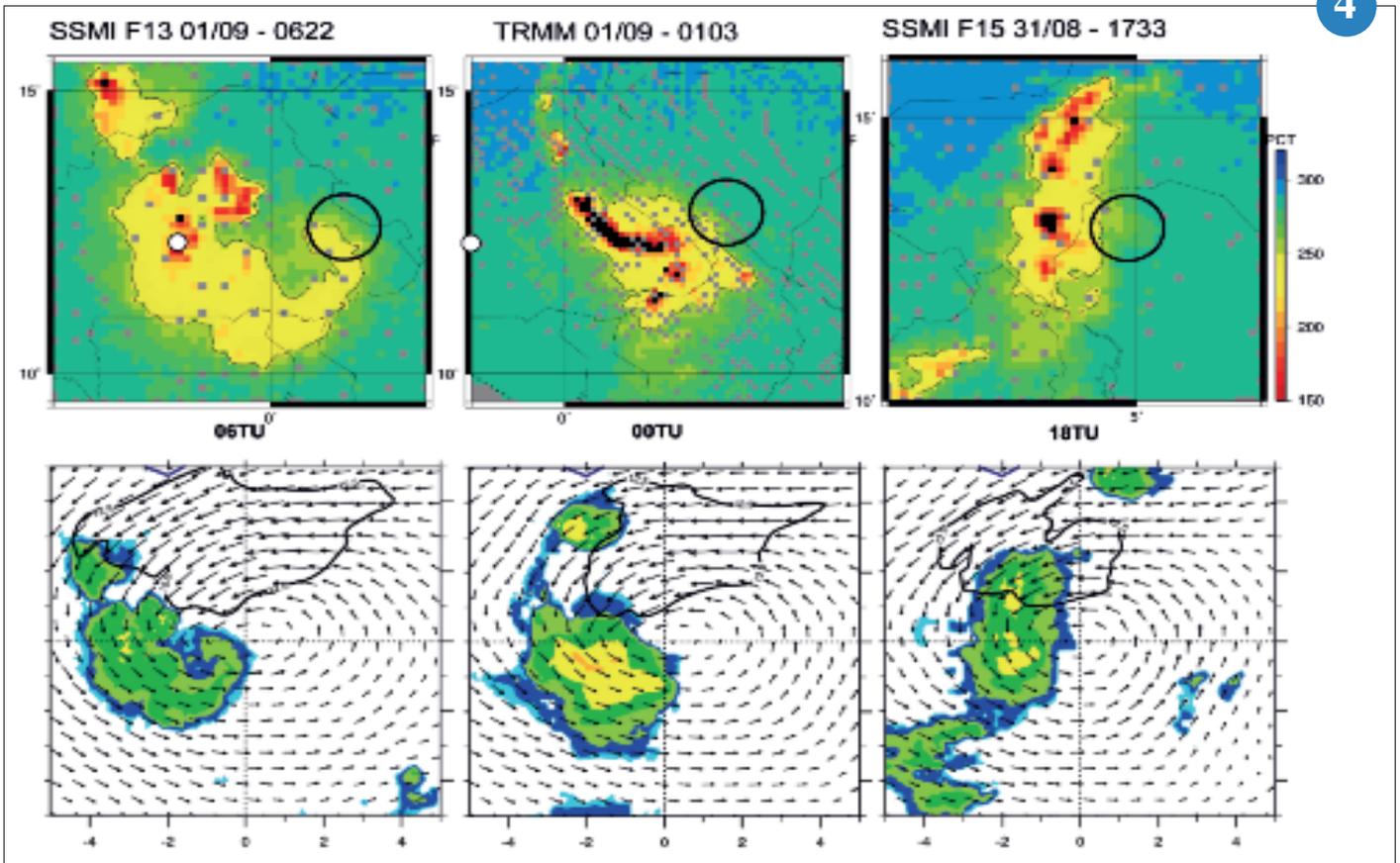
## Impact de l'orographie de l'île de La Réunion sur la trajectoire des cyclones

De nombreuses études ont montré que l'orographie pouvait influencer significativement la trajectoire et l'intensité des cyclones tropicaux au voisinage des terres immergées. En raison de sa grande taille, de son terrain escarpé et de sa position, le cas de l'île de Taïwan a été particulièrement étudié, mais de plus petites îles telles que La Réunion peuvent également avoir une influence notable sur la trajectoire des cyclones (e.g. Bejisa en 2014 ou Dina en 2002).

L'analyse des données de « best-track » du CMRS-cyclones de La Réunion sur la période 1981-2015 a ainsi montré que les cyclones passant à moins de 200 km de l'île de La Réunion étaient plus souvent sujets à des changements de direction et de vitesse que les systèmes plus distants. Pour confirmer ces résultats, une quinzaine de simulations numériques idéalisées ont été effectuées à partir du modèle de recherche Mésos-NH (absence d'île, île plate, hauteur du relief et distance à l'île variables). Les résultats obtenus confirment ceux de l'analyse climatologique et montrent que la zone d'influence de l'île de La Réunion est maximisée à une distance de deux fois le rayon de vent maximum du cyclone (distance entre le centre du système et le point où est observé le maximum de vent). L'effet de l'île se manifeste notamment par un phénomène d'aspiration (changement de trajectoire et accélération) associé à une baisse d'intensité à mesure que le cyclone se rapproche de l'île. Une fois l'île dépassée, le système reprend alors sa trajectoire initiale et se ré-intensifie progressivement.

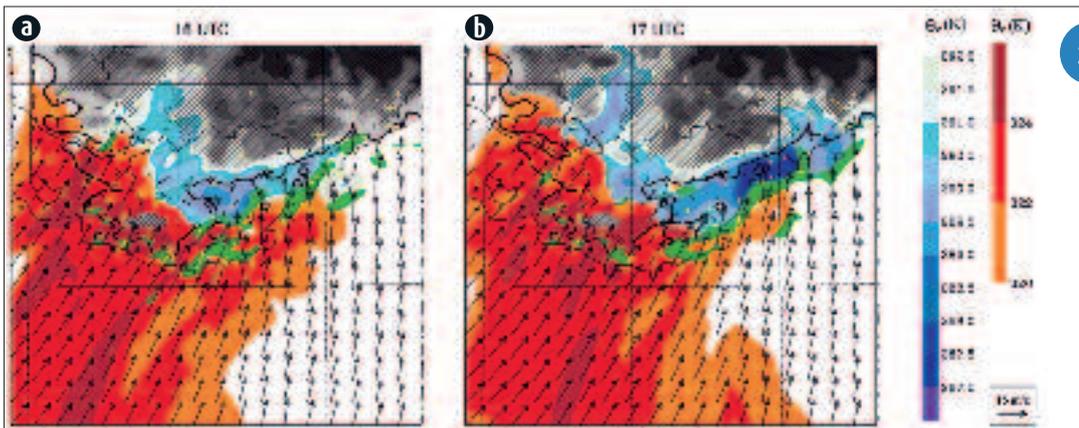
Ces travaux doivent permettre aux prévisionnistes d'anticiper plus précisément les changements de trajectoire parfois très brusques des cyclones évoluant à proximité de petites îles montagneuses telles que La Réunion.

6

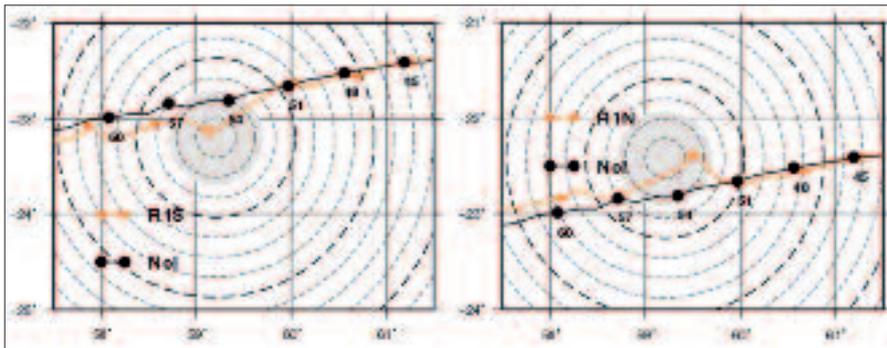


Evolution de la structure des précipitations associées au tourbillon humide.  
 Rangée du haut : Instantanés de la température polarisée corrigée (PCT in °K) à proximité du tourbillon repéré par le cercle noir. Les faibles précipitations (1-3 mm/h) correspondent à des PCT > 255 K (coloration verte), et les précipitations convectives (10-12 mm/h) aux PCT < 225 K (coloration chaudes). Rangée du bas : cumul de pluie GSMAP sur 1 h (couleur en mm) avec le vent moyen (flèches) dans la couche 950-600 hPa analysé par ARPEGE. Le centre du carré de 10° correspond au centre du tourbillon. Le contour épais noir délimite le noyau de vent supérieur à 12.5 m s<sup>-1</sup>.

Le 31 août à 18TU (à droite), on observe une structure linéaire de type ligne de grains ; 6h plus tard l'enroulement par la circulation tourbillonnaire est en cours (au centre) pour aboutir le 1er septembre à 06UTC (à gauche) à une structure spiralée au-dessus de Ouagadougou (point blanc) avec une intensification du tourbillon.



Simulation Més0-NH (a) 16 UTC et (b) 17 UTC : température potentielle équivalente à 925 hPa (plages de couleur rouge, K) température potentielle virtuelle au premier niveau modèle (plages de couleur bleue, K), vent horizontal à 925 hPa (flèches, simulation en noir, observations à 10 m en jaune) et vitesse verticale à 500 m supérieure à 0.5 m/s (plages de couleur verte).



Simulations Més0-NH idéalisées illustrant la modification de trajectoire d'un cyclone passant au voisinage de l'île de La Réunion.  
 La courbe noire représente la trajectoire théorique du système en l'absence d'île. Les courbes de couleur orange montrent la trajectoire d'un système passant à une distance d'un rayon de vent maximum au Nord (panneau de gauche) et au Sud (panneau de droite) de La Réunion. L'emplacement de l'île de La Réunion est indiqué en grisé.

# Climat

En 2016, la température moyenne mondiale se situait à 1,1 °C au-dessus du niveau préindustriel, établissant un nouveau record. Particulièrement touchées par ce « coup de chaleur », les régions polaires ont vu la couverture de banquise régresser jusqu'à des niveaux inédits. Or, l'accord de Paris (COP 21) prévoit de limiter le réchauffement à 2 °C, et si possible 1,5 °C. Selon l'état actuel des connaissances, cet objectif implique une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, mais peut-être aussi en dernier recours, l'utilisation de techniques de géo-ingénierie qu'il convient d'évaluer.

Côté observation, Météo-France a poursuivi ses efforts en vue du sauvetage de données climatologiques anciennes. Cette action permet d'acquiescer le recul nécessaire pour distinguer variabilité et évolution du climat, que ce soit à travers l'analyse des séries elles-mêmes ou à des fins d'intégration dans des ré-analyses qui reflètent l'état du système climatique. Cette année, un nouveau jeu de données de référence sur l'insolation en France depuis les années 1930 a vu le jour, tandis que pour les outremers, le travail de récupération de données de pression, de température, d'humidité et de vent mené depuis plusieurs années s'est poursuivi.

Côté modélisation climatique, la version 6 d'ARPEGE-Climat incluant une nouvelle physique atmosphérique également utilisée en prévision du temps a été finalisée en fin d'année et a été intégrée dans le modèle de climat couplé global CNRM-CM6. Ce dernier sera mis en œuvre pour réaliser des simulations climatiques qui alimenteront la base de données CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6). Cet exercice permettra à la communauté scientifique de disposer de projections climatiques futures selon plusieurs scénarios, et de mieux comprendre les erreurs des modèles et la réponse du climat aux forçages externes (gaz à effet de serre, aérosols, éruptions volcaniques et variabilité solaire). Pour l'heure, la base de données CMIP5 reste inégale. Son exploitation a notamment permis cette année d'étudier l'évolution des routes dépressionnaires en Atlantique Nord, ou encore la sinuosité du jet des moyennes latitudes de l'hémisphère nord dans un climat en évolution.

Parallèlement, l'offre de services climatiques s'enrichit de nouveaux produits. Certains découlent des prévisions saisonnières du système opérationnel de Météo-France, qui a été amélioré l'an dernier grâce à des actions de recherche sur la prise en compte des imperfections du modèle et l'initialisation du système. L'an dernier, un prototype de service climatique pour la gestion saisonnière des ressources en eau jusqu'à trois mois à l'avance a été développé, de même qu'un diagnostic sur la fréquence des régimes de temps en Atlantique Nord. D'autres actions concernent notamment le secteur de l'énergie éolienne et solaire, et visent à estimer l'adéquation offre-demande, que ce soit quelques jours à l'avance, à l'échelle de la saison à venir, ou en moyenne lors des prochaines décennies.

1

## Étude du climat

### Développement et évaluation de la version 6 d'ARPEGE-Climat

Le modèle de circulation générale atmosphérique, ARPEGE-Climat, est une composante centrale du modèle de climat du CNRM. Fin 2016, la version 6 de ce modèle atmosphérique a été finalisée en vue de son couplage avec un modèle d'océan et de banquise. Elle servira de base à la contribution du CNRM au projet international d'inter-comparaison CMIP-6.

Cette version inclut de nombreux développements, qui se sont étalés sur les 5 à 10 dernières années et qui ont impliqué les différentes unités du CNRM : le nouveau schéma de convection, couplé à une microphysique nuageuse détaillée, traite de manière continue la convection profonde et peu profonde ; le nouveau schéma de turbulence améliore la représentation des couches limites ; le nouveau schéma des surfaces continentales décrit les processus liés aux aquifères et aux plaines d'inondation ; un schéma d'ondes de gravité non orographique permet la prise en compte des sources liées à la convection profonde et à la frontogénèse. Le travail de réglage final s'est focalisé sur l'équilibre énergétique du modèle et sur la réduction des biais les plus marquants

(nuages hauts tropicaux, précipitations extrêmes sur les reliefs).

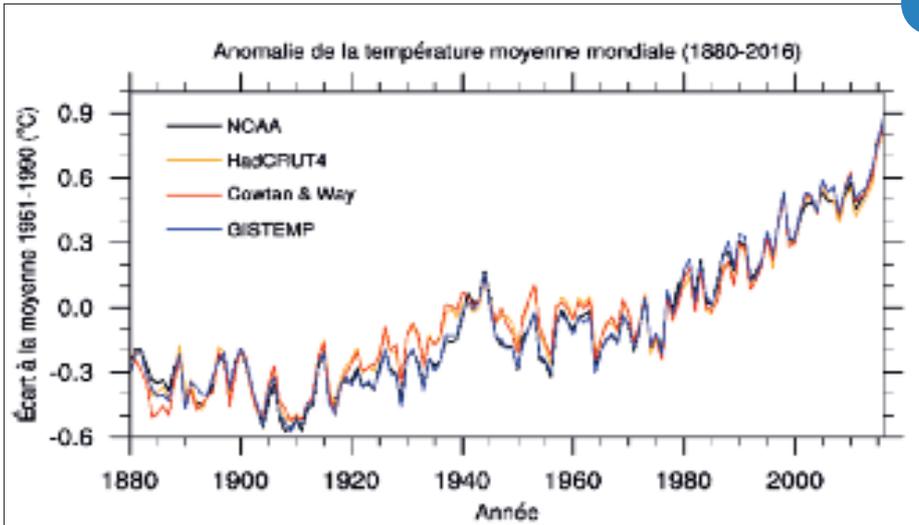
En comparaison à la version précédente mise en œuvre dans CMIP-5, le modèle simule par exemple de manière nettement plus réaliste la distribution des pluies tropicales (avec une excellente simulation de la mousson asiatique en été, cf. illustration) ou celle des cumulus sur les océans tropicaux et des stratocumulus sur le bord est des océans subtropicaux. La représentation de la stratosphère est elle aussi grandement améliorée, avec pour la première fois une simulation réaliste de l'Oscillation Quasi-Biennale dans la stratosphère équatoriale.

2

### Un nouveau jeu de référence pour l'analyse de l'évolution de l'insolation en France depuis les années 1930

L'analyse des évolutions climatiques est effectuée à partir de longues séries de référence. L'homogénéisation est un traitement statistique qui permet de constituer des séries mensuelles corrigées des ruptures dues aux déplacements des points de mesures, aux modifications de leur environnement, aux changements de capteurs ou d'observateurs, ... Après la constitution de nouveaux jeux de séries mensuelles de températures et de précipitations, Météo-France vient de réactualiser le jeu de longues séries homogénéisées d'insolation pour la France métropolitaine.

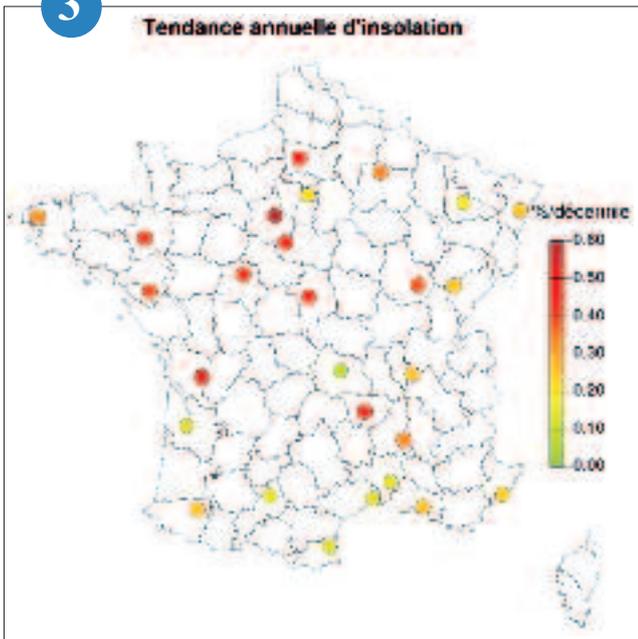
Le précédent jeu concernait 18 séries sur la période 1931-2000. Suite à un important travail de Data Rescue (« Sauvetage des données anciennes »), de numérisation et d'insertion de données, le nombre de séries homogénéisées a été porté à 27. Cette nouvelle action d'homogénéisation a également bénéficié de l'évolution du logiciel Homer.



1

Anomalie de la température moyenne mondiale annuelle estimée selon 4 jeux de données : NOAA, HadCRUT4, Cowtan & Way (2014) et GISTEMP, par rapport à la moyenne sur la période 1961-1990.

Précipitation moyenne (mm/jour) pour la période 1979-2008 et la saison JJA pour (haut) le produit GPCP, et pour des simulations avec ARPEGE-Climat version CMIP-5 (milieu) et ARPEGE-Climat version CMIP-6 (bas) réalisées en prescrivant des températures océaniques observées.



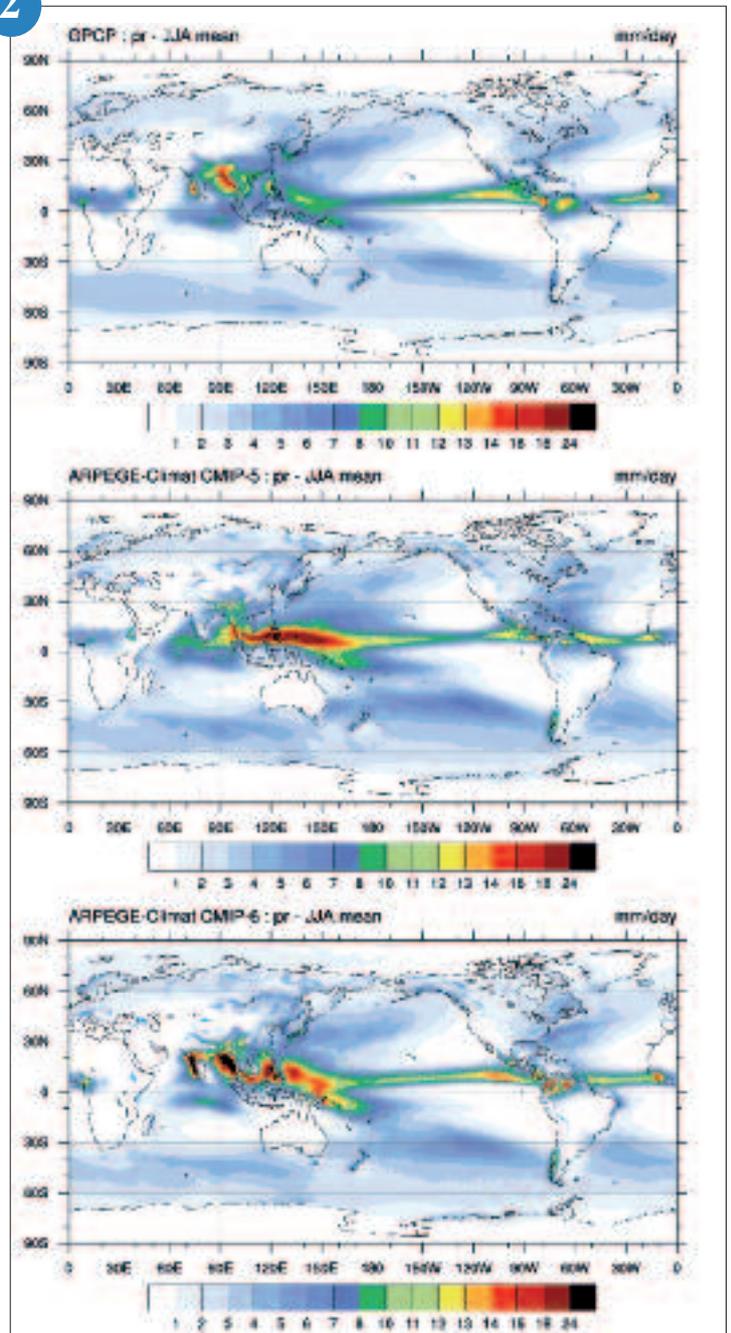
3

Ce jeu de 27 séries homogénéisées d'insolation sur la période 1931-2014 a permis de montrer une évolution à la hausse de la durée d'insolation annuelle sur la période 1931-2014 sur tout le territoire. Les tendances calculées sont comprises entre + 0.1% et + 0.6% par décennie mais sont majoritairement non significatives du point de vue statistique. Un grand quart nord-ouest de la France allant de Cognac à Beauvais rassemble la quasi-totalité des valeurs les plus élevées. Cette évolution à la hausse est significative sur tout le territoire en automne et en hiver. Par contre, les séries printanières et estivales ne présentent pas de tendance significative.

Le nouveau jeu de séries homogénéisées est cohérent avec les résultats obtenus précédemment. Les données utilisées et la méthode ayant été améliorées, il devient le nouveau jeu de référence pour analyser l'évolution de l'insolation sur la France.

Évolution de l'insolation, tendance 1931-2014 (en % par décennie) estimée à partir des séries homogénéisées.

2



3

## Activités du Data Rescue pour les ré-analyses du climat

Une demande croissante de la recherche porte aujourd'hui sur l'alimentation des modèles de ré-analyses du climat en données climatologiques anciennes, à travers des besoins spécifiques en matière de type, de fréquence temporelle et de période des paramètres. Les données infra-quotidiennes de pression, de température, d'humidité, de vent en surface et en altitude remontant au milieu du 19<sup>e</sup> siècle sont ainsi attendues par la communauté scientifique. Un enjeu particulier consiste à cibler les récupérations sur des zones géographiques isolées (régions polaires ou tropicales) pour lesquelles les bases de données internationales sont déficitaires.

En réponse, Météo-France mène depuis plusieurs années une action de sauvetage de données climatologiques anciennes (Data Rescue) qui suppose la recherche et la conservation des archives, la récupération, la qualification et la mise à disposition des données et des métadonnées qu'elles contiennent.

En 2016, l'action a été orientée en direction de l'Outre-mer française, grâce à l'exploitation d'une partie des archives d'anciens hôpitaux coloniaux du fonds de Météo-France conservé aux Archives nationales. Les relevés météorologiques originaux des hôpitaux de Saint-Pierre-et-Miquelon, de Nouvelle-Calédonie, des Antilles et de La Réunion ont ainsi fait l'objet d'une numérisation et d'une saisie des observations de surface sur la période 1861-1932. Les archives des stations professionnelles de Météo-France ont ensuite permis d'extraire des données en altitude après 1945 pour la Guadeloupe, la Guyane et La Réunion.

Les archives du climat de l'Établissement, avec plusieurs kilomètres d'un patrimoine d'exception, permettent d'envisager de nouvelles avancées.

4

## Étude climatologique de la variabilité spatio-temporelle des précipitations à La Réunion

Une étude, basée sur l'utilisation de données pluviométriques et de ré-analyses ERA-INTERIM, a été réalisée sur la période 1979-2015 (37 ans) pour identifier les différents régimes précipitants à La Réunion en fonction des propriétés des vents dominants. Cette analyse a permis d'identifier 3 périodes significatives : la saison des pluies (JFMA, été austral), caractérisée par des alizés faibles et une hauteur d'inversion élevée (3000m), la saison sèche (MJJAS, hiver austral) caractérisée par des alizés plus forts et une inversion plus basse (2000m) et une saison de transition (OND), caractérisée par des alizés modérés et une hauteur d'inversion intermédiaire (2500m).

Une analyse en régime de temps a ensuite été effectuée pour chacune de ces 3 saisons afin d'explicitier plus précisément la variabilité spatio-temporelle des précipitations matérialisée à partir des données pluviométriques. Les liens entre les types de régimes de temps et des

pluies au sol ont été mis en évidence par des méthodes statistiques (analyses en composante principale et canonique). Cette étude a permis d'identifier entre 4 et 5 classes pour chacune des 3 saisons (5 pour l'été austral, 4 pour l'hiver austral et la saison de transition). La prise en compte des régimes de temps et du critère d'inversion, doit permettre à terme d'améliorer la lame d'eau radar en adaptant les lois Z-R utilisées en fonction des saisons et des situations météorologiques. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet interdisciplinaire ERO-VEG (érosion –végétation ; financement Ministère de l'Outremer) qui a pour ambition de mieux comprendre l'impact des précipitations sur l'érosion à l'échelle de La Réunion.

5

## Cycle diurne et vents dominants en Nouvelle Calédonie

Dans le cadre du projet Pluvar associant Météo France/Météo Nouvelle-Calédonie et des partenaires régionaux (IRD Nouméa, Université de Polynésie Française, Université du Pacifique Sud, Université d'Auckland, NIWA) et financé par le Fonds Pacifique, les chercheurs ont identifié une particularité du cycle diurne en Nouvelle Calédonie. Le cycle diurne des pluies est plus fort et plus continental, c'est-à-dire avec un maximum en fin d'après-midi, sur la côte de Nouvelle-Calédonie à l'abri du vent. L'intensité des brises va de pair avec l'intensité des précipitations : une forte brise de mer dans l'après-midi crée une ascendance sur la côte sous le vent et y favorise la convection nuageuse.

Ce phénomène est vrai en moyenne, alors que les vents dominants viennent de l'Est/Sud-Est, mais aussi lorsque le vent dominant change en fonction des régimes de temps, comme le montre la figure : en moyenne, le cycle diurne est faible sur la côte Est et fort sur la côte Ouest ; en régime de Sud, la brise de mer est réduite sur la côte Ouest et plus développée sur la côte Est.

En utilisant un modèle haute-résolution, les chercheurs ont pu montrer que cette sensibilité du cycle diurne résulte de plusieurs facteurs. D'abord le vent dominant peut permettre à la convection de se développer toute la journée sur la côte au vent en apportant un air humide qui condense en montant les pentes de la chaîne centrale de l'île, et ceci limite le cycle diurne. Ensuite, le cumul du vent dominant et de la brise de mer sur la côte au vent peut permettre au flot de passer la chaîne centrale dans l'après-midi et d'humidifier la troposphère au-dessus de la côte sous le vent, ce qui y renforce la convection. Reste aux chercheurs à mieux quantifier ces mécanismes et leur possible effet sur des événements extrêmes.

6

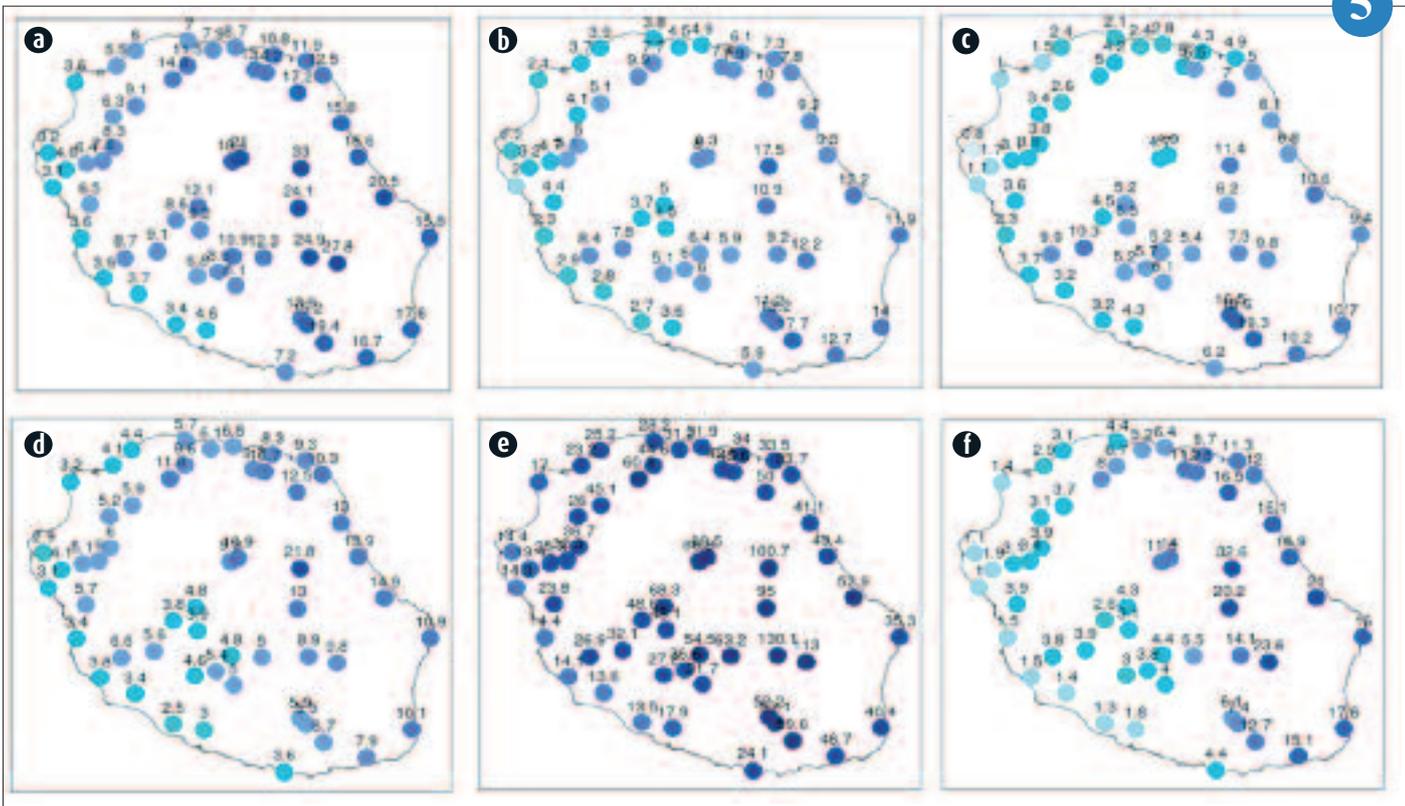
4



Le parc à instruments de l'hôpital de Saint-Pierre (Saint Pierre-et-Miquelon) en 1902.

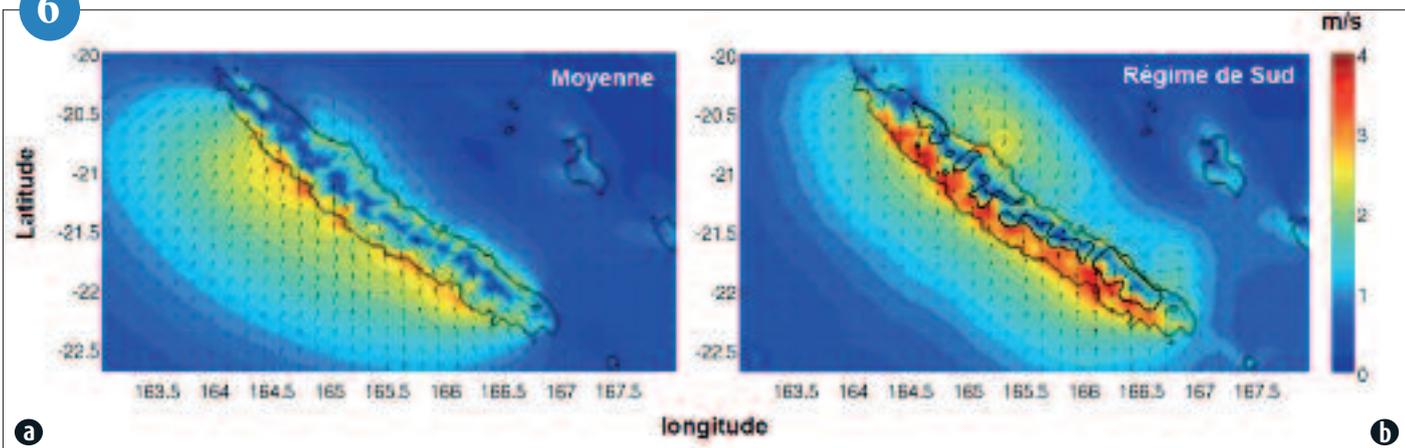
(a) moyenne des précipitations journalières à La Réunion sur la période Janvier-Février-Mars-Avril (JFMA), calculée à partir d'une série climatologique de 37 ans (54 postes pluviométriques) ;  
 (b-f) moyenne quotidienne pour chacun des 5 régimes de temps identifiés :  
 (b) basses pressions ; (c) dorsale ; (d) système dépressionnaire (e) alizés ; (f) neutre.

5



Anomalie de vent de surface (flèches) dans l'après-midi (14h-17h) par rapport à la moyenne journalière, et son intensité (couleurs) en moyenne (a) et en régime de Sud (b), pendant la saison chaude (Novembre-Avril), dans une simulation de modèle haute-résolution.

6



# Évolution climatique

## Mesures et ressenti du microclimat à l'échelle du quartier

Le quartier toulousain Bordelongue-Papus-Tabar a été investi lors du projet interdisciplinaire EUREQUA. Des parcours commentés ont eu lieu à 10h, 16h et 19h pour 3 journées de janvier, avril et juin 2014. En 6 points d'arrêt, des mesures météorologiques, acoustiques et de pollution ont été combinées à des enquêtes sur le ressenti des habitants de différentes variables environnementales. Au total, on compte 162 points de mesure et un corpus de 186 enquêtés.

Les données microclimatiques présentent une variabilité temporelle et spatiale. Pour le vent, les tendances saisonnières sont moins marquées que pour la température ou l'humidité, mais des différences sont relevées entre points d'arrêt, certains espaces étant plus exposés que d'autres (Fig. a).

Une régression linéaire multiple montre que la perception du vent (selon les niveaux "très calme", "calme", "venteux", "très venteux") est corrélée à la vitesse moyenne et l'écart-type du vent (Fig. b) mesurés au point d'arrêt sur la durée de l'enquête, et corrélée négativement à la température radiante. La vitesse du vent pour laquelle le ressenti passe de calme à venteux est plus forte en été qu'en hiver, indiquant que les individus ressentent moins le vent lorsqu'il fait moins froid. L'évaluation de la chaleur (de "très froid" à "très chaud") est quant à elle corrélée à la température radiante en été, et non à la température de l'air. En hiver, aucune corrélation n'est relevée. Enfin, l'évaluation du confort climatique n'est pas reliée aux variables mesurées ou aux dimensions climatiques interrogées dans les enquêtes. Elle est fortement corrélée à l'appréciation générale du lieu, la qualité sonore et la qualité de l'air. Ainsi elle semble contribuer à une évaluation intégrée de la qualité environnementale.

7

## Sinuosité de l'écoulement atmosphérique des moyennes latitudes et changement climatique

Le courant-jet atmosphérique de l'hémisphère Nord fait-il plus de méandres, et si oui, est-ce l'empreinte du réchauffement climatique ? La question fait débat depuis quelques hivers marqués par des blocages intenses en Europe et en Amérique du Nord. Plusieurs études évoquent un lien avec la fonte de la banquise arctique, car en modifiant le différentiel de température entre l'équateur et le pôle, l'amplification polaire peut affecter l'écoulement des moyennes latitudes.

Dans cette étude, nous avons caractérisé la sinuosité de l'écoulement via une métrique originale basée sur la longueur d'isolignes de hauteur de géopotential à 500 mb (figure). Cette approche est similaire à la quantification des méandres de rivières en géomorphologie. Après avoir vérifié la cohérence avec d'autres métriques plus classiques (indice NAO, fréquence de blocage), nous avons étudié les tendances récentes de sinuosité et les changements projetés par les modèles CMIP5.

Sur la période récente, nous trouvons une légère augmentation de sinuosité, avec néanmoins un faible rapport signal sur bruit. Les projections futures sont plus formelles, et indiquent une diminution généralisée de sinuosité en climat plus chaud. Les incertitudes associées sont partiellement expliquées par la dispersion des modèles dans leur réponse de gradient de température équateur-pôle ; en particulier les modèles avec une plus faible amplification polaire montrent une plus forte diminution de sinuosité.

Reste désormais à bien comprendre l'augmentation récente de sinuosité (variabilité interne ? réponse transitoire ?), et à déterminer comment contraindre les projections futures.

8

## Contraindre la réponse à long terme du climat à l'injection d'aérosols stratosphériques via sa réponse à court terme aux éruptions volcaniques

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre contribue au réchauffement climatique, avec de multiples impacts sur les sociétés humaines et les écosystèmes. Les méthodes de géo-ingénierie comme la gestion du rayonnement solaire (GRS) via l'injection d'aérosols sulfatés dans la stratosphère (IAS) proposent de limiter les symptômes du changement climatique en diminuant la température globale. Les modèles « Système Terre » demeurent des outils indispensables afin d'évaluer les effets climatiques de la géo-ingénierie. Cependant, les simulations effectuées dans le cadre du projet d'inter-comparaison de modèles GeoMIP suggèrent qu'il existe un désaccord des modèles quant à l'ampleur du refroidissement induit par une injection continue de 5 Tg de SO<sub>2</sub> par an dans le cadre du scénario climatique RCP4.5 (expérience G4 de GeoMIP).

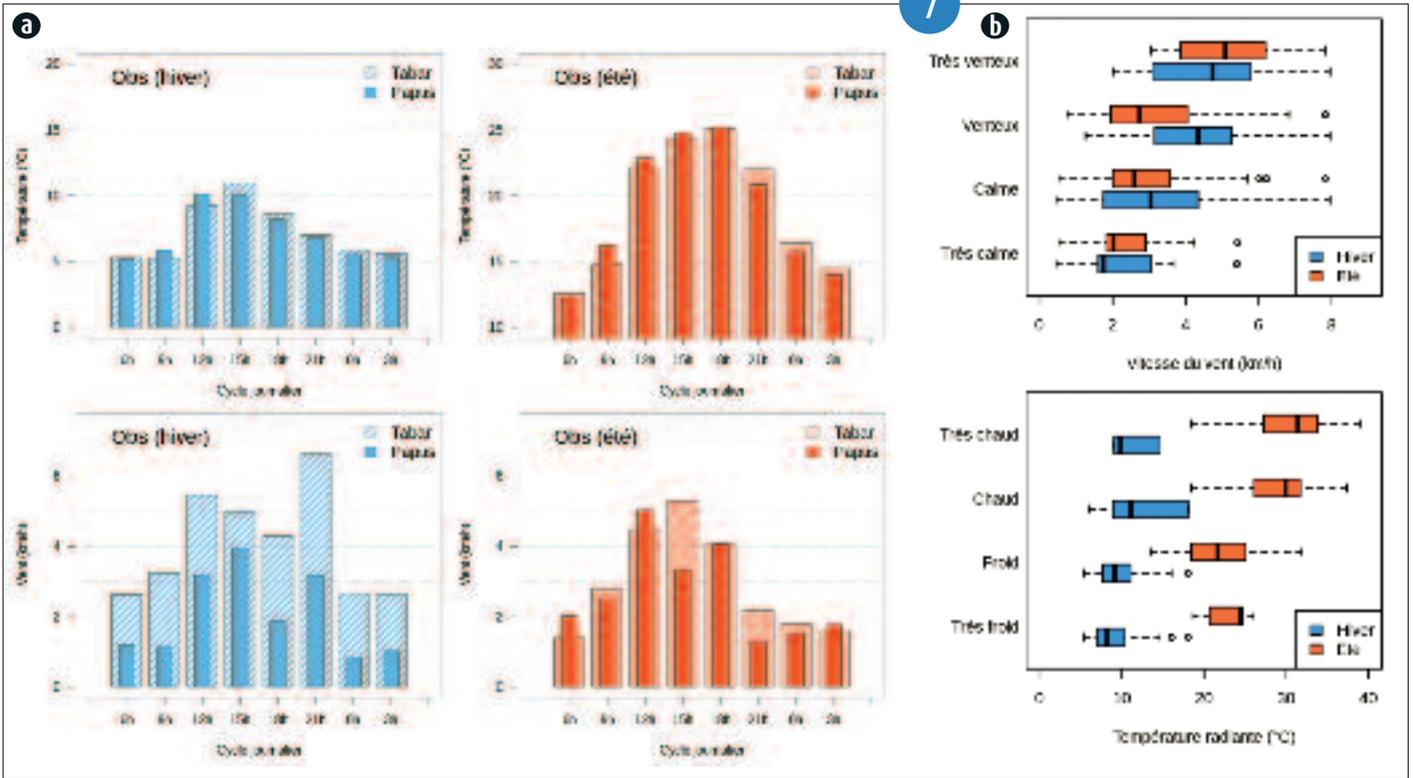
En utilisant les éruptions volcaniques comme un analogue d'IAS, une relation émerge entre le refroidissement à long terme dû à une diminution du rayonnement solaire incident en ciel clair (SWcs), et le refroidissement à court terme induit par la diminution du SWcs lors des éruptions volcaniques majeures du XX<sup>ème</sup> siècle (1850-2005). Cette relation explique 80% de la dispersion des modèles sur la réponse des températures continen-

tales en moyenne annuelle à la GRS-IAS, allant de 0.32 à 0.86 K par W.m<sup>-2</sup>. En s'appuyant sur des produits d'observations et de ré-analyses couvrant les éruptions volcaniques majeures, il est possible de contraindre cette réponse à 0.37 K par W.m<sup>-2</sup> en moyenne.

Cette approche devrait permettre d'étudier plus finement les impacts climatiques de la GRS-IAS, notamment les rétroactions sur les cycles du carbone et hydrologiques.

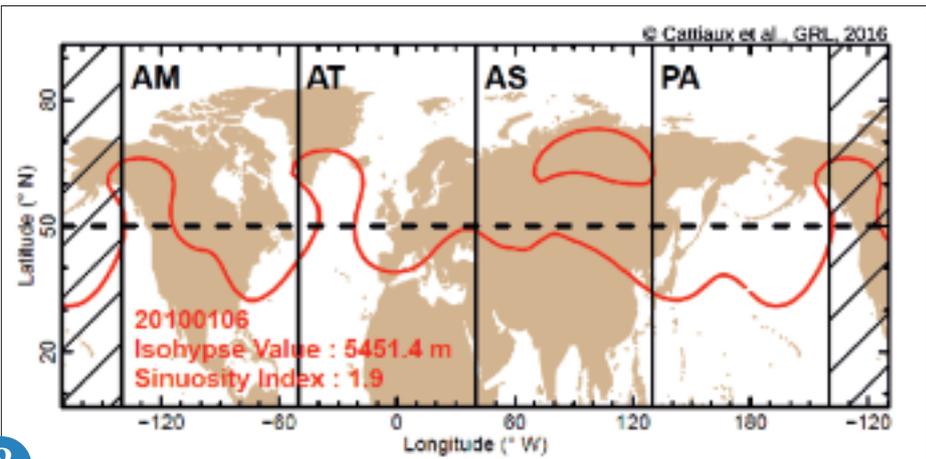
9

7



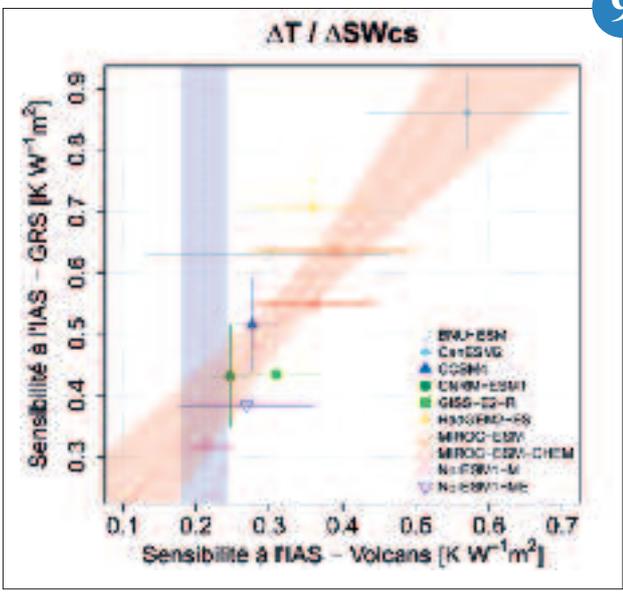
(a) : Comparaison des températures et vitesse de vent mesurées en hiver et en été en 2 points d'arrêt (Tabar et Papus) du quartier d'étude.  
 (b) : Comparaison (tous points confondus) entre l'évaluation du vent par les enquêtes et les vitesses de vent mesurées (en haut), et entre l'évaluation de la chaleur par les enquêtes et les températures radiantes mesurées (en bas).

8



Exemple de calcul de la sinuosité pour le 6 janvier 2010.  
 En rouge : isoligne de hauteur de géopotiel à 500 mb dont la valeur (5451.4 m) correspond à la moyenne du champ sur la bande latitudinale 30-70°N.  
 La sinuosité est définie comme le ratio entre la longueur de cette isoligne et la longueur de la « ligne droite » à latitude équivalente (50°N).  
 En l'occurrence, ce jour est caractérisé par une forte sinuosité (1.9) causée par deux dorsales en Amérique du Nord et Europe et un « cut-off » en Asie.

9



Réponse de la température continentale normalisée par la variation du rayonnement solaire descendant en ciel clair ( $\Delta T / \Delta SWcs$ ) à l'injection d'aérosols stratosphériques.  
 L'axe des abscisses représente l'amplitude de la métrique  $\Delta T / \Delta SWcs$  observée et simulée lors des éruptions volcaniques majeures sur la période 1850-2005.  
 L'axe des ordonnées indique l'amplitude de cette même métrique dans des simulations de gestion du rayonnement solaire effectuées dans le cadre de l'exercice CMIP5/GeoMIP.  
 Une régression linéaire à travers un ensemble de 10 modèles Systèmes Terres est représentée par un trait discontinu rouge, tandis que le trait discontinu bleu mentionne la contrainte observationnelle. Les intervalles de confiance à 95% sont représentés par les zones colorées rouges et bleues, et par des traits continus pour chaque modèle.

## Variabilité interannuelle de la langue d'eau froide Atlantique

Chaque année, les températures de l'océan Atlantique équatorial chutent de plus de 4°C au printemps et favorisent le développement de la mousson sur l'Afrique de l'Ouest. Ce refroidissement est plus ou moins important selon les années et conditionne en partie l'intensité de la mousson. Les mécanismes qui expliquent cette variabilité sont encore peu connus. Ceux-ci ont été étudiés grâce à l'analyse du bilan de chaleur de la couche superficielle océanique à l'aide du modèle d'océan NEMO sur la période 1982-2008.

Dans un premier temps, il a été montré que le modèle était capable de reproduire de façon réaliste les mécanismes qui expliquent le refroidissement saisonnier. Cette validation s'est appuyée sur une comparaison aux données des bouées PIRATA ainsi que sur différents produits d'analyse et de ré-analyse océanique.

Les refroidissements printaniers ont ensuite été classifiés afin d'isoler des années à refroidissement anormalement élevé ou faible. Cette classification a permis de faire une étude composite climatologique de ces événements.

L'étude des différents termes du bilan de chaleur a montré que ces événements étaient liés à une augmentation du mélange océanique généralement généré par des anomalies de vent dans l'ouest du bassin équatorial Atlantique. Les flux de chaleur océan-atmosphère quant à eux tendent à limiter les anomalies de température générées dynamiquement. Il existe cependant une certaine dissymétrie entre les événements anormalement froids et chauds, car les refroidissements les plus intenses s'estompent plus rapidement en fin d'été par advection d'eau relativement plus chaude, tandis que le refroidissement se prolonge plus longtemps lors des années à refroidissement moindre par advection froide.

10

## Tendances des storm-tracks sur le XX<sup>e</sup> siècle

Dans le cadre d'une thèse cofinancée par la société de réassurance SCOR et Météo-France, une analyse de la variabilité des tempêtes hivernales au cours du XX<sup>e</sup> siècle et sur l'hémisphère nord a été menée. Une méthode d'identification et de suivi des systèmes dépressionnaires développée au CNRM a été appliquée à la ré-analyse ERA 20C récemment livrée par le CEPMMT. Ce jeu de données révèle une importante variabilité multi-décennale avec une forte augmentation de la fréquence des tempêtes les plus fortes entre 1936 et 1980 tandis qu'au début du siècle et depuis 1980, la tendance globale est plutôt à la stagnation des tempêtes avec des disparités régionales importantes. Ce résultat a été confronté aux principaux modes de variabilité d'échelle planétaire dans le but d'en évaluer la robustesse. La période 1936-1980 se caractérise par une plus forte extension de la glace de mer arctique et un refroidissement des latitudes

polaires. Cela conduit à une augmentation des contrastes thermique nord-sud en équilibre avec une augmentation de l'intensité des jets d'ouest cohérente avec une augmentation de l'activité dépressionnaire. Les deux autres périodes, caractérisées par une diminution de l'extension de la glace de mer et un fort réchauffement des latitudes polaires, voient des réponses assez différentes de l'activité dépressionnaire notamment sur le bassin Atlantique. La période la plus récente voit notamment une diminution des dépressions au sud du rail des dépressions, c'est à dire sur le Nord-Ouest de l'Europe. Par conséquent ces résultats accréditent la variabilité multi-décennale des tempêtes obtenue à partir d'ERA20C.

11

## Développement de services climatiques pour l'énergie

Le projet COPERNICUS CLIM4ENERGY, conduit par le CEA, vise à fournir des services climatiques au secteur de l'énergie.

Parmi ces services, Météo-France développe, en étroite coopération avec le gestionnaire du réseau de distribution d'électricité français, RTE, un ensemble d'indicateurs de l'adéquation entre la demande et la production d'électricité.

Cet équilibre offre-demande est doublement tributaire des conditions météorologiques. D'une part, la production des énergies renouvelables intermittentes, solaires et éoliennes, est directement dépendante des conditions de vent et d'ensoleillement et d'autre part, la consommation électrique de certains pays européens, dont la France, connaît de très fortes anomalies positives en cas de pic de froid.

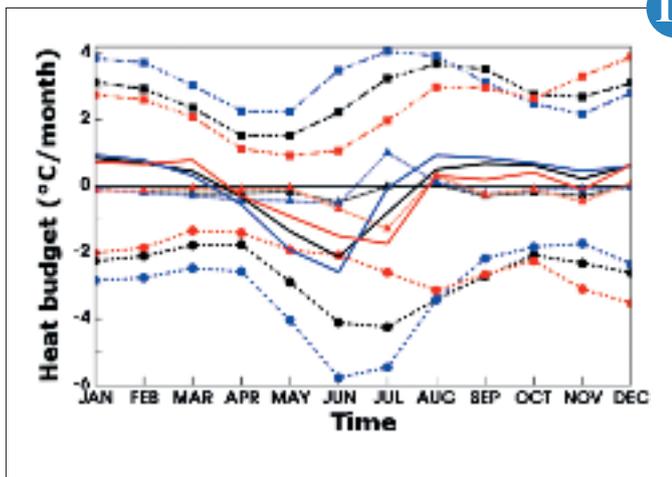
Pendant une phase de spécifications de six mois avec RTE, plusieurs indicateurs ont été testés et comparés à des observations. Au final, ces indicateurs doivent permettre d'évaluer la production d'électricité par les énergies renouvelables intermittentes (solaire et éolien) ainsi que les anomalies de

la consommation électrique relatives au contexte météorologique. Des régimes de temps quotidiens ont également été déterminés pour mieux identifier et anticiper les situations météorologiques défavorables à l'équilibre offre-demande.

Ces indicateurs sont en cours de calcul sur un ensemble de projections climatiques EURO-CORDEX débiaisées par l'IPSL, pour une trentaine de pays européens, afin d'évaluer leurs changements potentiels à des horizons proches, en 2030 et 2050 pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et 8.5). Ils seront également calculés et évalués en prévisions saisonnières.

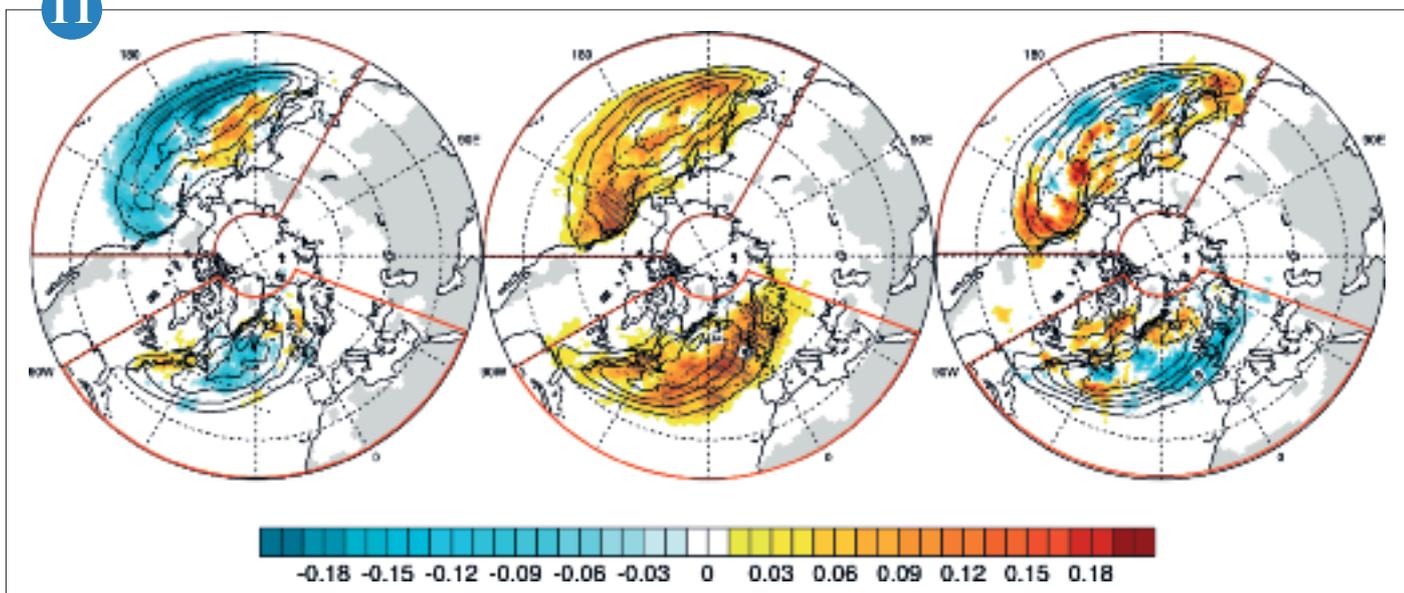
12

10



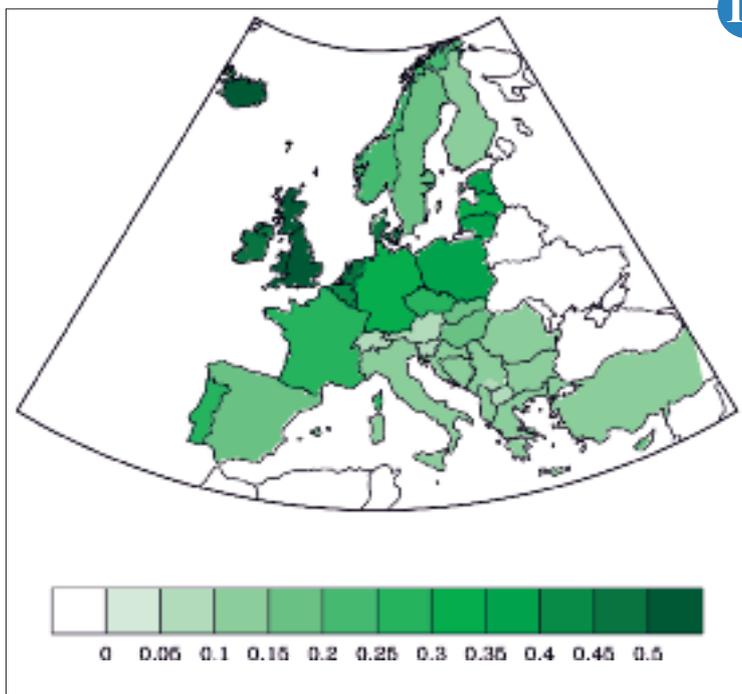
◀ Cycle saisonnier du bilan de chaleur de la couche de mélange océanique dans la région 15°W-6°W, 4°S-1°N. Les courbes en noir correspondent à la moyenne sur la période 1982-2008, en bleu à la composite des années à refroidissement plus intense (1983, 1992, 1997, 2004, 2005), en rouge à la composite des années à refroidissement moindre (1988, 1991, 1995, 1996, 1999). Les courbes en traits plein représentent les tendances de températures, les tirets avec points : la contribution du mélange vertical à cette tendance, les traits avec carrés : la contribution des flux de chaleur en surface, et les traits avec triangles : la contribution de l'advection horizontale.

11



▲ Densité (isolignes noires) des plus fortes dépressions et tendances au cours de la période considérée (en plages de couleurs). De gauche à droite : 1900-1936, 1936-1980 et 1980-2009.

12



◀ Facteur de charge éolien moyen en hiver - Moyenne de 10 modèles EuroCordex pour l'horizon temporel 2030..

## Prévision saisonnière

### Développement de produits multi-modèles pour les prévisions saisonnières

Dans le cadre du programme Copernicus Climate Change Service (C3S), Météo-France a été retenu par le Centre Européen (Opérateur C3S) pour contribuer au futur multi-modèle de prévision saisonnière européen à la fois pour fournir les données du modèle Arpège Climat mais aussi pour contribuer au développement de produits multi-modèles.

Le projet se déroule sur la période janvier 2016 à mars 2018 avec une phase de « Proof of Concept » en 2016 et de production pré-opérationnelle en 2017.

La contribution de Météo-France concerne quatre familles de produits ou services :

- l'évaluation des produits en lien avec les Services Météorologiques Nationaux dans le cadre du Centre Climatique Régional Europe ;
- la spécification de nouveaux produits, notamment sur l'analyse de grande échelle : régimes de temps et modes de variabilité (voir Figure) ;
- le développement de produits de post-traitement statistique : descentes d'échelle et adaptation statistique ;
- le développement de produits sur la probabilité d'occurrence des extrêmes : tempêtes, vagues de chaleur ou de froid.

Un premier travail sur le calcul des modes de variabilité (NAO, EA, Blocking, PNA) selon l'approche de Barnston et Livezey, a été réalisé à la fois sur le hindcast du modèle Arpège (période 1991-2014) et le forecast disponible depuis 2015. Des modes de représentation 2D originaux ont été proposés combinant plusieurs modes 2 à 2 (voir Figure).

Ces produits ont vocation à être utilisés dès 2017 à la fois tant en matière de suivi climatique que de diagnostic sur les prévisions saisonnières du trimestre à venir.

13

### Prise en compte des imperfections du modèle en prévision saisonnière

En prévision saisonnière, il est primordial de prendre en compte les incertitudes provenant des conditions initiales, mais aussi du modèle couplé (approximations numériques, paramétrisations des échelles non résolues). Dans le cadre du projet européen SPECS (2012-2016), le CNRM a étudié une famille de méthodes consistant à introduire des perturbations stochastiques dans le modèle couplé de prévision saisonnière, afin d'échantillonner les impacts possibles des imperfections du modèle sur les prévisions.

Des perturbations-corrrections de la dynamique de la composante atmosphérique ARPEGE, en retirant aux variables pronostiques du modèle des erreurs estimées sur des cas de prévisions passées, ont un effet bénéfique sur le biais du modèle sur les moyennes latitudes (Fig.), et dans une moindre mesure sur les performances du système. Ces perturbations permettent également de générer une dispersion d'ensemble en appliquant des corrections d'erreurs différentes à chaque membre de la prévision. Cette méthode appelée dynamique stochastique est désormais intégrée au système opérationnel de prévision saisonnière.

Une deuxième approche, la méthode SPPT développée au CEPMMT, perturbe les tendances liées aux paramétrisations physiques du modèle d'atmosphère à l'aide de coefficients multiplicatifs auto-corrélés dans l'espace et le temps. Elle permet d'augmenter la dispersion d'ensemble, mais a des effets contrastés en termes de scores selon les régions et variables d'intérêt.

Les efforts futurs porteront sur la combinaison de ces deux techniques dans le modèle ARPEGE, et l'étude de l'impact de perturbations similaires dans la composante océanique du système couplé de prévision.

14

### Les avancées du projet SPECS sur la prévisibilité saisonnière

Le projet européen SPECS qui vient de s'achever en octobre 2016 a réuni pendant quatre ans les principaux acteurs européens de la prévision saisonnière. Contrairement aux projets précédents comme DEMETER ou ENSEMBLES, il ne s'agissait pas de construire une base de données de prévisions s'appuyant sur un ensemble multi-modèles. Le but visé était l'amélioration des prévisions sur des bases scientifiques, et de leur potentiel utilitaire via un couplage avec un autre projet européen EUPORIAS.

Il existe de nombreuses façons d'améliorer une prévision numérique, notamment en complexifiant le modèle d'atmosphère de sol ou d'océan. Ici, afin de pouvoir confronter les résultats de modèles assez différents, nous nous sommes concentrés sur :

- l'état initial des surfaces continentales
- l'état initial de la banquise
- la résolution horizontale
- la prise en compte d'une stratosphère réaliste
- la prise en compte des erreurs du modèle

Les évaluations rétrospectives des prévisions montrent que si chaque développement listé ci-dessus mène à des améliorations de certains aspects de la prévision et des dégradations d'autres, le bilan est favorable à leur intégration au système. Le progrès le plus robuste provient de l'amélioration de l'initialisation de l'humidité du sol et de celle de la banquise en mai. La prise en compte simultanée de tous ces développements permet de tirer parti des améliorations et d'annuler les effets néfastes de chacun. Le nouveau système de prévision de Météo-France (Eurosip, système 5) opérationnel depuis juillet 2016 agrège toutes les modifications ci-dessus. La figure montre les scores de la prévision du phénomène ENSO pour le système 4 et le système 5.

15

## Expérimentation de service climatique pour la gestion saisonnière de la ressource en eau sur la Seine et la Garonne

Dans le cadre du projet Européen FP7/ EUPORIAS, Météo-France a développé un prototype de service climatique pour la gestion saisonnière de la ressource en eau (<http://riff.euporias.eu/fr>).

Ce service a été développé en lien étroit avec deux gestionnaires (Seine Grands Lacs et le Syndicat Mixte d'Etudes et d'Aménagement de la Garonne) ayant contribué à la définition des produits adaptés à leurs besoins et l'évaluation de leur plus value pour la décision opérationnelle : re-jeu de 29 années de décision avec Seine Grands Lacs en 2015).

En 2016, l'effort a porté sur la mise en place d'une expérimentation temps réel sur la base d'une chaîne de prévision saisonnière hydrologique sur la France métropolitaine intégrant le modèle hydrologique Surfex-Modcou forcé par le système de prévision saisonnière Arpège Système 5.

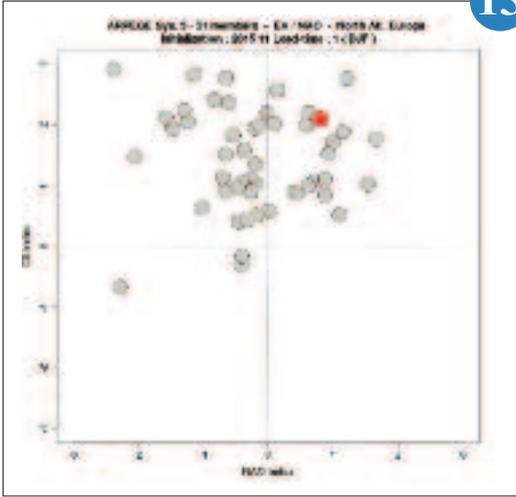
Cette chaîne temps réel a bénéficié aussi d'une évolution de l'outil de « débiaisage » à partir d'une approche quantile-quantile, tant en pré-traitement des données issues d'Arpège (utilisant la référence Safran pour les observations)

qu'en post traitement des débits (sur la base de chronique de débits naturalisés fournis par les gestionnaires).

Au final, des prévisions probabilistes de débit sur quatre stations (trois sur la Garonne et une sur le bassin de la Seine) ont été fournies sur l'initialisation du mois de mai pour la gestion stratégique de la ressource en eau pour l'été 2016 et accompagnées de prévisions basées sur les scénarios historiques.

16

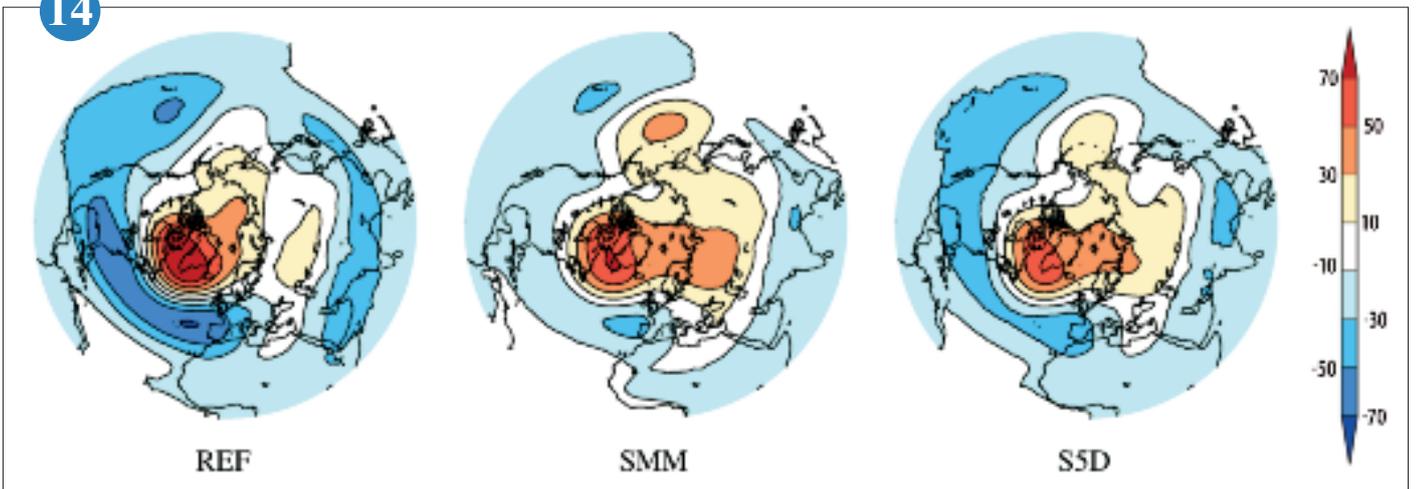
13



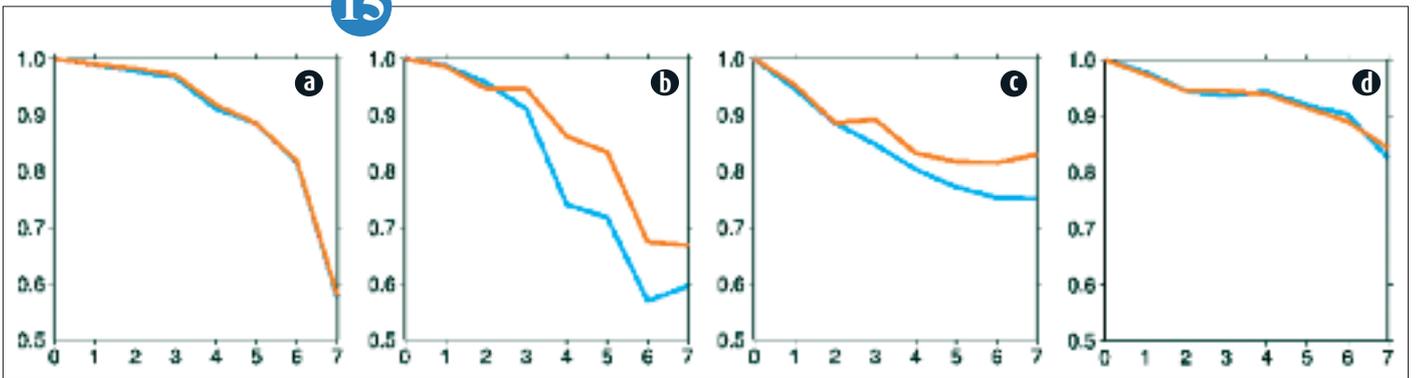
Représentation de la prévision pour le trimestre DJF des modes EA et NAO des 51 membres d'Arpège Syst 5 sur l'initialisation du 1<sup>er</sup> novembre 2015 (point gris) et l'observation (point rouge).

Biais moyen (m) du géopotential à 500 hPa en hiver (décembre à février) de trois jeux de prévisions saisonnières avec CNRM-CM initialisées en novembre 1979 à 2012 : REF (sans perturbations stochastiques), SMM (corrections-perturbations moyennes mensuelles) et S5D (séquences de cinq jours de corrections-perturbations). Les corrections sont estimées dans les autres années de la période des prévisions passées. La référence est ERA-Interim.

14

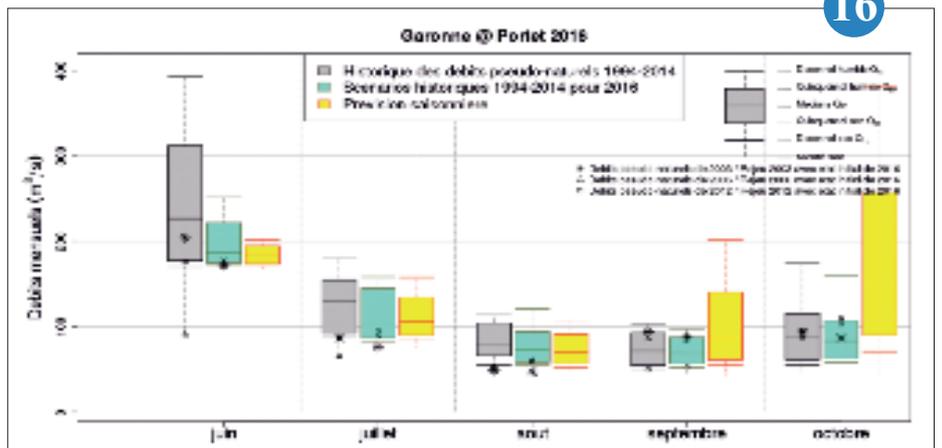


15



Corrélation de température mensuelle de surface de l'océan Pacifique équatorial central (zone Nino 3.4) en fonction de l'échéance (mois) pour des conditions de départ en novembre (a), février (b), mai (c) et août (d) ; ancien système de prévision de Météo-France (bleu), nouveau système (rouge).

16



Représentation probabiliste des prévisions saisonnières de débit à la station de Portet-sur-Garonne (31) pour l'été 2016 à partir de l'initialisation au 1<sup>er</sup> mai. En gris, la climatologie 1994-2014 ; en vert un re-jeu des scénarios historiques à partir de l'été initial de mai 2016 ; en jaune la prévision saisonnière.

# Composition atmosphérique : aérosols, microphysique et chimie

La compréhension et la modélisation de la composition atmosphérique en espèces chimiques et aérosols, mais aussi de ses interactions avec l'atmosphère est un enjeu important à plusieurs titres. Dans les basses couches de l'atmosphère, la composition atmosphérique elle-même, c'est-à-dire la qualité de l'air représente un enjeu sanitaire. D'un point de vue opérationnel, la présence d'aérosols dans l'atmosphère peut interférer avec le trafic aérien. Sur le plan de la météorologie et du climat, les aérosols réduisent le rayonnement solaire par effet d'écran, et certains d'entre eux sont aussi des noyaux de condensation et affectent les propriétés des nuages. L'ozone quant à lui a des effets contrastés : polluant des basses couches de l'atmosphère, il dégrade la qualité de l'air, tandis que dans la stratosphère il constitue une couche protectrice filtrant les rayonnements UV ; il participe à l'effet de serre lorsqu'il est présent dans la troposphère.

Côté observation, une grande campagne de mesures aériennes (utilisation de l'ATR-42 opéré par SAFIRE) centrée sur les mesures d'aérosols, de rayonnement et de nuages a été réalisée en Afrique de l'Ouest. Parallèlement, des tests ont montré que l'utilisation de drones instrumentés permet d'estimer les sources d'aérosols marins, qui sont encore mal représentées dans les modèles climatiques, météorologiques et de qualité de l'air. La modélisation des aérosols avec MOCAGE progresse en permanence grâce aux observations. Elle fournit une vision complète des processus en jeu (émissions, production et destruction par la chimie, dépôt et import-export) sur un domaine et une fenêtre temporelle donnés. Dans certaines situations, cette connaissance permet d'orienter des décisions portant sur le contrôle des émissions de polluants. Par ailleurs, l'introduction d'aérosols interactifs dans ARPEGE Climat a permis de produire cette année des climatologies globales d'aérosols à partir d'émissions pour le modèle de climat couplé global CNRM-CM6. Enfin, l'assimilation d'espèces chimiques dans MOCAGE progresse également. Cette année la valeur ajoutée de l'assimilation des mesures de la future plateforme Sentinel-5P a été mise en évidence pour le CO en ayant recours à des expériences de simulation de systèmes d'observation.

1

## Variations saisonnières des aérosols sur le bassin méditerranéen

Le bassin méditerranéen est une région avec des enjeux climatiques et sanitaires importants. Les aérosols jouent un rôle, tant du point de vue sanitaire avec des zones très polluées, que climatique avec un impact sur le rayonnement et les nuages. Il s'avère alors important de comprendre le cycle de vie des aérosols dans cette région.

MOCAGE est un modèle de chimie-transport, développé au CNRM, permettant de simuler les concentrations de différents gaz et aérosols. A l'aide de ce modèle, nous avons simulé l'année 2013 afin d'étudier le bilan des aérosols sur la région, sur le domaine présenté dans la figure (f). Nous avons montré que l'ensemble des

aérosols considérés ici sont exportés, parfois en quantité, comme 40 % des carbones suie. La figure montre, à la fréquence mensuelle, le bilan pour: les sels marins (a), les poussières désertiques (b), les carbones suie (c) et organiques (d), les aérosols inorganiques secondaires (e). Les différentes courbes sont les émissions ou la production chimique en vert, la somme des dépôts en bleu, la destruction chimique en rouge, le terme d'import/export en violet (négatif si export) et la charge en marron. On observe la forte saisonnalité des poussières désertiques avec une forte activité au printemps et en été. D'autres aérosols présentent un cycle annuel, comme les sels marins et les

carbones suie. Nous avons montré que l'anomalie en été pour les carbones organiques primaires, associée à de l'import, provient de l'arrivée d'une masse d'air fortement polluée par des feux de forêt en Amérique du Nord. Cette étude permet d'illustrer la palette de phénomènes liés aux aérosols que l'on retrouve autour du bassin méditerranéen et est une étape de la compréhension du cycle de vie des aérosols.

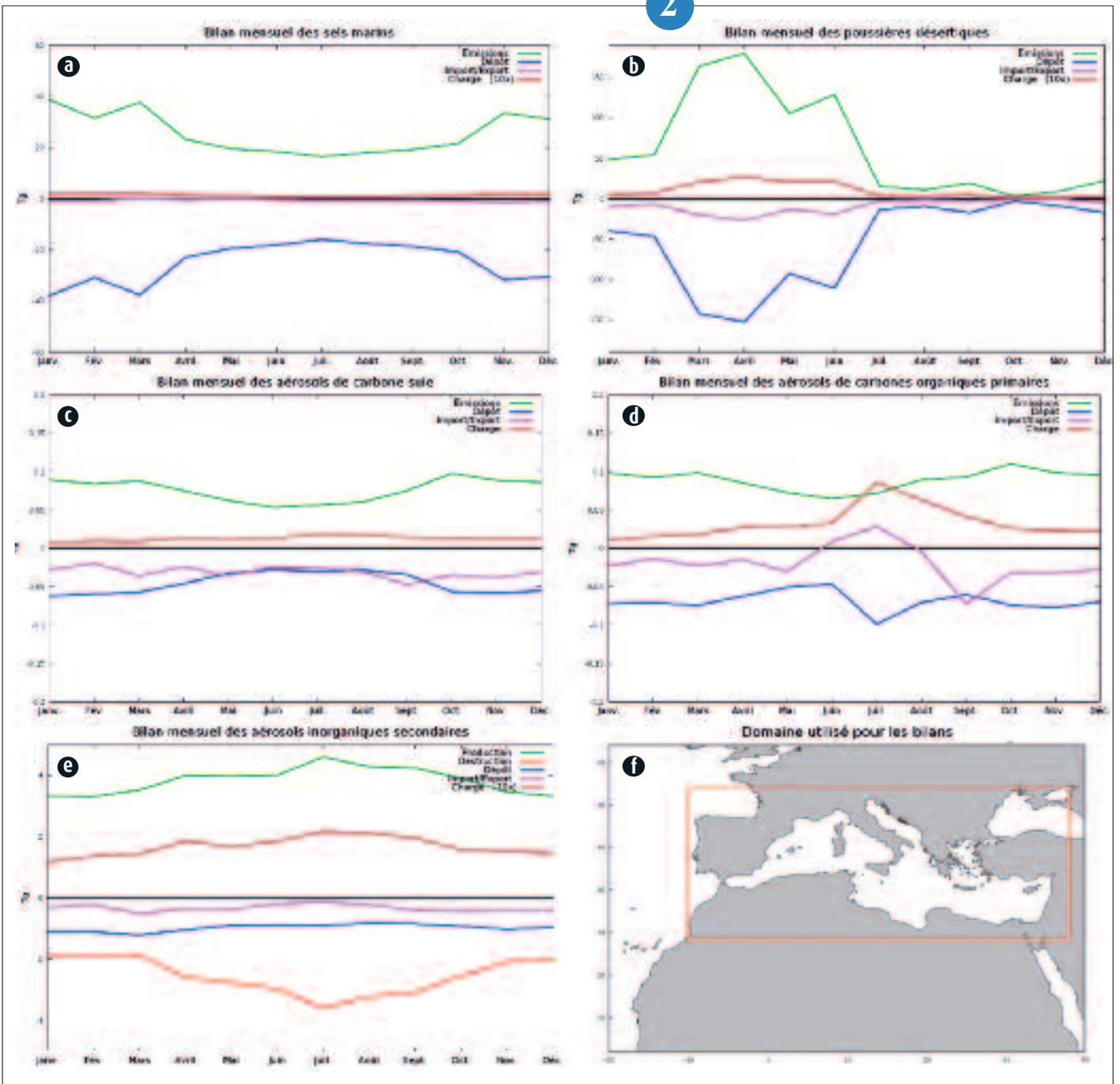
2



1

Épisode de poussières désertiques dans le sud de la France suite à une tempête au Sahara, photo prise à Montpellier le 23 février 2017. Crédit : Laurent Garcelon / Infoclimat

2



## La future plateforme spatiale Sentinel-5P permettra-t-elle de mesurer la pollution de l'air dans les basses couches ?

La capacité des instruments satellitaires pour la détection des polluants dans la basse troposphère s'est considérablement améliorée récemment, et a ouvert la voie à une surveillance et à une meilleure compréhension des processus de pollution atmosphérique. La future plateforme Sentinel-5P (S-5P) du programme Copernicus, en orbite défilante, a pour but de fournir des mesures quotidiennes globales d'espèces chimiques et d'aérosols, à une résolution spatiale relativement élevée (entre 8 km et 50 km).

Une méthode pour déterminer objectivement la valeur ajoutée des futures observations par satellite est celle des expériences de simulation de systèmes d'observation (OSSE) basées sur l'assimilation de données. Les observations par satellite sont simulées à partir d'un état de modèle le plus réaliste possible (nature run) en utilisant les caractéristiques de l'instrument spatial et sont assimilées dans un autre modèle (control run) afin d'évaluer les avantages obtenus dans l'analyse (assimilation run).

Nous nous intéressons ici au monoxyde de carbone (CO), dont la mesure reste particulièrement difficile à la surface. Le CO a une durée de vie assez longue pour donner une information sur les panaches de pollution transportés sur de longues distances. L'OSSE a été effectuée sur l'Europe pendant l'été 2003, particulièrement chaud et propice à l'accumulation de polluants dans la couche limite. Les résultats de l'OSSE effectuée avec le modèle MOCAGE, montrent que les mesures de S-5P apportent un bénéfice important dans la surveillance du CO à la surface. En général, le plus grand avantage est sur terre dans les régions éloignées de sources de CO. Des travaux sont en cours pour évaluer l'apport d'autres futures plateformes à la surveillance de la qualité de l'air.

3

## Pollution atmosphérique en Afrique de l'Ouest : mesure des propriétés physico-chimiques des aérosols pendant la campagne DACCIWA

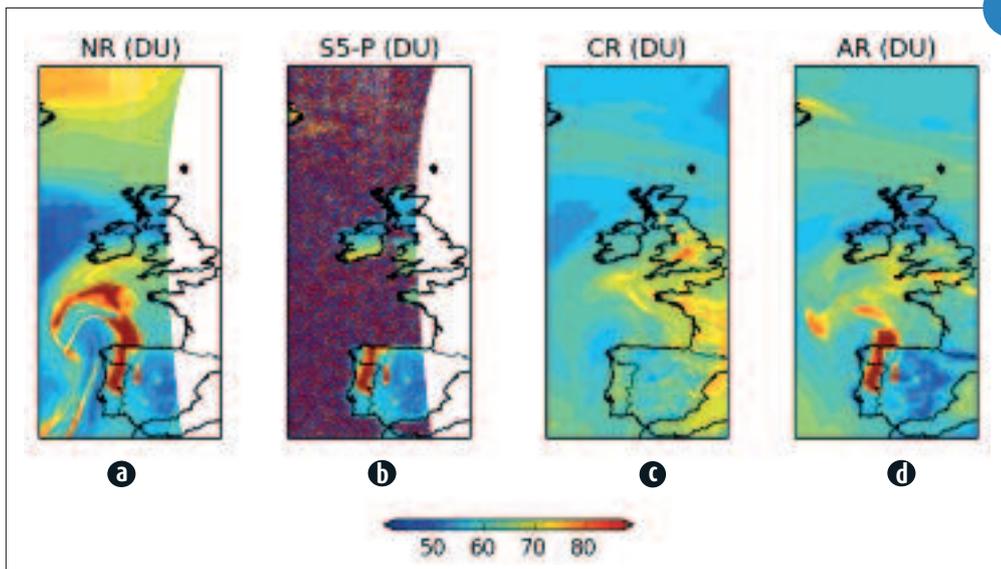
Dans le cadre du projet Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa (DACCIWA), une campagne de mesures sans précédent a été réalisée au cours de l'été 2016 en Afrique de l'Ouest. L'avion de recherche multi-instrumenté ATR-42 opéré par Safire a réalisé une vingtaine de vols pour suivre la pollution de l'air des ports et des grandes villes côtières (Abidjan, Accra, Lomé), ainsi que la pollution régionale liée aux feux de biomasse en provenance de l'hémisphère Sud ou aux poussières désertiques émises depuis les déserts du Sahara et du Soudan.

Le groupe GMEI du CNRM, et plus particulièrement son équipe MNPCA, a joué un rôle moteur dans ce programme en opérant la veine de prélèvement aérosols à bord de l'ATR-42 et en déployant un dispositif instrumental important : compteurs de particules et de noyaux de condensation nuageuses, analyseurs de la distribution granulométrique et de l'extinction des aérosols et un analyseur des propriétés physico-chimiques (concentration, distribution granulométrique, état de mélange) du carbone-suie. Les premiers résultats montrent des concentrations très élevées en carbone-suie non seulement dans les panaches urbains mais également dans les zones de fond (Figure a), liées prin-

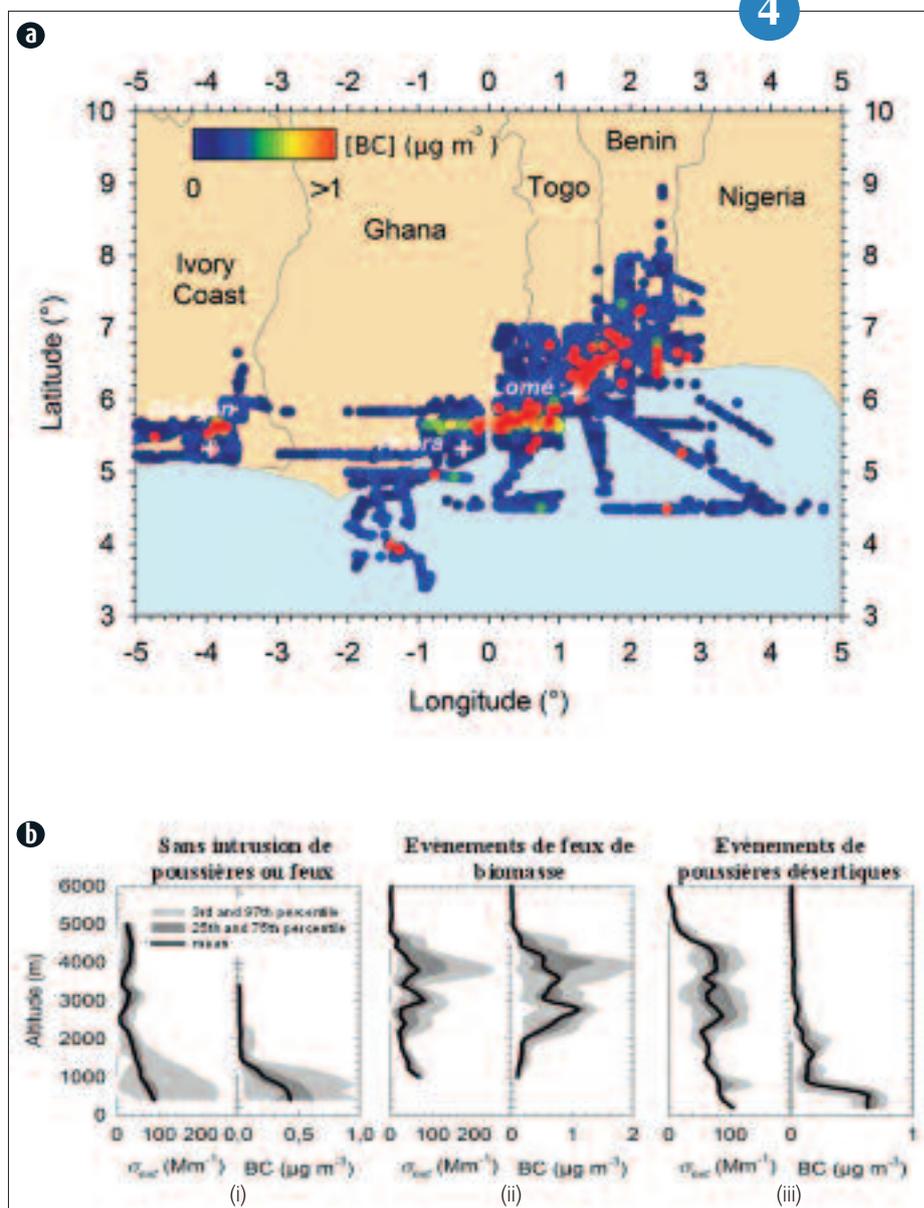
cipalement à la combustion permanente dans les décharges à ciel ouvert ainsi qu'à la circulation de vieux véhicules polluants. Les sondages effectués par l'ATR-42 ont également permis d'observer que les couches de feux de biomasse et de poussières désertiques étaient principalement localisées en altitude entre 1,5 et 6 km et associées à des extinctions importantes jusqu'à 250 Mm<sup>-1</sup> (Figure b).

L'exploitation de l'ensemble des mesures collectées pendant la campagne est en cours dans le but d'établir des paramétrisations décrivant les interactions entre aérosols, rayonnement et nuages afin d'améliorer la représentation des aérosols dans les modèles de climat et de qualité de l'air.

4



▲ Colonne totale de CO à 14:15 TU le 4 Août 2003 en DU, pendant un feu de forêt au Portugal.  
 a : Nature Run ; b : Les observations S-5P simulées ;  
 c : Control Run ; d : Assimilation Run.  
 Les couleurs rouge/bleue indiquent les valeurs fortes/faibles de colonne totale de CO.  
 Source : Abida et al, 2016.



► a : Répartition spatiale de la concentration massique en carbone-suie mesurée avec le SP2 à bord de l'ATR-42 pendant DACCIWA.  
 b : Distributions verticales du coefficient d'extinction (gauche) et de la concentration en carbone-suie (droite) en l'absence d'intrusion de feu ou de poussière (i), en présence de feux de biomasse provenant de l'hémisphère sud (ii) et en présence de couches de poussières désertiques transportées depuis les déserts du Soudan ou du Sahara (iii). Les traits pleins indiquent la moyenne observée pendant la campagne et les aires grisées les statistiques sur les cas mesurés.

---

## Mesure des flux d'aérosols et d'énergie au-dessus des océans par un drone à grand rayon d'action : le projet MIRIAD

Le Centre national de recherches météorologiques de Météo-France est porteur d'un nouveau projet d'étude de l'atmosphère à basse altitude, à l'aide de drones instrumentés : MIRIAD (Système de Mesures scientifiques de flux de surface en milieu maritime embarqué sur Drone). Il est mené en partenariat avec le Laboratoire d'Aérodologie de l'Observatoire Midi-Pyrénées et la société toulousaine AJS\* (société privée basée dans la région toulousaine et membre du pôle Aerospace Valley, spécialisée dans le développement et la construction de systèmes de drones à grandes capacités), et est soutenu par la région Occitanie et l'Union Européenne.

L'océan est l'une des régions clé pour les mesures de flux d'énergie et d'aérosols afin d'améliorer les modèles climatiques. En particulier, nombre d'études scientifiques montrent que pour évaluer l'effet climatique des aérosols sur la Terre, les sources et les puits des aérosols marins doivent être correctement paramétrés [e.g. Pierce et Adams, 2006, Pringle et al. 2010]. L'importance relative des sources locales d'aérosols à la surface de la mer (i.e., déferlement de vagues, couverture moutonneuse) demeurent des questions importantes non résolues.

Pourtant, malgré le rôle prépondérant des flux de surface rappelé ci-dessus, déployer des instruments de mesure à proximité de la surface marine à quelques mètres près dans les zones d'intérêt est techniquement très difficile, avec pour conséquence le fait que les mécanismes de ces flux demeurent très mal connus à

l'heure actuelle. En effet, les mesures à partir d'instruments fixés sur les navires scientifiques sont perturbées par les interactions entre la structure de ces derniers et la physique ambiante (i.e., perturbations aérodynamiques et thermodynamiques). De plus, les navires, en raison de leur faible vitesse de progression à l'échelle d'une zone d'intérêt de plusieurs centaines de kilomètres, ne permettent pas d'échantillonner de manière satisfaisante les phénomènes liés aux flux de surface qui se déroulent à l'échelle régionale.

Ainsi, les drones scientifiques à grande endurance apportent une réponse à la problématique posée. Les drones Boréal mis au point par AJS sont des appareils de 4 m d'envergure qui peuvent voler pendant 10 heures, parcourir 1 000 km et embarquer 5 kg d'instrumentation. Dotés de radars altimétriques, ils pourront réaliser des vols autonomes à très basse altitude au-dessus de la mer (jusqu'à 10 m dans des conditions favorables) pour caractériser les échanges dans cette zone d'interface jusqu'à présent inaccessible aux mesures.

Afin d'atteindre les objectifs scientifiques, la réalisation du projet dépend des expertises de chaque partenaire – c.à.d. le développement de la charge utile scientifique qui mesure les flux énergétiques et aérosols (responsabilité du Laboratoire Aérodologie et du CNRM) ainsi que la capacité d'adapter le système embarqué d'un drone pour des vols à très basse altitude (quelques mètres au-dessus de la surface, AJS). En 2016, ces radars altimétriques ont été intégrés et testés avec succès le long des côtes

Aquitaine, à Monthalivet. Les radars altimétriques ont réussi à mesurer l'état de la surface de la mer, ce qui constitue un des paramètres clés dans les calculs de flux d'aérosol marins. Une seconde campagne d'essais a eu lieu fin 2016 avec les capteurs d'aérosols : elle a mis en évidence un fort gradient lié à la production des aérosols dans les dix premiers mètres au-dessus de la zone côtière. Ce système drone, équipé avec des capteurs scientifiques, permettra l'acquisition de données indispensables à la compréhension des phénomènes énergétiques de surface pour alimenter les modèles climatiques et météorologiques. A l'issue du projet fin 2018, Météo-France mettra en œuvre ce type de drone par l'intermédiaire de l'unité mixte de service SAFIRE

5



a



b

▲  
a : Drone Boréal développé par la société AJS, en vol.  
Copyright "© AJS"

◀  
b : Livraison du drone Boréal au CNRM.  
Copyright "© Christophe Ciais - Météo France"

c : Équipe du projet MIRIAD.  
De gauche à droite : Fabien Pollina (AJS), Marc Pollina (AJS),  
Greg Roberts (CNRM/GMEI/MNPCHA), Sébastien Barrau (CNRM/GMEI), Michel Gavart (AJS),  
Frédéric Murguet (CNRM/GMEI/MNPCHA).  
Copyright "© Christophe Ciais - Météo France"



c

# Neige et hydrologie des surfaces continentales

Météo-France conduit des recherches concernant l'ensemble des compartiments du système terrestre de surface, parmi lesquels les surfaces continentales jouent un rôle majeur du point de vue météorologique, climatique, et des impacts. Les divers états de l'eau en surface (eau liquide, neige, glace) doivent être appréhendés de façon globale, l'ensemble des processus étant liés. De ce fait, les actions de Météo-France en matière de nivologie, qui rassemble l'ensemble des activités concernant les caractéristiques du manteau neigeux en terrain de montagne (notamment le risque d'avalanches), et d'hydrologie des surfaces continentales, sont transverses à l'ensemble des métiers de l'établissement. Connaissances académiques au sujet des processus mis en jeu, observation en surface et par satellite, traitement de l'information, modélisation numérique à plusieurs échelles de temps et d'espace, sont nécessaires pour appréhender le comportement du manteau neigeux et des autres stocks hydriques de surface et en prévoir les évolutions. Les activités de recherche dans ces domaines abordent naturellement l'ensemble de ces domaines, le plus souvent de façons imbriquées, notamment analyses conjointes associant modélisation et observations pour faire fructifier leurs apports mutuels.

Les principaux travaux de recherche en nivologie et hydrologie des surfaces continentales permettent de faire progresser les connaissances au sujet des processus à l'œuvre au sein du manteau neigeux, du sol et de la végétation, qui gouvernent les transformations incessantes de la neige entre la chute et la fonte de la neige au sol, son comportement mécanique, et les processus physiques à l'œuvre dans le sol et la végétation. Les travaux de modélisation, qui bénéficient de ces avancées, ont, ces dernières années, vu plusieurs développements visant à accroître la résolution spatiale d'application des modèles, mieux représenter le relief (e.g. passage SIM – SIM2), mieux caractériser l'incertitude de mesure, améliorer les liens qui peuvent être établis entre les prévisions des modèles et les observations par satellite, et préparer ainsi le développement des futures chaînes de modélisation à haute résolution spatiale, ensemblistes et assimilant des observations satellitaires.

L'année 2016 a également vu l'achèvement du projet d'inter-comparaison de méthodes de mesure de la précipitation neigeuse et de la hauteur et quantité de neige au sol (projet SPICE, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale). Ces dernières sont particulièrement difficiles, notamment en montagne et en sites ventés. Les équipes de recherche de Météo-France en matière de nivologie a contribué à cet effort international, en collaboration avec la communauté de recherche grenobloise. Ceci s'est traduit par une grande quantité de mesures au site expérimental du Col de Porte (Alpes du Nord), et une contribution à l'analyse des résultats et au rapport final. Ce dernier aura vocation de guider les stratégies d'implémentation de capteurs de mesure automatiques tant pour les activités opérationnelles de mesure (pour la prévision et le suivi climatique) que pour les actions de recherche qui doivent toutes deux nécessairement s'appuyer sur des méthodes de mesure fiables et éprouvées.

1

## Précipitations surfondues et formation de couche de glace à la surface du manteau neigeux dans les Pyrénées

Les précipitations verglaçantes sont constituées de gouttes d'eau surfondues qui gèlent au contact d'un objet. Ce phénomène, à l'origine du verglas sur les routes en plaine, est parfois observé en montagne où il peut conduire à la formation d'une couche de glace vive en surface du manteau neigeux. Il se produit à une fréquence au moins annuelle dans les Pyrénées, et rend la progression en montagne dangereuse (9 décès accidentels en Janvier 2012).

Des recherches récentes ont eu pour objectif de déterminer l'apport du modèle de Prévision Numérique du Temps AROME pour la prévision de tels événements dans les Pyrénées. Un diagnostic est proposé, combinant la concentration en eau liquide nageuse et la température près de la surface simulées par AROME. Il a été appliqué aux prévisions quotidiennes d'AROME pendant

cinq hivers successifs, de 2010 à 2015, puis comparé aux événements rapportés sur les sites web communautaires de ski de randonnée. Cette expérience s'avère concluante avec 71% à 75% de détections, et 16% à 32% de fausses alarmes. En se concentrant sur l'épisode de Janvier 2012, l'analyse montre que cette méthode permet une localisation concordante avec les observations.

En outre, la formation de glace en surface de la neige peut être simulée à l'aide du modèle détaillé de manteau neigeux Crocus, alimenté par les champs météorologiques d'AROME modifiés selon le diagnostic. Pour ce faire a été introduite dans Crocus une modélisation de la formation de glace vive induite par la solidification de l'eau surfonduée au contact de la neige. Le modèle est ainsi capable de reproduire la formation et l'évolution des couches de glace au cours de l'hiver (Fig.).

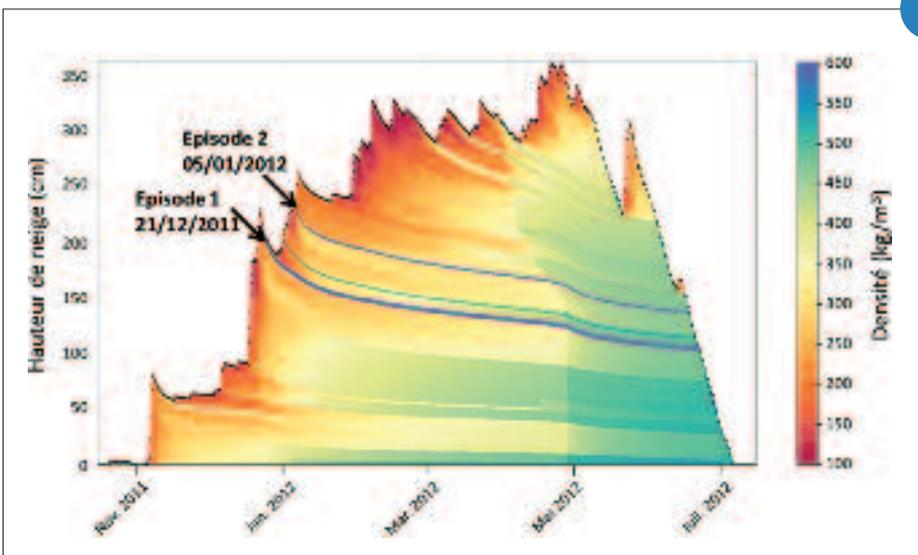
Au-delà de la prévention des accidents dus à la couche de glace en surface, sa prise en compte est utile pour la prévision d'avalanche, car sa présence souvent persistante peut influencer la stabilité du manteau neigeux pendant plusieurs semaines après le dépôt.

2



1

Aperçu du parc instrumental du site expérimental du Col de Porte, incluant les capteurs déployés dans le cadre du projet OMM-SPICE.



2

Évolution de la densité du manteau neigeux au cours de l'hiver 2011/2012, en un point à 2370 m dans le massif de Haute-Bigorre (Pyrénées), simulée par Crocus, alimenté par les prévisions AROME incluant le diagnostic de précipitations surfondues. Les deux couches de glace observées durant la saison (21 décembre et 5 janvier) sont bien reproduites (flèches) et correspondent à des couches de densité particulièrement élevée.

## Détection des dépôts d'avalanches par imagerie SAR haute résolution de Sentinel-1

La télédétection satellitaire des dépôts avalanches en zones de montagne est un thème scientifique en plein essor et représente un enjeu de taille. La localisation des dépôts avalanches et l'estimation de leurs tailles sont d'une grande importance pour les études sur la stabilité du manteau neigeux afin d'évaluer et d'améliorer les modèles physiques de prévision du risque d'avalanche. Disposer d'une série homogène, dans le temps et dans l'espace, des événements avalanches pourrait également se révéler extrêmement utile pour étudier la variabilité de l'activité avalancheuse naturelle en lien avec le changement climatique. A plus court terme, disposer de telles informations permettrait de mieux identifier les zones et les périodes à risque avalancheux. De plus, des cartographies satellitaires des dépôts avalancheux compléteront les bases de données existantes basées principalement des constats visuelles sur le territoire, comme la base de données EPA (Enquête Permanente sur les Avalanches), SSA (Sites Sensibles Avalanche) et la base de données CLPA (Carte de Localisation des Phénomènes Avalanche). Avec l'avènement des satellites Sentinel-1, nous disposons désormais d'observations pertinentes pour observer l'évolution du manteau neigeux avec une résolution spatio-temporelle compatible avec la télédétection des dépôts avalancheux. Les satellites Sentinel-1A et Sentinel-1B observent les massifs français à

l'aide d'un Radar à Synthèse d'ouverture (SAR) en bande-C avec une résolution spatiale de 20m et une répétitivité de 6 jours. La méthode de détection des dépôts avalancheux que nous avons développée est basée sur l'examen des différences de coefficients de rétrodiffusion SAR avant et après l'épisode avalancheux, combinées à l'usage d'une image de référence sol sans neige. La détection s'opère suite à des changements importants des coefficients de rétrodiffusion dus à des changements des propriétés de la neige à l'endroit de l'avalanche (hauteur, densité, rugosité, ...), le voisinage autour de l'avalanche restant presque inchangé (du point de vue de l'état de la neige). L'algorithme de détection développé a été testé avec succès sur les massifs alpins et pyrénéens (voir la figure jointe avec une cartographie de dépôts d'avalanches près d'Aragouet dans les Pyrénées en mars 2015) et possède un fort potentiel d'automatisation ce qui ouvre la voie pour une implémentation opérationnelle et pour la constitution d'une base de données cartographique des dépôts avalancheux depuis l'hiver 2014-2015. La constitution d'une telle base serait un atout considérable pour permettre un retour d'expériences sur les événements de vigilance rouge/orange, et plus globalement pour évaluer les situations du passé.

3

## CellDyM : une cellule cryogénique fonctionnant à température ambiante pour le suivi dynamique des métamorphoses de neige par micro-tomographie X

Une fois déposée au sol, la neige forme un milieu poreux complexe principalement constitué d'air et de glace et dont la microstructure est en constante évolution sous l'effet des conditions imposées par son environnement. Ces transformations de la neige, connues sous le nom de métamorphoses, impactent fortement l'évolution temporelle de ses propriétés physiques et doivent être prises en compte pour une modélisation adéquate du manteau neigeux.

Afin de mieux comprendre la physique en jeu dans les métamorphoses, nous avons mis au point des approches consistant à suivre l'évolution de la microstructure de la neige en trois dimensions (3D) puis à comparer ces évolutions morphologiques à celles obtenues par simulation. Sur le plan expérimental, nous avons ainsi développé une cellule cryogénique permettant de maintenir précisément les températures aux bornes d'un échantillon lors de sa tomographie par rayons X, une technique non-destructive adaptée à l'imagerie 3D des matériaux.

4

## Apport de l'assimilation des réflectances optiques pour la simulation du manteau neigeux

Le manteau neigeux en zone de montagne se caractérise par une importante variabilité spatiale et temporelle. Les mesures ponctuelles sont insuffisantes pour décrire cette variabilité, ce que permettent les images satellites. Comme la modélisation actuelle du manteau neigeux ne prend pas en compte d'observation du manteau neigeux en cours de saison hivernale, une erreur ponctuelle de simulation peut avoir des effets pendant l'ensemble de la saison, du fait de la mémoire du manteau neigeux. L'assimilation de données satellitaires dans les simulations du manteau neigeux peut permettre de « corriger » les simulations du manteau neigeux en cours de saison tout en préservant la variabilité spatiale de celui-ci. La source première d'incertitude dans les simulations des manteaux neigeux est associée aux incertitudes des forçages météorologiques. Des simulations d'ensemble prenant en compte les incertitudes associées à chacune de ses variables météorologiques permettent de les caractériser. L'utilisation d'un filtre particulaire permet de sélectionner les membres de l'ensemble correspondant le mieux aux observations satellitaires et ainsi de « corriger » la simulation du manteau neigeux au cours d'une saison.

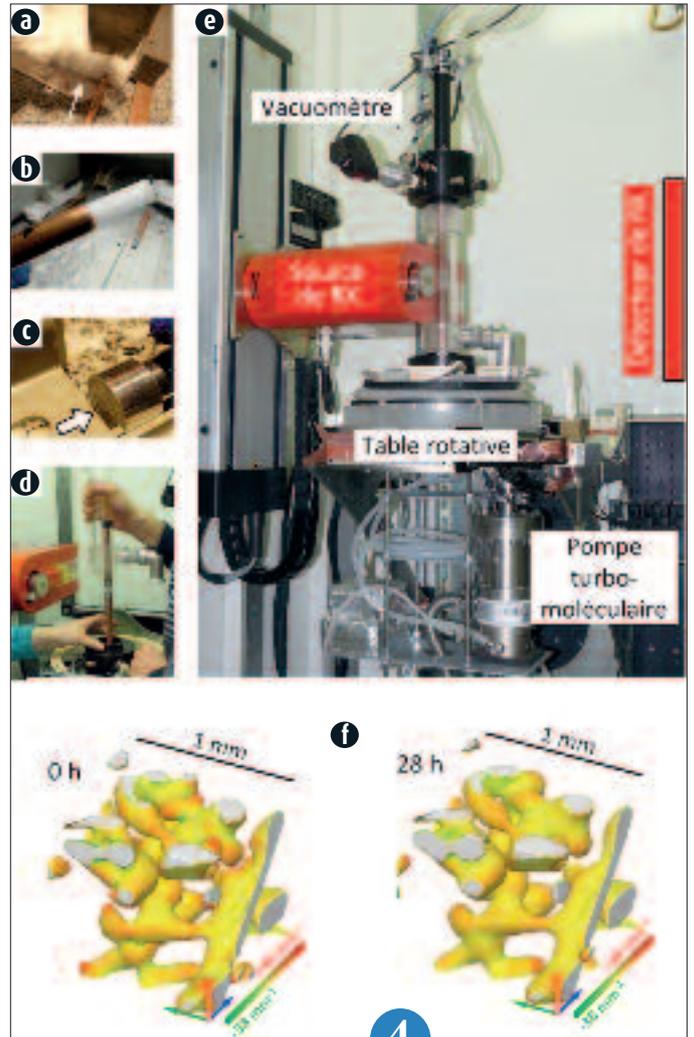
La nature des observations à assimiler est essentielle. Une étude récente a montré que l'assimilation de réflectances optiques (visible et proche-infrarouge) issues d'imagers multi-spectraux tel que MODIS (MODerate resolution Imaging Spectrometer) permettait d'améliorer très significativement en un point les simulations du manteau neigeux en termes de quantité et de hauteur de neige (Figure) du modèle de manteau neigeux Crocus. Ces données de réflectances ont l'avantage d'être disponibles quotidiennement en l'absence de nuages, à une résolution spatiale de quelques centaines de mètres, adaptée aux zones de montagne. En s'appuyant sur cette étude pionnière, l'impact de l'assimilation doit être maintenant étudié à l'échelle d'un massif montagneux.

5

3



▶ Dépôts d'avalanches, en vert, identifiées avec deux images SAR Sentinel-1 du 22/02/2015 et du 06/03/2015 superposées aux couleurs suivis par l'Enquête Permanente des Avalanches dans le secteur d'Aragnouet dans les Pyrénées.

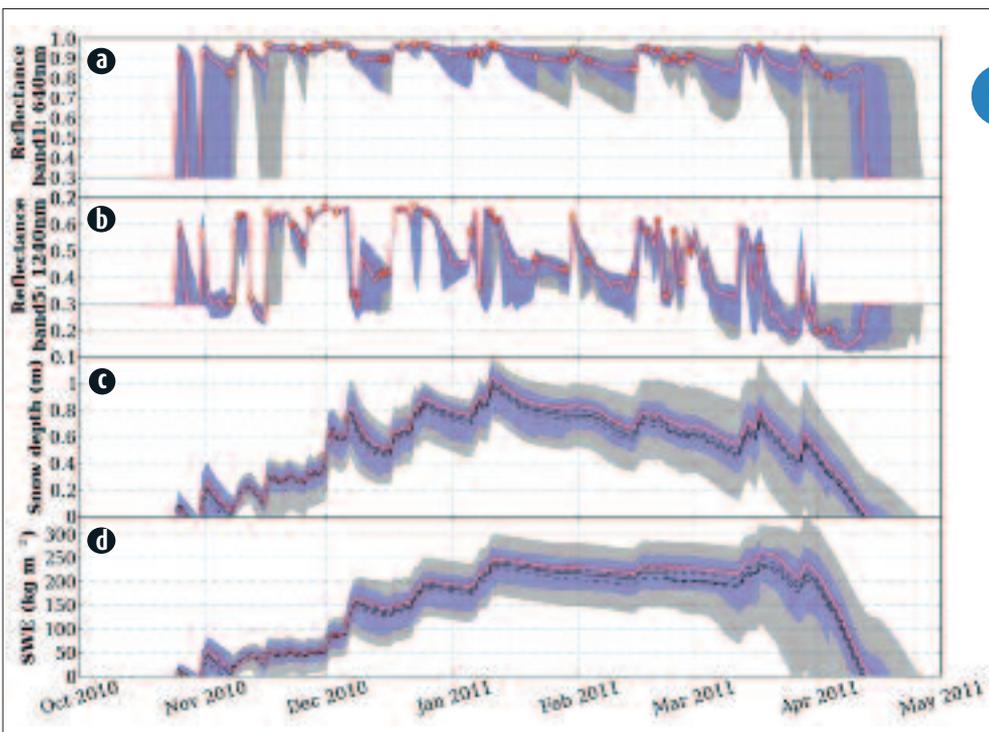


▶ Dispositif expérimental (à gauche) et résultats obtenus pour une métamorphose d'isothermie (à droite) :

- (a) Prélèvement d'un échantillon cylindrique dans une couche de neige ;
- (b-c) Insertion du cylindre obtenu dans son porte-échantillon en aluminium ;
- (d) Installation de l'échantillon dans la cellule cryogénique CellDyM ;
- (e) Vue d'ensemble de la cellule installée dans la cabine de tomographie du laboratoire 3SR (RX-solutions).
- (f) Résultats obtenus pour un sous-volume au cours d'une métamorphose de 28 h à -7°C.

Le code couleur représente la courbure moyenne : les convexités, zones planes et concavités sont respectivement représentées en rouge, jaune et vert. On remarque que, comme dans tout phénomène de frittage, les fortes convexités disparaissent au profit des concavités, générant un arrondissement de la microstructure. Les détails les plus précis de l'image mesurent 7.8  $\mu\text{m}$ .

4



5

▶ Évolution des simulations d'ensemble du manteau neigeux pour la saison 2010/2011 : (a) et (b) réflectances à 640 et 1240 nm (MODIS bandes 1 et 5, respectivement), (c) hauteur de neige et (d) équivalent en eau du manteau neigeux. Les enveloppes bleues représentent l'ensemble avec assimilation de réflectances MODIS simulées, et l'enveloppe grise correspond à l'ensemble sans assimilation. Les lignes rouges représentent la simulation de contrôle (d'où sont extraites les simulations). Sur les graphiques (a) et (b), les points rouges représentent les observations assimilées. Sur les graphiques (c) et (d), la ligne noire continue correspond au quantile 50 % (médiane de l'ensemble), et les lignes pointillées, aux quantiles 33 et 67 % de l'ensemble avec assimilation.

## Évolution du modèle hydrométéorologique SIM vers SIM2

Le modèle hydrométéorologique SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) est utilisé à la DCSC pour la production opérationnelle depuis 2004. Récemment, plusieurs améliorations ont été développées au CNRM. La modélisation physique du sol a évolué, passant d'une discrétisation du sol en 3 couches avec modélisation « Force-restaure », à une version « diffusion » comprenant 14 couches de sol. De plus, pour pallier le manque de représentation du relief sous-maille, une chaîne « montagne » a été développée, permettant de prendre en compte dans les zones de montagne plusieurs tranches d'altitude. Enfin, c'est le code SURFEX (contenant le cœur de modèle ISBA) qui est maintenant utilisé.

Toutes ces améliorations ont été intégrées dans la nouvelle version opérationnelle SIM2, la bascule vers SIM2 pour la production ayant eu lieu fin septembre 2016. La chaîne SIM2 a bénéficié d'une première validation scientifique par le CNRM lors de son développement. Ce travail a été complété à la DCSC par une seconde validation et par une description de l'impact de l'évolution du modèle sur l'ensemble de la production basée sur cet outil. En effet, le changement de modélisation et la chaîne montagne induisent des modifications dans les valeurs des paramètres usuellement utilisés pour la production, en particulier le SWI, et un document recensant toutes les évolutions des produits a été mis à disposition des utilisateurs.

La bascule vers SIM2 se prolonge sur 2017 pour les partenaires de Météo-France (en particulier le SCHAPI) et également pour les applications basées sur SIM et les projets de recherche : prévision d'ensemble et prévision saisonnière hydrologique, projet AQUI-FR notamment.

6

## Fusion d'observations satellitaires et de modèles pour le suivi du cycle hydrologique terrestre

La description des processus de surface par les modèles peut être améliorée par l'intégration dynamique d'observations. Celles issues de la télédétection spatiale ont l'avantage d'être disponibles à l'échelle globale, de manière répétée dans le temps. De nombreuses observations, en lien avec le cycle hydrologique et la végétation sont ou vont être disponibles avec des résolutions spatiales/temporelles de plus en plus fines. L'assimilation de données permet d'intégrer ces observations dans les modèles de manière cohérente avec leur représentation des processus de surface. Le couplage de ces systèmes avec des modèles hydrologiques permet un suivi plus précis du cycle terrestre de l'eau.

Un système d'assimilation a été mis en place dans la plate-forme de modélisation SURFEX. Il permet l'assimilation d'observations satellitaires d'indice de surface foliaire (LAI) et d'humidité superficielle du sol. L'impact de l'assimilation est répercuté sur les variables du cycle terrestre de l'eau (e.g. débit des rivières)

via un couplage interactif avec un modèle hydrologique (CTRIP). La figure ci-après représente l'impact de l'assimilation sur le LAI sur la région Euro-Méditerranée. L'analyse, après assimilation, est plus proche des observations. Une étude d'impact sur la représentation du débit des rivières dans CTRIP, effectuée sur la période (1990-2010) à l'aide de plus de 100 stations de mesures, indique une amélioration après assimilation. L'interprétation de l'évaluation est cependant délicate en raison de l'absence de représentation dans SURFEX de processus liés aux activités humaines (comme les pratiques agricoles, présence de barrages de réservoirs). Une prochaine étape dans le réalisme de SURFEX concerne l'irrigation.

7

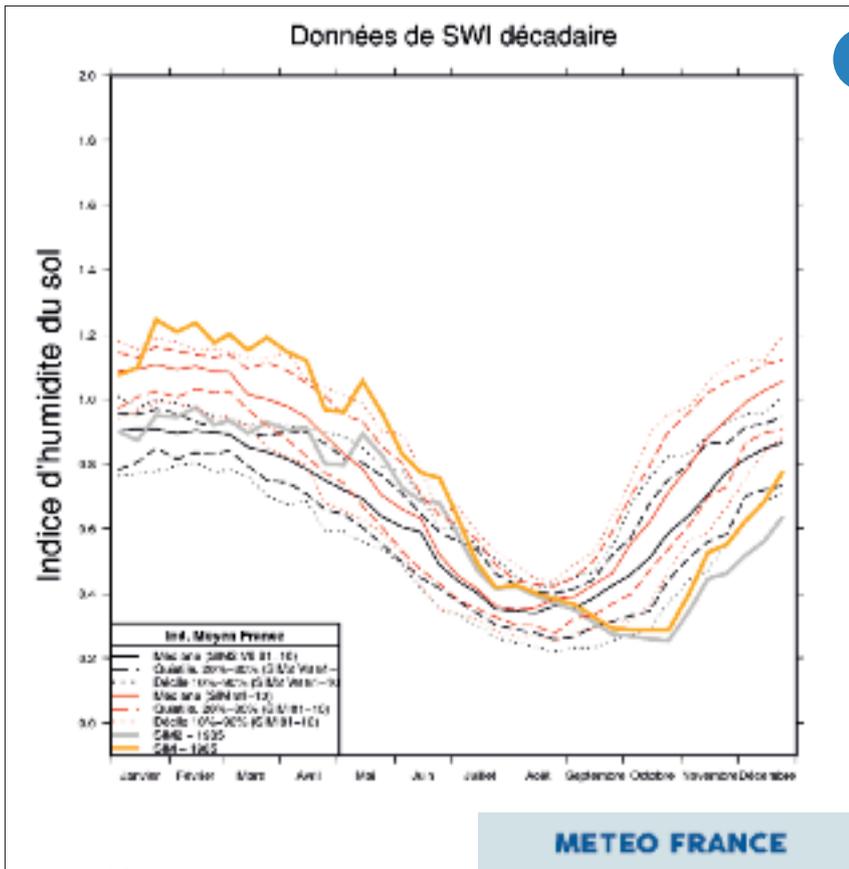
## Impact de la meilleure modélisation de l'évapotranspiration des forêts et en particulier de son partitionnement sur la modélisation des débits

La version actuelle du modèle de surface continentale ISBA, partie intégrante de la plateforme SURFEX développée à Météo France, représente la couche de sol superficiel et la végétation comme un composite dont les propriétés physiques résultent de pondérations entre les propriétés de chacune de ces deux surfaces. Une nouvelle version, ISBA-MEB (Multi-Energy-Balance), prend en compte de manière distincte le sol et la végétation. Ce développement permet de représenter de nouveaux processus comme l'effet d'ombrage de la canopée sur le sol, le transfert radiatif à travers la végétation, l'interception de la neige par la canopée ou encore la litière sur le sol des forêts.

Un travail d'évaluation de ces nouveaux développements par rapport à des données d'observations locales a montré que le cycle énergétique était sensiblement impacté sur un large panel de climats et type de forêts. En particulier l'amplitude du flux de chaleur par conduction dans le sol est fortement réduite au profit du flux de chaleur sensible et ce, en accord avec les observations. La chaîne de

modélisation hydrométéorologique SIM développée à Météo-France permet de simuler l'état hydrique des sols et les débits des rivières. Cette chaîne constitue un outil d'évaluation des travaux de recherche relatifs à la modélisation des surfaces. Ainsi, l'impact de ces nouveaux développements dans SIM se caractérise par l'amélioration de la simulation des débits pour la quasi-totalité des stations de mesure disponibles (fig.). L'évaporation du sol a été identifiée comme la source principale de cette amélioration. En effet, la nouvelle représentation plus réaliste des forêts, et en particulier du sol, réduit l'amplitude annuelle de ce flux, améliorant ainsi les débits modélisés.

8



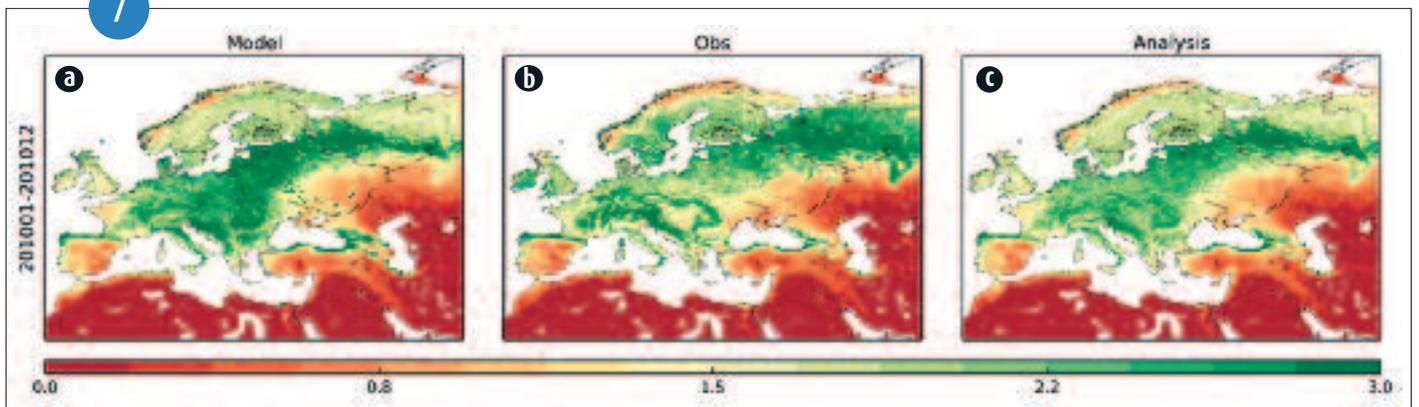
6

Comparaison des climatologies décennales de SWI sur la France entre SIM et SIM2 (1981-2010) et superposition de l'évolution du SWI décadaire pour l'année 1985. Si les valeurs du paramètre changent de SIM à SIM2, les variations interannuelles sont conservées, et pour une année particulière, les comparaisons par rapport à la climatologie traduisent un comportement similaire.

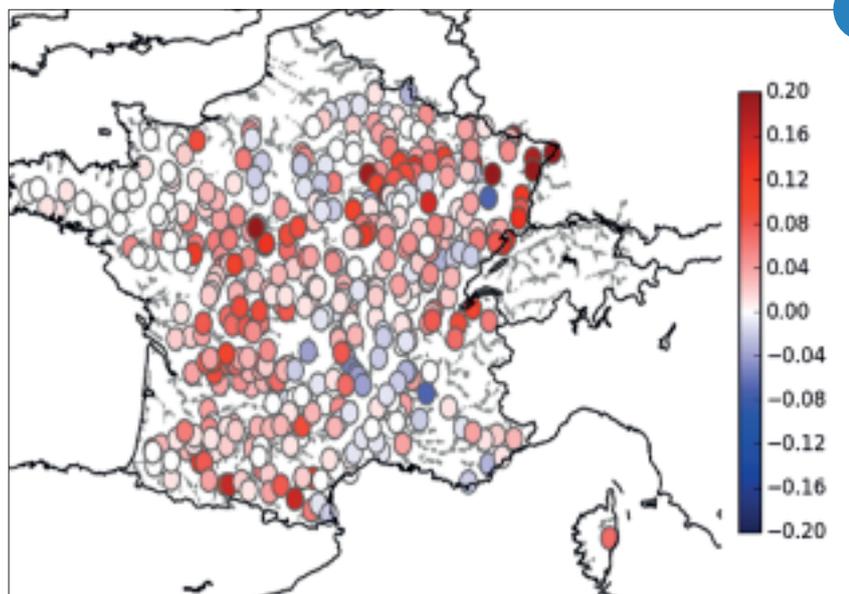
Indice de surface foliaire en  $m^2m^{-2}$  :  
 (a) simulé par le modèle (sans assimilation),  
 (b) issu de la télédétection spatiale,  
 (c) après assimilation des observations (i.e., b).

Les valeurs représentées sont des moyennes sur l'année 2010.

7



8



Différence de critère de Nash, critère classiquement utilisé en hydrologie pour l'évaluation des débits, entre la simulation utilisant les nouveaux développements et le modèle par défaut. Les stations menant à des Nash négatifs pour les deux simulations sont écartées. On a désormais 68.8 % des Nash supérieurs à 0.5 contre 63.6 % auparavant.

# Océanographie

Les recherches menées par Météo-France concernent l'ensemble du « système Terre », terme qui rappelle combien l'atmosphère est intimement liée aux surfaces continentales ou océaniques et interagit étroitement avec ces milieux. Elles portent notamment sur la compréhension des processus, très en amont des applications. Une meilleure connaissance des mécanismes les plus fins qui régissent les phénomènes météorologiques, et leur représentation sans cesse améliorée au sein des outils de modélisation, renforcent constamment la capacité des équipes opérationnelles contribuant à la gestion des risques ou à l'adaptation aux évolutions climatiques.

La mer est, depuis l'aube du service météorologique, un lieu d'étude et d'action privilégié des météorologues. Avec leurs collègues océanographes, ils abordent l'océan et l'atmosphère en considérant leur couplage à toutes échelles, en pleine mer et à la côte. Les processus tels que la convection profonde ou les interactions atmosphère – vagues – courants sont au cœur des enjeux de recherche actuels. Si l'océan fait depuis longtemps l'objet de toutes les attentions des climatologues – ses caractéristiques propres en font un des déterminants essentiels du climat –, il intéresse de plus en plus les spécialistes de la prévision à courte échéance : en effet, un couplage air-mer plus réaliste pourrait améliorer la prévision de certains phénomènes à enjeux, notamment dans les mers qui bordent les côtes françaises, en Méditerranée, Manche-Atlantique et sans oublier nos Outremer. Car la finalité de ces travaux, outre la compréhension des mécanismes qui régissent notre planète, réside aussi dans les enjeux permanents de sécurité des personnes et des biens et dans ceux tout aussi essentiels d'optimisation des activités maritimes et littorales. Les applications sont très pratiques : recherche et sauvetage, gestion portuaire, énergies off-shore... Le souci de recherche peut être très appliqué et original, comme en témoignent ces travaux sur le changement d'amure d'objets à la dérive : naufragés, conteneurs dangereux – les prévisions opérationnelles de Météo-France en la matière sont sollicitées chaque jour sur l'ensemble des océans.

1

## Nouvelle configuration du modèle de vagues en côtier pour les Antilles et la Guyane

Fin 2015, la seconde phase du projet HOMONIM, conduit par Météo-France et le SHOM, a été lancée avec le soutien du MEEM pour améliorer les outils de prévisions des surcotes et des vagues à la côte, notamment en Outre-Mer. Un des volets de la première phase avait abouti à la mise en place d'un modèle de vagues côtier haute résolution, WaveWatch 3 (WW3), pour la métropole sur la chaîne opérationnelle en mars 2015.

Après des études sur la bathymétrie et différents maillages, puis la validation sur une période longue et sur quelques événements marquants de ces dernières années, la configuration de ce modèle WW3 pour les Antilles et la

Guyane a été installée en décembre 2016 sur la chaîne opérationnelle de Météo-France. Le modèle WW3 fournit des paramètres décrivant l'état de la mer à une résolution de 200 m près des côtes françaises et a la particularité d'utiliser une maille irrégulière qui permet d'adapter sa grille à la forme des côtes. Il est forcé par des vents du modèle atmosphérique Arome outremer, à 2,5 km de résolution, et est imbriqué dans le modèle régional de vagues de Météo-France MFWAM, ayant une résolution d'environ 10 km.

En eau peu profonde, WW3 présente l'avantage de mieux simuler les processus liés à la bathymétrie, à la nature des fonds et au trait de

côte, par rapport au modèle régional MFWAM. Sur la Guyane, la prise en compte à l'avenir des courants de surface et de la nature vaseuse du fond pourra améliorer la simulation des états de mer.

La suite du projet consistera notamment à mettre en place des configurations de WW3 sur Mayotte et La Réunion.

2

## Prise en compte des courants et du niveau marin par le modèle de vagues en côtier

Dans le cadre du projet HOMONIM, dirigé par Météo-France et le SHOM, sous la maîtrise d'ouvrage de la DGPR et de la DGSCGC, un modèle de vagues (WW3), en zone côtière métropolitaine, a été développé puis mis en place dans la chaîne opérationnelle de Météo-France en mars 2015. La résolution de ce modèle atteint 200 m sur le littoral français.

Fin 2016, une nouvelle version de ce modèle, développée avec le SHOM, utilise, pour la zone Atlantique/Manche, les courants et les niveaux marins simulés par le modèle Hycom-2D également développé par le projet HOMONIM. Ces nouveaux forçages permet-

tent au modèle de vagues de décrire plus précisément la frange côtière, notamment lorsque la marée est importante et la profondeur faible. Les estrans sont ainsi beaucoup mieux représentés (des zones devenant alternativement des points mer ou des points terre selon la phase de la marée) et la physique des vagues tire parti d'une meilleure précision de la bathymétrie. De même, la prise en compte des courants marins affine les calculs, tant pour la hauteur des vagues que pour leur période. Des mesures sur les vagues ont été réalisées en mars 2016 au fond de la baie du Mont St Michel, dans une zone découverte, à marée basse, alors que

la mer était agitée. La figure montre le gain en qualité des simulations de hauteur de vagues par le modèle WW3 quand il prend en compte la hauteur d'eau puis les courants, par rapport aux mesures au large de la plage d'Hirel.

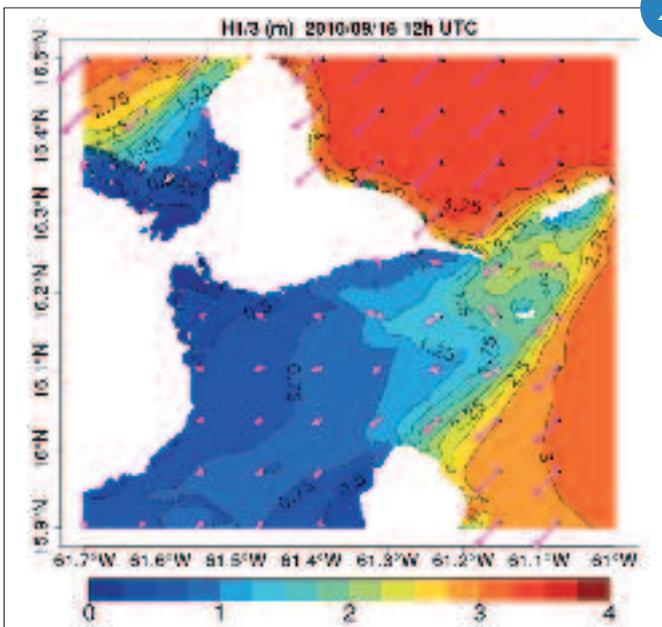
Cette amélioration du modèle de vagues en côtier est un premier pas vers le couplage complet entre les modèles de vagues et de niveaux marins qui sera testé et validé dans les prochains mois à l'aide d'une maquette couvrant les pertuis charentais (projet HOMONIM).

3

(a) : Le navire de recherche « Akademik Treshnikov » au milieu des glaces dans l'océan austral, en 2016, lors de l'expédition de circumnavigation antarctique internationale ACE du Swiss Polar Institute. Météo-France collabore avec l'Université de Melbourne pour le test d'un radar WAMOS afin d'étudier les interactions vagues / courant / glace.  
Crédit : Alessandro Toffoli / Université de Melbourne"



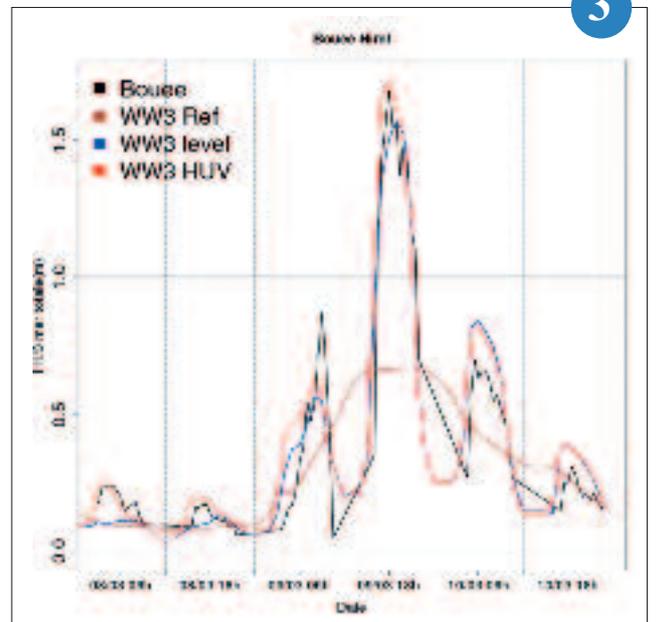
(b) : Remplacement de la bouée Côte d'Azur : mise à l'eau de la nouvelle bouée (ODAS12) qui remplace l'ODAS11.



2

Hauteur significative des vagues de la mer totale (m) de WW3 le 16/09/2010 à 12h UTC sur la Guadeloupe. Les flèches violettes représentent la direction de la houle, issue du cyclone Igor (catégorie 4) circulant à 600 km au nord-est. Les variations de hauteur reflètent les effets du déferlement et de la dissipation d'énergie due à la réfraction et au fond marin.

3



Comparaison entre les mesures (trait noir) et les simulations de la hauteur significative des vagues par WW3, sans forçage océanique (Ref, trait marron), avec le niveau marin (level, trait bleu) et avec le niveau marin et les courants (HUV, trait rouge). Il s'agit de la situation du 8 au 10 mars 2016, la mesure ayant été réalisée au large de la plage d'Hirel, au fond de la baie du Mont St-Michel, par l'EPHE de Dinard.

## Modélisation des vagues pour Copernicus (global et régional)

Les vagues jouent un rôle important dans les échanges de flux de quantité de mouvement, de chaleur et de transfert de gaz à l'interface océan-atmosphère. Dans le cadre des services opérationnels Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service : CMEMS), Météo-France (DirOP/MAR) va fournir les produits vagues issus du modèle de vagues MFWAM pour le global avec une résolution de la grille de 20 km. Le modèle global est forcé par les vents CEP et utilise l'assimilation des données altimétriques. Le modèle de vagues MFWAM sera aussi exploité pour le domaine régional Iberian Biscay Ireland (IBI) avec une résolution de 10 km dans le cadre d'une collaboration avec Puertos Del Estados, AEMET, CESGA et Marine Institute.

Le lancement des services CMEMS pour les vagues est prévu pour Avril 2017. Dans la version V3 du système opérationnel CMEMS-IBI, le modèle de vagues MFWAM sera couplé avec le modèle de circulation océanique NEMO. Trois processus de couplage ont été implémentés. Le premier concerne le terme de forçage

Stokes-Coriolis qui utilise la dérive de Stokes calculée par le modèle de vagues. Le deuxième processus consiste à prendre en compte le stress du flux de quantité de mouvement fourni à l'océan, et enfin le troisième processus prend en compte la turbulence lié au déferlement des vagues injecté dans la couche de mélange océanique.

Les premiers résultats du couplage entre MFWAM et NEMO montrent un impact significatif sur les paramètres clés qui sont la température de surface, les composantes du courant, la salinité et la couche de mélange océanique. La phase de validation du couplage vagues/océan sur une période longue 2014/2015 est en cours, et va permettre de corriger et ajuster les paramétrisations physiques utilisées dans les modèles de vagues et d'océan.

4

## Prise en compte du changement d'amure dans le calcul des dérives d'objet

Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en œuvre le modèle MOTHY de prévision de dérive en mer de nappes d'hydrocarbures ou d'objets flottants. Le système est utilisé plus de 800 fois par an pour des cas réels de déversement d'hydrocarbures ou d'opérations de recherche et sauvetage. La recherche d'objets ou de personnes constitue 80 % des demandes.

De petites différences dans l'orientation initiale d'un objet par rapport au vent peuvent conduire à une dérive à droite ou à gauche de la direction du vent, avec la même probabilité. Ces deux positions ne sont pas stables. L'objet peut empanner, à savoir, changer d'amure par vent arrière. La fréquence de ces changements est un élément important pour la modélisation des zones de recherche. Sans empannage, la distribution initiale de probabilité va rapidement se séparer en deux zones de forte probabilité selon que l'objet est bâbord ou tribord

amure. Si l'objet empanne, la distribution de probabilité va au fil du temps remplir la zone centrale entre les deux zones de recherche dominantes. Plus l'empannage est fréquent, plus la distribution est centrale.

La dynamique de l'empannage est mal comprise, mais sa fréquence estimée a été déterminée à partir d'observations. Ces changements aléatoires d'amure sont maintenant pris en compte dans les calculs de dérive.

5

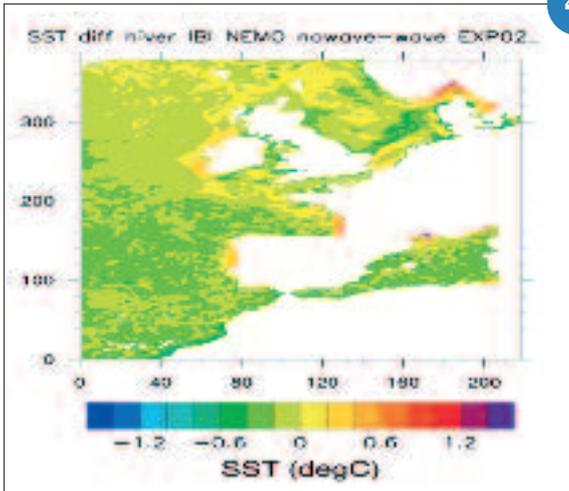
## Étude de la convection océanique profonde en Méditerranée : cas HyMeX de l'hiver 2012-2013

La convection océanique profonde est un phénomène emblématique de l'océanographie physique. C'est un élément clé de la circulation thermo-haline et un lieu d'échange privilégié entre océan de surface et océan profond. Afin de progresser notablement dans la connaissance et la modélisation de ce phénomène, les programmes HyMeX, MerMex et MOOSE ont collecté une quantité inédite d'observations en Méditerranée Nord-Occidentale lors de l'année 2012-2013.

En particulier, les observations de ce golden case permettent de suivre en continu la chronologie de la couche de mélange océanique (Figure a en noir). La convection atteint des profondeurs intermédiaires fin Janvier, le fond de la colonne d'eau en Février puis à nouveau mi-Mars, avant la restratification définitive. Elles permettent également de quantifier, pour la première fois, l'évolution saisonnière du volume d'eau dense (Figure b en noir) et d'estimer un taux annuel de convection de 1.3-2.3 Sv ( $1\text{Sv}=106\text{ m}^3/\text{s}$ ) et de restratification de 0.8 Sv. Pour comparaison, les figures a et b représentent les résultats de deux ensembles de simulations initialisés obtenus en perturbant aléatoirement les structures de méso-échelle des conditions initiales issues des observations en Août 2012. Seul l'ensemble rouge résout explicitement la méso-échelle océanique avec un zoom à 2 km de résolution spatiale. Les simulations reproduisent bien les différentes phases du phénomène (Figure a) ainsi que l'évolution saisonnière du volume d'eau dense (Figure b) malgré une légère sous-estimation de l'intensité maximale de la convection. La représentation explicite de la méso-échelle augmente le réalisme de la géographie de convection (non montré), diminue l'intensité de la convection (Figure a) et augmente le taux de restratification (Figure b).

6

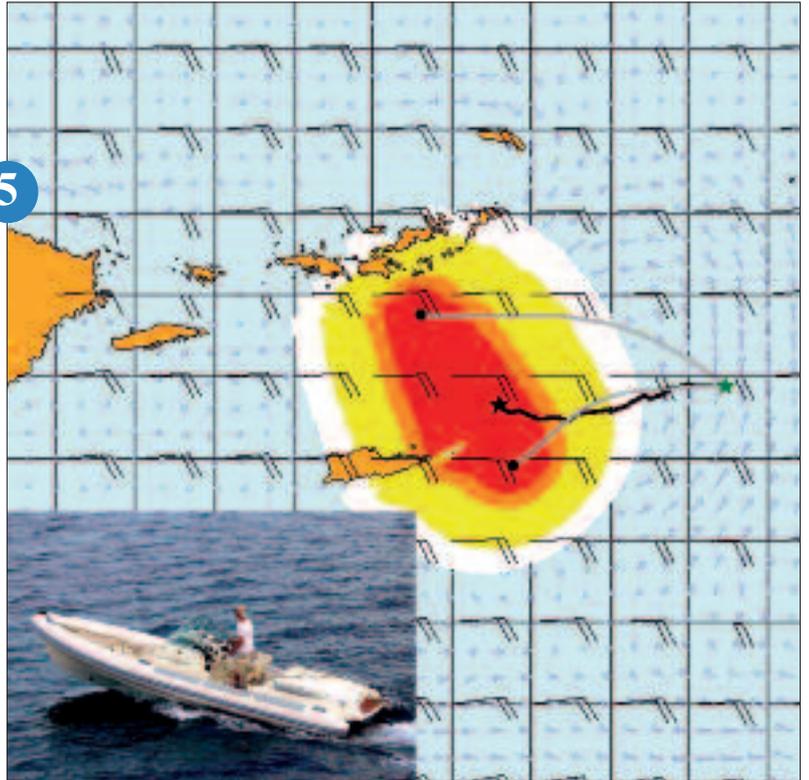
4



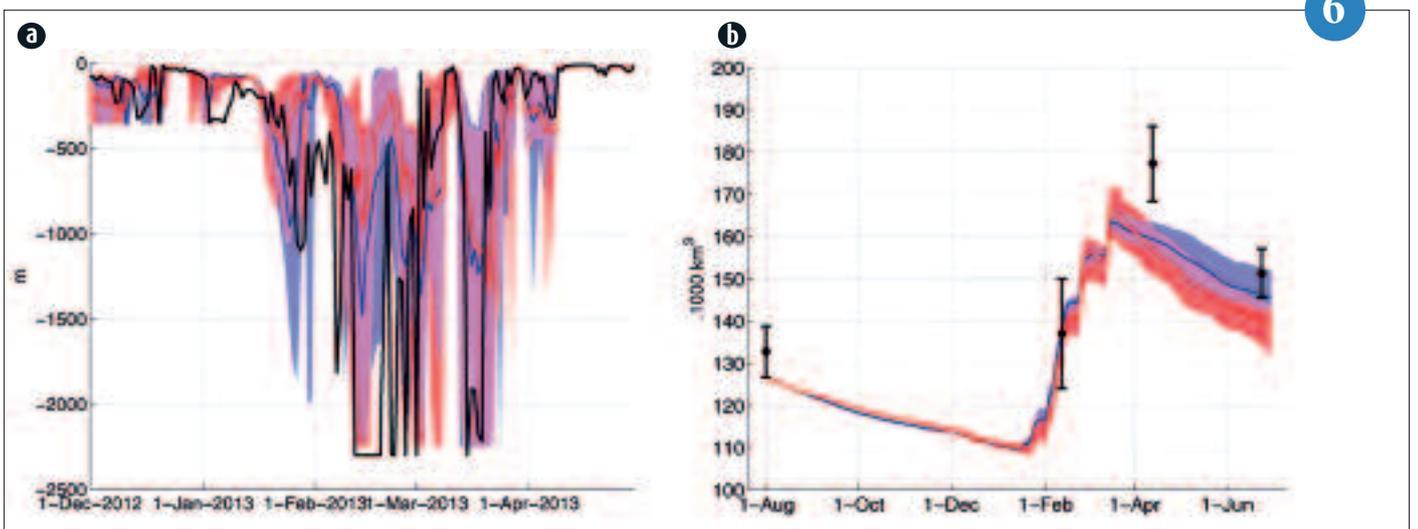
Différence de la moyenne de température de surface (en °C) entre simulations de NEMO-IBI non-couplé et couplé (forçage Stokes-Coriolis et le stress calculé par MFWAM) avec les vagues pour la période de l'hiver 2014 sur le domaine IBI. Les valeurs positives de différence indiquent un refroidissement de la surface océanique induit par les vagues.

5

Prévision probabiliste de dérive de canot pneumatique au large des îles Vierges, en mer des Caraïbes. Les couleurs représentent la probabilité de présence du canot : 50 % en rouge ; 67 % en rouge et orange ; 95 % en rouge, orange et jaune ; 99 % en ajoutant le blanc. Les points noirs sont les prévisions déterministes sans changement d'amure, selon deux hypothèses d'orientation initiale par rapport au vent. L'étoile verte indique la position de perte du canot. L'étoile noire indique la position où le canot a été retrouvé 60 heures plus tard.



Série quotidienne (a) de la profondeur de la couche de mélange (en mètres) au point de mesure LION (42.1°N, 4.7°E) du 1er décembre 2012 au 1er mai 2013 et (b) du volume d'eau dense (en 103 km<sup>3</sup>) dans le bassin méditerranéen nord-ouest (anomalie de densité potentielle supérieure à 29.11 kg/m<sup>3</sup>) du 1er août 2012 au 1er juillet 2013 ; en noir les observations, en bleu l'ensemble de 10 simulations réalisé avec NEMO Méditerranée (6 km de résolution), et en rouge pour l'ensemble jumeau réalisé avec un zoom à 2 km de résolution sur le Nord-ouest Méditerranéen.



6

# Techniques, campagnes et produits d'observation

Les objets connectés sont de plus en plus nombreux à acquérir des informations potentiellement utiles pour la prévision du temps. La masse de données pourrait être gigantesque et révolutionner le domaine de l'observation. Soucieux de ne pas rater le tournant, Météo-France s'est lancée dans une première expérimentation. Elle porte sur l'exploitation à des fins de prévision immédiate de mesures de température à bord de voitures connectées. On pourrait imaginer à terme un système d'alerte des mauvaises conditions de route reposant sur l'échange en temps réel des informations entre véhicules.

La mesure automatique par un récepteur GPS du contenu atmosphérique vertical de vapeur d'eau est une technique relativement récente mais désormais bien maîtrisée. La mesure est aujourd'hui accessible dans un délai suffisamment court pour pouvoir être assimilée. Un projet a été lancé en 2016 pour le déploiement d'un réseau de balises dans l'Océan Indien afin d'améliorer la prévision des cyclones tropicaux. Les techniques de fusion de données se perfectionnent et se diffusent. Le produit ANTILOPE est désormais accessible outre-mer, et des cartographies en temps réel des types de précipitation (pluie, neige, glace...) sont maintenant disponibles sur métropole.

L'observation joue un rôle clé dans le domaine de la recherche, soit en proposant des séries de mesures longues auxquelles on peut confronter les modèles – mesures des échanges à la surface de la station Météopôle-Flux par exemple – ou bien en étudiant un phénomène particulier comme le brouillard pendant une campagne de mesures pour pouvoir in fine en améliorer la modélisation.

1

## Campagnes de mesures du profil vertical des propriétés microphysiques du brouillard

Le brouillard a un impact important sur la sécurité des personnes et sur l'économie, notamment dans le domaine du transport aérien. Pour améliorer la modélisation et la prévision du brouillard, le CNRM a mené deux campagnes de mesures durant les automnes 2015 et 2016, en collaboration avec l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire). Réalisées 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) avec un important dispositif instrumental, elles répondaient aux objectifs suivants :

- documenter les caractéristiques du profil vertical des propriétés microphysiques du brouillard (nombre et dimension des gouttelettes

d'eau, contenu en eau liquide et visibilité) afin de contraindre et de valider les simulations numériques ;

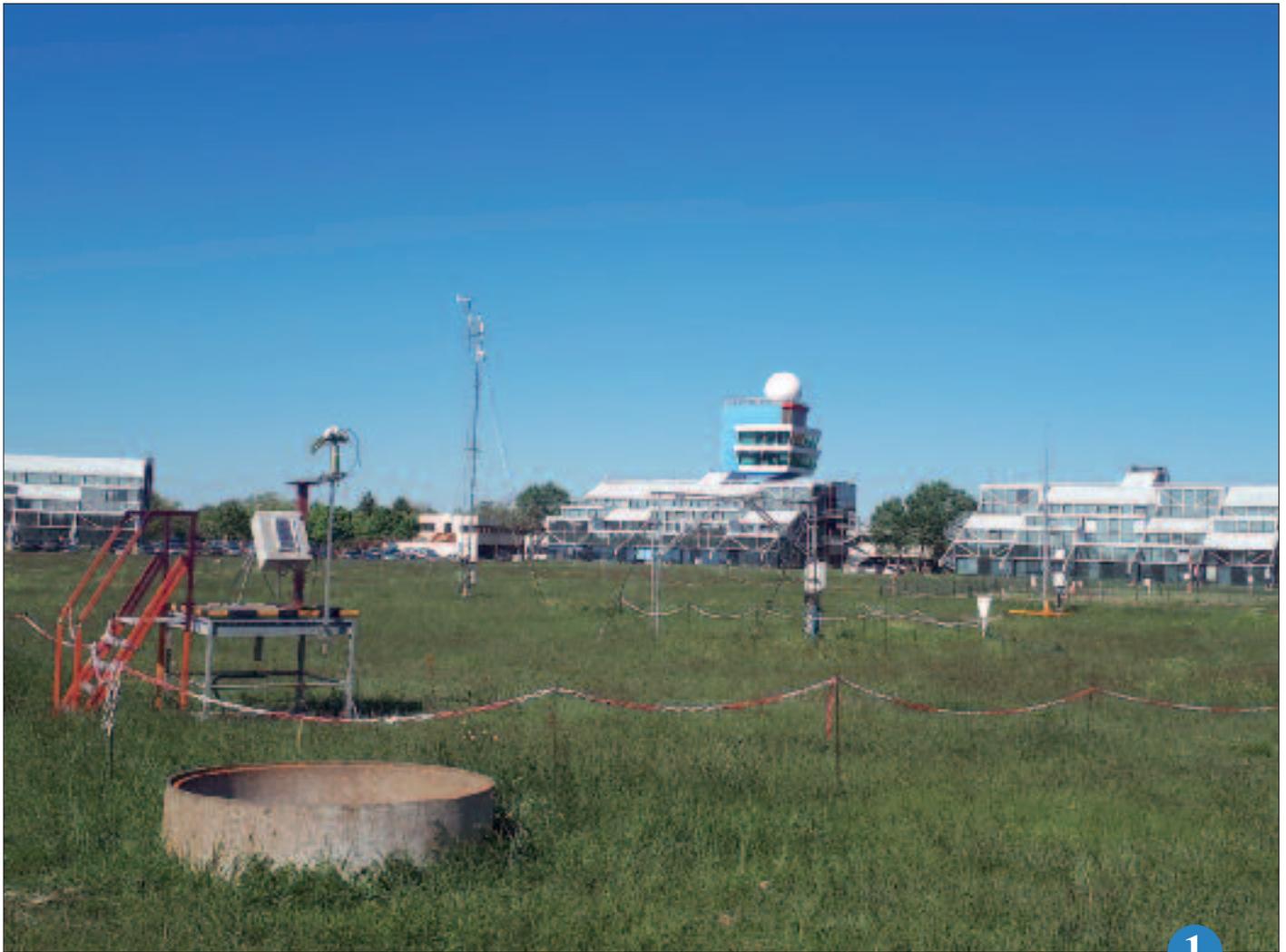
- évaluer l'apport de l'assimilation dans AROME des profils de température et d'humidité fournis par le radiomètre micro-ondes pour la prévision du brouillard ;

- quantifier le terme de dépôt turbulent d'eau liquide sur la végétation qui n'est actuellement pas pris en compte dans les modèles, et qui est un terme puits important au voisinage de la surface.

De nombreux capteurs ont été installés sur un pylône à différents niveaux d'altitude (2, 10, 50 et 120 m). En période d'observation intensive, des profils verticaux in situ ont été réalisés jusqu'à 500 m avec un ballon captif. Des

drones ultralégers ont aussi été utilisés pour suivre l'évolution de la couche limite en complément des radiosondages classiques. Ces données en cours d'analyse vont permettre d'explorer la variabilité des différents paramètres dans toute la couche de brouillard. Plusieurs cas de formation par descente de stratus, qui sont particulièrement délicats à prévoir, ont été échantillonnés.

2



1

▲ Site Météopole-Flux.

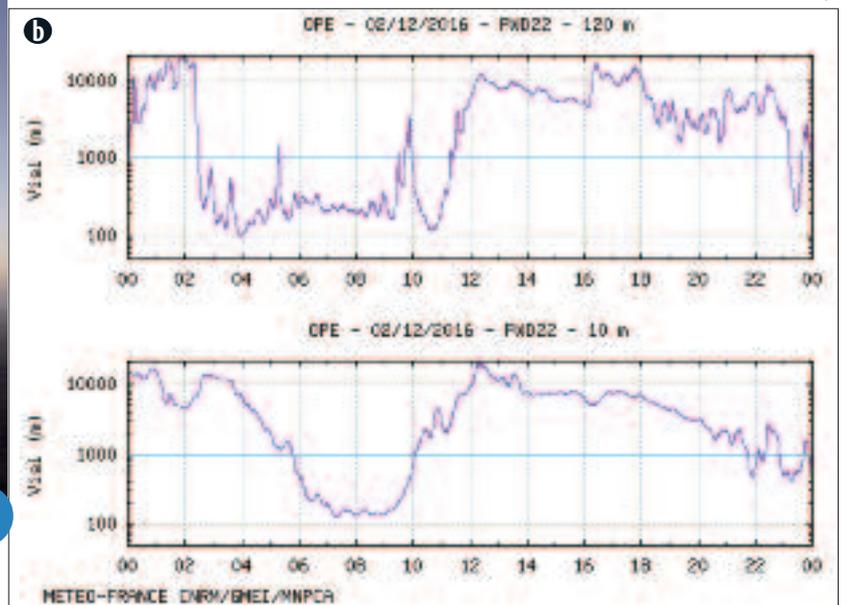


a

◀ (a) : Lâcher de radiosondage au lever du jour.

2

(b) : Séries temporelles de la visibilité mesurée par les PWD22 du pylône pour le cas de la descente de stratus de la journée du 2 décembre 2016 : indique que le sommet du pylône à 120 m d'altitude est dans le stratus (visibilité < 1000 m) dès 2h30 mais que le brouillard n'a atteint le sol qu'un peu avant 6h.



## Météopole-Flux : mesurer les échanges surface-atmosphère et servir aux échanges scientifiques

La station Météopole-Flux est spécifiquement conçue pour mesurer, outre les grandeurs météorologiques usuelles, les échanges de chaleur, de vapeur d'eau et de CO<sub>2</sub> entre la surface et l'atmosphère. En particulier, des mesures rapides (20 échantillons par seconde) de température, d'humidité, de concentration en CO<sub>2</sub> et de vent en 3 dimensions permettent de calculer les flux verticaux turbulents de ces grandeurs. Dans le sol, la température et l'humidité sont mesurées jusqu'à 2 mètres de profondeur, ce qui est bien plus complet que d'autres stations du même type.

Cette station a été installée en 2012 sur le champ expérimental de la Météopole, à Toulouse, par le groupe GMEI, pour répondre aux besoins du groupe GMME en modélisation du sol et des échanges avec l'atmosphère. Un jeu de données homogène 2012-2016 vient d'être diffusé, prenant en compte tous les recalibrages des instruments.

La dynamique autour de cette station s'est rapidement élargie. Le GMAP l'utilise pour valider les paramétrisations des modèles et pour l'étude de l'enthalpie de l'air humide. De nouvelles mesures radiatives ont rejoint le dispositif (photomètre du réseau AERONET, capteurs de rayonnement photo-synthétiquement actif). Elle est un point de référence des réseaux d'étude du microclimat urbain, et a servi à des tests de méthodes d'estimation d'humidité superficielle du sol à partir de signaux GPS réfléchis.

L'intérêt de cette station est reconnu au-delà de Météo-France : en 2017, elle rejoindra l'infrastructure de recherche ACTRIS-France, et deviendra site associé au réseau ICOS.

3

## Expérimentation 2016/2017 sur les véhicules connectés

Une campagne expérimentale consacrée aux véhicules connectés est menée en partenariat avec la société Continental.

Une première expérimentation avec un véhicule a eu lieu pendant l'hiver 2015/2016 pour étudier la pertinence technique du système connecté (dongle+téléphone) et qualifier de manière préliminaire la restitution d'un paramètre exploitable facilement : la température de l'air. La comparaison (Fig. a) avec des observations de températures spatialisées a montré que la température mesurée depuis le véhicule était d'une qualité relativement satisfaisante (erreur moyenne de -0.7°C et écart quadratique moyen de 1.1°C). De plus, il a été montré qu'en zone de relief, il était possible d'observer un profil vertical de température à partir du véhicule (Fig. b), avec une plus-value à attendre pour la détection des inversions de température et l'observation de la limite pluie-neige.

Une campagne à plus grande échelle (200 véhicules de service dont 100 de Météo-France répartis dans toutes les régions) est en cours pour l'hiver 2016/2017 afin de constituer une base de données et également étudier l'intérêt des alertes de prévision à courte échéance sur l'itinéraire (1h) diffusées dans le véhicule concernant les risques de phénomènes impactant la sécurité (pluie verglaçante, neige, grêle ...).

L'analyse des résultats de cette campagne permettra d'ouvrir la démarche à l'exploitation d'autres paramètres du véhicule plus difficilement exploitables (essuie-glaces pour les précipitations, ESP pour l'état de surface, phares pour la visibilité ...). Le but est d'obtenir à terme un système de prévision/alerte embarqué intégrant en temps réel les données issues d'autres véhicules.

4

## HYDRE

Le produit HYDRE permet le signalement et la discrimination des hydrométéores atteignant le sol : pluie, pluie verglaçante, pluie et neige mêlée, neige, grêle, ...

Il a été développé ces deux dernières années pour les prévisionnistes afin de mieux appréhender les situations hivernales critiques ainsi que les cas de grêle en France métropolitaine.

Il s'appuie sur différentes sources d'informations : radar et satellite, réseaux d'observation de surface et prévisions du modèle AROME.

La méthode de discrimination des hydrométéores hivernaux, inspirée d'algorithmes déjà mis au point aux États-Unis ou au Canada, repose sur la structure du profil vertical de température, déduite ici des prévisions les plus récentes du modèle AROME.

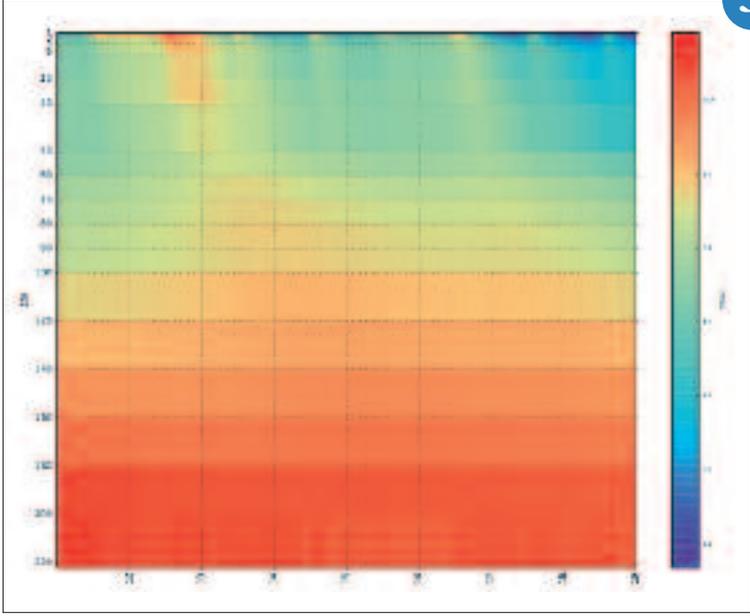
La discrimination de la grêle et l'estimation de sa taille (petite, moyenne ou grosse) se fait quant à elle exclusivement à partir des données radar (polarimétrie et réflectivité).

Une expérimentation par les prévisionnistes de Météo-France, mise en place des mois de janvier à octobre 2016 a permis de finaliser le choix des algorithmes et d'affiner les réglages de cette première version.

Dès la fin de l'année 2016, cette discrimination sera produite de manière opérationnelle toutes les 5 minutes ; elle profitera naturellement à l'avenir des avancées dans les domaines de la mesure radar et de la prévision.

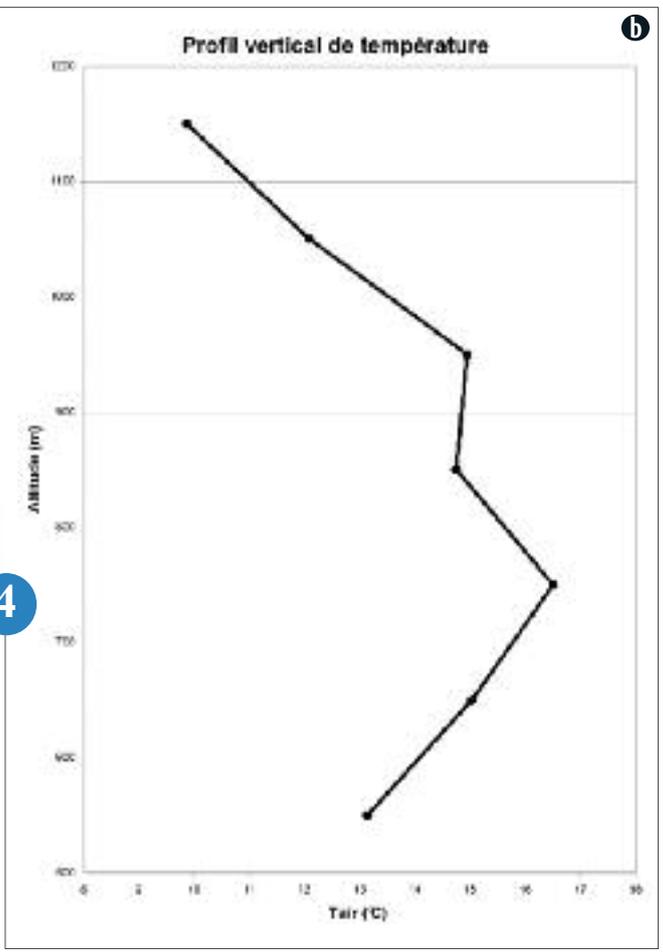
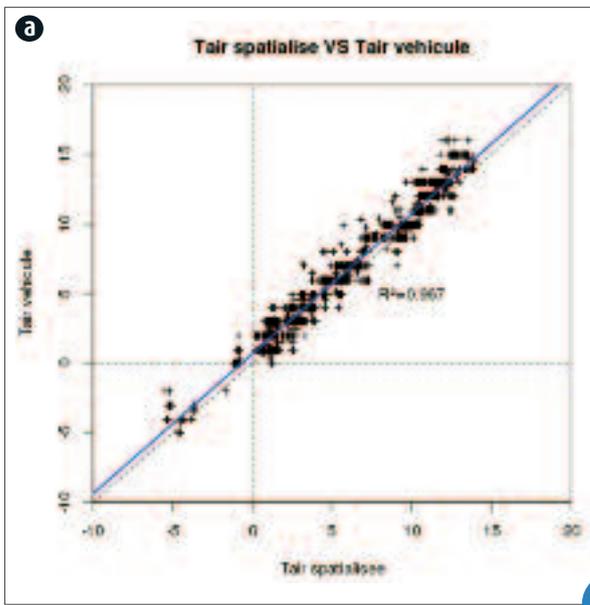
5

3



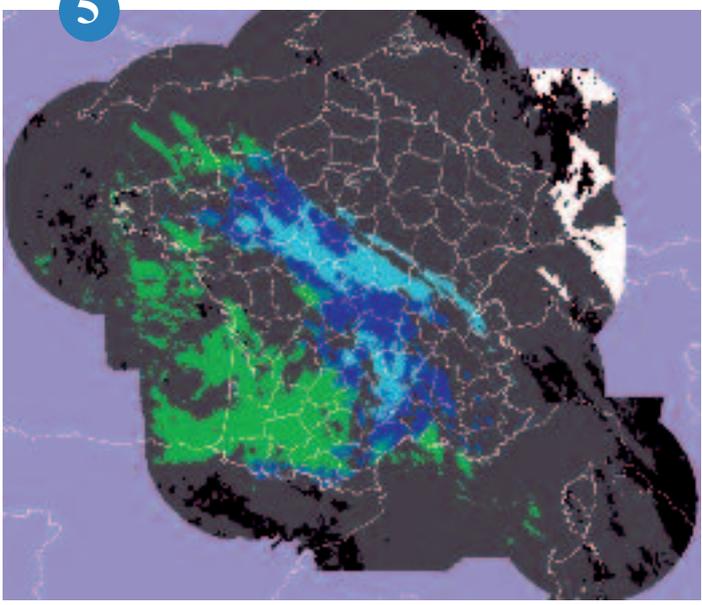
◀ Coupe temps-profondeur de température dans le sol entre le 11 et le 18 janvier. La propagation vers le bas des ondes de températures est bien visible.

(a) : Comparaison de la température d'air mesurée par le véhicule avec un produit opérationnel d'observations de températures spatialisées (résolution 1km, fréquence 5 minutes) pendant l'hiver 2015/2016.  
 (b) : Exemple de profil vertical de température reconstitué à partir de l'observation de température du véhicule (trajet dans les Alpes).



4

5



◀ Discrimination des hydrométéores au sol HYDRE pour le 18 janvier 2016 à midi. On peut y voir de la pluie (vert), de la neige (bleu), de la pluie et de la neige mêlées (turquoise). La couleur bleu ciel indique des chutes de neige tenant au sol, la couleur blanche de la neige visible au sol par satellite.

## Fusion de données pour l'Outre-Mer

Des produits d'observation combinant des données issues de sources diverses ont été réalisés pour l'Outre-Mer.

ANTILOPE est une analyse horaire des précipitations fusionnant données issues des pluviomètres et des radars, développée initialement pour la métropole. Les précipitations sont décomposées en une partie stratiforme et une partie convective à partir des images radar. L'estimation des cumuls horaires associés à ces deux parties est réalisée en utilisant une méthode de spatialisation (« krigeage » avec dérive externe) permettant de corriger la lame d'eau radar à l'aide des données des pluviomètres. Le résultat final est la somme des deux estimations. Cette méthode a été adaptée pour La Réunion, domaine sur lequel elle est à présent produite opérationnellement, ainsi que pour les Antilles et la Nouvelle-Calédonie, où les évaluations sont en cours.

Par ailleurs, une analyse spatialisée du rayonnement solaire global a été développée spécialement pour l'Outre-Mer. La méthode consiste à spatialiser les mesures au sol (inverse de la distance) en s'appuyant sur une ébauche de rayonnement produite à partir des images satellitaires disponibles au moment de la production (SSI ou à défaut, classification nuageuse). Sont ainsi fournis les cumuls horaire et quotidien de rayonnement solaire global sur La Réunion, la Martinique et la Nouvelle-Calédonie.

L'adaptation du produit de rayonnement sur la métropole est à présent envisagée.

6

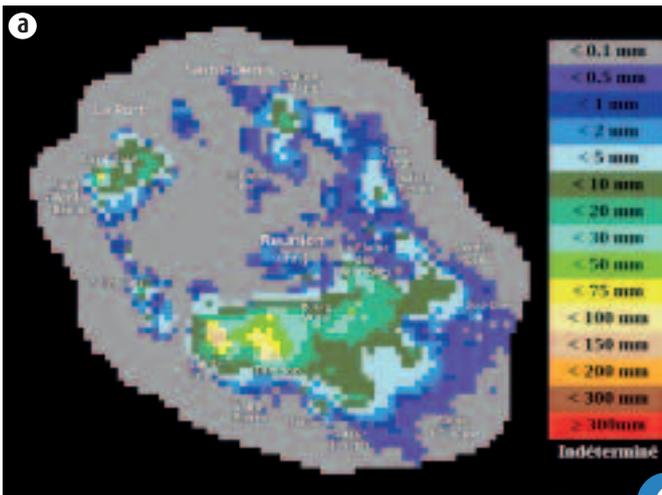
## Déploiement et exploitation d'un réseau de stations GPS dans le bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien pour la météorologie

Les cyclones tropicaux se développent, évoluent et se propagent majoritairement au-dessus des océans qui sont, par définition, des zones généralement pauvres en observations directes conventionnelles. Le bassin Sud-ouest de l'Océan Indien, en dépit de son importante activité cyclonique – il s'agit du deuxième bassin le plus actif après le bassin Pacifique Ouest – est à cet égard le moins instrumenté des 7 bassins cycloniques de la planète.

Pour s'adapter à l'évolution des besoins en météorologie, notamment en termes de modélisation numérique et de surveillance du climat, le Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy) a lancé un projet visant à augmenter sensiblement le nombre de sites capables de mesurer l'humidité atmosphérique dans le bassin Sud-Ouest de l'Océan Indien. Dans le cadre de ce projet, de nouvelles stations GPS seront déployées à partir de 2017 : Madagascar, Seychelles, Maurice, Mozambique et sur les îles Eparses (Glorieuses, Tromelin, Juan de Nova et Europa). Les observations issues de ces nouvelles stations viendront compléter la quinzaine de stations actuellement utilisées par des géodynamiciens (le réseau GPS international IGS en grande partie) et seront archivées à l'Observatoire de Physique de l'Atmosphère de La Réunion pour y être traitées puis distribuées aux principaux centres météorologiques (recherche et opérationnels) régionaux.

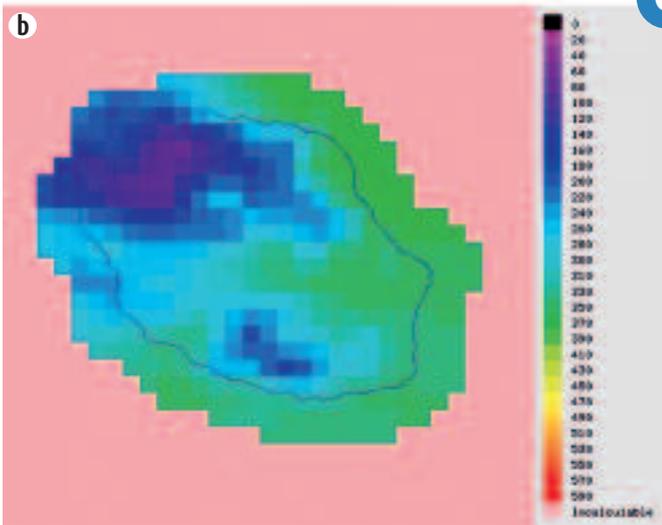
Ces données, qui auront, in fine, vocation à être assimilées dans le nouveau modèle AROME Indien, offriront un moyen supplémentaire d'évaluer la pertinence des simulations et prévisions numériques de cyclones tropicaux, de mieux comprendre les processus atmosphériques mis en jeu lors des cyclogenèses et de surveiller l'évolution du climat, via l'analyse du contenu intégré en vapeur d'eau sur le long terme. Ce projet, qui est un modèle de collaboration transdisciplinaire, fait partie du programme de recherche ReNovRisk (Recherche Innovante et Intégrée sur les Risques Naturels), financé par l'Etat, la Région Réunion et le FEDER.

7



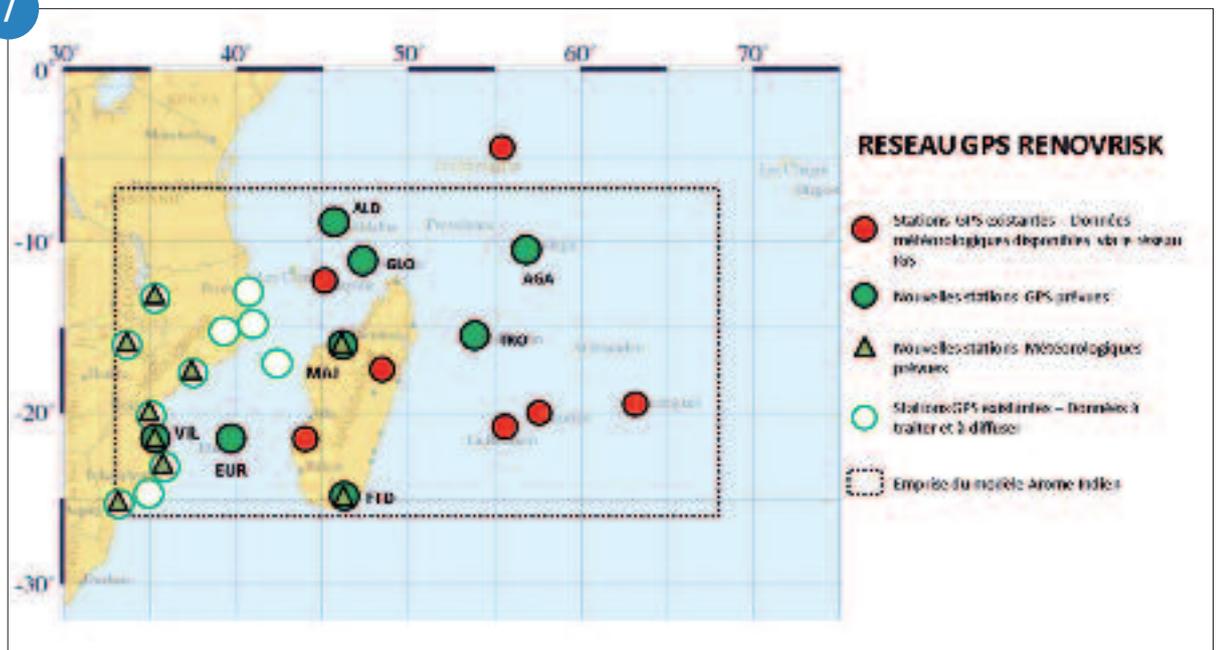
(a) : ANTILOPE (La Réunion, le 25/10/2016 à 11 UTC).  
 (b) : Spatialisation du rayonnement (La Réunion, le 18/10/2016 à 10 UTC).

6



Vue d'ensemble du réseau de stations GPS exploitées dans le cadre du programme ReNovRisk. Les points rouges représentent les stations existantes dont les données (contenu intégré en vapeur d'eau, délai zénithal) sont déjà traitées et diffusées en temps réel ; les points blancs indiquent les stations existantes dont les données seront centralisées à La Réunion pour y être traitées et diffusées à partir de 2017 ; les points et triangles verts indiquent les stations GPS et les stations météorologiques installées en 2017 dans le cadre du programme. L'emprise du modèle Arome Indien est également indiquée.

7



# Recherche et aéronautique

Dans le cadre du programme SESAR (volet technologique du Ciel Unique Européen), Météo-France a activement contribué en 2016 aux derniers travaux de la première partie de ce programme, en apportant en plus des prototypes de nouveaux services MET, une expertise et un savoir-faire qui ont permis le bon déroulement de plusieurs exercices de démonstration du programme et contribué à leur succès. L'établissement est maintenant amené à participer au déploiement de ces nouveaux services MET, y compris le service conforme au SWIM de mise à disposition de l'information MET auprès des usagers aéronautiques appelé MET-GATE. La recherche sur les phénomènes météorologiques pouvant avoir un impact sur l'aviation se poursuit via les travaux sur les cristaux de glace à haute altitude, sur les traînées de condensation et sur les orages. L'année 2016 a aussi vu le déroulement de plusieurs campagnes de mesure, par exemple en Afrique ou sur le Nord Atlantique, impliquant des avions de recherche du réseau EUFAR. Ainsi l'aviation se met au service de la recherche météorologique, avec succès.

1

## Les avions au service de la recherche météorologique

### Transfert technologique au sein d'EUFAR, le réseau de la recherche aéroportée en Europe

Une nouvelle et stimulante activité liée au transfert technologique a été entreprise par EUFAR dans son contrat actuel financé au titre du 7<sup>e</sup> programme-cadre de l'UE (2014-2018). Dirigé par ONERA, un partenaire EUFAR, cette activité a pour objectif de soutenir le transfert de technologies entre les experts de mesures aéroportées et l'industrie. Concrètement, l'activité vise à créer un cadre stratégique et un environnement favorisant l'échange et le développement des partenariats privés-publics afin de moderniser et de transformer des instruments, méthodes et logiciels en produits innovants et utiles pendant la durée de vie du projet et au-delà.

EUFAR a entrepris cette activité sur la base du volontariat, avant même que cela ne devienne une requête forte de l'UE pour investir plus et mieux dans la recherche et l'innovation afin d'améliorer la compétitivité internationale et la

capacité d'innovation en Europe. L'accent mis sur la transformation des résultats de recherche en produits/services commercialisables entraînera des impacts socio-économiques, y compris en abordant des enjeux environnementaux et sociétaux (ex. changement climatique, pollution et croissance économique). Ceci permettra également à l'industrie de disposer de nouveaux canaux d'accès aux technologies de pointe et assurera la continuité du financement public de la recherche. D'autre part, pour obtenir un financement dans le cadre du programme H2020 et au-delà, l'UE a rendu obligatoire d'incorporer une forte composante de transfert technologique, quel que soit le domaine scientifique. Malgré beaucoup d'attente au début du contrat EUFAR, le démarrage d'activité a pris plus de temps que prévu et l'activité reste confrontée à un certain nombre de difficultés

principalement à la nouveauté de la tâche et à la résistance des scientifiques. À ce jour, un guide dédié aux scientifiques a été élaboré pour présenter des stratégies visant à introduire des technologies sur les marchés potentiels. Une réunion a eu lieu avec des scientifiques EUFAR afin de partager de bonnes pratiques en matière de transfert de connaissances, gestion des DPI, contrats R&D, etc., et de faciliter par la suite l'interaction avec l'industrie. De plus, parmi les technologies innovantes développées par les laboratoires au sein de la communauté EUFAR, 12 ont été sélectionnées et seront présentées à l'industrie lors d'une réunion extraordinaire visant à promouvoir le dialogue entre les scientifiques et l'industrie et tracer la voie à un ou deux partenariats prometteurs avant la fin du projet.

2

### DACCIWA : mieux comprendre les impacts de la pollution en Afrique de l'Ouest

Le programme DACCIWA, financé par l'Union Européenne s'intéresse aux liens entre météorologie, climat et pollution de l'air en Afrique de l'Ouest, de la Côte d'Ivoire au Nigéria. Il permet pour la première fois à des scientifiques d'étudier intégralement les impacts des émissions naturelles et anthropiques (émises par les activités humaines) sur l'atmosphère de cette région, ainsi que sur la santé des populations, grâce à une campagne de terrain de grande ampleur en juin et juillet 2016.

L'ATR 42 exploité par le Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement SAFIRE (CNRS/Météo-France/CNES) est l'un des 3 avions de recherche ayant

travaillé de manière coordonnée au-dessus des pays du golfe de Guinée, en complément de nombreux équipements sol. Basé à Lomé au Togo, il embarquait plus de deux tonnes de matériel de mesures in situ (dont 3 spectromètres de masse différents) et de télédétection. L'ATR 42 a ainsi réalisé plus de 80 heures de vols scientifiques, et grâce à l'expertise des personnels des laboratoires LaMP/OPGC, du CNRM mais aussi du LISA, LATMOS et LSCE (tous trois de l'IPSL), de nombreuses données ont été collectées.

Cette campagne aéroportée a permis de documenter la composition chimique de l'atmosphère en amont et en aval des sources de

pollution et d'étudier son impact sur les propriétés nuageuses. Elle a également renseigné sur les sources de pollution régionales comme les feux de biomasse ou les poussières désertiques. Les chercheurs vont maintenant analyser ces données afin de proposer un schéma explicatif de l'interaction entre chimie atmosphérique, aérosols, formation et dissipation des nuages bas, bilan radiatif et précipitations afin d'améliorer les modèles météorologiques, de climat et de qualité de l'air.

3

Recherche météorologique et aéronautique.



1



2

Exposition de la sonde ALIDS, pépite RTI à la Tech Day de Normandie AeroEspace, Rouen, France, 24 novembre 2015. ALIDS figure parmi les 12 technologies sélectionnées pour présentation à l'industrie dans le cadre de l'activité EUFAR dédiée au transfert technologique. De gauche à droite sur la photo - Pascal Lemaitre (IRSN), chercheur principal ALIDS Emmanuel Porcheron (IRSN), coordinateur du projet EUFAR Élisabeth Gérard (Météo-France) et Marc Brunel (CORIA).



a

3

(a) : Le laboratoire volant ATR 42 en préparation avant un vol, Lomé, Togo.  
Crédit : Arnaud MANSAT / CNRS ULISSE.



b

(b) : Vérification du bon fonctionnement des instruments à bord de l'ATR 42 avant un vol.  
Crédit : Arnaud MANSAT / CNRS ULISSE.

## EPATAN-NEAREX : participation franco-norvégienne en Islande à la campagne internationale NAWDEX

L'expérience NAWDEX (North Atlantic Waveguide Downstream and impact Experiment), qui a eu lieu de mi-Septembre à mi-Octobre 2016, est la plus importante campagne internationale dédiée à l'étude des perturbations atmosphériques dans l'Atlantique Nord depuis près de 20 ans et la campagne FASTEX en 1997. NAWDEX s'intéresse aux processus thermodynamiques à fine échelle au sein de ces perturbations, et notamment au sein des « bandes transporteuses d'air chaud », qui ne sont pas forcément bien représentés dans les modèles et sont sources d'incertitude dans les prévisions météorologiques à courte et moyenne échéance.

La composante aéroportée française y a participé du 28 septembre au 17 octobre 2016, période au cours de laquelle le Falcon 20 de SAFIRE, basé en Islande à Keflavik, a effectué 14 vols pour les équipes scientifiques françaises (LATMOS, LA, LaMP, LMD et Météo-France) et norvégiennes (Météo norvégienne, Univ. Bergen, Univ. Oslo). Le DLR allemand engageait pour sa part deux avions, un Falcon 20 et le Gulfstream5 « HALO » dans la campagne NAWDEX. Le BAE146 britannique du FAAM a lui aussi participé à un vol coordonné avec les avions français et allemands, en préparation de mesures spatiales futures (ICI sur MetOp - Eumetsat).

Les mesures faites pendant les vols du F20 de SAFIRE visaient à satisfaire les objectifs de deux projets. D'un côté, EPATAN, financé par l'ESA et

le CNES, prépare la mission spatiale « Earthcare » (forçage radiatif des nuages et des aérosols), et ADM-Aeolus (dynamique atmosphérique), notamment en constituant un jeu de données unique de mesures de télédétection active à l'aide des instruments RASTA (radar 95 GHz) et LNG (LIDAR 355 nm). De l'autre côté, NEAREX, sélectionné par EUFAR et porté par une équipe norvégienne, vise à mieux comprendre les masses d'air appelées « rivières atmosphériques » qui transportent de la chaleur et de l'humidité des régions subtropicales vers de plus hautes latitudes et peuvent être à l'origine de précipitations intenses sur les terres. Des largages de drop-sondes ont permis de compléter le jeu de données par des mesures in-situ, envoyées en direct au système mondial de télécommunication (SMT).

En synergie avec la campagne NAWDEX, on a pu ainsi échantillonner un large ensemble de nuages et de situations caractéristiques des latitudes moyennes, tout en comparant les mesures avec celles d'instruments similaires embarqués dans les autres avions participants. Grâce à l'excellente fiabilité de l'avion et des instruments, tout comme à l'investissement des personnels, l'équipe française a assuré la totalité des vols prévus, dans des conditions parfois difficiles.

4

## L'adaptation aéroportée d'un instrument de mesure d'humidité

Le capteur permettant d'obtenir une mesure d'humidité rapide (Lyman  $\alpha$ ) n'est plus maintenable. Le challenge est de le remplacer par un capteur plus récent avec le moins de certification possible dans le laps de temps le plus réduit afin de participer à la campagne DACCIWA de l'été 2016.

Afin de limiter au maximum la phase de certification, notamment éviter les vols d'essais, on choisit de conserver l'enveloppe du Lyman  $\alpha$  et remplacer l'électronique de détection interne par une électronique issue d'un capteur vendu par Campbell : le KH20.

Les deux instruments sont basés sur la mesure de l'absorption d'une raie ultra-violette spécifique. Ces deux longueurs d'ondes sont absorbées d'une façon similaire par la vapeur d'eau, ce qui implique que les trajets optiques seront du même ordre de grandeur. L'opération consiste en une adaptation mécanique des émetteur/récepteur du KH20 grâce à des pièces conçues à SAFIRE dans l'enveloppe du Lyman. En parallèle est

menée la phase de certification. Celle-ci est réduite mais nécessaire du fait de l'installation d'un nouvel instrument.

Ensuite, de nombreux tests sont réalisés, tant au sol qu'en vol pour s'assurer de la qualité des mesures et de l'absence de perturbation induite par ce nouvel instrument. Les tests montrent que la mesure contient des informations au-delà de 10 Hz. Actuellement, il est nécessaire de fixer le trajet optique avant chaque vol afin d'éviter la saturation du signal. Lors de DACCIWA l'instrument a volé plus de 100 heures en donnant satisfaction. Dans le futur il est prévu d'installer un moteur pas à pas commandé depuis la cabine afin de faire varier l'écartement du trajet optique pour s'adapter à toutes les situations rencontrées en vol en élargissant la gamme de mesure de l'instrument.

5

## La recherche météorologique au service de l'aviation

### Contributions de Météo-France au programme SESAR

L'année 2016 est l'année de clôture de la première partie du programme SESAR, au cours de laquelle les solutions développées et vérifiées au cours du projet dédié à la météorologie, à savoir le WP11.2, ont contribué aux exercices de validation de certains projets orientés ATM, ou ont fait l'objet d'exercices de démonstration tels que TOPLINK ou la SWIM Global Demo. Les équipes SESAR de Météo-France ont concouru activement à la réussite de ces événements au côté de nos partenaires historiques du projet WP11.2, principalement Thalès, le FMI, le DWD et le UKMO.

Les équipes SESAR de Météo-France ont aussi contribué à l'atelier organisé par EUMETNET avec l'objectif d'informer les membres du GIE sur les travaux réalisés dans le cadre du WP11.2 de SESAR. Il faut enfin ajouter l'évènement de clôture du programme en juin 2016 au cours duquel les solutions 'météo' regroupées sous le concept de 4DWxCube ont encore démontré leur bon niveau de maturité. Ceci a conduit la SESAR JU à inclure, dans le média de communication relatif à tout le programme SESAR, appelé Catalogue des Solutions (<http://www.sesarju.eu/solutions>), la solution 4DWxCube appelée aussi 'Met Information Exchange', sous le numéro 35. Celle-ci est maintenant sur la voie de la mise en opération, via les projets de déploiement SESAR.

Les trois projets de déploiement, soumis par les partenaires EUMETNET dans le cadre de la résolution UE appelée Pilot Common Project (PCP) et de l'appel à projets INEA CEF 2015, et finalisés début 2016, ont été retenus par le SESAR Deployment Manager et feront l'objet d'un cofinancement à hauteur de 50 %. Ces projets ont démarré en octobre 2016 avec une première phase de développement du plan de travail de chacun des projets. L'objectif est de déployer trois services : un service d'information 2D et 3D sur la convection basé sur la composite radar européenne, un service de prévision harmonisée des phénomènes météorologiques impactant le trafic aérien (givrage, turbulence, convection) qui couvre l'Europe de l'Ouest et le service de mise à disposition d'information MET en conformité avec le SWIM (MET-GATE), très attendu par la communauté aéronautique et pour lequel Météo-France sera pilote de projet.

6



4

## L'utilisation du RDT dans le projet HAIC

Le projet européen PCRD7 HAIC 2012-2017 vise à caractériser des conditions environnementales spécifiques à proximité des nuages convectifs qui peuvent conduire à des incidents aéronautiques liés à la phase mixte et au givrage en haute altitude.

Le RDT est un logiciel développé par Météo-France dans le cadre du NWCSAF. Le RDT détecte, suit et caractérise les systèmes convectifs.

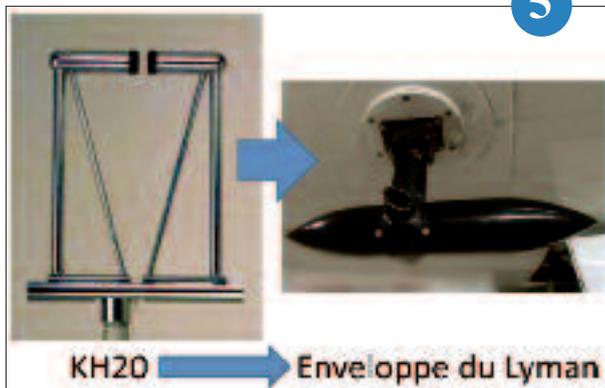
Dans le cadre du projet HAIC, le RDT a été opéré par Météo-France et a fourni pour les différentes campagnes de mesures aéroportées à travers des chaînes de traitement dédiées. Le RDT a été exploité pour différents satellites et domaines: MTSAT pour la première campagne HAIC (Darwin, 2014), MSG pour la seconde (Cayenne, 2015) et Himawari-8 et Meteosat 7 pour la dernière (Darwin / La Réunion, 2016). Le premier objectif était de cibler les zones de convection pour les avions de recherche. Ainsi, le RDT a été utilisé par les prévisionnistes de chaque campagne pour le soutien météorologique au sol. Les sorties de RDT ont également été adaptées pour être envoyées aux avions de recherche grâce au système Planet développé par la société Atmosphère (campagnes 2015 et 2016). Ce développement a permis d'améliorer pour les pilotes la vision des zones convectives environnantes.

Le deuxième objectif était d'étudier avec les données des campagnes de mesures le potentiel du RDT en tant qu'outil de détection des zones de fort contenu en glace (IWC). Des études qualitatives et quantitatives ont fourni des résultats raisonnablement bons, notamment en termes de probabilité de détection. Dans la figure, on note les fortes concentrations en IWC à l'intérieur d'une cellule convective. Le RDT a ainsi atteint le niveau 5 de la procédure TRL utilisée dans le projet HAIC pour évaluer le degré de maturité d'une technologie.

Eu égard à ces bonnes performances de RDT, la dernière version NWCSAF du produit (v2016) comprend un attribut décrivant le risque IWC à l'intérieur de chaque cellule.

### Remerciements :

Ce projet a bénéficié d'un financement du 7<sup>e</sup> PCRD de l'Union européenne en matière de recherche, de développement technologique et de démonstration au titre de l'accord de subvention n° ACP2-GA-2012-314314.



5

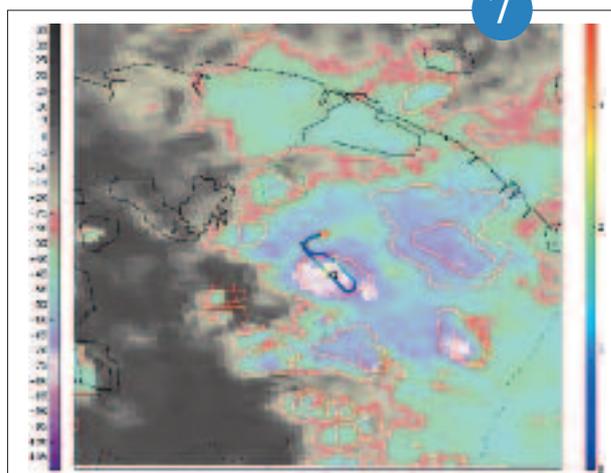
Sur le tarmac de l'aéroport de Keflavik, le Falcon 20 de SAFIRE au premier plan côtoie le Gulfstream HALO (milieu) et le Falcon 20 du DLR (arrière-plan).

◀ Métamorphose du KH20.



6

(a) : Page de couverture du Catalogue des Solutions SESAR.  
(b) : Description de la solution 'MET Information Exchange' dans le Catalogue des Solutions SESAR.



7

◀ Image satellite du 25/5/2015 au dessus de Cayenne dans le canal infrarouge 10.8µm (échelle de température en °C à gauche) avec superposition des cellules nuageuses (en rouge les contours des cellules convectives) et des mesures avions d'IWC (échelle de droite, en g/m³).

## TOPLINK (SESAR) : vers un nouveau système collaboratif de transmission d'informations pour l'aviation

Parmi les projets européens de démonstration du programme SESAR 1 (2009-2016) auxquels Météo-France a activement participé et contribué, le projet TOPLINK fait figure de référence et a permis de tester et de valider un nouveau système collaboratif de partage d'informations, notamment météorologiques, dédiés aux services de la navigation aérienne, aux aéroports, aux compagnies aériennes et à l'aviation générale.

Après 75 jours d'opération tests opérés, au cours de l'été 2016, avec l'aéroport de Paris Charles de Gaulle et le contrôle aérien français, croate et autrichien, 81 jours d'opération avec les compagnies aériennes partenaires (Brussels Airlines, Air France, Hop! et Air Corsica), 84 vols tests réalisés avec les pilotes et 15 000 vols gérés par le personnel au sol de ces mêmes compagnies, l'apport et les bénéfices de ce nouveau système ont pu, à grande échelle, être évalués et validés.

Le projet TOPLINK a ainsi pu démontrer que l'utilisation d'un tel système pouvait améliorer significativement les performances opérationnelles et apporter une aide aux acteurs impliqués dans la gestion d'un vol, pour s'assurer que, même en situation à risque (zone ora-

geuse à éviter par exemple), le vol et la trajectoire de l'avion soient en permanence optimisés, du décollage jusqu'à l'atterrissage de l'appareil, tout en maintenant le niveau de sécurité et de confort des passagers.

TOPLINK a permis notamment une validation effective des nouveaux services MET proposés selon les besoins des usagers aéronautiques. Tous les services météorologiques utilisés durant ces exercices de démonstration ont été développés selon les concepts SWIM et sont dorénavant disponibles sur le portail MET-GATE porté par Météo-France et ses partenaires EUMETNET.

*Les partenaires de TOPLINK : Thales, Airbus, Météo-France, Finnish Meteorological Institute, DWD, Paris Airport, ENAC, DSNA, Croatia Control, Austro Control, Brussels Airlines, Air France, Hop! and Air Corsica.*

Pour en savoir plus :

[www.sesarju.eu/node/2100](http://www.sesarju.eu/node/2100)

<https://www.youtube.com/watch?v=e79ilBPOW5Y>

8

## Quels progrès pour la prévision de COTRAS ?

La prévision de traînées de condensation (COTRAS) est d'intérêt majeur dans le domaine de la Défense (recherche de furtivité des avions en vol). Les prévisions actuellement utilisées en France n'ont pas évolué depuis une quinzaine d'années. Sur demande de la DGA qui recherche une amélioration à court terme de ces prévisions, Météo-France et le CERFACS ont conduit des recherches bibliographiques de l'état de l'art : une revue de l'existant en France et à l'étranger, dans les domaines civil et défense, a été réalisée. Une analyse, parmi les solutions existantes a ensuite été menée afin de définir quelles sont celles d'intérêt pour une utilisation pour la Défense.

La plupart des solutions actuelles opérationnelles sont toujours basées sur un critère dit de Schmidt Appleman, datant de 1953 et revu en 1996. Une voie d'amélioration est de permettre la paramétrisation de certains des facteurs de ce critère en fonction des caractéristiques de l'avion considéré (facteur de COTRAS) : les travaux ont abouti à la spécification d'un algorithme plus complet. Par ailleurs, la communauté scientifique travaille sur des modèles plus complexes dont l'application opérationnelle n'est pas envisagée avant plusieurs années.

Des recommandations d'études complémentaires et de mise en place de campagnes de mesures ont été formulées, avec des propositions de suites éventuelles à donner sur demande et financement DGA.

Enfin, rappelons que les COTRAS contribuent à l'effet de serre, et que leur prévision pourrait devenir un enjeu pour le trafic aérien d'ici quelques années.

9

## SESAR SWIM GLOBAL DEMO 2016 : une démonstration à échelle mondiale du système TOPLINK et du prototype MET-GATE, porté par Météo-France

La SESAR SWIM GLOBAL DEMONSTRATION, organisée en 2016 à Rome (8 et 9 juin), est un événement réunissant plus d'une centaine d'acteurs du monde de l'Air Traffic Management (ATM) et une quarantaine d'organisations mondiales, avec pour objectif principal de démontrer les capacités globales d'interopérabilité du concept SWIM (System Wide Information Management), conformément aux plans régionaux (European ATM Master Plan) et aux dispositions de l'OACI.

Le concept SWIM consiste à partager, au meilleur moment, les informations aéronautiques et météorologiques les plus pertinentes entre tous les acteurs et les gestionnaires du trafic aérien. Ce concept innovant représente une rupture dans la façon dont la gestion de l'information est effectuée dans le domaine de l'ATM et devrait permettre de gérer efficacement l'augmentation attendue du trafic aérien mondial dans les années à venir.

Dans le cadre de cet événement, le système TOPLINK et le prototype 4DWeatherCube MET-GATE\* d'Eumetnet, porté par Météo-France, ont été étendus de l'Europe vers les Etats-Unis, le Brésil, l'Afrique, l'Europe, le Moyen-Orient et

l'Australie et ont fait l'objet d'exercices, grandeur nature, sur des vols simulés, afin de démontrer leur capacité à fonctionner à l'échelle mondiale. La valeur ajoutée qui en résulte a pu être ainsi démontrée pour différents profils d'utilisateurs comme les compagnies aériennes (Brussels Airlines, TAP Portugal et Qantas), les Services de la Navigation Aérienne (ACC de Vienne) ou encore les aéroports (Paris CDG).

(\*) Développé dans le cadre de SESAR, le prototype 4DWeatherCube MET-GATE d'Eumetnet, porté par Météo France, avec le soutien de MET Office, du DWD (Deutscher Wetterdienst) et de THALES, est un portail d'accès unique à l'information météorologique pour l'aviation.

Pour en savoir plus :

<http://www.sesarju.eu/newsroom/events/sesar-swim-global-demonstration>

10



(a) : Exemple d'informations météorologiques (convection) visibles depuis le cockpit sur une tablette tactile (Copyright SESAR-TOPLINK-2016).  
 (b) : Exemple d'informations météorologiques (convection) visibles depuis le poste FMP des Services de la Navigation Aérienne (copyright SESAR-TOPLINK-2016).

Trainées de condensation.



Le MET-GATE a été testé lors d'exercices à échelle mondiale à l'occasion de la SESAR SWIM GLOBAL DEMO à Rome du 8 au 9 juin 2016. Participation de Météo-France, MET Office et DWD.

# Annexes

## Liste des publications scientifiques 2016

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

- Artinyan, E., Vincendon B., Kroumova K, Nedkov N, Tsarev P., Balabanova S., Koshinchanov G. : Flood forecasting and alert system for Arda River basin. *Journal of Hydrology*, Volume : 541, Special Issue : SI, Pages : 457-470, Part : A, Doi : 10.1016/j.jhydrol.2016.02.059. Published : OCT 2016.
- Arbogast P., O. Pannekoucke, L. Raynaud, R. Lalanne and E. Mémén : Object-oriented processing of CRM precipitation forecasts by stochastic filtering. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 700, Pages : 2827-2838, Part : PT A, Published : OCT 2016.
- Augros, C., O. Caumont, V. Ducrocq, N. Gaussiat, P. Tabary, 2016: Comparisons between S, C, and X band polarimetric radar observations and convective-scale simulations of HyMeX first special observing period. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 347-362, Doi : 10.1002/qj.2572. Published : AUG 2016.
- Avanzi, F., C. De Michele, S. Morin, C. M. Carmagnola, A. Ghezzi and Y. Lejeune, 2016 : Model complexity and data requirements in snow hydrology: seeking a balance in practical applications. *Hydrological Processes*, Doi: 10.1002/hyp.10782, Published: FEB 2016.
- Azaïs J.-M., and A. Ribes, 2015 : Multivariate spline analysis for multiplicative models: Estimation, testing and application to climate change. *Journal of Multivariate Analysis*, Volume: 144, Pages: 38-53, Doi : 10.1016/j.jmva.2015.09.026. Published : FEB 2016.
- Batté, L. And M. Déqué, 2016 : Randomly correcting model errors in the ARPEGE-Climate v6.1 component of CNRM-CM : applications for seasonal forecasts. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 6, Pages : 2055-2076, Doi : 10.5194/gmd-9-2055-2016. Published : 2016.
- Bazin, L., A. Landais, V. Masson-Delmotte, C. Ritz, G. Picard, E. Capron, J. Jouzel, M. Dumont, M. Leuenberger and F. Prié, 2016 : Phase relationships between orbital forcing and the composition of air trapped in Antarctic ice cores. *Climate of the Past*, Volume: 12, Pages: 729-748, Doi: 10.5194/cp-12-729-2016, Published : MAR 2016.
- Beck, J., F. Bouttier, L. Wiegand, C. Gebhardt, C. Eagle, N. Roberts : Development and verification of two convection-allowing multi-model ensembles over Western Europe. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 700, Pages : 2808-2826, Part: PT A, Doi : 10.1002/qj.2870. Published : OCT 2016.
- Bergot T., 2016 : Large-eddy simulation of the dissipation of radiation fog. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, Volume : 142, Issue : 695, Pages : 1029-1040, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2706 Published : JAN 2016.
- Berthou, S., Mailler, S., Drobinski, P., Arsouze, T., Bastin, S., Béranger, K., Flaounas, E., Lebeauin Brossier, C., Somot, S. and Stéfanon, M. (2016), Influence of submonthly air-sea coupling on heavy precipitation events in the Western Mediterranean basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 453-471, Doi : 10.1002/qj.2717. Published : AUG 2016.
- Besson, L., Caumont, O., Goulet, L., Bastin, S., Menut, L., Bresson, E., Fourrié, N., Fabry, F. and Parent du Châtelet, J., 2016: Comparison of real-time refractivity measurements by radar with automatic weather stations, AROME-WMED and WRF forecast simulations during SOP1 of the HyMeX campaign. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 138-152, Doi : 10.1002/qj.2799. Published : AUG 2016.
- Bianchi, E., Villalba, R., Viale, M., Couvreur, F., Marticorena, R, 2016 : New Precipitation and Temperature Grids for Northern Patagonia: Advances in Relation to Global Climate Grids. *Journal of Meteorological Research*, Volume : 30, Issue : 1, Pages : 38-52, Article Number : 2095-6037(2016)30:1<38:NPATGF>2.0.TX;2-C, Doi : 10.1007/s13351-015-5058-y. Published : FEB 2016.
- Bock O, P. Bosser, R. Pacione, M. Nuret, N. Fourrié and A. Parracho, 2016 : A high quality reprocessed ground-based GPS dataset for atmospheric process studies, radiosonde and model evaluation, and reanalysis of HyMeX Special Observing Period. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 56-71, Doi : 10.1002/qj.2701. Published : AUG 2016.
- Boisserie, M., B. Decharme, L. Descamps, and P. Arbogast, 2015 : Land surface initialization strategy for a global reforecast dataset. *Quarterly Journal of the Royal meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 695, Pages : 880-888, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2688. Published : JAN 2016.
- Boisserie M., L. Descamps, P. Arbogast : "Calibrated forecasts of extreme wind-storms using EFI and SOT." *Weather and Forecasting*, Volume : 31, Issue : 5, Pages : 1573-1589, Doi : 10.1175/WAF-D-15-0027.1. Published : OCT 2016.
- Boone, A., Y. Xue, F. De Sales, R. Comer, S. Hagos, S. Mahanama, K. Schiro, G. Song, G. Wang and C. R. Mechoso, 2016 : The regional impact of Land-Use Land-cover Change (LULCC) over West Africa from an ensemble of global climate models under the auspices of the WAMME2 project. *Climate Dynamics*, Volume : 47, Issue : 11, Pages : 3547-3573, Doi : 10.1007/s00382-016-3252-y. Published : DEC 2016
- Boucher O., V. Bellassen, H. Benveniste, P. Ciais, P. Criqui, C. Guivarch, H. Le Treut, S. Mathy and R. Séférian, 2016 : In the wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research, *Proceedings of The National Academy of Science of The United States of America*, Volume : 113, Issue : 27, Pages : 7287-7290, Doi : 10.1073/pnas.1607739113. Published : JUL 5 2016.
- Boullot, N., Rabier, F., Langland, R., Gelaro, R., Cardinali, C., Guidard, V., Bauer, P. and Doerenbecher, A. : Observation impact over the southern polar area during the Concordiasi field campaign. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 695, Pages : 597-610, Part : B. Doi : 10.1002/qj.2470. Published : JAN 2016.
- Bouniol, D., R. Roca, T. Fiolleau, and E. Poan, 2016 : Macrophysical, Microphysical, and Radiative Properties of Tropical Mesoscale Convective Systems over Their Life Cycle. *Journal of Climate*, Volume : 29, Issue : 9, Pages : 3353-3371, Doi : 10.1175/JCLI-D-15-0551.1. Published : MAY 2016.
- Bouttier F., L. Raynaud, O. Nuissier and B. Ménétrier, 2016: Sensitivity of the AROME ensemble to initial and surface perturbations during HyMeX. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*. Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 390-403, Doi : 10.1002/qj.2622. Published : AUG 2016.
- Brognez, H., S. English, J. F. Mahfouf, A. Behrendt, W. Berg, S. Boukabara, S. A. Buehler, P. Chambon, A. Gambacorta, A. Geer, W. Ingram, E. R. Kursinski, M. Matricardi, T. Odintsova, V. H. Payne, P. Thorne, M. Tretyakov, and J. Wang. A review of sources of systematic errors and uncertainties in water vapor information derived from observations at 183GHz. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume : 9, Issue : 5, Pages : 2207-2221, Doi : 10.5194/amt-9-2207-2016. Published : 2016.
- Brousseau, P., Y. Seity, D. Ricard and J. Leger : Improvement of the convective activity forecast with the AROME-France system. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 699, Pages : 2231-2243, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2822. Published : JUL 2016.
- Butler, A., A. Arribas, M. Athanassiadou, J. Baehr, N. Calvo, A. Charlton-Perez, M. Déqué, D. I. V. Domeisen, K. Fröhlich, H. Hendon, Y. Imada, M. Ishii, M. Iza, A. Yu. Karpechko, A. Kumar, C. MacLachlan, W. J. Merryfield, W. A. Müller, A. O'Neill, A. Scaife, J. Scinocca, M. Sigmond, T. N. Stockdale and T. Yasuda, 2016 : The Climate-system Historical Forecast Project : Do stratosphereresolving models make better seasonal climate predictions in boreal winter ? *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 696, Pages : 1413-1427, Part : A, Doi : 10.1002/qj.2743. Published : APR 2016.
- Canut G., F. Couvreur, M. Lothon, D. Legain, B. Piguet, A. Lampert and E. Moulin, 2016 : Turbulence measurements with a tethered balloon. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume : 9, Issue : 9, Pages : 4375-4386, Doi : 10.5194/amt-9-4375-2016. Published : SEP 6 2016.

- Cassou, C. and J. Cattiaux (2016), Disruption of the European climate seasonal clock in a warming world. *Nature Climate Change*, Volume : 6, Issue : 6, Pages : 589-594, Doi : 10.1038/nclimate2969. Published : JUN 2016.
- Cattiaux, J., Y. Peings, D. Saint-Martin, N. Trouchechout, and S. J. Vavrus, 2016 : Sinuosity of mid-latitude atmospheric flow in a warming world, *Geophysical Research Letters*, Volume : 43, Issue : 15, Pages : 8259-8268, Doi:10.1002/2016GL070309. Published : AUG 16 2016.
- Caumont, O., D. Cimini, U. Löhnert, L. Alados-Arboledas, R. Bleisch, F. Buffa, M. E. Ferrario, A. Haefele, T. Huet, F. Madonna et G. Pace, 2016 : Assimilation of humidity and temperature observations retrieved from ground-based microwave radiometers into a convective-scale NWP model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume : 142, Issue : 700, Pages : 2692–2704, Part : PTA, Doi : 10.1002/qj.2860. Published : OCT 2016
- Chaboureau, J.-P., Flamant, C., Dauhut, T., Kochara, C., Lafore, J.-P., Lavaysse, C., Marnas, F., Mokhtari, M., Pelon, J., Reinares Martínez, I., Schepanski, K., and Tulet, P, 2016 : Fennec dust forecast intercomparison over the Sahara in June 2011. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16, Issue : 11, Pages : 6977-6995, Doi : 10.5194/acp-16-6977-2016. Published : 2016.
- Charrois, L., E. Cosme, M. Dumont, M. Lafaysse, S. Morin, Q. Libois and G. Picard, 2016 : On the assimilation of optical reflectances and snow depth observations into a detailed snowpack model. *The Cryosphere*, Volume : 10, Pages: 1021-1038, Doi: 10.5194/tc-10-1021-2016, Published : MAY 2016.
- Chazette, P., Flamant, C., Shang, X., Totems, J., Raut, J.-C., Doerenbecher, A., Ducrocq, V., Fourrié, N., Bock, O. and Cloché, S., 2016: A multi-instrument and multi-model assessment of atmospheric moisture variability over the western Mediterranean during HyMeX. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*. Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 7-22, Doi : 10.1002/qj.2671. Published : AUG 2016.
- Chemel, C., G. Arduini, C. Staquet, Y. Largeron, D. Legain, D. Tzanos, A. Paci : Valley heat deficit as a bulk measure of wintertime particulate air pollution in the Arve River Valley. *Atmospheric Environment*, Volume : 128, Pages : 208-215, Doi : 10.1016/j.atmosenv.2015.12.058. Published : MAR 2016.
- Coronel, B., D. Ricard, G. Rivièrè and P. Arbogast, 2016 : Cold-conveyor belt jet, sting jet and slantwise circulations in idealized simulations of extratropical cyclones – *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 697, Pages : 1781-1796, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2775. Published : APR 2016.
- Couto, F., V. Ducrocq, R. Salgado, M. J. Costa, 2016: Numerical simulations of significant orographic precipitation in Madeira island. *Atmospheric Research*, Volume: 169, Pages: 102-112, Part: A, Doi : 10.1016/j.atmosres.2015.10.002. Published : MAR 1 2016.
- Couvreur F., E. Bazile, G. Canut, Y. Seity, M. Lothon, F. Lohou, F. Guichard and E. Nilsson, 2016 : Boundary-layer turbulent processes and mesoscale variability represented by numerical weather prediction models during the BLLAST campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16, Issue : 14, Pages: 8983-9002, Doi : 10.5194/acp-16-8983-2016. Published : 2016.
- Danabasoglu, G, et al., 2016 : North Atlantic Simulations in Coordinated Ocean-ice Reference Experiments phase II (CORE-II). Part II : Inter-Annual to Decadal Variability, *Ocean Modelling*, Volume : 97, Pages : 65-90, Doi : 10.1016/j.ocemod.2015.11.007. Published : JAN 2016.
- De Angelis, F., Cimini, D., Hocking, J., Martinet, P., and Kneifel, S. : RTTOV-gb – adapting the fast radiative transfer model RTTOV for the assimilation of ground-based microwave radiometer observations. *Geosci. Model Dev.*, 9, 2721-2739, Doi : 10.5194/gmd-9-2721-2016. Published : 19 Aout 2016.
- Decharme, B., E. Brun, A. Boone, C. Delire, P. Le Moigne and S. Morin, 2016 : Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *The Cryosphere*, Volume: 10, Pages: 853-877, Doi:10.5194/tc-10-853-2016, Published : APR 2016.
- Dedieu, J.-P., C. Bradley Z., S. Bigot, P. Sirguey, V. Vionnet and P. Choler, 2016 : On the importance of high-resolution time series of optical imagery for quantifying the effects of snow cover duration on alpine plant habitat. *Remote Sensing*, Volume : 8, Issue : 6, Number : 481, Doi : 10.3390/rs.8060481, Published : 2016.
- Degrauwe, D., Y. Seity, F. Bouyssel, and P. Termonia, 2016 : Generalization and application of the flux-conservative thermodynamic equations in the AROME model of the ALADIN system. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 6, Pages : 2129-2142, Doi : 10.5194/gmd-9-2129-2016. Published : 2016.
- Dehecq, A., R. Millan, E. Berthier, N. Gourmelen, E. Trouvé and V. Vionnet, 2016 : Elevation changes inferred from TanDEM-X data over the Mont-Blanc area: Impact of the X-band interferometric bias. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Volume: 9, Issue: 8, Pages: 3870-3882, Doi: 10.1109/JSTARS.2016.2581482, Published : AUG 2016.
- Denjean, C., Cassola, F., Mazzino, A., Triquet, S., Chevaillier, S., Grand, N., Bourriane, T., Mombouisse, G., Sellegri, K., Schwarzenbock, A., Freney, E., Mallet, M., and Formenti, 2016 : Size distribution and optical properties of mineral dust aerosols transported in the western Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16, Issue : 2, Pages : 1081-1104, Doi : 10.5194/acp-16-1081-2016. Published : 2016.
- Desroziers, G., E. Arbogast and L. Berre : Improving spatial localization in 4D-EnVar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 701, Pages : 3171-3185, Doi : 10.1002/qj.2898. Published : octobre : 2016.
- Di Biagio C., P. Formenti, L. Doppler, C. Gaimoz, N. Grand, G. Ancellet, J.-L. Attié, S. Bucci, P. Dubuisson, F. Fierli, M. Mallet, and F. Ravetta, 2016 : Continental pollution in the Western Mediterranean basin : large variability of the aerosol single scattering albedo and influence on the direct shortwave radiative effect. *Atmospheric Chemistry Physics*, Volume : 16, Issue : 16, Pages : 10591-10607, Doi : 10.5194/acp-16-10591-2016. Published : AUG 25 2016.
- Di Girolamo, P., C. Flamant, M. Cacciani, E. Richard, V. Ducrocq, D. Summa, D. Stelitano, N. Fourrié, F. Saïd, 2016 : Observation of low-level wind reversals in the Montpellier region and over the Gulf of Lion and their impact on the water vapour variability. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 153-172, Doi : 10.1002/qj.2767. Published : AUG 2016.
- Doell, P., H. Douville, A. Güntner, H. Müller Schmied, Y. Wada, 2015: Modelling freshwater systems at the global scale: Challenges and prospects. *Surveys in Geophysics*, Volume : 37, Issue : 2, Special Issue : SI, Pages: 195-221, Doi:10.1007/s10712-015-9343-1. Published : MAR 2016.
- Ingleby, B., P. Pauley, A. Kats, J. Ator, D. Keyser, A. Doerenbecher, E. Fucile, J. Hasegawa and E. Toyoda, T. Kleinert, W. Qu, J. St James, W. Tennant, R. Weedon. Progress towards high-resolution, real-time radiosonde reports. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume : 97, Issue : 11, Pages : 2149-2161, Doi : 10.1175/BAMS-D-15-00169.1. Published : NOV 2016.
- Doerenbecher, A., C. Basdevant, Ph. Drobinski, C. Fesquet, F. Bernard, P. Durand, Ph. Cocquerez, N. Verdier and A. Vargas: Low-atmospheric drifting balloons : platforms for environment monitoring and prediction. *Bulletin of The American Meteorological Society*, Volume : 97, Issue : 9, Pages : 1583+, Doi : 10.1175/BAMS-D-14-00182.1. Published : SEP 2016.
- Douville H., J. Cattiaux, J. Colin, E. Krug, and S. Thao, 2016 : Midlatitude daily summer temperatures reshaped by soil moisture under climate change. *Geophysical Research Letters*, Volume : 43, Issue : 2, Pages : 812-818, Doi: 10.1002/2015GL066222. Published : JAN 28 2016.
- Driss, B., T. Bergot, M. El Khlifi, 2016 : Local meteorological and large-scale weather characteristics of fog over the Grand Casablanca region, Morocco. *Journal of applied meteorology and Climatology*, Volume : 55, Issue : 8, Pages : 1731-1745, Doi : 10.1175/JAMC-D-15-0314.1. Published : AUG 2016.
- Ducrocq, V., Davolio, S., Ferretti, R., Flamant, C., Santaner, V. H., Kalthoff, N., Richard, E. and Wernli, H., 2016 : Introduction to the HyMeX Special Issue on 'Advances in understanding and forecasting of heavy precipitation in the Mediterranean through the HyMeX SOP1 field campaign'. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 1-6, Doi : 10.1002/qj.2856. Published : AUG 2016.
- Duffour, C., Lagouarde, JP, Olioso, A, Demarty, J, Roujean, JL, 2016 : Driving factors of the directional variability of thermal infrared signal in temperature regions . *Remote Sensing of Environment*, Volume : 177, Pages : 248-264, Doi : 10.1016/j.rse.2016.02.024. Published : MAY 2016.
- Duffourg F., O. Nuissier, V. Ducrocq, C. Flamant, P. Chazette, J. Delanoë, A. Doerenbecher, N. Fourrié, P. Di Girolamo, C. Lac, D. Legain, M. Martinet, F. Saïd and O. Bock, 2016: Offshore deep convection initiation and maintenance during IOP16a Offshore deep convection initiation and maintenance during HyMeX IOP 16a heavy precipitation event. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 259-274, Doi : 10.1002/qj.2725. Published : AUG 2016.
- Emery, C., S. Biancamaria, A. Boone, P.-A. Garambois, B. Decharme, S. Ricci and M. Rochoux, 2016 : Temporal variance-based sensitivity analysis of the large scale hydrological model ISBA-TRIP: Application on the Amazon basin. *J. Hydrometeorol. Journal of Hydrometeorology*, Volume : 17, Issue : 12, Pages : 3007-3027, Doi : 10.1175/JHM-D-16-0050.1. Published : DEC 2016.
- Estournel, C., P. Testor, I. Taupier-Letage, M.-N. Bouin, L. Coppola, P. Durand, P. Conan, A. Bosse, P.-E. Brilouet, L. Beguery, S. Belamari, K. Béranger, J. Beuvier, D. Bourras, G. Canut, A. Doerenbecher, X. Durrieu de Madron, F. D'Ortenzio, P. Drobinski, V. Ducrocq, N. Fourrié, H. Giordani, L. Houpert, L. Labatut, C. Lebeaupin Brossier, M. Nuret, L. Prieur, O. Roussot, L. Seyfried, S. Somot, 2016: HyMeX-SOP2: the field campaign dedicated to dense water formation in the northwestern Mediterranean. *Oceanography*, Volume : 29, Issue : 4, Special Issue : SI, Pages : 196-206, Doi : 10.5670/oceanog.2016.94. Published : DEC 2016.

- Evan, A.T., Flamant, C., Gaetani, M., Guichard, F., 2016 : The past, present and future of African dust. *Nature*, Volume : 531, Issue : 7595, Pages: 493+, Doi : 10.1038/nature17149. Published : MAR 24 2016.
- Flaounas, E., A. Di Luca, P. Drobinski, S. Mailler, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeauin Brossier, 2016 : Cyclones contribution to the Mediterranean Sea water budget. *Climate Dynamics*, Volume: 46, Issue: 3-4, Pages: 913-927, Doi : 10.1007/s00382-015-2622-1. Published : FEB 2016.
- Fuckar, N. S., V. Guemas, N. C. Johnson, F. Massonnet, and F. J. Doblas-Reyes, 2015 : Clusters of interannual sea ice variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dynamics*, Volume : 47, Issue : 5-6, Page : 1527-1543, Doi : 10.1007/s00382-015-2917-2. Published : SEP 2016.
- Giorgi, F., C. Torma, E. Coppola, N. Ban, C. Schär and S. Somot, 2016 : Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, Volume : 9, Issue : 8, Pages : 584+, Doi : 10.1038/ngeo2761. Published : AUG 2016.
- Goessling, H., T. Jung, S. Klebe, J. Baeseman, P. Bauer, P. Chen, M. Chevallier, R. Dole, N. Gordon, P. Ruti, A. Bradley, D. Bromwich, B. Casati, D. Chechin, J. Day, F. Massonnet, B. Mills, I. Renfrew, G. Smith, and R. Tatusko, 2015 : Paving the Way for the Year of Polar Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Volume : 97, Issue : 4, Pages : ES85-ES88, Doi : 10.1175/BAMS-D-15-00270.1. Published : APR 2016.
- Guemas, V., E. Blanchard-Wrigglesworth, M. Chevallier, J.J. Day, M. Déqué, F. J. Doblas-Reyes, N. Fučkar, A. Germe, E. Hawkins, S. Keeley, T. Koenigk, D. Salas y Méliá, S. Tietsche, 2015 : A review on Arctic sea ice predictability and prediction on seasonal-to-decadal timescales. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 695, Pages : 546-561, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2401. Published : JAN 2016.
- Guerbette, J., J.-F. Mahfouf and M. Plu, 2016 : Towards the assimilation of allsky microwave radiances from the SAPHIR humidity sounder in a limited area NWP model over tropical regions. *TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography*, Volume : 68, Article Number : 28620, Doi : 10.3402/tellusa.v68.28620. Published : 2016.
- Guth, J., B. Josse, V. Maréchal, M. Joly, and P. D. Hamer, 2016 : First implementation of secondary inorganic aerosols in the MOCAGE version 2.15.0 chemistry transport model. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 1, Pages : 137-160, Doi : 10.5194/gmd-9-137-2016. Published : 2016.
- Hagenmuller, P. and T. Pilloix, 2016 : A new method for comparing and matching snow profiles, application for profiles measured by penetrometers. *Frontiers in Earth Science*, Volume: 4, Doi: 10/3389/feart.2016.00052, Published : MAY 2016.
- Hagenmuller, P., M. Margret, G. Chambon and M. Schneebeli, 2016 : Sensitivity of snow density and specific surface area measured by microtomography to different image processing algorithms. *The Cryosphere*, Volume: 10, Pages: 1039-1054, Doi: 10.5194/tc-10-1039-2016, Published : MAY 2016.
- Hamon, M., J. Beuvier, S. Somot, J.M. Lellouche, E. Greiner, G. Jordà, M.N. Bouin, T. Arsouze, K. Béranger, F. Sevault, C. Dubois, M. Drévillon, and Y. Drillet, 2016 : Design and validation of MEDRYS, a Mediterranean Sea reanalysis over 1992-2013. *Ocean Science*, Volume : 12, Issue : 2, Pages : 577-599, Doi : 10.5194/os-12-577-2016. Published : 2016 12.
- Haughton, N., G. Abramowitz, A. J. Pitman, D. Or, M. J. Best, H. R. Johnson, G. Balsamo, A. Boone, M. Cuntz, B. Decharme, P. A. Dirmeyer, J. Dong, M. Ek, Z. Guo, V. Haverd, B. J. van den Hurk, G. S. Nearing, B. Pak, C. Peters-Lidard, J. A. Santanello Jr., L. Stevens, and N. Vuichard, 2016 : The plumbing of land surface models: why are models performing so poorly? *Journal of Hydrometeorology*, Volume : 17, Issue : 6, Pages : 1705-1723, Doi : JHM-D-15-0171.1. Published : JUN 2016.
- Honnert, R., V. Masson and F. Couvreur, 2015 : Sampling of the structure of turbulence : Implications for parametrizations at sub-kilometric scales *Boundary Layer Meteorology*, Volume : 160, Issue : 1, Pages : 133-156, Doi : 10.1007/s10546-016-0130-4. Published : JUL 2016.
- Karsisto, P., C. Fortelius, M. Demuzere, C. S. B. Grimmond, K. W. Oleson, R. Kouznetsov, V. Masson and L. Järvi, 2016 : Seasonal surface urban energy balance and wintertime stability simulated using three land-surface models in the high-latitude city Helsinki (pages 401-417). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume : 142, Issue : 694, Pages : 401-417, Part : A, Doi : 10.1002/qj.2659. Published : JAN 2016.
- Khalifa, A., Marchetti, M., Bouilloud, L., Martin, E., Bues, M., Chancibaut, K., 2016 : Accounting for anthropic energy flux of traffic in winter urban road surface temperature simulations with the TEB model. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 2, Pages: 547-565, Doi : 10.5194/gmd-9-547-2016. Published : 2016.
- Khodayar, S., G. Fosser, S. Berthou, S. Davolio, P. Drobinski, V. Ducrocq, R. Ferretti, M. Nuret, E. Pichelli, E. Richard, 2015 : A seamless weather-climate multi-model intercomparison on the representation of high impact weather in the Western Mediterranean: HyMeX IOP12. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 433-452, Doi : 10.1002/qj.2700. Published : 2016.
- Krichak, S. O., S. B. Feldstein, P. Alpert, S. Gualdi, E. Scoccimarro, and J.-I. Yano, 2016 : Discussing the role of tropical and subtropical moisture sources in cold season extreme precipitation events in the Mediterranean region from a climate change perspective. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume : 16, Issue : 1, Pages : 269-285, Doi : 10.5194/nhess-16-269-2016. Published : 2016.
- Laanaia, N., Carrer, D., Calvet, J.-C., and Pagé, C.: How will climate change affect the vegetation cycle over France? A generic modeling approach. *Climate Risk Management*, Volume : 13, Pages : 31-42, Doi : 10.1016/j.crm.2016.06.001. Published : 2016.
- Lampert, A., Pätzold, F., Jiménez, M. A., Lobitz, L., Martin, S., Lohmann, G., Canut, G., Legain, D., Bange, J., Martínez-Villagrasa, D., and Cuxart, J. : A study of local turbulence and anisotropy during the afternoon and evening transition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16 Issue : 12 Pages: 8009-8021, Doi : 10.5194/acp-16-8009-2016. Published : 2016.
- Largerou, Y., C. Staquet, 2016 : Persistent inversions dynamics and wintertime PM10 air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environment*, Volume : 135, Pages : 92-108, Doi : 10.1016/j.atmosenv.2016.03.045. Published : JUN 2016.
- Largerou, Y., C. Staquet, 2016 : The atmospheric boundary-layer during wintertime persistent inversions in the Grenoble valleys. Special issue "The atmosphere over mountainous regions", *Frontiers in Earth Science*, Volume : 4, Article Number : UNSP 70, Doi : 10.3389/feart.2016.00070, Published : JUL 21 2016.
- Lazeroms W.M.J., G. Svensson, E. Bazile, G. Brethouwer, S. Wallin, A.V. Johansson : Study of transitions in the atmospheric boundary layer using explicit algebraic turbulence models. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume : 161, Issue : 1, Pages : 19-47, Doi : 10.1007/s10546-016-0194-1. Published : OCT 2016.
- Le Moigne, P., J., Colin, and B. Decharme, 2016 : Impact of lake surface temperatures simulated by the Flake scheme in the CNRM-CM5 climate model. *Tellus Series A-Dynamic Meteorology And Oceanography*, Volume : 68, Article Number : 31274, Doi : 10.3402/tellusa.v68.31274. Published : 2016.
- Lee K.-O. , C. Flamant , V. Ducrocq, F. Duffourg, N. Fourrié and S. Davolio : Convective initiation and maintenance processes of two back-building mesoscale convective systems leading to heavy precipitation events in Southern Italy during HyMeX IOP 13. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 700, Pages : 2623-2635, Part : PT A, Doi : 10.1002/qj.2851. Published : OCT 2016.
- Léger, F., C. Lebeauin Brossier, H. Giordani, T. Arsouze, J. Beuvier, M.-N. Bouin, E. Bresson, V. Ducrocq, N. Fourrié, M. Nuret, 2016 : Dense water formation in the north-western Mediterranean area during HyMeX-SOP2 in 1/36° ocean simulations : Sensitivity to initial conditions. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Volume : 121, Issue : 8, Pages : 5549-5569, Doi : 10.1002/2015JC011542. Published : AUG 2016.
- Legrand, R., Y. Michel, and T. Montmerle, 2016 : Diagnosing non-Gaussianity of forecast and analysis errors in a convective-scale model. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Volume : 23, Issue : 1, Pages : 1-12, Doi : 10.5194/npg-23-1-2016. Published : 2016.
- Lemonsu, A., V. Vignieu V., M. Daniel and V., Masson, 2015 : Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*. Volume 14, Part 4, December 2015, Pages 586-605
- Leroux, M.-D., M. Plu and F. Roux, 2016 : On the Sensitivity of Tropical Cyclone Intensification under Upper-Level Trough Forcing. *Monthly Weather Review*, Volume : 144, Issue : 3, Pages : 1179-1202, Doi : 10.1002/qj.2756. Published : MAR 2016.
- Leroux, S., G. Bellon, M. Caian, N. Klingaman, I. Musat, C. Rio, R. Roehrig, J-P. Lafore and S. Tyteca : Inter-model comparison of sub-seasonal tropical variability in aquaplanet experiments: effect of a warm pool. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Volume : 8, Issue : 4, Pages : 1526-1551, Doi : 10.1002/2016MS000683. Published : DEC 2016.
- Ilicak, M, et al., 2016, An assessment of the Arctic ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III : Hydrology and fluxes. *Ocean Modelling*, Volume : 100, Pages : 141-161, Doi : 10.1016/j.ocemod.2016.02.004. Published : APR 2016.
- Lucas-Picher, P., J. Cattiaux, A. Bougie, and R. Laprise, 2015 : How does large scale nudging in a regional climate model contribute to improving the simulation of weather regimes and seasonal extremes over North America ? *Climate Dynamics*, Volume: 46, Issue: 3-4, Pages: 929-948, Doi : 10.1007/s00382-015-2623-0. Published : FEB 2016.
- Mallet, M., Dulac, F., Formenti, P., Nabat, P., Sciare, J., Roberts, G., Pelon, J., Ancellet, G., Tanré, D., Parol, F., Denjean, C., Brogniez, G., di Sarra, A., Alados-Arboledas, L., Arndt, J., Auriol, F., Blarel, L., Bourriane, T., Chazette, P., Chevaillier, S., Claeys, M., D'Anna, B., Derimian, Y., Desboeufs, K., Di Iorio, T., Doussin, J.-F., Durand, P., Féron, A., Frenay, E.,

- Gaimoz, C., Goloub, P., Gómez-Amo, J. L., Granados-Muñoz, M. J., Grand, N., Hamonou, E., Jankowiak, I., Jeannot, M., Léon, J.-F., Maillé, M., Mailler, S., Meloni, D., Menut, L., Momboisse, G., Nicolas, J., Podvin, T., Pont, V., Rea, G., Renard, J.-B., Roblou, L., Schepanski, K., Schwarzenboeck, A., Sellegri, K., Sicard, M., Solmon, F., Somot, S., Torres, B., Totems, J., Triquet, S., Verdier, N., Verwaerde, C., Waquet, F., Wenger, J., and Zapf, P., 2016 : Overview of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment/Aerosol Direct Radiative Forcing on the Mediterranean Climate (ChArMEx/ ADRIMED) summer 2013 campaign. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16, Issue : 2, Pages : 455-504, Doi : 10.5194/acp-16-455-2016. Published : 2016.
- Mao J., A. Ribes, B. Yan, X. Shi, P. Thornton, R. Séférian, P. Ciais, R. Myneni, H. Douville, S. Piao, Z. Zhu, R. Dickinson, Y. Dai, D. Ricciuto, M. Jin, F. Hoffman, B. Wang, M. Huang and X. Lian, 2016 : Human-induced greening of the northern extratropical land surface. *Nature Climate Change*, Volume : 6, Issue : 10, Pages : 959+, Doi : 10.1038/NCLIMATE3056. Published : OCT 2016.
- Marquet, P.: Comments on "MSE minus CAPE is the true conserved variable for an adiabatically lifted parcel. *Journal of Atmospheric Sciences*, Volume : 73, Issue : 6, Pages : 2565-2575, Doi : 10.1175/JAS-D-15-0299.1. Published : JUN 2016.
- Martin, E, Gascoïn, S, Grusson, Y, Murgue, C, Bardeau, M, Ancil, F, Ferrant, S, Lardy, R, Le Moigne, P, Leenhardt, D, Rivalland, V, Perez, JMS, Sauvage, S, Therond, O, 2016 : On the Use of Hydrological Models and Satellite Data to Study the Water Budget of River Basins Affected by Human Activities: Examples from the Garonne Basin of France. *Surveys in Geophysics*, Volume : 37, Issue : 2, Special Issue : SI, Pages : 223-247, Doi : 10.1007/s10712-016-9366-2. Published : MAR 2016.
- Mašek J., J.-F. Geleyn, R. Brožková, O. Giot, H. O. Achom and P. Kuma : Single interval short-wave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 142, Issue: 694, Pages: 304-326, Part: A, Doi : 10.1002/qj.2653. Published: JAN 2016.
- Mechri R., C. Ottlé, O. Pannekoucke, A. Kallel, F. Maignan, D. Courault and I. Trigo. Downscaling Meteosat land surface temperature over a heterogeneous landscape using a data assimilation approach. *Remote Sensing*, Volume : 8, Issue : 7, Article Number : UNSP 586, Doi : 10.3390/rs8070586. Published : JUL 2016.
- Michel, Y., B. Ménétrier, T. Montmerle : Objective Filtering of the Local Correlation Tensor. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 699, Pages : 2314-2323, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2824. Published : JUL 2016.
- Nicolet, G., N. Eckert, S. Morin, and J. Blanchet, 2016 : Decreasing spatial dependence in extreme snowfall in the French Alps since 1958 under climate change. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, Volume: 121, Issue : 14, Pages : 8297-8310, Doi : 10.1002/2016JD025427, Published : JUL 2016.
- Nuissier O., C. Marsigli, B. Vincendon, A. Hally, F. Bouttier, A. Montani and T. Paccagnella: Evaluation of two convection-permitting ensemble systems in the HyMeX Special Observation Period (SOP1) framework. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 404-418, Doi : 10.1002/qj.2859. Published : AUG 2016.
- Omrani, H., T. Arsouze, K. Béranger, M. Boukthir, P. Drobinski, C. Lebeaupin Brossier, H. Mairech, 2016 : Sensitivity of the sea circulation to the atmospheric forcing in the Sicily Channel. *Progress in Oceanography*, Volume : 140, Pages : 54-68, Doi : 10.1016/j.pocean.2015.10.007. Published : JAN 2016.
- Pannekoucke, O., P. Cebron, N. Oger, Ph. Arbogast : From the Kalman Filter to the Particle Filter: A geometrical perspective of the curse of dimensionality. *Advances in Meteorology*, Pages : 72786-72786, Published : 2016.
- Pannekoucke, O., S. Ricci, S. Barthelemy, R. Menard, O. Thual, : Parametric Kalman filter for Chemical Transport Models. *TELLUS SERIES B-Chemical and Physical Meteorology*, Volume : 68, Pages : 1-14, Published : 2016.
- Pardowitz T., R. Osinski, T. Kruschke and U. Ulbrich, 2016 : An analysis of uncertainties and skill in forecasts of winter storm losses. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volume : 16, Issue : 11, Pages : 2391-2402, Doi : 10.5194/nhess-16-2391-2016. Published : NOV 21 2016.
- Payra, S., Ricaud, P., Abida, R., El Amraoui, L., Attié, J.-L., Riviére, E., Carminati, F., and von Clarmann, T., 2016 : Evaluation of water vapour assimilation in the tropical upper troposphere and lower stratosphere by a chemical transport model. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume : 9, Issue : 9, Pages : 4355-4373, Doi : 10.5194/amt-9-4355-2016. Published : SEP 6 2016.
- Pellarin, T., A. Mialon, R. Biron, C. Coulaud, F. Gibon, Y. Kerr, M. Lafaysse, B. Mercier, S. Morin, I. Redor, M. Schwank and I. Völksh, 2016 : Three years of L-band brightness temperature measurements in a mountainous area : Topography, vegetation and snowmelt issues. *Remote Sensing of Environment*, Volume : 180, Pages : 85-98, Doi : 10.1016/j.rse.2016.02.047, Published : 2016.
- Peyrillé P., J.-P. Lafore and A. Boone, 2016 : The annual cycle of the West African Monsoon in a two-dimensional model : mechanisms of the rain band migration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 696, Pages : 1473-1489, Part : A, Doi : 10.1002/qj.2750. Published : APR 2016.
- Picard, G., L. Arnaud, J.-M. Panel and S. Morin, 2016 : Design of a scanning laser meter for monitoring the spatio-temporal evolution of snow depth and its application in the Alps and in Antarctica. *The Cryosphere*, Volume: 10, Pages : 1495-1511, Doi : 10.5164/tc-10-1495-2016, Published : JUL 2016.
- Pierre, C., Grippa, M., Mougïn, E., Guichard, F, Kergoat, L, 2016 : Changes in Sahelian annual vegetation growth and phenology since 1960 : A modeling approach. *Global and Planetary Change*, Volume : 143, Pages : 162-174, Doi : 10.1016/j.gloplacha.2016.06.009. Published : AUG 2016.
- Prein, A.F., A. Gobiet, H. Truhetz, K. Keuler, K. Goergen, C. Teichmann, C. Fox Maule, E. van Meijgaard, M. Déqué, G. Nikulin, R. Vautard, A. Colette, E. Kjellström and D. Jacob, 2015 : Precipitation in the EURO-CORDEX 0.11° and 0.44° simulations: high resolution, high benefits?, *Climate Dynamics*, Volume : 46, Issue : 1-2, Pages : 383-412, Doi : 10.1007/s00382-015-2589-y. Published : JAN 2016.
- Quéno, L., I. Dombrowski-Etchevers, M. Lafaysse, M. Dumont and F. Karbou, 2016 : Snowpack modeling in the Pyrenees driven by kilometer-resolution meteorological forecasts. *The Cryosphere*, Volume : 10, Pages : 1571-1589, Doi : 10.5194/tc-10-1571-2016, Published : JUL 2016.
- Rainaud, R., C. Lebeaupin Brossier, V. Ducrocq, H. Giordani, M. Nuret, N. Fourrié, M-N. Bouin, I. Taupier-Letage, D. Legain, 2016: Characterisation of air-sea exchanges over the Western Mediterranean Sea during the HyMeX SOP1 using the AROME-WMED model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Page : 173-187, Doi : 10.1002/qj.2480. Published : AUG 2016.
- Raynaud, L. and Bouttier, F., 2015 : Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 695, Pages : 854-866, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2686. Published : JAN 2016.
- Reuelto, J., V. Vionnet, J.-I. López-Moreno, M. Lafaysse and S. Morin, 2016 : Combining snowpack modeling and terrestrial laser scanner observations improves the simulation of small scale snow dynamics. *Journal of Hydrology*, Volume: 533, Pages: 291-307, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.015, Published: 2016.
- Ribaud, J.-F., O. Bousquet, S. Coquillat, H. Al-Sakka, D. Lambert, V. Ducrocq, E. Fontaine, 2015 : Evaluation and application of hydrometeor classification algorithm outputs inferred from multi-frequency dual-polarimetric radar observations collected during HyMeX. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 95-107, Doi : 10.1002/qj.2589. Published : AUG 2016.
- Riette, S. and C. Lac, 2016 : A New Framework to Compare Mass-Flux Schemes Within the AROME Numerical Weather Prediction Model. *Boundary-Layer Meteorology*, Volume : 160, Issue : 2, Pages : 269-297, Doi : 10.1007/s10546-016-0146-9. Published : AUG 2016.
- Ruti, P. M., S. Somot, F. Giorgi, C. Dubois, E. Flaounas, A. Obermann, A. Dell'Aquila, G. Pisacane, A. Harzallah, E. Lombardi, B. Ahrens, N. Akhtar, A. Alias, T. Arsouze, R. Aznar, S. Bastin, J. Bartholy, K. Béranger, J. Beuvier, S. Bouffies-Cloché, J. Brauch, W. Cabos, S. Calmanti, J.-C. Calvet, A. Carrillo, D. Conte, E. Coppola, V. Djurdjevic, P. Drobinski, A. Elizalde-Arellano, M. Gaertner, P. Galàn, C. Gallardo, S. Gualdi, M. Goncalves, O. Jorba, G. Jordà, B. L'Heveder, C. Lebeaupin-Brossier, L. Li, G. Liguori, P. Lionello, D. Maciàs, P. Nabat, B. Önal, B. Raikovic, K. Ramage, F. Sevault, G. Sannino, M. V. Struglia, A. Sanna, C. Torma, and V. Vervatis, 2016 : Med-CORDEX Initiative for Mediterranean Climate Studies. *Bulletin of The American Meteorological Society*, Volume : 97, Issue : 7, Pages : 1187-1208. Doi : 10.1175/BAMS-D-14-00176.1 Published : JUL 2016.
- Saïd, F., B. Campistron, H. Delbarre, G. Canut, A. Doerenbecher, P. Durand, N. Fourrié, D. Lambert and D. Legain, 2016 : Offshore winds obtained from a network of wind profiler radars during HyMeX. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 23-42, Doi : 10.1002/qj.2749. Published : AUG 2016.
- Séférian, R., C. Delire, B. Decharme, A. Voltaire, D. Salas y Méliá, M. Chevallier, D. Saint-Martin, J.-C. Calvet, D. Carrer, H. Douville, L. Franchis-téguy, E. Joetzer, and S. Sénési: Development and evaluation of CNRM Earth-System model – CNRM-ESM1, *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 4, Pages : 1423-1453, Doi : 10.5194/gmd-9-1423-2016. Published : 2016.
- Séférian, R. et al., 2016 : Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5 : implications for ocean biogeochemical model performance assessment. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 5, Pages : 1827-1851, Doi : 10.5194/gmd-9-1827-2016. Published : 2016.
- Sič, B., L. El Amraoui, A. Piacentini, V. Marécal, E. Emili, D. Cariolle, M. Prather and J.-L. Attié, 2016 : Aerosol data assimilation in the chemical transport

model MOCAGE during the TRAQA/ChArMEx campaign : aerosol optical depth. *Atmospheric Measurement Techniques*, Volume : 9, Issue : 11, Pages : 5535-5554, Doi : 10.5194/amt-9-5535-2016. Published : NOV 22 2016.

Sicart, J. E., J. C. Espinoza, L. Quéno and M. Medina, 2016 : Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier: seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, Volume : 36, Issue : 8, Pages: 3116-3128, Doi : 10.1002/joc. 4540, Published : JUN 2016.

Soci, C., E. Bazile, F. Besson and T Landelius, 2016 : High-resolution precipitation re-analysis system for climatological purposes, TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography, Volume : 68, Article Number : 29879, Doi : 10.3402/tellusa.v68.29879. Published : 2016.

Spandre, P., S. Morin, M. Lafaysse, Y. Lejeune, H. François and E. George-Marcelpoil, 2016 : Integration of snow management processes into a detailed snowpack model. *Cold Regions Science and Technology*, Volume: 125, Pages: 48-64, Doi: 10.1016/j.coldregions.2016.01.002, Published : JAN 2016.

Staufer, J., G. Broquet, F.-M. Bréon, V. Puygrenier, F. Chevallier, I. Xueref-Rémy, E. Dieudonné, M. Lopez, M. Schmidt, M. Ramonet, O. Perrussel, C. Lac, L. Wu, and P. Ciais, The first 1-year-long estimate of the Paris region fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions based on atmospheric inversion. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume : 16, Issue : 22, Pages : 14703-14726, Doi : 10.5194/acp-16-14703-2016. Published : NOV 25 2016.

Su, C.-H., D. Ryu, W. A. Dorigo, S. Zwieback, A. Gruber, C. Albergel, R. H. Reichle, and W. Wagner (2016). Homogeneity of a global multi-satellite soil moisture climate data record. *Geophysical Research Letters*, Volume : 43, Issue : 21, Pages : 11245-11252, Doi : 10.1002/2016GL070458. Published : NOV 2016.

Thévenot, O., Bouin, M.-N., Ducrocq, V., Lebeaupin Brossier, C., Nuissier, O., Pianezze, J. and Duffourg, F., 2016 : Influence of the sea state on Mediterranean heavy precipitation: a case-study from HyMeX SOP1. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Special Issue : SI, Supplement : 1, Pages : 377-389, Doi: 10.1002/qj.2660. Published : AUG 2016.

Tseng, Y-H, et al., 2016 : North and equatorial Pacific ocean circulation in the CORE-II hindcast simulations, *Ocean Modelling*, Volume : 104, Pages : 143-170, Doi : 10.1016/j.ocemod.2016.06.003. Published : AUG 2016.

Tsushima, Y., M. A Ringer, T. Koshiro, H. Kawai, R. Roehrig, J. Cole, M. Watanabe, T. Yokohata, A. Bodas-Salcedo, K. D. Williams and M. J. Webb, 2015 : Robustness, uncertainties, and emergent constraints in the radiative response of stratocumulus cloud regimes to future warming. *Climate Dynamics*, Volume : 46, Issue : 9-10, Pages : 3025-3039, Doi : 10.1007/s00382-015-2750-7. Published : MAY 2016.

Vaittinada Ayar, P., M. Vrac, S. Bastin, J. Carreau, M. Déqué, and C. Gallardo, 2015. Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models

under the EURO- and MED-COREDEX initiative framework : present climate evaluations, *Climate Dynamics*, Volume : 46, Issue : 3-4, Pages : 1301-1329, Doi : 10.1007/s00382-015-2647-5. Published : FEB 2016.

Van den Hurk B., H. Kim, G. Krinner, S. I. Seneviratne, C. Derksen, T. Oki, H. Douville, J. Colin, A. Ducharme, F. Cheruy, N. Viovy, M. Puma, Y. Wada, W. Li, B. Jia, A. Alessandri, D. Lawrence, G. P. Weedon, R. Ellis, S. Hagemann, J. Mao, M. G. Flanner, M. Zampieri, R. Law, and J. Sheffield, 2016 : LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: the Land Surface, Snow and Soil moisture Model Intercomparison Project – aims, setup and expected outcome. *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 8, Pages : 2809-2832, Doi : 10.5194/gmd-9-2809-2016. Published : AUG 24 2016.

Vié, B., Pinty, J.-P., Berthet, S. and Leriche, M., 2016 : LIMA (v1.0): A quasi two-moment microphysical scheme driven by a multimodal population of cloud condensation and ice freezing nuclei, *Geoscientific Model Development*, Volume : 9, Issue : 2, Pages : 567-586, Doi : 10.5194/gmd-9-567-2016. Published: 2016.

Vincendon, B., Edouard S., Dewaele H., Ducrocq V., Lospinas F., Delrieu G., Anquetin S., 2016 : Modeling flash floods in southern France for road management purposes, *Journal of Hydrology*, Volume : 541, Special Issue : SI, Pages : 190-205, Part : A, Doi : 10.1016/j.jhydrol.2016.05.054. Published : OCT 2016.

Vionnet, V., I. Dombrowski-Etchevers, M. Lafaysse, L. Quéno, Y. Seity and E. Bazile : Numerical weather forecasts at kilometer scale in the French Alps: evaluation and applications for snowpack modeling. *Journal of Hydrometeorology*, Volume : 17, Issue : 10, Pages : 2591-2614, Doi : 10.1175/JHM-D-15-0241.1. Published : OCT 2016.

Waldman, R., S. Somot, M. Herrmann, P. Testor, C. Estoumel, F. Sevault, L. Prieur, L. Mortier, L. Cop-pola, V. Taillandier, P. Conan and D. Dausse, 2016 : Estimating dense water volume and its evolution for the year 2012–2013 in the Northwestern Mediterranean Sea : An observing system simulation experiment approach, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Volume : 121, Issue : 9, Pages : 6696-6716, Doi : 10.1002/2016JC011694. Published : SEP 2016.

Wang, Q. et al., 2016, An assessment of the Arctic ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part I : Sea Ice and solid freshwater, *Ocean Modelling*, Volume : 99, Pages : 110-132, Doi : 10.1016/j.ocemod.2015.12.008. Published : MAR 2016.

Watson, L., G. Lacressonnière, M. Gauss, M. Engardt, C. Andersson, B. Josse, V. Maréchal, A. Nyiri, S. Sobolowski, G. Siour, S. Szopa, R. Vautard, 2016 : Impact of emissions and +2 °C climate change upon future ozone and nitrogen dioxide over Europe. *Atmospheric Environment*, Volume : 142, Pages : 271-285, Doi : 10.1016/j.atmosenv.2016.07.051. Published : OCT 2016.

Xue, Y, F. De Sales, W. K-M Lau, A. Boone, K.-M. Kim, C. R. Mechoso, G. Wang, F. Kucharski, K. Schiro, M. Hosaka, S. Li, L. M. Druryan, I. Seidou Sanda, W. Thiaw, N. Zeng, R. E. Comer, Y.-K. Lim, S. Mahanama, G. Song, Y. Gu, S. M Hagos, M. Chin, S.

Schubert, P. Dirmeyer, L. R. Leung, E. Kalnay, A. Kitoh, C.- H. Lu, N. M. Mahowald, Z. Zhang, 2016 : West African monsoon decadal variability and drought and surface-related forcings: Second West African Monsoon Modeling and Evaluation Project Experiment (WAMME II) in the Special Issue – Decadal variability of West African monsoon, external surface forcings, and their modeling. *Climate Dynamic*, Volume : 47, Issue : 11, Pages : 3517-3545, Doi : 10.1007/s00382-016-3224-2. Published : DEC 2016.

Xu, H., Guo, J.P., Ceamanos, X., Roujean, J.L., Min, M., Carrer, D., Ceamanos, X., 2016 : On the influence of the diurnal variations of aerosol content to estimate direct aerosol radiative forcing using MODIS data *Atmospheric Environment*, Volume : 141, Pages : 186-196, Doi : 10.1016/j.atmosenv.2016.06.067. Published : SEP 2016.

Yano, J.-I, A. Heymysfield and T. Vaughan, 2016 : Size Distributions of Hydrometeors : Analysis with the Maximum Entropy Principle. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume : 73, Issue : 1, Pages : 95-108, Doi : 10.1175/JAS-D-15-0097.1. Published : JAN 2016.

Yano, J.I., 2016 : Subgrid-scale physical parameterization in atmospheric modeling: How can we make it consistent? *Journal of Physics A-Mathematical and Theoretical*, Volume : 49, Issue : 28, Article Number : 284001, Doi : 10.1088/1751-8113/49/28/284001. Published : JUL 15 2016.

Yano, J.-I.; Jakubiak, B., 2016 : Wavelet-based verification of the quantitative precipitation forecast, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Volume : 74, Pages : 14-29, Published : JUN 2016.

Yano, J.-I., Plant, R. S., 2016 : Generalized convective quasi-equilibrium principle. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Volume : 73, Pages : 10-33, Doi : 10.1016/j.dynatmoce.2015.11.001. Published : MAR 2016.

Yano, J.-I., Moncrieff, M. W., 2016 : Numerical Archedtypal Parameterization for Mesoscale Convective Systems. *Journal of Atmospheric Sciences*, Volume : 73, Issue : 7, Pages : 2585-2602, Published : JUL 2016.

Yano, J.I., Phillips, V. T. J.; Kanawade, V., 2016 : Explosive ice multiplication by mechanical break-up in ice-ice collisions: a dynamical system-based study. *Quarterly journal of the Royal Meteorological Society*, Volume : 142, Issue : 695, Page s: 867-879, Part : B, Doi : 10.1002/qj.2687. Published : JAN 2016.

Younjoo, J. L., P. Matrai, M. Chevallier, R. Séférian, 2016 : Net primary productivity estimates and environmental variables in the Arctic Ocean : An assessment of coupled physical-biogeochemical models. *Journal of Geophysical Research*, Volume : 121, Issue : 12, Pages : 8635-8669. Published : DEC 2016.

Zagar, N., Boyd, J. Kasahara, A., Tribbia, J., Kallen, E., Tanaka, H., Yano, J., 2016 : Normal Modes of Atmospheric Variability in Observations, Numerical Weather Prediction, and Climate Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume : 97, Issue : 6, Pages : ES125-ES128, Doi : 10.1175/BAMS-D-15-00325.1. Published : JUN 2016.

## Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

Dadou I., V. Sanial, K. Gueirero, M-L Bachèlery S. Chastanet, G. Alory and S. Somot, 2016 :

Reproduire la circulation thermohaline à échelle réduite et comprendre son rôle dans le climat.

La Météorologie, 93, may 2016, doi: 10.4267/2042/59937.

## Publications 2016 dans des revues à comité de lecture hors CNRM

- Barthe, C., T. Hoarau, and C. Bovalo, 2016: Cloud electrification and lightning activity of a tropical cyclone-like vortex. *Atmos. Res.*, 180, doi:10.1016/j.atmosres.2016.05.023, 297-309.
- Bousquet, O., J. Delanoë and S. Bielli, 2016: Evaluation of 3D wind observations inferred from the analysis of airborne and ground-based radars during HyMeX SOP-1. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* doi:10.1002/qj.2710.
- Chane Ming F., D. Vignelles, F. Jegou, G. Berthet, J.-B. Renard, F. Gheusi, and Y. Kuleshov, 2016: Gravity-wave effects on tracer gases and stratospheric aerosol concentrations during the 2013 ChArMEx campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8023-8042, doi:10.5194/acp-16-8023-2016
- Ciavatta, S.; Kay, S.; Saux Picart, S.; Butenschön, M., Allen, J. (2016) Decadal reanalysis of biogeochemical indicators and fluxes in the North West European shelf-sea ecosystem. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121, 1824-1845
- Coleou, C., H. Merzisen, C. Gendre, Y. Danielou, J.-M. Willemet, F. Marty, A. Lasserre-Bigorry and S. Morin, 2016: SynopsiS, an Innovative Platform Supporting Avalanche Hazard Forecasting in France. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2016*, Breckenridge, Colorado, Pages: 335- 342, Published: 2016.
- Georgiev C. , P. Santurette and K. Manard, 2016 : Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis, Academic Press, Print Book ISBN : 9780128001943. Publication.Ribes, A.,Corre L., Gibelin AL, Dubuisson B: Issues in estimating observed warming at the local scale. A case study: the recent warming over France, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4593
- Hoareau, C., Noel, V., Chepfer, H., Vidot, J., Chiriaco, M., Bastin, S., Reverdy, M. and Cesana, G. (2016), Remote sensing ice supersaturation inside and near cirrus clouds: a case study in the subtropics. *Atmos. Sci. Lett.*, 17: 639–645. doi:10.1002/asl.714
- Khalifa, A., Marchetti, M., Bouilloud, L., Martin, E., Bues, M., and Chancibaut, K.: Accounting for anthropic energy flux of traffic in winter urban road surface temperature simulations with the TEB model, *Geosci. Model Dev.*, 9, 547-565, doi:10.5194/gmd-9-547-2016.
- Kuleshov, Y., Choy, S., Fu, E. F., Chane Ming, F., Liou, Y.-A., and Paveleyev, A., 2016: Analysis of Meteorological Variables in the Australasian Region Using Ground- and Space-based GPS Techniques, Accepted in *Atmos. Res.*, doi:10.1016/j.atmosres.2016.02.021
- Labbé, L; Simulation numérique de la pluviométrie en Afrique : Perspectives continentales et régionales à partir des réanalyses ERA-Interim, *La Météorologie*, 2016, N° 92 ; p. 30-38. DOI : 10.4267/2042/58220
- Lassegues, P., Daily and climatological fields of precipitation over the western Alps with a high density network for the period of 1990–2012, *P. Theor Appl Climatol* (2016), doi:10.1007/s00704-016-1954-z
- Pascaud, Aude ; Sauvage, Stéphane ; Pagé, Christian ; Roustant, Olivier ; Probst, Anne ; Nicolas, Manuel ; Croisé, Luc ; Mezdoor, Abdelkrim ; Coddeville, Patrice ; Composition chimique des dépôts atmosphériques à l'horizon 2020-2040, *La Météorologie*, 2016, N° 92 ; p. 56-65. doi: 10.4267/2042/58223
- Peltier, H., M. Authier, R. Deaville, W. Dabin, P. D. Jepson, O. van Canneyt, P. Daniel, V. Ridoux, 2016: Small cetacean bycatch as estimated from stranding schemes: The common dolphin case in the northeast Atlantic, *Environmental Science & Policy* 63 7-18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2016.05.004>
- Pohl, B., Morel, B., Barthe, C., & Bousquet, O. (2016). Regionalizing rainfall at very high resolution over la réunion island: a case study for tropical cyclone ando. *Monthly Weather Review*, 144(11), 4081–4099.
18. Poli, P., H. Hersbach, D. Dee, P. Berrisford, A. Simmons, F. Vitart, P. Laloyaux, D. Tan, C. Peubey, J. Thépaut, Y. Trémolet, E. Hólm, M. Bonavita, L. Isaksen, and M. Fisher, 2016: ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *J. Climate*, 29, 4083–4097, doi:10.1175/JCLI-D-15-0556.1.
- Poli, P., D.P. Dee, R. Saunders, V.O. John, P. Rayer, J. Schulz, K. Holmlund, D. Coppens, D. Klaes, J.E. Johnson, A.E. Esfandiari, I.V. Gerasimov, E.B. Zamkoff, A.F. Al-Jazrawi, D. Santek, M. Albani, P. Brunel, K. Fennig, M. Schröder, S. Kobayashi, D. Oertel, W. Doehler, D. Spaenkuch, S. Bojinski: Recent advances in satellite data rescue. *Bulletin of the American Meteorological Society*, in press. DOI 10.1175/BAMS-D-15-00194.1
- Ribaud J.-F., O. Bousquet and S. Coquillat, 2016: Relationships between total lightning activity, microphysics, and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bow echo system. *Q. J. R. Meteorol. Soc. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, DOI : 10.1002/qj.2756
- Ribes, A.,Corre L, Gibelin AL, Dubuisson B : Issues in estimating observed warming at the local scale. A case study: the recent warming over France, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4593
- Soubeyroux, J.-M. G. Ouzeau, M. Schneider, O. Cabanes, R. Kounkou-Arnaud : Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur *La météorologie N°94*, DOI : 10.4267/2042/60704 .
- Soula, S., J. J. Kigotsi, J.-F. Georgis, and C. Barthe, 2016: Lightning climatology in the Congo Basin, *Atmos. Res.*, 178-179, doi:10.1016/j.atmosres.2016.04.006, 304-319.
- Taillardat, M., Mestre, O., Zamo, M., Naveau, P. : Calibrated Ensemble Forecasts using Quantile Regression Forests and Ensemble Model Output Statistics, *Monthly Weather Review* 2016, doi: 10.1175/MWR-D-15-0260.1
- Vèrèmes, H., J.-P. Cammas, J.-L. Baray, P. Keckhut, D. Dionisi, C. Barthe, P. Tulet, S. Bielli and F. Posny, 2016 : Multiple subtropical stratospheric intrusions over Reunion island: observational, lagrangian and eulerian numerical modeling approaches. *J. Geophys. Res. Atmos.* doi: 10.1002/2016JD025330
- Viel, C., Beaulant, A.-L., Soubeyroux, J.-M., and Céron, J.-P.: How seasonal forecast could help a decision maker: an example of climate service for water resource management, *Adv. Sci. Res.*, 13, 51-55, doi:10.5194/asr-13-51-2016, 2016.

## Thèses soutenues en 2016

- Augros, C., 2016 : "Apport des données polarimétriques radar pour un modèle atmosphérique à échelle convective" le 19 mai 2016.
- Birman, C., 2016 : "Apport des observations micro-ondes à la caractérisation des précipitations à méso-échelle" le 11 février 2016.
- Clayes, M., 2016 : "Modélisation des aérosols marins et de leur effet radiatif direct sur le bassin méditerranéen dans le cadre du projet ChArMEx" le 7 juillet 2016.
- Colavolpe, C., 2016 : "Étude des schémas de discrétisation temporelle "Explicite Horizontal, Implicite Vertical" dans une dynamique non-hydrostatique pleinement compressible en coordonnée masse" le 5 décembre 2016.
- Edouard, S., 2016 : "Prévision d'ensemble des crues rapides méditerranéennes" le 9 décembre 2016.
- Guerbette, J., 2016 : "Modélisation et assimilation d'observations satellitaires micro-ondes dans les systèmes dépressionnaires tropicaux" le 4 avril 2016.
- Mazoyer, M., 2016 : "Impact du processus d'activation sur les propriétés microphysiques des brouillards et sur leur cycle de vie" le 1er avril 2016.
- Napoly, A., 2016 : "Apport de paramétrisations avancées des processus liés à la végétation dans les modèles de surfaces pour la simulation des flux atmosphériques et hydrologiques" le 8 décembre 2016.
- Philip, A., 2016 : "Apport d'une résolution verticale plus fine dans le calcul des tendances physiques pour la modélisation du brouillard dans le modèle AROME" le 17 octobre 2016.
- Spandre, P., 2016 : "Observation et modélisation des interactions entre conditions d'enneigement et activité des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises" le 5 décembre 2016.
- Waldman, R., 2016 : "Etude multi-échelle de la convection océanique profonde en mer Méditerranée : de l'observation à la modélisation climatique" le 16 décembre 2016.

---

## Thèses soutenues en 2016 hors CNRM

Zamo, M., 2016 : "Statistical post-processing of deterministic and ensemble wind speed forecasts on a grid" le 15 décembre 2016.

---

## Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2016

Miichel, Y., 2016 : "Représentation des incertitudes et assimilation de données pour la prévision numérique du temps" le 1er juillet 2016.

Berre, L., 2016 : "Estimation et modélisation des covariances d'erreur d'ébauche en assimilation de données" le 23 mars 2016.

Boone, A., 2016 : "Modélisation de l'interface surface continentale-hydrologie-atmosphère" le 27 mai 2016.

Caumont, O., 2016 : "Utilisation de données de télédétection depuis le sol pour la prévision numérique de la convection profonde à fine échelle" le vendredi 17 juin 2016.

Marquet, P., 2016 : "Étude de l'énergétique de l'air humide et des paramétrisations physiques de l'atmosphère" le 28 juin 2016.

Nuissier, O., 2016 : "Prévisibilité des phénomènes convectifs intenses de l'échelle convective à l'échelle climat régional" le 10 mai 2016.

Ricard, D., 2016 : "Modélisation numérique de phénomènes météorologiques extrêmes" le 9 mai 2016.



<b>BAMED</b>	BAlloons in the MEDiterranean	<b>AROME-COMB</b>	AROME - COMBinaison
<b>CHFP</b>	Climate Historical Forecasting Project	<b>AROME-PERTOBS</b>	AROME (OBServations PERTurbées aléatoirement)
<b>CHROME</b>	Couplage Hydrométéorologique Régional Multi-Ensemble	<b>AROME-WMED</b>	Configuration AROME sur la Méditerranée occidentale
<b>CIDEX</b>	Calibration and Icing Detection EXperiment	<b>ARPEGE</b>	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
<b>CMIP</b>	Coupled Model Intercomparaison Project	<b>AS</b>	Adaptations Statistiques
<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>ASAR</b>	Advanced Synthetic Aperture Radar
<b>CYPRIM</b>	projet Cyclogénèse et précipitations intenses dans la zone méditerranéenne	<b>ASCAT</b>	Advanced SCATterometer
<b>ERA-CLIM</b>	European Reanalysis of Global Climate Observations	<b>ASTEX</b>	Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment
<b>ESURFMAR</b>	Eumetnet SURFace MARine programme	<b>ATM</b>	Air Traffic Management - Contrôle du trafic aérien
<b>EUFAR2</b>	2nd projet EUFAR dans le cadre de 7e PCRD et 4 <sup>e</sup> projet EUFAR depuis 2000	<b>ATMS</b>	Advanced Technology Microwave Sounder
<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, CERE, LISST, LAVUE, LPED.	<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>EURO4M</b>	European reanalysis and observations for monitoring <a href="http://www.euro4m.eu/">http://www.euro4m.eu/</a>	<b>BAS</b>	British Antarctic Survey
<b>GeoMIP</b>	Geoengineering Model Intercomparaison Project	<b>BPCL</b>	Ballon Pressurisé de Couche Limite
<b>GHRSSST</b>	International Group for High Resolution SST	<b>BSS</b>	Score probabiliste « Brier Skill Score »
<b>GLOSCAL</b>	GLobal Ocean Surface salinity CALibration and validation Programme-cadre pour la recherche et l'innovation (2014-2020)	<b>CALIOP</b>	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
<b>H2020</b>		<b>CALIPSO</b>	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
<b>HOMONIM</b>	Historique Observation MOdélisation des Niveaux Marins	<b>CANARI</b>	Code d'Analyse Nécessaire à ARPEGE pour ses Rejets et son Initialisation
<b>HyMeX</b>	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXperiment	<b>CAPE</b>	Convective Available Potential Energy
<b>IMAGINES</b>	Implementing Multi-scale Agricultural Indicators Exploiting Sentinels	<b>CAPRICORNE</b>	CARactéristiques PRincipales de la COUvertuRe Nuageuse
<b>IncREO</b>	Increasing Resilience through Earth Observation	<b>CARIBOU</b>	Cartographie de l'Analyse du Risque de Brume et de brUillard
<b>LEFE</b>	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »	<b>CAROLS</b>	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
<b>MACC</b>	Monitoring Atmospheric Composition and Climate	<b>Cb</b>	Cumulonimbus
<b>METOP</b>	METEorological Operational Polar satellites	<b>CFMIP</b>	Cloud Feedback Intercomparaison Project
<b>PCRD</b>	Programme Cadre de Recherche et de Développement	<b>CFOSAT</b>	Chinese-French SATellite
<b>PLUVAR</b>	Variabilité sub-saisonnière des pluies sur les îles du Pacifique Sud	<b>ChArMEx</b>	Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment
<b>PNRA</b>	Programma Nazionale di Ricerca in Antartide	<b>CISMF</b>	Centre Inter-armées de Soutien Météorologique aux Forces
<b>QUANTIFY</b>	Programme QUANTIFYing the climate impact of global and European transport systems	<b>CLAS</b>	Couches Limites Atmosphériques Stables
<b>RHYTMME</b>	Risques HYdro-météorologiques en Territoires de Montagnes et MÉditerranéens	<b>CMC</b>	Cellule Météorologique de Crise
<b>SCAMPEI</b>	Scénarios Climatiques Adaptés aux Montagnes : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes - projet de l'ANR coordonné par le CNRM	<b>CMIP5</b>	5 <sup>e</sup> me phase du Coupled Model Intercomparaison Project
<b>SMOS</b>	Soil Moisture and Ocean Salinity Suomi-NPP Programme américain de satellites météorologiques en orbite polaire	<b>CNRM-CM5</b>	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM
<b>THORPEX</b>	The Observing system Research and Predictability EXperiment	<b>CNRM-RCSM</b>	Regional Climate System Model
<b>UERRA</b>	Uncertainties in Ensembles of Regional Re-Analyses	<b>COP</b>	Contrat d'Objectifs et de Performances
<b>USAP</b>	United States Antarctic Program	<b>COPAL</b>	COmmunity heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences
<b>VOLTIGE</b>	Vecteur d'Observation de La Troposphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement	<b>CPR</b>	Cloud Profiling Radar
<b>WCRP</b>	World Climate Research Programme	<b>CrIS</b>	Cross-track Infra-Red Sounder

### Campagnes expérimentales

<b>AMMA</b>	Analyses Multidisciplinaires de la Mousson Africaine
<b>CORDEX</b>	COordinated Regional climate Downscaling EXperiment
<b>EUREQUA</b>	Evaluation mUltidisciplinaire et Requalification Environnementale des QUArtiers
<b>HAIC</b>	High Altitude and Ice Crystals ( <a href="http://www.haic.eu">www.haic.eu</a> )
<b>MEGAPOLI</b>	Megacities : Emissions, urban, regional and Global Atmospheric POLLution and climate effects, and Integrated tools for assessment and mitigation
<b>SMOSREX</b>	Surface MONitoring of the Soil Reservoir EXperiment

### Autres sigles, abréviations ou acronymes

<b>AIRS</b>	Sondeur Infrarouge avancé
<b>ALADIN</b>	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement International
<b>ALIDS</b>	Interféromètre laser aéroporté pour mesurer la granulométrie des gouttes d'eau dans les nuages
<b>AMSR</b>	Advanced Microwave Scanning Radiometer
<b>AMSU</b>	Advanced Microwave Sounding Unit
<b>AMSU-A</b>	Advanced Microwave Sounding Unit-A
<b>AMSU-B</b>	Advanced Microwave Sounding Unit-B
<b>ANASYG</b>	ANalyse Synoptique Graphique
<b>ANTILOPE</b>	ANalyse par spaTialisation hOraire des PrEcipitations
<b>ARAMIS</b>	Application Radar A la Météorologie Infra-Synoptique
<b>ARGO</b>	Array for Real time Geostrophic Oceanography
<b>AROME</b>	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle

<b>ASAR</b>	Advanced Synthetic Aperture Radar
<b>ASCAT</b>	Advanced SCATterometer
<b>ASTEX</b>	Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment
<b>ATM</b>	Air Traffic Management - Contrôle du trafic aérien
<b>ATMS</b>	Advanced Technology Microwave Sounder
<b>AVHRR</b>	Advanced Very High Resolution Radiometer
<b>BAS</b>	British Antarctic Survey
<b>BPCL</b>	Ballon Pressurisé de Couche Limite
<b>BSS</b>	Score probabiliste « Brier Skill Score »
<b>CALIOP</b>	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
<b>CALIPSO</b>	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
<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 brUillard
<b>CAROLS</b>	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
<b>Cb</b>	Cumulonimbus
<b>CFMIP</b>	Cloud Feedback Intercomparaison Project
<b>CFOSAT</b>	Chinese-French SATellite
<b>ChArMEx</b>	Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment
<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>CMIP5</b>	5 <sup>e</sup> me phase du Coupled Model Intercomparaison Project
<b>CNRM-CM5</b>	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM
<b>CNRM-RCSM</b>	Regional Climate System Model
<b>COP</b>	Contrat d'Objectifs et de Performances
<b>COPAL</b>	COmmunity heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences
<b>CPR</b>	Cloud Profiling Radar
<b>CrIS</b>	Cross-track Infra-Red Sounder
<b>CROCUS</b>	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France.
<b>CTRIP</b>	CNRM-Total Routing Integrated Pathway
<b>DCSC</b>	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
<b>DCT</b>	Diffraction Contrast Tomography
<b>DEM</b>	Discrete Element Method
<b>DMT</b>	Droplet Measurement Technologies
<b>DP</b>	Direction de la Production
<b>DPI</b>	Droits de Propriété Intellectuelle
<b>DPR</b>	Dual frequency Precipitation Radar
<b>DPrévi</b>	Direction de la Prévision
<b>DSI</b>	Direction des Systèmes d'Information (Météo-France)
<b>DSNA</b>	Direction des Services de la Navigation Aérienne
<b>ECMWF</b>	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
<b>ECOCCLIMAP</b>	Base de données de paramètres de surface
<b>ECUME</b>	Exchange Coefficients from Unified Multi-campaigns Estimates
<b>EGEE</b>	Etude du golfe de Guinée
<b>ENVISAT</b>	ENVironmental SATellite
<b>ERA</b>	European Re-Analysis
<b>ESRF</b>	European Synchrotron Radiation Facility
<b>EUCLIPSE</b>	European Union Cloud Intercomparaison, Process Study & Evaluation
<b>FAB</b>	Fonctionnel Aerospace Block
<b>FABEC</b>	Functional Airspace Block Europe Central
<b>FAR</b>	Fausse AleRte
<b>FSO</b>	Forecast Sensitivity to Observations
<b>FSOI</b>	Forecast Sensitivity to Observations-based impact
<b>GABLS4</b>	Gewex Atmospheric Boundary Layer Study
<b>GELATO</b>	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean
<b>GEV</b>	Loi généralisée des valeurs extrêmes
<b>GIEC</b>	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat
<b>GMAP</b>	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision
<b>GMEI</b>	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale
<b>GMME</b>	Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle
<b>GMES</b>	Global Monitoring for Environment and Security
<b>GNSS-R</b>	Global Navigation by Satellite System (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) – R pour « Reflectométrie »

<b>GPM</b>	Global Precipitation Measurement	<b>POI</b>	Période d'Observation Intensive
<b>GPP</b>	Gross Primary Production	<b>PRESYG</b>	PREvision Synoptique Graphique
<b>GPS</b>	Global Positioning System	<b>Prev'Air</b>	Plateforme nationale de la qualité de l'air
<b>High IWC</b>	High Ice Water Content	<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>HIRLAM</b>	High Resolution Limited Area Model		
<b>HISCRIM</b>	High Spectral resolution Cloudy-sky Radiative Transfer Model	<b>Prévi-Prob</b>	Projet sur les prévisions probabilistes
<b>HSS</b>	Measurement of improvement of the forecast	<b>PSI</b>	Pollutant Standard Index
<b>HYCOM</b>	HYbrid Coordinate Ocean Model	<b>PSR</b>	Plan Submersions Rapides
<b>IAGOS</b>	In-service Aircraft for Global Observing System	<b>PVM</b>	Particulate Volume Monitor
<b>IASI</b>	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge	<b>PVs</b>	Tourbillon potentiel de l'air humide
<b>IAU</b>	Incremental analysis update, mise à jour incrémentale par une analyse	<b>RADOME</b>	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu
<b>IFS</b>	Integrated Forecasting System		
<b>IIR</b>	Infrared Imaging Radiometer	<b>RCP.8.5</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>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>RDI</b>	Référent Départemental Inondation
<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>RDT</b>	Rapidly Developing Thunderstorm
<b>ISBA-TOP</b>	Couplage du schéma de surface ISBA et d'une version « méditerranéenne » du modèle hydrologique TOPMODEL	<b>RHI</b>	Range Height Indicator (coupe verticale)
<b>ISFC</b>	Indice de Segmentation de la Composante de Fourier	<b>ROC</b>	Relative Operating Characteristic curve
<b>ISIS</b>	Algorithme de suivi automatique des systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Météosat	<b>RTI</b>	Recherche Technologie & Innovation
<b>IWC</b>	Ice Water Content	<b>RTTOV</b>	Radiative Transfer for TOVS
<b>LAI</b>	Leaf Area Index (indice foliaire)	<b>SAF NWP</b>	Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction
<b>Land-SAF</b>	LAND Satellite Application Facilities	<b>SAF OSI</b>	Satellite Application Facility for Ocean and Sea Ice
<b>LCCS</b>	Land Cover Classification System	<b>SAFRAN</b>	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Neige
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation model	<b>SAPHIR</b>	Sondeur Atmosphérique du Profil d'Humidité Intertropicale par Radiométrie
<b>LISA</b>	Lidar SATellite	<b>SARA</b>	Spectroscopy by Amplified Resonant Absorption
<b>MEDUP</b>	MEDiterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment	<b>SATOB</b>	Satellite Observation
<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>SCM</b>	Single-Column Model
<b>MEPRA</b>	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche (modélisation)	<b>SESAR</b>	Single European Sky ATM Research
<b>MERSEA</b>	Marine EnviRonnement and Security for the European Area	<b>SEVIRI</b>	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
<b>MESCAN</b>	Combinaison de MESAN (nom du système suédois) et de CANARI	<b>SFRI</b>	Système Français de Recherche et d'Innovation
<b>MESO-NH</b>	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique	<b>S2M</b>	SAFRAN - SURFEX/ISBA-Crocus - MEPRA
<b>MFWAM</b>	Météo-France WAve Model	<b>SIM</b>	SAFRAN ISBA MODCOU
<b>MHS</b>	Microwave Humidity Sounder	<b>SIRTA</b>	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique
<b>MISR</b>	Multi-angle Imaging Spectroradiometer	<b>SMOSMANIA</b>	Soil Moisture Observing System - Meteorological Automatic Network Integrated Application
<b>MNPCA</b>	Microphysique des Nuages et de Physico-Chimie de l'Atmosphère	<b>SMT</b>	Système Mondial de Télécommunications
<b>MOCAGE</b>	MOdélisation de la Chimie Atmosphérique de Grande Echelle (modélisation)	<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>MODCOU</b>	MODèle hydrologique COUplé surface-souterrain.	<b>SOP</b>	Special Observing Period
<b>MODIS</b>	MODerate-resolution Imaging Spectro-radiometer (instrument)	<b>SPC</b>	Service de Prévision des Crues
<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>SPIRIT</b>	SPectromètre Infra-Rouge In situ Toute altitude
<b>MOTHY</b>	Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbure	<b>SPPT</b>	Stochastically Perturbed Parametrization Tendencies
<b>MRR</b>	Micro Rain Radars	<b>SSI</b>	Solar Surface Irradiance
<b>MSG</b>	Météosat Seconde Génération	<b>SSMI/S</b>	Special Sounder Microwave Imager/Sounder
<b>NAO</b>	North Atlantic Oscillation	<b>SURFEX</b>	code de SURFace EXternalisé
<b>NEMO</b>	Nucleus for European Modelling of Ocean	<b>SVP</b>	Surface Velocity Program
<b>NEMO-WMED36</b>	Configuration de NEMO sur la Méditerranée occidentale	<b>SWI</b>	Soil Wetness Index
<b>NSF</b>	Norges StandardiseringsForbund	<b>SWIM</b>	Surface Wave Investigation and Monitoring
<b>NWCSAF</b>	Satellite Application Facility for Nowcasting	<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>OPIC</b>	Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection	<b>TCU</b>	Towering Cumulus
<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>TRL</b>	Technology Readiness Level
<b>ORCHIDEE</b>	ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic EcosystEms	<b>TEB</b>	Town Energy Budget
<b>OSCAT</b>	OCEANSAT-2 Scatterometer	<b>TRIP</b>	Total Runoff Integrating Pathways
<b>OSTIA</b>	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis	<b>TSM</b>	Températures de Surface de la Mer
<b>OTICE</b>	Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires	<b>UHF</b>	Ultra-Haute Fréquence
<b>PALM</b>	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes	<b>UNIBAS</b>	Modèle de précipitations
<b>PDO</b>	Pacific Decadal Oscillation	<b>VARPACK</b>	Current tool for diagnostic analysis in Meteo-France
<b>PEARO</b>	Prévision d'Ensemble AROME	<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>PEARP</b>	Prévision d'Ensemble ARPège	<b>VOS</b>	Voluntary Observing Ships
<b>PI</b>	Prévision Immédiate	<b>WWLLN</b>	World Wide Lightning Location Network
<b>PN</b>	Prévision Numérique		
<b>PNT</b>	Prévision Numérique du Temps		
<b>POD</b>	PrObabilité de Détection		

# Organigramme du Centre National de Recherches Météorologiques

A la date du : 31.12.2016

Directeur : **Marc Pontaud**

Directrice Adjointe - Toulouse : **Claire Doubremelle**

Directeur Adjoint Scientifique : **Philippe Dandin**

Directeur Adjoint CNRS : **Jean-Louis Roujean**

Directeur Adjoint - Saint-Mandé : **Jacques Parent du Chatelet**

SAFIRE : Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement

CENTRE D'AVIATION MÉTÉOROLOGIQUE

CAM - Toulouse

Chef de division : **Jean-Christophe Canonici**

CENTRE D'ÉTUDES DE LA NEIGE

CEN - Grenoble

Chef de division : **Samuel Morin**

GROUPE DE MODÉLISATION ET D'ASSIMILATION POUR LA PRÉVISION

GMAP - Toulouse

Chef de division : **Alain Joly**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE EXPERIMENTALE ET INSTRUMENTALE

GMEI - Toulouse

Chef de division : **Alain Dabas**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE DE GRANDE ÉCHELLE ET CLIMAT

GMGEC - Toulouse

Chef de division : **David Salas y Mélia**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE DE MOYENNE ÉCHELLE

GMME - Toulouse

Responsable : **Véronique Ducrocq**

SERVICES COMMUNS

SC - Toulouse

Responsable : **Claire Doubremelle**

## Nota :

L'Unité Mixte de Recherche 3589 entre Météo-France et le CNRS est représentée sur fond bleu.

SAFIRE (représentée sur fond blanc) est une Unité Mixte de Service entre Météo-France, le CNRS et le CNES.

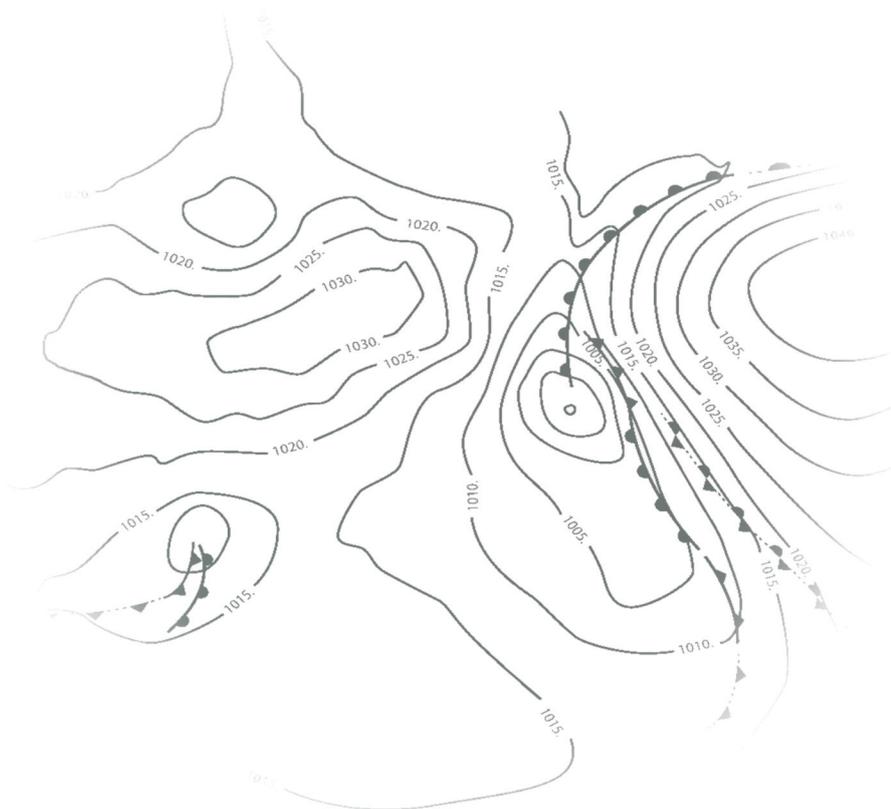


## Météo-France

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)

## Centre National de Recherches Météorologiques

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.umn-cnrm.fr>  
Mail : [contact@cnrm.meteo.fr](mailto:contact@cnrm.meteo.fr)



Création DIRCOM/CGN

Météo-France is certified to ISO 9001  
by Bureau Veritas Certification  
© Météo-France 2017  
Copyright avril 2017  
ISSN : 2116-438X