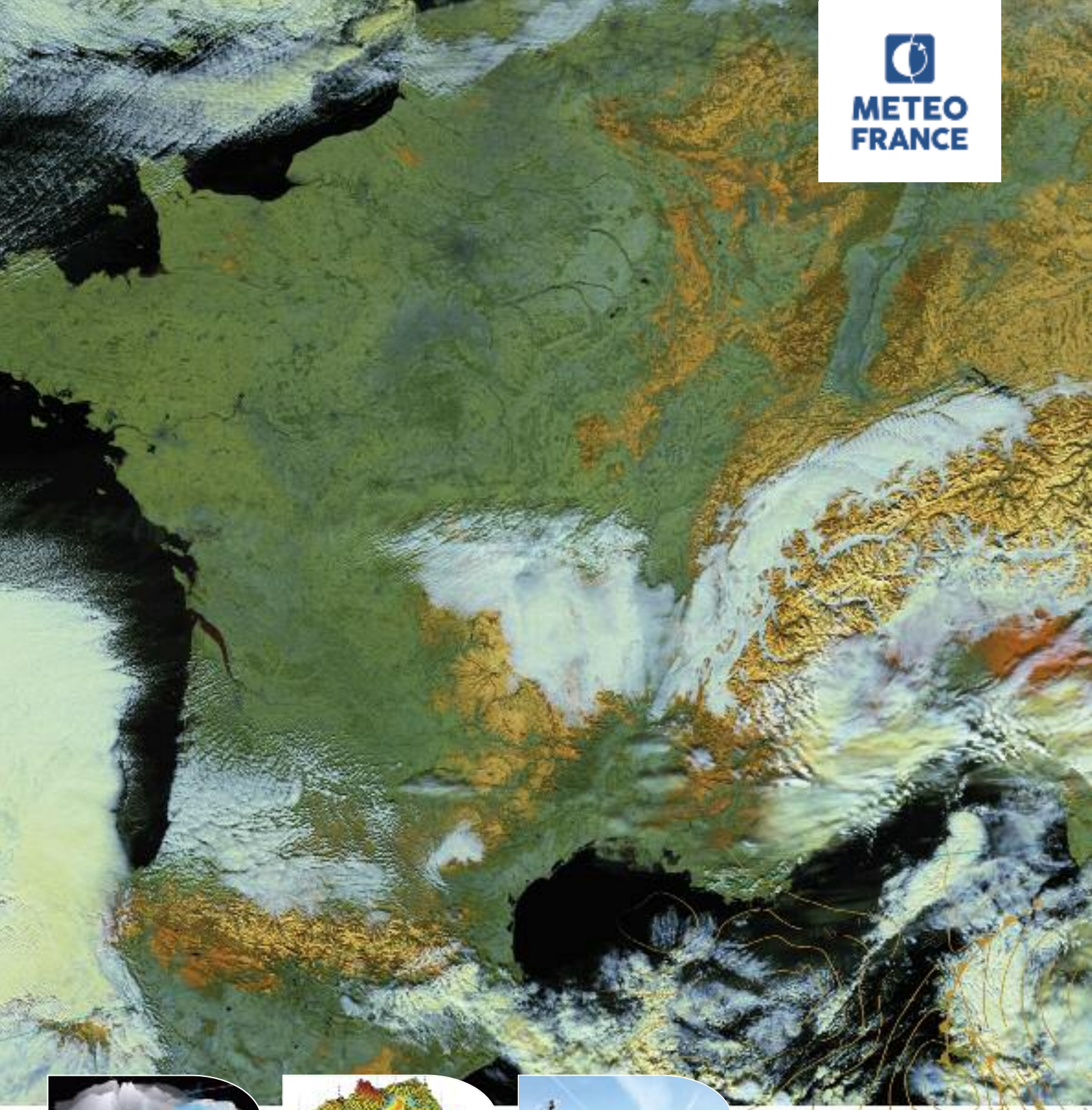
METEO FRANCE



Rapport **Recherche**

2015

Rapport
Recherche 2015

Sommaire

Prévision numérique du temps et assimilations de données ● page 6

Étude des processus ● page 14

Climat ● page 22
Modélisation du climat et du changement climatique
Prévisions saisonnière et climatique
Diagnostic et détection d'évolution climatique

Chimie, aérosols et qualité de l'air ● page 32

Neige ● page 36

Océanographie ● page 40

Techniques, campagnes et produits d'observation ● page 44

Recherche et aéronautique ● page 52

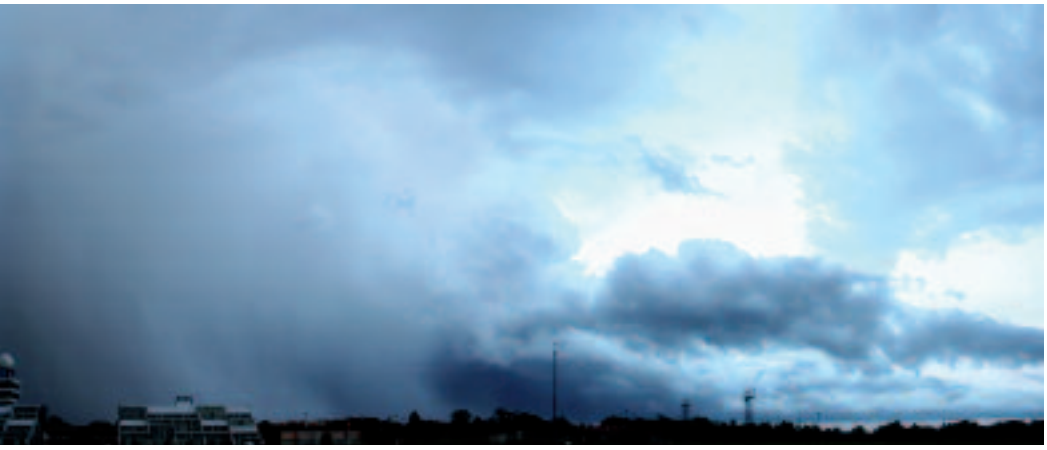
Annexes ● page 55

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

Les objectifs de recherche sont décrits dans la Stratégie Scientifique 2013-2020, avec sept orientations structurantes :

- poursuivre la convergence entre les modèles de prévision du temps et du climat,
- améliorer la représentation des processus physiques et des couplages,
- augmenter régulièrement la résolution de tous les systèmes de prévision,
- généraliser l'utilisation des techniques d'ensembles,
- maîtriser l'utilisation et l'évolution des systèmes opérationnels d'observation,
- évaluer l'impact des activités humaines sur le climat,
- explorer la prévisibilité du climat, de l'horizon infra-saisonnier à décennal.

Le principal résultat de 2015 est la mise en service de plusieurs améliorations des systèmes de prévision du temps prévues dans le Contrat d'Objectifs et de Performances 2012-2016 de l'Etablissement. Le système à échelle convective AROME fonctionne maintenant avec une résolution horizontale de 1,3 km, soit une résolution deux fois plus fine que la version précédente. La résolution verticale a également été améliorée avec un changement de 60 à 90 niveaux. Ces changements améliorent le réalisme des simulations atmosphériques et sont très appréciés des prévisionnistes. Le cycle d'assimilation de données d'AROME reste un algorithme variationnel séquentiel 3D, mais la fréquence des analyses a été augmentée de 8 à 24 par jour, triplant ainsi potentiellement le nombre de données utilisées. Sur le plan des observations, davantage de données satellitaires micro-ondes, de données de surface, de radiosondages et surtout de radars sont utilisées. Une autre réalisation importante a été l'introduction dans la chaîne opérationnelle d'une analyse horaire et de prévisions AROME à 6h d'échéance avec la même configuration à 1,3 km. Ce système est nommé AROME-PI (pour « AROME Prévision Immédiate »), il est le premier des nouveaux systèmes numériques qui doivent être mis en œuvre dans le



© Camille Luxen

cadre du contrat actuel. Les versions ensembliste et déterministe du système de prévision global à maille variable ARPEGE ont été également significativement améliorées.
Dans le domaine du climat, les chercheurs de Météo-France ont été très sollicités par la préparation de la COP21, qui a donné lieu à l'organisation de plusieurs conférences scientifiques et des présentations publiques en grand nombre.
Plusieurs résultats intéressants sur la détection et l'attribution des événements extrêmes au changement climatique, et sur le fonctionnement du système Terre ont également été publiés.
Des accords importants ont été signés avec les organismes délégataires de la Commission Européenne concernant les services Copernicus. Grâce à la qualité de sa recherche, Météo-France confirme ainsi son statut d'acteur important des quatre services Copernicus (Atmosphère, Marine, Climat et Surfaces Continentales).
Concernant l'étude des processus, l'année 2015 a vu la réalisation d'une campagne de mesures dans la vallée de Passy dans les Alpes, permettant d'examiner les caractéristiques de la couche limite stable qui ont un impact fort sur la qualité de l'air.
Dans le domaine des infrastructures de recherches, la concertation avec nos partenaires se poursuit pour identifier la meilleure stratégie de remplacement de l'avion Falcon-20 de SAFIRE, qui arrive bientôt en fin de vie. Un argumentaire complet sera présenté aux tutelles en 2016. La création d'une association internationale sans but lucratif regroupant les opérateurs d'avions de recherche devrait également déboucher en 2016. Le développement de systèmes d'observations par drones est activement poursuivi.
L'année 2015 a également permis des évolutions importantes du Centre National de Recherches Météorologiques. Plusieurs activités ont été transférées à d'autres services de Météo-France, et le CNRM se concentrera désormais sur sa mission de recherche. L'association avec le CNRS a été renouvelée, et notre Unité Mixte de Recherche prendra tout simplement, dès 2016, le nom « CNRM ».
Ceci est le dernier éditorial que je signe en tant que Directeur de la Recherche. Je remercie l'ensemble des agents de Météo-France qui m'ont aidé dans cette mission depuis 2009, et je souhaite bonne chance à mon successeur Marc Pontaud.

Philippe Bougeault
Directeur du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)

Prévision numérique du temps et assimilations de données

Une partie significative des livrables en matière de prévision numérique du temps (PNT) du contrat d'objectifs et de performance entre Météo-France et l'Etat sont devenus opérationnels. Ils ne sont pas seulement disponibles dans tous les services de production de Météo-France, mais, en raison de la politique de données publiques mise en œuvre peu de temps après ces évolutions, ils sont également directement accessibles à tous, sous la forme de visualisations graphiques sur des sites Internet ou même de données numériques brutes. La plupart des applications PNT existantes ont connu des changements très importants, en deux temps, en avril et en décembre 2015.

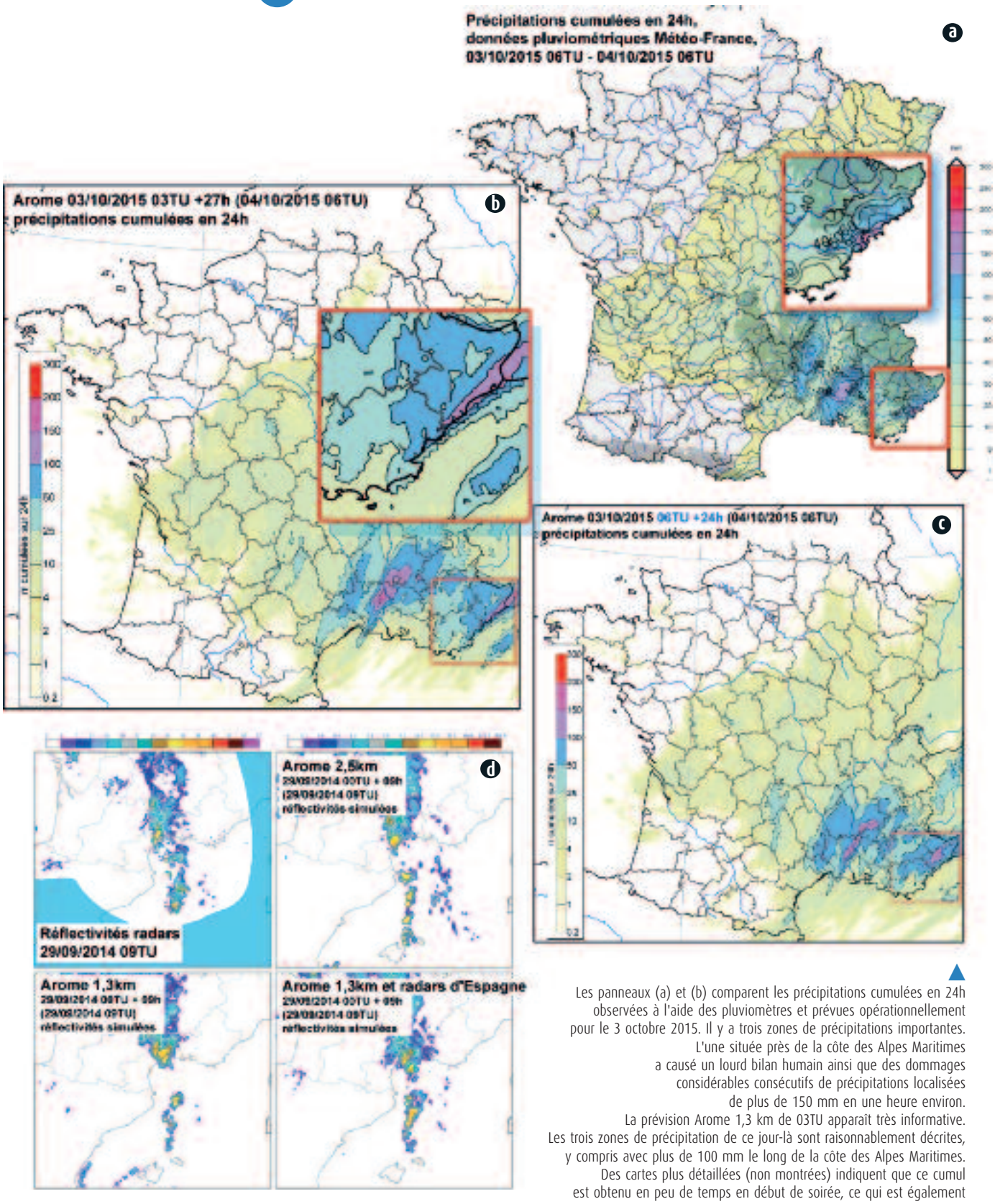
Le système à échelle convective AROME fonctionne maintenant avec une résolution horizontale de 1,3 km, soit une résolution deux fois plus fine que la version précédente. La résolution verticale a également été améliorée avec un changement de 60 à 90 niveaux. Ces changements améliorent le réalisme des simulations atmosphériques et permettent une représentation explicite d'un plus grand nombre de processus et de nouvelles échelles. Cependant, l'amélioration des prévisions est une question quelque peu différente, qui nécessite que le lien entre l'atmosphère réelle et l'état initial du modèle soit amélioré. Deux des changements les plus significatifs dans ce domaine sont l'évolution vers une assimilation de données plus continue et une augmentation de la densité spatiale des données radars utilisées dans l'assimilation. Le cycle d'assimilation de données d'AROME reste un algorithme variationnel séquentiel 3D, mais la fréquence des analyses a été augmentée de 8 à 24 par jour, triplant ainsi potentiellement le nombre de données utilisées. Sur le plan des observations, davantage de données satellitaires micro-ondes, de données de surface et de radiosondages sont utilisées. Un changement devenu opérationnel en décembre doit être mentionné, la densité spatiale des données radars a en effet été quadruplée, l'écrémage spatial ayant été modifié de 16 à 8 km. Lors de ce changement, deux effets relatifs aux interactions rayonnement-orographie ont été introduits dans AROME. Les flux solaires descendants sont maintenant modulés par la pente de la surface, et le flux solaire direct en un point donné est maintenant intercepté par un horizon réaliste tenant compte de la présence de montagnes dans la direction du soleil. Il s'agit d'un changement notable dans la mesure où ce type d'effet très local était, jusqu'à présent, considéré comme typique de ce que les prévisionnistes devaient prendre en compte pour adapter la prévision numérique en fonction du versant d'une vallée. La figure illustre les capacités mais également les limitations du système AROME dans des situations réelles extrêmes. Une autre réalisation importante, partagée avec l'équipe de prévision immédiate et plusieurs services opérationnels, a été l'introduction dans la chaîne opérationnelle d'une analyse horaire et de prévisions AROME à 6h d'échéance avec la même configuration à 1,3 km. Ce système est nommé AROME-PI (pour « AROME prévision immédiate »), il est le premier des nouveaux systèmes numériques qui doivent être mis en œuvre dans le cadre du contrat actuel. Cette implémentation a été réalisée en utilisant un tout nouvel environnement de scriptage basé sur le langage Python. Ce développement technique est destiné à faciliter la transition entre environnements expérimental et opérationnel.

Les versions ensembliste et déterministe du système de prévision global à maille variable ARPEGE ont été également significativement améliorées. Il n'est pas possible de détailler ici, les modifications principales concernent l'amélioration des résolutions verticale et horizontale (l'ensemble atteint une résolution horizontale de 10 km sur l'Europe), l'utilisation de nouvelles observations satellitaires, comme la première assimilation au monde des observations micro-ondes SAPHIR du satellite franco-indien Megha-Tropiques. Un autre changement important a été l'augmentation de la taille de l'assimilation d'ensemble pionnière de type variationnelle 4D passant de 6 à 25 membres, fournissant à l'assimilation variationnelle 4D de référence des statistiques d'erreur d'ébauche dépendante de la situation. Cela profite également à la prévision d'ensemble ARPEGE, qui devient également le premier système global opérationnel à utiliser une nouvelle représentation de la convection atmosphérique, décrite plus en détail ci-dessous.

Tous ces changements marquants sont fondés sur l'évolution continue moins visible mais néanmoins essentielle du logiciel de prévision numérique du temps sous-jacent. Ce logiciel est partagé et co-développé avec le CEPMMT ainsi que de nombreux services météorologiques nationaux européens et nord-africains. Cette coopération internationale est à la fois exemplaire et primordiale pour permettre à tous les participants de bénéficier avec des ressources limitées d'un système de PNT à l'état de l'art hautement intégré et polyvalent. En parallèle des activités opérationnelles et techniques, le groupe PNT a également atteint plusieurs objectifs en matière de recherche. Certains d'entre eux sont illustrés ci-dessous. Pour n'en citer que quelques autres, des prototypes de nouveaux algorithmes d'assimilation de données ont été construits et sont maintenant testés. Ils appartiennent toujours à la famille variationnelle, mais ils reposent beaucoup plus sur les ensembles. Du côté des processus physiques, le projet d'inter-comparaison internationale GABLS 4 sur une situation de couche limite stable sur la station Concordia (plateau Antarctique) a été lancé. L'impact important de la résolution verticale sur la simulation 4D du cycle de vie du brouillard a été documenté. Deux projets européens Horizon H2020 débutent : l'un sur une ré-analyse de surface à méso-échelle, l'autre centré sur l'adaptation des codes et des algorithmes de base aux futures architectures de calcul. Dans le cadre du second projet, deux nouveaux schémas numériques nouveaux seront testés ou conçus : un schéma alternatif “explicite horizontalement implicite verticalement” pour AROME au cas où le schéma spectral actuel deviendrait trop couteux et un schéma à grande précision mais non spectral pour un modèle global.

1

1



Les panneaux (a) et (b) comparent les précipitations cumulées en 24h observées à l'aide des pluviomètres et prévues opérationnellement pour le 3 octobre 2015. Il y a trois zones de précipitations importantes. L'une située près de la côte des Alpes Maritimes a causé un lourd bilan humain ainsi que des dommages considérables consécutifs de précipitations localisées de plus de 150 mm en une heure environ. La prévision Arome 1,3 km de 03TU apparaît très informative. Les trois zones de précipitation de ce jour-là sont raisonnablement décrites, y compris avec plus de 100 mm le long de la côte des Alpes Maritimes. Des cartes plus détaillées (non montrées) indiquent que ce cumul est obtenu en peu de temps en début de soirée, ce qui est également proche de ce qui s'est produit. Cette prévision montre la capacité du modèle à représenter l'événement réel avec une intensité réaliste mais légèrement sous-estimée. Toutefois, cette prévision s'est révélée être la meilleure seulement a posteriori : elle n'a pas été si facile à utiliser en temps réel, car elle fait partie d'une série de prévisions qui ne sont pas totalement consistantes dans le temps, comme indiqué par le panneau (c) avec la prévision 06TU. Une explication est la faible prévisibilité probable de ce système précipitant, mais mise en évidence par un contrôle insuffisant du système Arome par des observations, en particulier sur la Méditerranée. Ceci est illustrée par le panneau (d), sur un cas différent de septembre 2014, lorsque la région de Montpellier a été inondée. La meilleure représentation du système nuageux près de la côte et sur la zone méditerranéenne combine la meilleure résolution spatiale et l'utilisation de données radars supplémentaires sur l'Espagne. Ces données ont été spécialement fournies par le service météorologique espagnol pour cette étude de cas, mais elles ne sont pas disponibles en opérationnel pour le moment.

Développement d'une prévision d'ensemble opérationnelle pour l'échelle convective

En 2016, l'augmentation des ressources de calcul sera mise à profit pour mettre en place une nouvelle application opérationnelle : la Prévision d'Ensemble AROME (PEARO). La configuration retenue pour ce système, actuellement développé par le CNRM, se compose de 12 prévisions du modèle AROME-France à 2,5km de résolution horizontale et 90 niveaux verticaux, couplées à la prévision d'ensemble ARPEGE (PEARP). Chaque membre est perturbé de façon à représenter les principales sources d'incertitude, en particulier l'erreur sur les conditions initiales, les conditions de surface, les conditions aux limites et le modèle. La PEARO produira deux fois par jour, aux réseaux de 09 et 21 TU, des prévisions jusqu'à 45h d'échéance.
Les évaluations objectives de la PEARO, menées sur plusieurs mois de simulation, indiquent un apport significatif de ce système par rapport à la PEARP, notamment pour les précipitations et le vent à 10m. La prise en main et l'évaluation subjective de la PEARO par les prévisionnistes ont par ailleurs débuté avec l'organisation de deux expérimentations en octobre 2014 et juin 2015.
La préparation à l'utilisation opérationnelle de la PEARO s'est poursuivie à l'automne 2015, durant lequel une configuration pré-opérationnelle a tourné en temps quasi-réel une fois par jour pour permettre l'organisation de vacations hebdomadaires avec des prévisionnistes. Ces vacations ont permis d'examiner le comportement et l'apport de la PEARO sur des situations variées et à enjeu, notamment des épisodes de vent fort, de brouillard et de pluies cévenoles. Elles ont également contribué à préciser les méthodes de travail, les paramètres et diagnostics synthétiques et les outils de visualisation utiles pour exploiter ces prévisions.

2

Un nouveau schéma de convection pour améliorer la prévision numérique des averses et des orages

Un nouveau schéma de convection nommé PCMT (Prognostic Clouds, Microphysics and Transport) a été développé. Il met l'accent sur les calculs microphysiques, traités de façon plus détaillée, et prend en compte les couches sèches en dessous du niveau de condensation, améliorant le déclenchement convectif, produisant notamment une meilleure prévision du cycle diurne de la convection continentale. Ce schéma comporte plusieurs options scientifiques, tels les calculs de l'intensité convective ou l'entraînement au bord des nuages, servant ainsi de laboratoire de recherche pour de nouvelles idées dans le domaine de la convection. Ce schéma a été implanté dans le modèle global ARPEGE de Météo-France, utilisé pour les prévisions météorologiques de la journée à la saison et pour les projections climatiques.

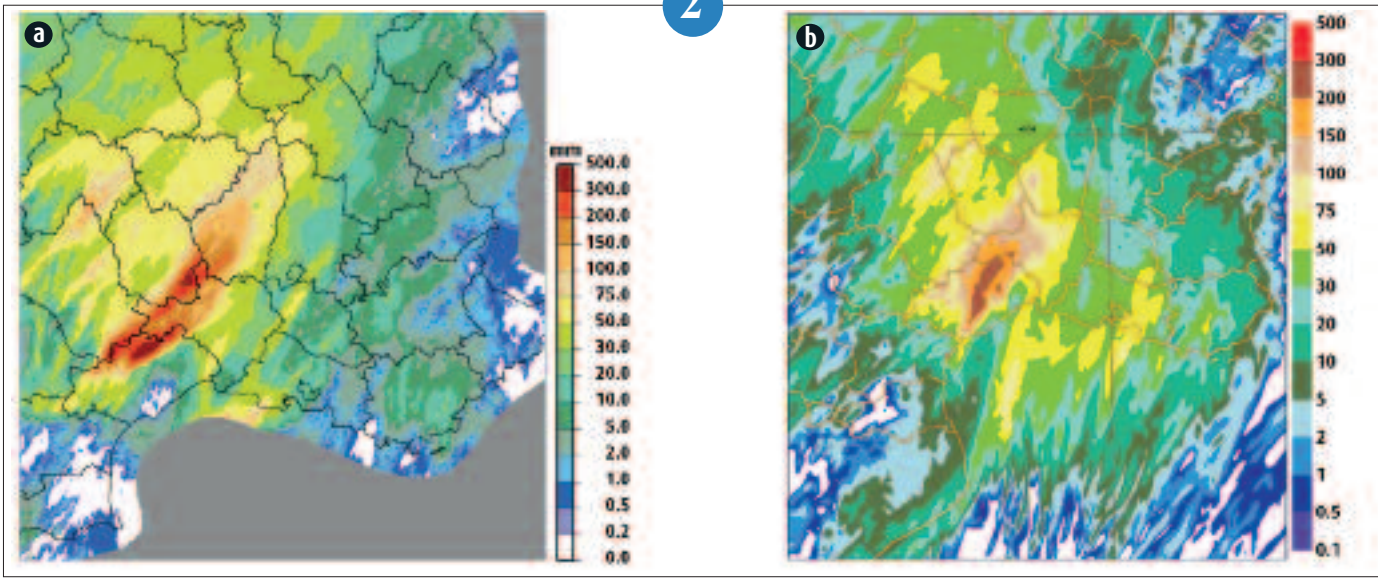
3

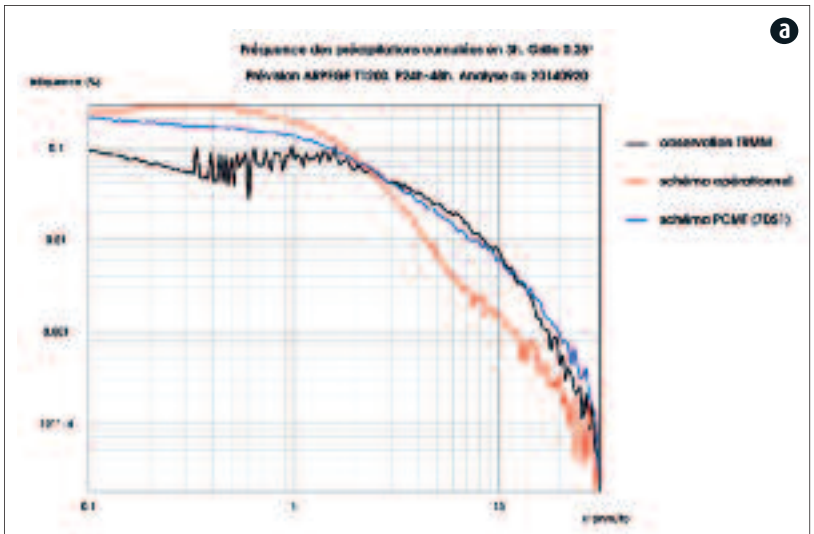
Prévision d'ensemble des crues rapides méditerranéennes

Les « crues-éclairs » affectent souvent les régions méditerranéennes, surtout à l'automne. Très rapides et dévastatrices, provoquées par des évènements de pluies intenses, elles ne sont pas faciles à prévoir tant en termes de localisation et d'intensité des noyaux précipitants qu'en termes de réponse hydrologique des cours d'eau concernés.
Une approche intégrée météorologique et hydrologique est développée au CNRM pour les simuler et les prévoir. Le système couplé ISBA-TOP est dédié à la simulation de la réaction rapide de cours d'eau. Il peut prévoir le débit de rivières méditerranéennes s'il est forcé par des champs de pluies prévus par un modèle météorologique de résolution kilométrique comme le modèle AROME.
Ces systèmes de modélisation restent incertains malgré une amélioration continue. La Prévision d'Ensemble AROME permet de considérer l'incertitude sur les pluies prévues en fournissant une dizaine de scénarii équiprobables de pluies. Chaque scénario est perturbé sur la base d'une climatologie d'erreurs de prévision des pluies afin d'obtenir un plus grand ensemble de pluies prévues. Cet ensemble est utilisé en entrée d'ISBA-TOP pour réaliser une prévision d'ensemble de débits.
L'incertitude sur les pluies prévues n'est pas la seule et les travaux actuels visent à prendre en compte celle liée à l'état initial des sols et celle inhérente à la modélisation hydrologique. Les paramètres hydrodynamiques du système couplé ISBA-TOP, sensibles pour la simulation de débits, ont été déterminés et l'importance des conditions initiales d'humidité des sols a été montrée.
Il nous reste à considérer conjointement ces trois sources d'incertitude afin de construire une prévision d'ensemble hydrologique complète.

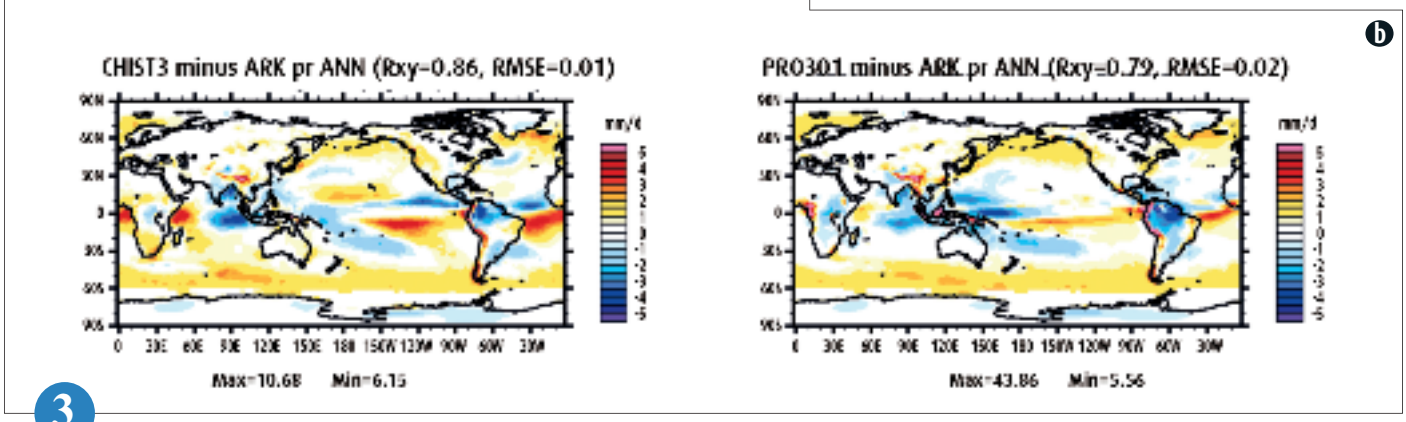
4

2





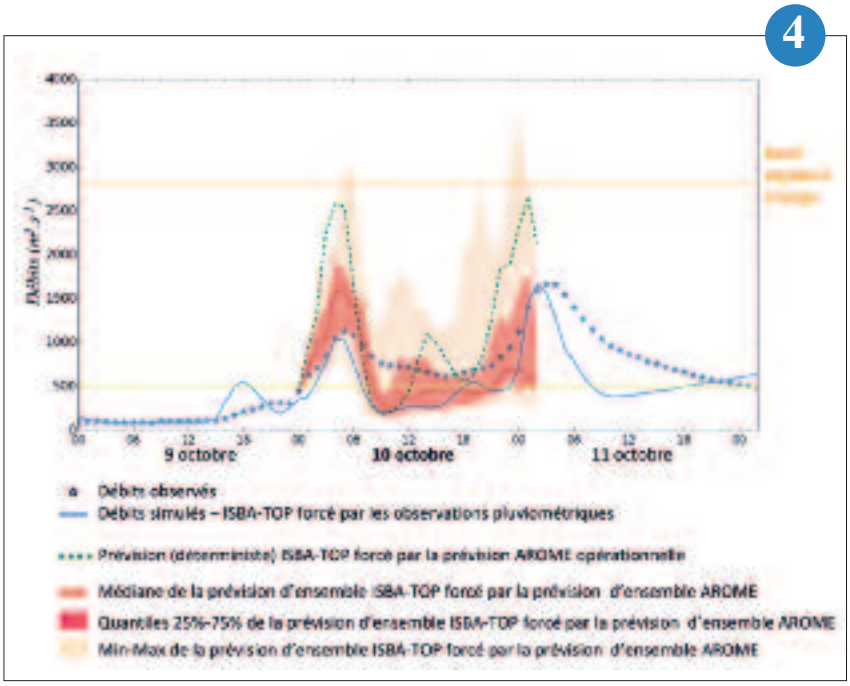
Comparaison des distributions de précipitations observées et prévues : en noir la distribution observée sur la zone 60°S-60°N, 180°W-180°E, de la bruine (0.1 mm/h) à la pluie forte (> 10 mm/h).
La distribution du nouveau schéma (bleu) est bien plus intermittente que celle du schéma opérationnel de référence (rouge), avec moins de pluie faible et plus de pluie forte, se rapprochant de la distribution observée.



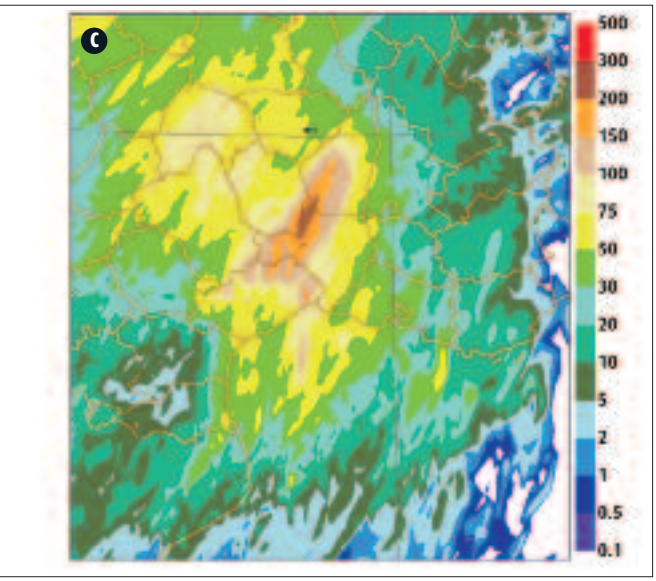
Biais de précipitation annuelle simulée par ARPEGE-Climat couplé utilisant l'ancienne physique en haut, et la physique PCMT en bas ; les biais sont calculés par rapport à la climatologie de Xie et Arkin (1997). L'amélioration majeure apportée par PCMT apparaît sur cette figure comme une diminution de l'étendue spatiale des biais positifs de part et d'autre de la zone de convergence.

3

Prévision d'ensemble des débits de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc pour la journée du 10 octobre 2014 à partir des prévisions de pluie d'AROME (ligne discontinue verte) et de celles de la Prévision d'Ensemble AROME (plages de couleurs). La prévision est comparée aux observations de débits (étoiles) et à la simulation d'ISBA-TOP forcé par des observations de pluies (ligne continue bleue). Le seuil de vigilance orange du SCHAPI pour ce cours d'eau est indiqué en ligne orange.



4



Précipitations cumulées en 24h, valides le 13 septembre 2015 à 03 TU :
(a) lame d'eau Antilope,
(b) Prévision AROME déterministe du 12 septembre à 00 TU
et (c) quantile 90% de la prévision d'ensemble AROME du 11 septembre à 21 TU.

Des AROME pour l'Outre-Mer

Confrontés à des évènements météorologiques particulièrement violents, les départements et collectivités d'Outre-Mer doivent disposer des meilleures prévisions possibles de ces phénomènes pour assurer la sécurité des personnes et des biens.
Depuis de nombreuses années, des systèmes de prévision numérique du temps sont dédiés à ces régions tropicales d'intérêt. 2015 a vu la concrétisation d'une amélioration majeure, avec l'utilisation du modèle AROME sur ces régions.
Le gain le plus évident est la résolution horizontale, qui passe de 8 à 2.5km. Cela permet notamment de mieux représenter le relief très complexe des îles volcaniques (cf. figures), et des effets locaux induits. AROME est également un modèle permettant de résoudre explicitement la formation des nuages convectifs les plus grands, ce qui améliore très significativement la prévision des pluies intenses, fréquentes en milieu tropical. La prévision des cyclones bénéficie des résolutions horizontale et verticale accrues, et aussi de la meilleure prise en compte de phénomènes physiques.
Ces AROME pour l'Outre-Mer utilisent comme conditions initiales pour chaque prévision l'état analysé par le modèle du CEPMMT. À l'avenir, pour améliorer ces conditions initiales, certains de ces modèles pourraient mettre en œuvre leur propre assimilation de données, avec prise en compte des radars locaux. Un autre axe d'amélioration est le couplage entre l'océan et l'atmosphère, qui permet de modéliser au cours d'une prévision leurs interactions mutuelles ; cela rendrait possible par exemple la modélisation du refroidissement de l'océan dans le sillage des cyclone et de sa rétroaction sur l'atmosphère.

5

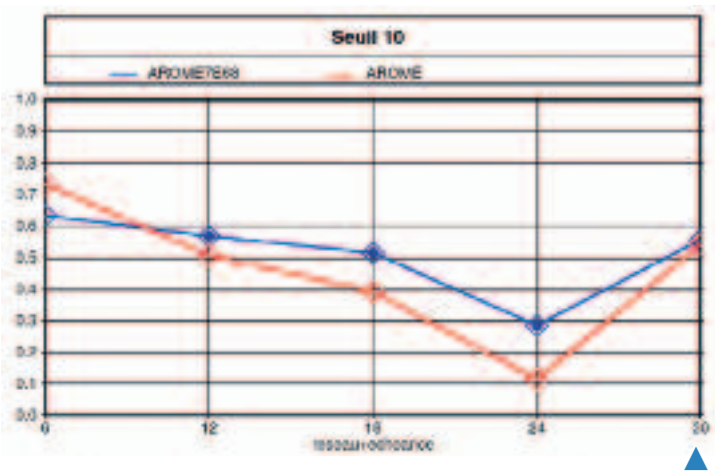
Augmentation de la densité des données radar utilisées dans le système d'assimilation AROME

Avec l'augmentation de résolution du modèle AROME, des échelles de plus en plus fines des phénomènes météorologiques peuvent être prévues, mais aussi progressivement analysées. Le passage du modèle AROME à la haute résolution horizontale de 1.3 km amène naturellement à envisager une augmentation de la densité des observations radar assimilées. L'assimilation des observations radar dans le modèle AROME à 2.5 km de résolution avait toutefois montré que leur densité horizontale ne pouvait pas être inférieure à 15 km, afin d'éviter des corrélations d'erreur d'observation induites par l'écart entre les échelles des phénomènes précipitants réels et les échelles du modèle.
En accord avec des diagnostics du système d'assimilation, il est apparu possible d'avoir une densité radar à 8 km moyennant un ajustement des paramètres de l'inversion des réflectivités et des erreurs d'observation des vents radiaux des radars Doppler. L'apport net de la haute-densité radar sur le système AROME a été montré, notamment par une amélioration des prévisions de précipitations jusqu'à 18 heures d'échéance.
L'amélioration du score des cumuls sur 6 heures des précipitations au sol de type « BSS » calculé avec la lame d'eau ANTILOPE est présentée sur la Figure a. Des déclenchements de la convection difficilement appréhendés par le système AROME à 2,5 km ont été simulés avec la nouvelle configuration. Ceci est illustré sur le cas de convection en Méditerranée du 19 septembre 2014 (Figure b) associé au développement d'une super-cellule qui a touché en fin de matinée la ville de Toulon. Avec la haute densité radar, la convection est initiée au bon endroit, même si le système ne parvient pas à reproduire l'étendue et l'intensité observées.

6

6

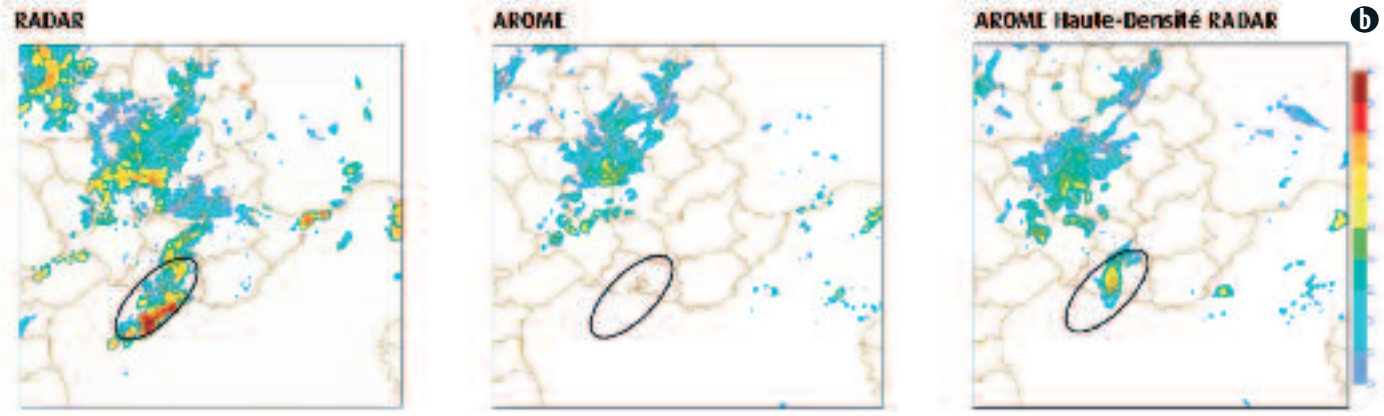
a

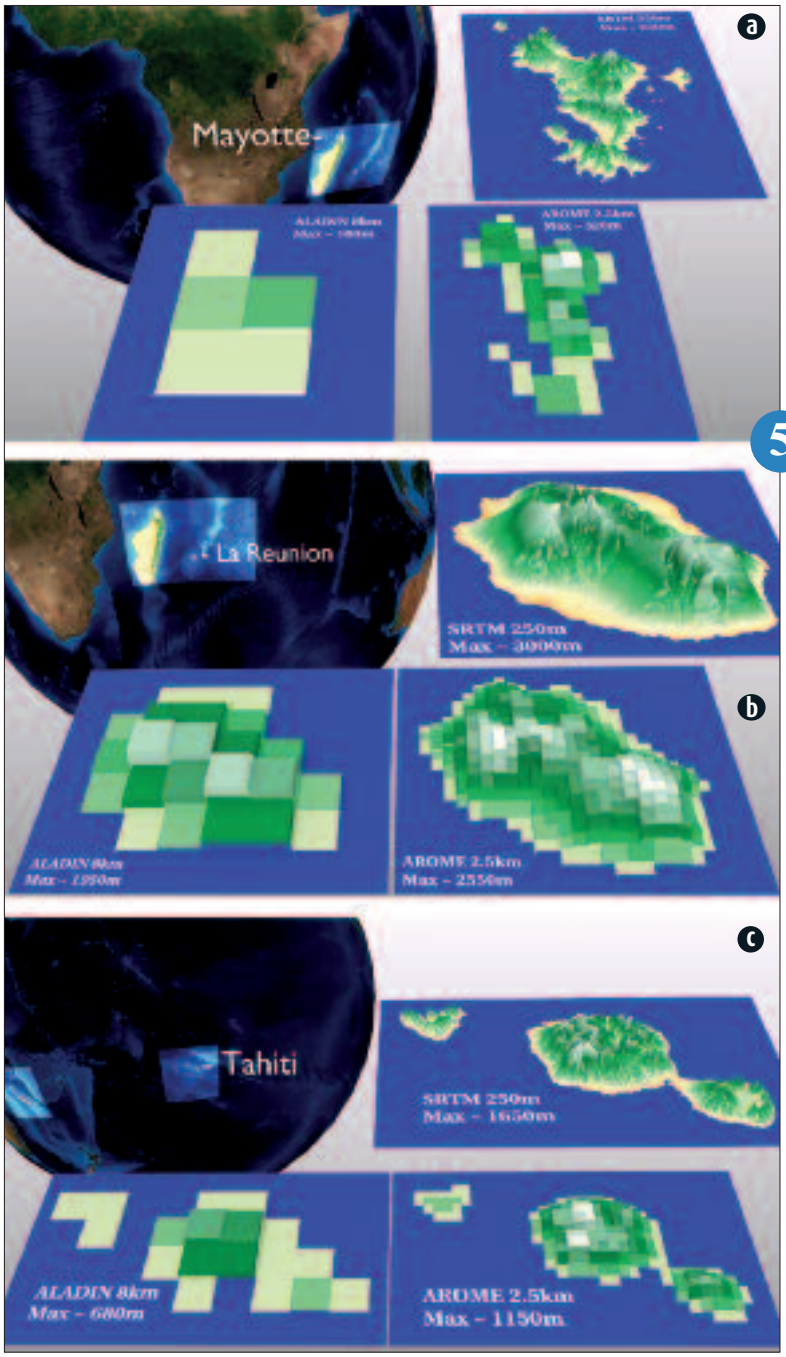


(a) Pour différentes échéances de prévision (6h à 30h) représentation des « Brier Skill Scores », scores probabilistes pour l'accumulation de précipitations sur 6 heures (RR6) pour la référence AROME (rouge) et l'expérience avec haute-densité radar (bleue) sur la période du 4 juillet au 6 août 2015. Le score est ici montré pour le seuil de 10 mm. Plus le score est élevé, meilleure est la prévision. Le score BSS prend ici en compte un voisinage de 52 km.

(b) Sur le Sud-Est de la France, le 19 septembre 2014 : composite radar à 07h TU (à gauche), réflectivités simulées à 700 hPa issues des prévisions 1h cyclées d'AROME à l'heure de validité 07h TU pour la référence AROME (au milieu) et l'expérience avec haute-densité radar (à droite).

b

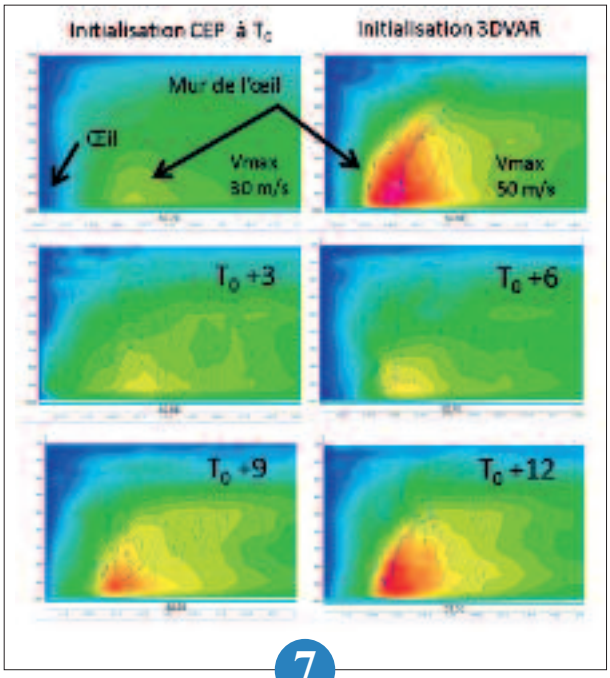




5

Comparaison du relief de Mayotte (a), La Réunion (b) et Tahiti (c) décrit par les modèles ALADIN (8km) et AROME (2.5km) ainsi que celui mesuré par la mission SRTM (250m).

Moyenne azimutale du vent analysé (haut) et prévu (milieu, bas) avec AROME Indien dans le cyclone Bejisa. L'analyse AROME 3D-VAR permet de réduire de près de 12 heures le temps nécessaire au modèle pour reconstruire la structure du cyclone (spin up) lorsque celui-ci est initialisé à partir d'une analyse du Centre Européen.



7

Apport de l'assimilation de données pour la prévision cyclonique à haute résolution

La configuration du modèle AROME Indien développée conjointement par la Cellule Recherche Cyclone (CRC) et le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo-France est considérée comme le laboratoire des quatre modèles AROME (Indien, Nouvelle-Calédonie, Antilles-Guyane, Polynésie) opérationnels qui seront prochainement déployés dans les régions ultramarines. Au cours de ces dernières années, de nombreuses études ont été réalisées par la CRC afin d'évaluer l'apport de l'assimilation de données pour la prévision cyclonique. Le schéma d'assimilation 3D-VAR du modèle AROME France a ainsi été implémenté dans AROME Indien, puis testé sur de nombreux cas de cyclones tropicaux ayant récemment affecté le bassin sud-ouest de l'océan Indien (Dumile, Bejisa, Hellen, Bansi...).

Les résultats obtenus en conditions cycloniques montrent que l'assimilation de données a globalement un impact très positif sur les performances du modèle. Par rapport à une initialisation classique à partir d'une analyse du modèle du Centre Européen, l'analyse 3DVAR AROME permet en effet d'obtenir des prévisions de précipitations et de vents plus réalistes, mais également de réduire considérablement le « spin up » du modèle (Fig.). Le recours à l'analyse 3DVAR semble, en revanche, n'avoir que peu d'impact sur la trajectoire prévue, laquelle est essentiellement pilotée par le modèle coupleur.

7

Utilisation des radars spatiaux pour la validation des modèles de prévision pour les territoires d'Outre-mer

Le satellite GPM Core Observatory est une mission portée par les agences spatiales américaine et japonaise (NASA/JAXA). Cette mission est dédiée à l'observation des précipitations à l'échelle globale. Elle embarque à son bord deux instruments dont le radar bifréquences DPR. Grâce à ses observations à 13.6 et 35.5GHz, le DPR fourni des informations sur les hydrométéores au cœur des nuages. Cet instrument est particulièrement intéressant pour les zones du globe peu ou mal couvertes par des radars au sol, comme les surfaces océaniques.
Dans le cadre de la mise en place d'une nouvelle génération de modèle de prévision numérique pour les régions tropicales à Météo France, il est intéressant de documenter la capacité du modèle AROME à prévoir les événements convectifs tropicaux. Le DPR est un système d'observation particulièrement approprié pour cette démarche et ainsi documenter les structures 3D des nuages pour des domaines géographiques pas ou peu couverts par des radars au sol.
Une première étude de comparaison a été menée entre les observations du DPR et les prévisions du modèle AROME Océan Indien pendant la saison cyclonique 2015. La figure montre ainsi le cyclone Bansi d'une part observé par les satellites Meteosat dans le domaine de l'infrarouge et GPM à 35.5GHz ((a) et (c)) et d'autre part simulé par AROME et projeté dans l'espace des observations ((b) et (d)). En particulier, la comparaison des deux coupes verticales de réflectivités ((c) et (d)) illustre le degré d'accord important entre ces observations et les prévisions AROME quant à la structure 3D des nuages. Ce type de comparaison devrait se révéler utile afin de qualifier de nouvelles versions du modèle AROME, par exemple dans le cadre d'une évolution de son schéma microphysique.

8

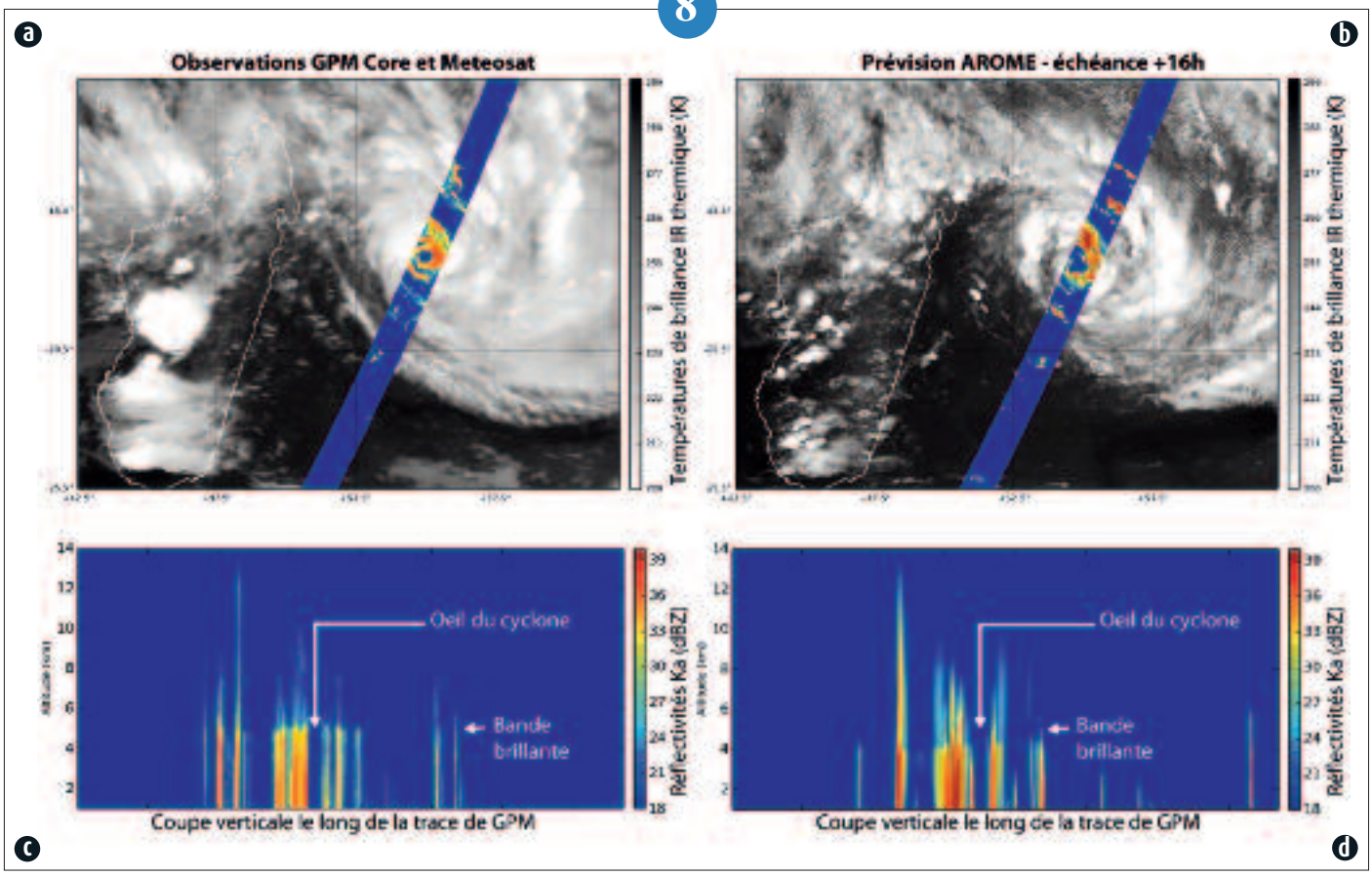
Impact de la résolution verticale sur les processus de formation d'un cas de brouillard sur l'aéroport de Roissy

La prévision du brouillard est une information très importante pour beaucoup d'activités, en particulier pour assurer au mieux la gestion des grandes plates-formes aéroportuaires comme celle de Roissy.
Des simulations à différentes résolutions verticales ont été effectuées avec une configuration du modèle AROME à domaine réduit centré sur l'aéroport de Roissy pour étudier l'impact de la résolution verticale sur le cycle de vie d'un cas de brouillard. Différentes résolutions verticales ont été testées : une résolution de 60 niveaux, une de 90 niveaux correspondant à l'opérationnel et enfin une résolution de 156 niveaux avec le premier niveau à 1m. La résolution horizontale est celle du modèle AROME opérationnel (1,3km). Sur la figure jointe on peut observer un impact important de la résolution verticale sur la chronologie de formation et de dissipation du brouillard. Il ne faut pas se focaliser sur les valeurs numériques de la visibilité, calculée ici de manière approximative par la formule de Kunkel, mais sur le début d'apparition du brouillard. La simulation à 156 niveaux, avec le premier niveau à 1m, permet un gain de près de 2 heures par rapport à la résolution verticale opérationnelle sur l'heure d'apparition du brouillard.

Dans le contexte d'exploitation d'un aéroport de grande capacité ceci est une information très importante. Une étude sur un assez grand nombre de cas confirme ce résultat sur la chronologie des brouillards détectés par le modèle. Cependant, la résolution verticale seule ne permet pas d'améliorer de manière significative le rapport non détection/fausse alerte. Compte tenu de ces résultats, l'étude s'oriente vers la recherche d'une solution algorithmique visant à concilier une forte résolution verticale avec les contraintes de stabilité numérique imposées par la prévision du temps opérationnelle.

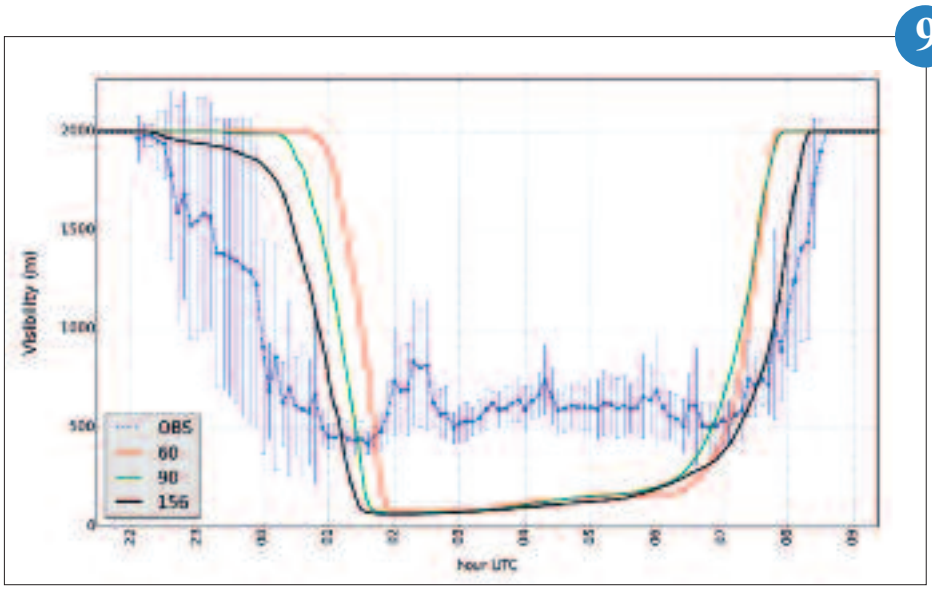
9

8



(a) Cyclone Bansi observé le 11 janvier 2015 à 11h00 UTC par Météosat dans le domaine de l'infrarouge (températures de brillance en noir et blanc) et par le radar du DPR à 35.5GHz pour une élévation de 3km au dessus du sol (réflectivités radar en couleur, même échelle que (c) et (d)).
(b) Idem que (a) pour une prévision AROME initialisée à 00h00 UTC le 11 Janvier.
(c) Coupe verticale des réflectivités radar mesurées par le DPR au milieu de la fauchée représentée sur (a).
(d) Idem que (c) pour la même prévision AROME représentée sur (b).

9



Moyenne et écart type de la visibilité mesurée par les différents visibilimètres sur l'aéroport de Roissy le 22 octobre 2012 (bleu) Visibilité calculée par le modèle AROME à 1,3km de résolution horizontale avec différentes résolutions verticales (60 niveaux en rouge, 90 niveaux en vert et 156 niveaux en noir).

Étude des processus

Les recherches conduites au CNRM visent à progresser dans la compréhension et la modélisation des phénomènes atmosphériques et de leurs interactions avec les surfaces. Des progrès ont entre-autres été réalisés en 2015 dans la caractérisation, la compréhension et la modélisation des systèmes orageux des latitudes tropicales et des moyennes latitudes, des tempêtes des latitudes tempérées et des surfaces continentales comme illustrés ci-après.
L'année 2015 a été particulièrement marquée par la réalisation d'un point d'étape à mi-parcours pour le programme de recherche HyMeX co-piloté par Météo-France. L'exploitation des observations des campagnes de mesures du programme HyMeX a conduit à un important effort de synthèse et de valorisation des premiers résultats obtenus, incluant la publication d'une quinzaine d'articles dans des numéros dédiés de journaux scientifiques reconnus internationalement. Entre-autres, l'étude des situations de pluie intense documentées pendant la campagne de l'automne 2012 a permis de progresser dans l'identification et la compréhension des mécanismes impliqués dans la formation des épisodes Méditerranéens. L'interaction de la circulation en basses couches avec les reliefs du pourtour Méditerranéen est un élément clé dans ces situations (Figure). Même si cette interaction dépend des configurations de la topographie locale, les différents cas étudiés présentent des caractéristiques communes. A côté du soulèvement orographique, induit par la chaîne montagneuse, du flux humide et instable de basses couches, ces études de cas mettent en évidence fréquemment d'autres ingrédients, comme i) des lignes de convergence, bien souvent sur mer, induites par l'interaction de la circulation de basses couches avec le relief ou résultant d'un forçage synoptique de plus grande échelle, ii) un dôme d'air froid en basses couches, induit le plus souvent par l'évaporation des précipitations du système orageux, iii) des circulations orographiques comme le contournement des chaînes montagneuses et la canalisation du flux dans les vallées.

1

Évaluation de la paramétrisation de la turbulence dans les nuages convectifs profonds

Peu de travaux se sont encore intéressés à la représentation de la turbulence au sein des nuages convectifs pour les modèles atmosphériques à l'échelle kilométrique. Les cumulus et les cumulonimbus sont pourtant le siège d'intenses mouvements turbulents qui peuvent avoir un impact sur la structure et la dynamique de ces nuages.
Ainsi, une simulation de convection profonde à très fine échelle avec des mailles de 50 m (LES, i.e. Large Eddy Simulation) a été réalisée dans une configuration idéalisée avec le modèle de recherche Méso-NH (Figure a). Cette simulation sert de référence pour caractériser les flux turbulents au sein de ces nuages aux échelles hectométrique et kilométrique. On met ainsi en évidence des structures, dites à contre-gradient, typiques d'une turbulence non locale.

L'évaluation du schéma de turbulence, actuellement utilisé dans les modèles Méso-NH et AROME, montre que la production thermique de la turbulence (Figure b) et par conséquent l'énergie cinétique turbulente sont largement sous-estimées dans les nuages à ces échelles. En particulier, les structures en contre-gradient des flux turbulents ne sont pas reproduites car la formulation actuelle n'est pas adaptée. Une formulation alternative, basée sur des gradients horizontaux, permet de mieux représenter ces structures turbulentes et la production thermique avec une augmentation de l'énergie cinétique turbulente et une réduction des vitesses verticales dans les nuages convectifs, ces dernières étant trop souvent surestimées dans les nuages convectifs profonds par les modèles ayant une résolution kilométrique.

L'évaluation et l'amélioration de ce nouveau schéma va se poursuivre avec des simulations de cas réels d'épisodes convectifs méditerranéens observés pendant les deux mois de la campagne HyMeX.

2

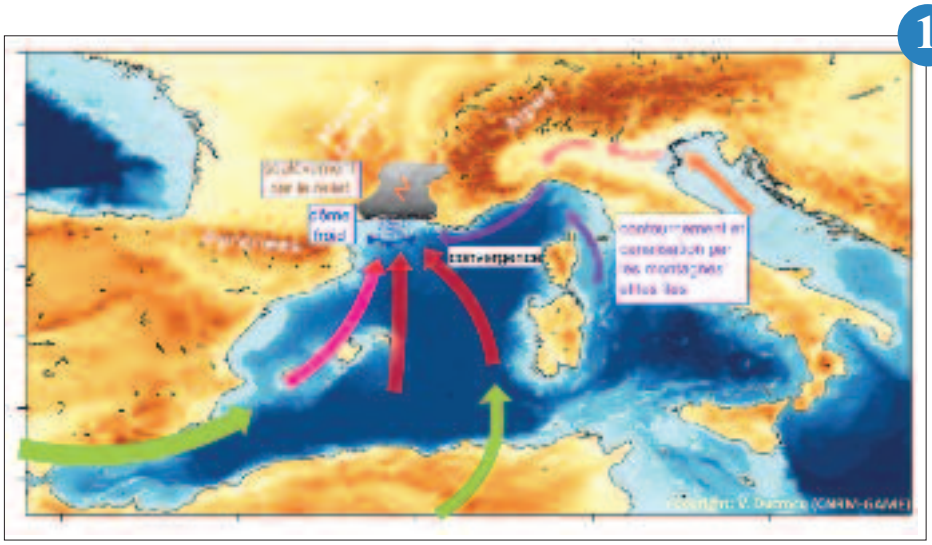
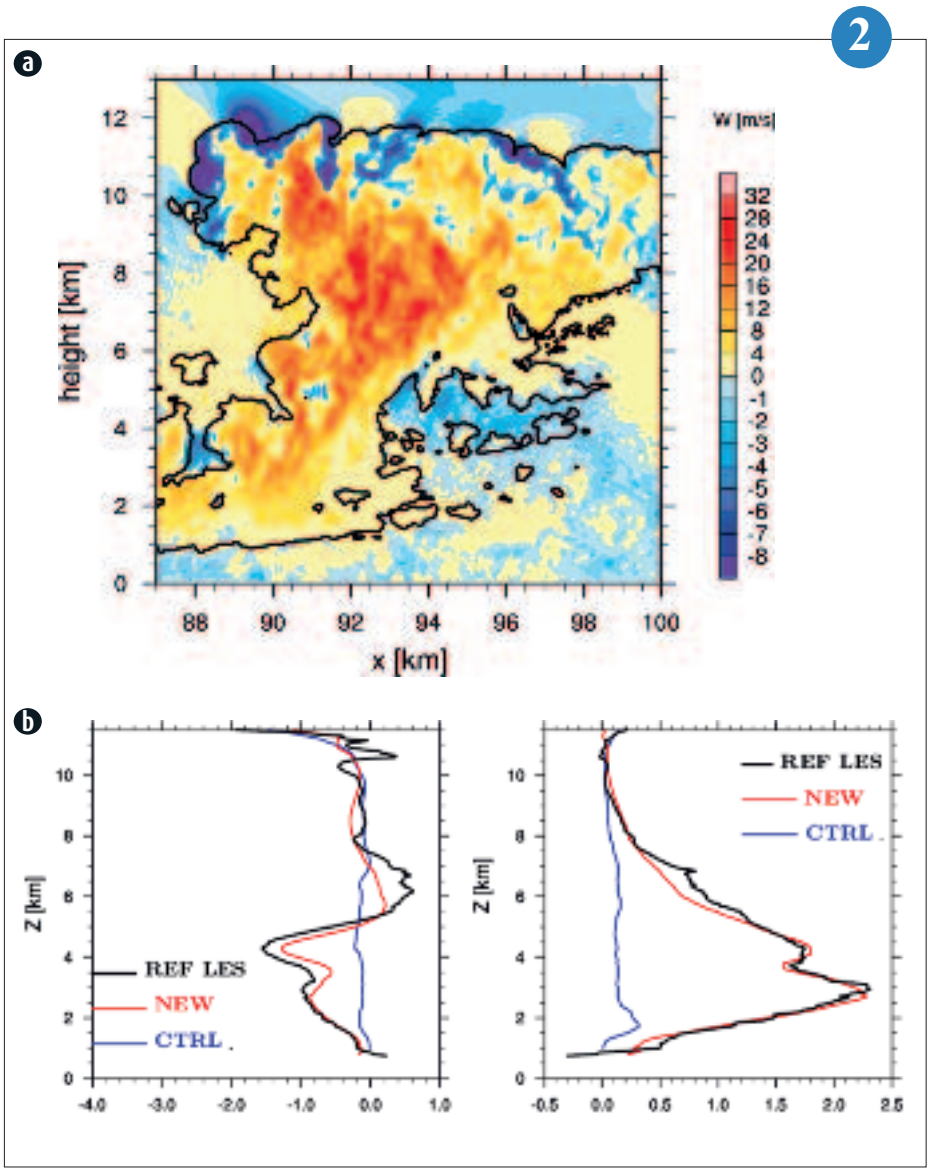


Schéma conceptuel de la circulation atmosphérique en basses couches et des mécanismes de formation des épisodes de pluie intense en Méditerranée.



(a) Coupe verticale dans un cumulonimbus pour la simulation de référence (LES à 50 m de résolution) : contour du nuage (en ligne noire) et vitesses verticales ($m.s^{-1}$, en plages colorées).
(b) Profils verticaux moyennés au sein des nuages convectifs des flux turbulents verticaux de chaleur (à gauche, en $m.s^{-1}.K$) et d'eau totale non précipitante (à droite, en $m.s^{-1}.g.kg^{-1}$) contribuant à la production thermique de la turbulence pour des simulations ayant une résolution horizontale de 1 km pour le schéma actuel (CTRL en bleu) t pour le schéma modifié (NEW en rouge). Ils sont comparés aux flux turbulents de la simulation de référence (REF LES en noir) filtrés à cette même résolution kilométrique.

Évolution des rails des dépressions au XXe siècle

Les modifications à l'échelle climatique des rails des dépressions sont un thème de plus en plus étudié. La mise à disposition d'une nouvelle ré-analyse centennale et homogène (couvrant la période 1900-2010) par le CEPMMT nous permet d'appréhender l'évolution des rails des dépressions au cours du siècle passé.
Un comptage des dépressions de l'Atlantique nord et de tout l'hémisphère a été réalisé au moyen d'une méthode de suivi des dépressions appliquée à l'ensemble de la ré-analyse (voir figure). Le nombre total de dépressions augmente entre 1900 et 1920. On peut raisonnablement penser que la tendance en début de siècle est due à l'augmentation du nombre d'observations assimilées dans la ré-analyse. Cette augmentation du nombre d'événements est néanmoins non significative sur l'Atlantique mais plus claire sur l'Asie et le Pacifique. Les raisons expliquant cette tendance ne sont pas connues à ce jour. En revanche, deux autres périodes marquées par des tendances significatives du nombre de tempêtes, sont aussi remarquables du point de vue du mode de variabilité appelé « oscillation arctique ». Il s'agit de la période 1970-1990 marquée par une augmentation du nombre de tempêtes suivie d'une période qui voit plutôt une diminution. On retrouve ces résultats lorsque l'on s'intéresse aux systèmes les plus intenses.
Enfin, la tendance moyenne sur le siècle est plutôt à l'augmentation du nombre de dépressions et plus particulièrement des tempêtes les plus intenses sur l'hémisphère nord. Cette tendance apparaît comme non significative sur l'Atlantique (en rouge sur la figure).

3

Estimation des erreurs systématiques de prévision de la trajectoire des dépressions au moyen des prévisions rétrospectives

La prévision du temps s'appuie le plus souvent sur des sorties de modèles calibrées. On espère ainsi corriger les erreurs systématiques ainsi que modérer la sur- ou sous-dispersion des prévisions d'ensemble. Or, une calibration efficace, notamment des événements extrêmes, requiert de très longs échantillons d'apprentissage.
Dans cet esprit nous mettons en place un système de prévisions rétrospectives s'appuyant sur la ré-analyse du CEPMMT. Nous disposons ainsi de prévisions sur 30 années obtenues avec la dernière version des modèles utilisés dans la prévision d'ensemble. Il est ainsi possible de caractériser les erreurs systématiques de phénomènes tels que les dépressions des latitudes tempérées. On s'intéresse ici aux erreurs systématiques de déplacement des dépressions commises par les modèles. Une détection systématique des dépressions les plus intenses a été réalisée. Une méthode de flot optique a permis, sur chaque événement, de caractériser l'erreur de déplacement. Les 500 événements correspondants aux plus fortes erreurs ont été analysés au moyen de composites. On montre notamment que les dépressions au déplacement vers l'est trop rapide sont sensiblement différentes des dépressions trop lentes. Les dépressions trop lentes sont aussi les dépressions dont l'amplitude est la plus sous-estimée dans la prévision. On retrouve un résultat bien connu : la propagation vers l'est est ralentie par le manque de tourbillon induit par les dégagements de chaleur latente à l'avant du système. Dans le cas des dépressions au déplacement trop rapide on retrouve le fait qu'elles ne sont pas assez creuses dans la prévision. Là encore les processus humides sont à incriminer. Dans ce second cas l'évaporation en haute troposphère est supposée produire un anticyclone qui, dans certaines configurations récemment étudiées au CNRM, est capable d'induire un vent contraire dans les basses couches et ainsi ralentir la progression de la dépression.
Ce mode d'analyse des erreurs systématiques sera généralisé et perfectionné dans l'avenir. Gageons qu'il soit un facteur d'amélioration des modèles numériques.

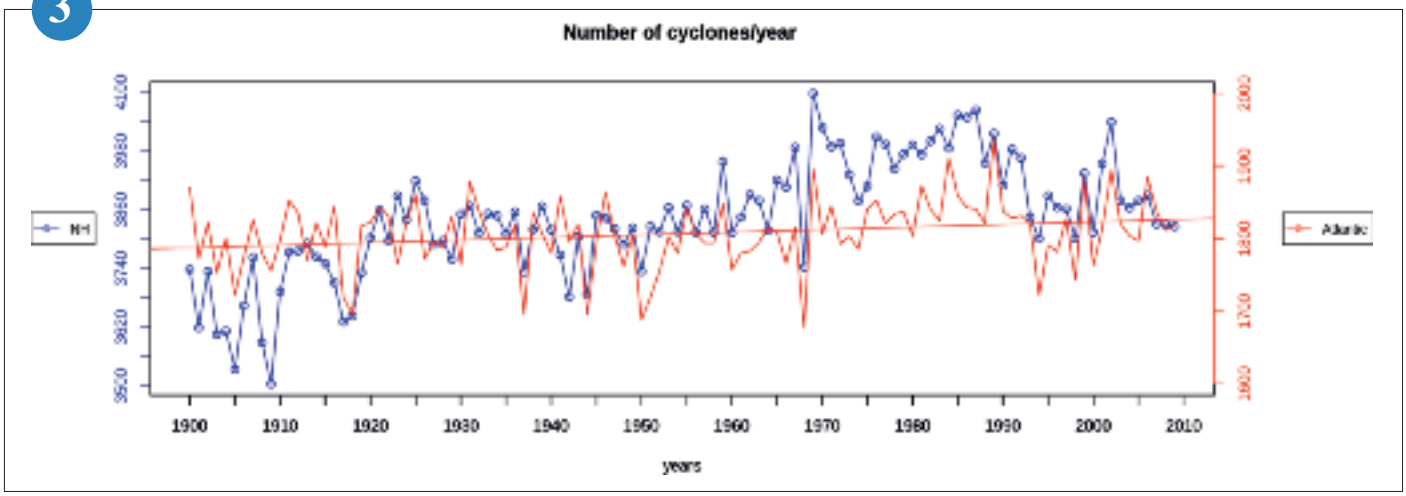
5

Les vents forts au sein des tempêtes, réalité des « sting jets »

Les tempêtes des latitudes tempérées résultent du mécanisme d'interaction barocline. On peut ainsi expliquer la présence de vents forts tournant autour de la dépression dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. En revanche, ce mécanisme ne permet pas d'expliquer les rafales les plus fortes généralement organisées en structures spatiales cohérentes de méso-échelle.
Le bord sud des dépressions en stade mature (voir figure) est une région particulièrement favorable aux vents très forts. Elle se caractérise par de faibles stabilités statiques, de forts gradients horizontaux de température, la proximité de structures nuageuses, mais surtout, par la présence de parcelles d'air atmosphérique à l'histoire longue et complexe : elles proviennent généralement du secteur chaud et subissent de fortes ascendances tandis qu'elles font le tour de la dépression. Lorsqu'elles se trouvent à l'ouest de la dépression en haute troposphère elles subissent de fortes subsidences renforcées par le refroidissement diabatique dû à l'évaporation des nuages et à la frontolyse.
Ces structures de méso-échelle, appelés « sting jets » ont été essentiellement étudiées dans des cas réels de tempêtes récentes. La mise en évidence d'un « sting jet » au sein d'une tempête idéalisée comme sur la figure est considérée comme plus difficile. La mise en place de simulations idéalisées a permis de mettre en évidence la forte sensibilité de l'intensité des vents forts à la dépression au sein de laquelle les vents forts se forment : une dépression naissant du côté sud du jet présente un « sting jet » très fort tandis que les dépressions naissant et demeurant en air froid ne présentent pas de telles structures.

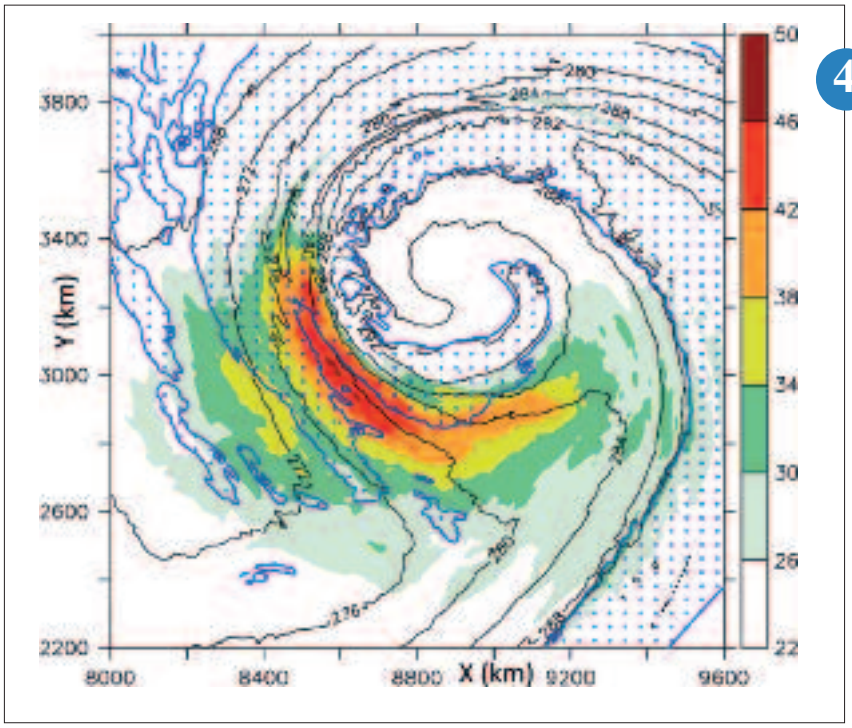
4

3



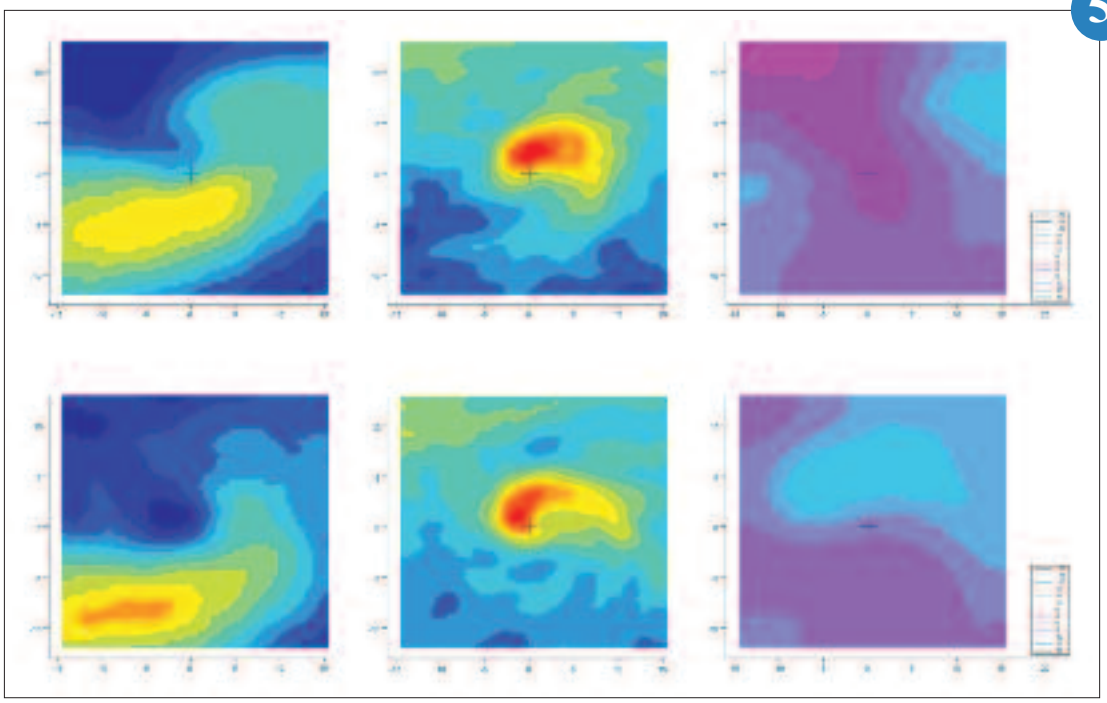
Evolution de nombre de dépressions pour tout l'hémisphère nord (en bleu) et pour le bassin Nord-Atlantique/Europe (en rouge). La ligne droite matérialise la tendance moyenne sur le siècle pour le second domaine.

4



Extrait d'une simulation Méso-NH à 4 km de résolution sur l'horizontale et 200 m sur la verticale en basse troposphère et sur un domaine de 1600 x 1700 km centré sur la dépression au bout de 4 jours d'intégration.
En plages de couleur : le module du vent (en m/s), la température potentielle en contours fins et noirs (K), l'humidité relative supérieure à 80% (en plage tachetée) à 1.7 km d'altitude.

5



Composites dans le référentiel de la dépression des systèmes présentant les plus fortes erreurs de position dans la direction est-ouest. Le domaine représenté est repéré en degrés de latitude et de longitude rapportés à la latitude de 45°.
En haut : composite des dépressions trop « lentes ».
En bas : composite des dépressions trop rapides.
De gauche à droite : module du vent à 300 hPa, humidité à 700 hPa, erreur de géopotentiel à 300 hPa attribuable au diabatisme.

Nouveaux indicateurs de sécheresse issus de l'assimilation de données satellitaires

Aujourd'hui, les indicateurs de sécheresse agricole produits par Météo-France proviennent de simulations numériques de l'humidité du sol réalisées grâce à la plateforme de modélisation SURFEX. Des recherches ont été menées dans le cadre du projet européen IMAGINES afin d'évaluer l'impact de l'intégration de données satellitaires dans SURFEX sur le suivi des sécheresses agricoles.
Dans ce but, un système d'assimilation de données a été mis en place. Il permet de simuler la biomasse et l'indice foliaire des céréales à paille et des prairies naturelles sur la France. L'assimilation permet d'améliorer la simulation de ces quantités par l'utilisation de produits satellitaires distribués en temps quasi-réel par le service Copernicus Global Land (**http://land.copernicus.eu/global/**).
Des données de référence correspondant à des observations in situ des rendements agricoles permettent de montrer que l'utilisation de données satellitaires permet d'obtenir une corrélation significative entre la biomasse aérienne maximale annuelle simulée par SURFEX et la production agricole à l'échelle d'un département. Sans les données satellitaires, la corrélation est quasiment nulle. On montre également que de nouveaux indicateurs de sécheresse complémentaires de l'humidité du sol peuvent être construits en utilisant l'indice foliaire de la végétation et la biomasse aérienne, tous les dix jours. L'exemple du Puy-de-Dôme est présenté dans la figure ci-après car ce département comporte à la fois des céréales à paille et des prairies. Ces produits de démonstration pour la période 2008-2013 sont en accès libre sur le site du projet (http://fp7-imagines.eu/) pour 45 départements pour les céréales à paille et pour 48 départements pour les prairies.

6

Vers une nouvelle typologie des environnements précipitants méditerranéens

Les événements précipitants méditerranéens (HPEs : Heavy Precipitating Events) d'automne sont des phénomènes naturels extrêmes aux impacts sociétaux majeurs. D'échelle spatiale supérieure à celle d'un simple orage, ils sont associés à des circulations atmosphériques typiques d'échelle synoptique. Nous proposons une nouvelle caractérisation de ces circulations en combinant des variables susceptibles de représenter une grande part des processus atmosphériques impliqués dans les HPEs, en distinguant les différentes zones d'impact (Pyrénées Orientales, Cévennes, plaine du Gard..., cf. encart figure)
Par une méthode de classification « multi-variables » originale, à partir de la ré-analyse ERA-Interim du CEPMMT une partition en huit classes décrit les circulations moyennes de l'automne atmosphérique méditerranéen. Trois d'entre elles discriminent bien la majeure partie des 90 événements de référence observés entre 1989 et 2010. Au passage, cela montre bien l'importance de ces événements dans le climat méditerranéen. En outre, en comparant les circulations associées aux HPEs seuls avec les circulations moyennes des trois classes, des ingrédients propices aux HPEs par zone d'impact sont identifiés. La classe C1 correspond à un flux rapide de sud sur le bassin Méditerranéen. Les Cévennes sont impactés lorsque la circulation intense d'altitude est combinée à une surface de la mer chaude, les Pyrénées Orientales (PO) lorsque le déferlement cyclonique du train d'onde de Rossby à l'ouest oriente les vents au sud-est, la plaine du Gard et l'Hérault lorsque l'écoulement de grande échelle devient stationnaire. En classe C2, le blocage anticyclonique sur l'Europe centrale favorise l'Hérault et les Cévennes. En classe C7, le déferlement à l'ouest combiné au blocage à l'est produit des HPEs sur l'Hérault et les PO. La robustesse de la méthodologie de classification permet d'envisager l'étude de ces environnements dans des simulations du changement climatique.

7

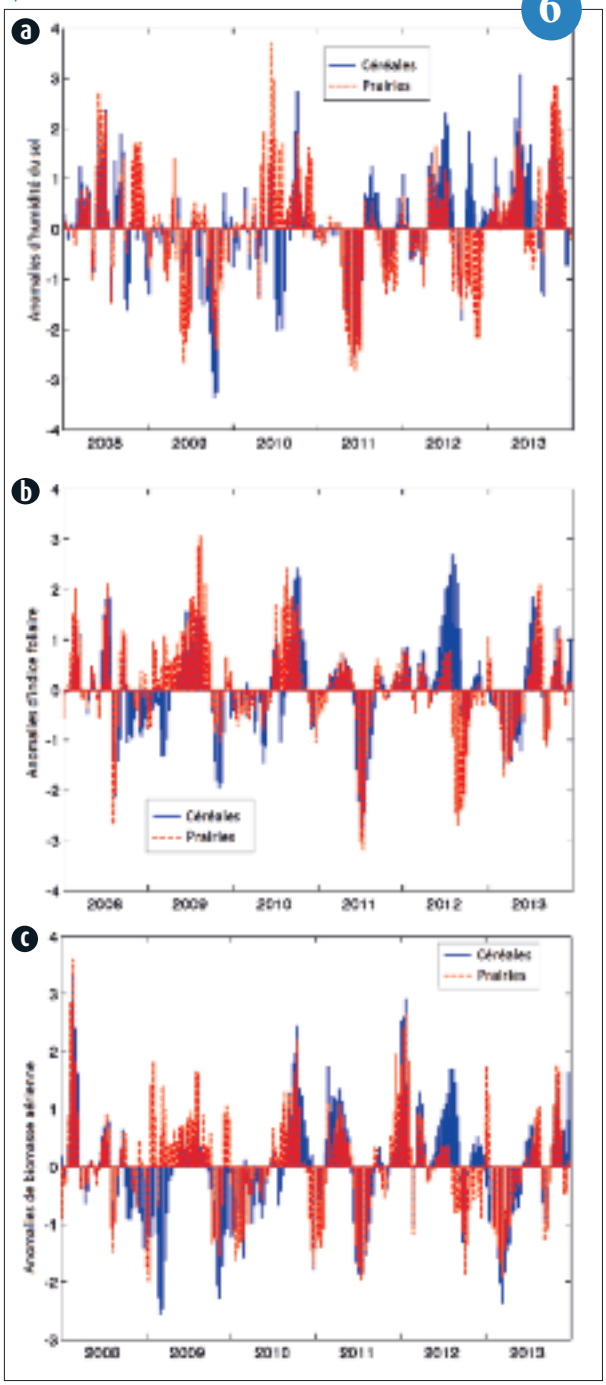
L'utilisation des données satellitaires pour améliorer la modélisation hydrologique à l'échelle régionale

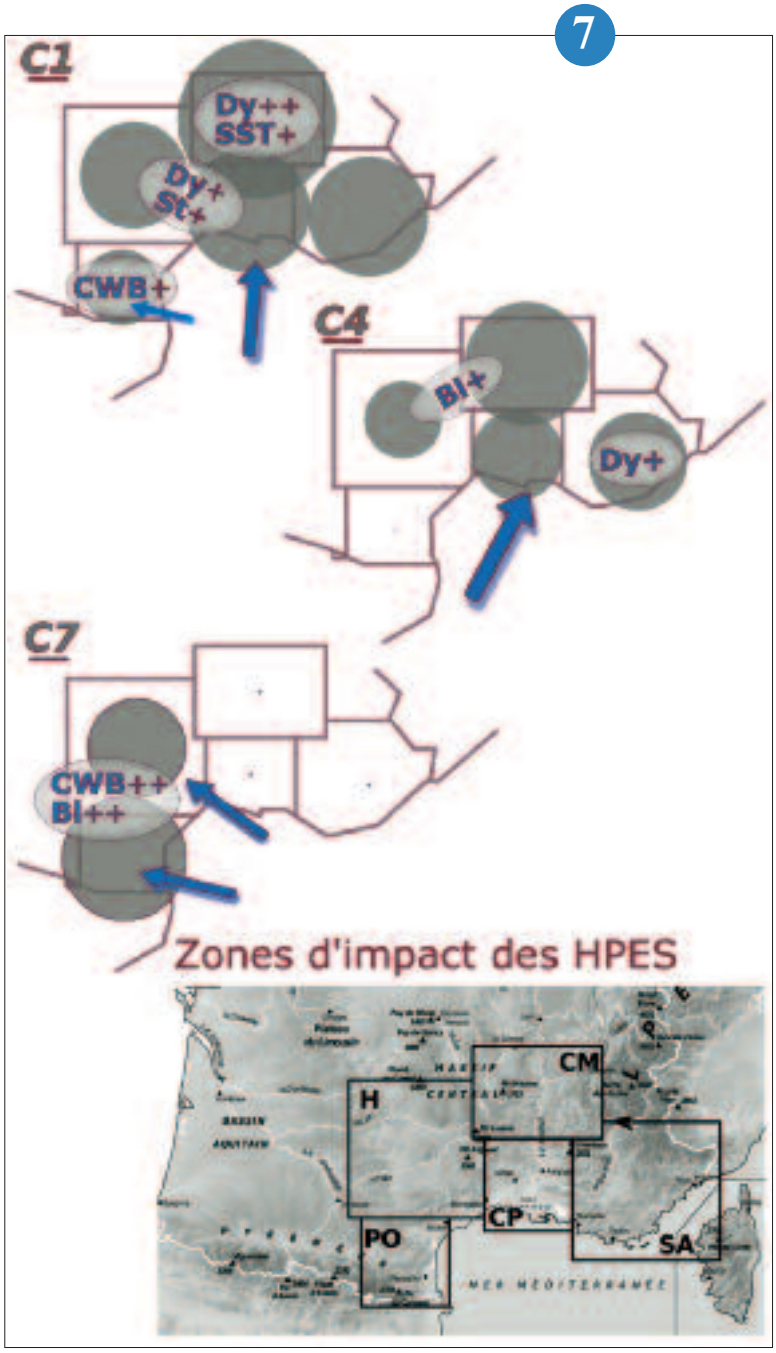
Le satellite CNES-NASA SWOT (Surface Water and Ocean Topography), dont le lancement est prévu aux horizons 2020, observera la hauteur d'eau des rivières de largeur supérieure à 50 m, avec une répétitivité d'environ 5 jours sur la France, en repassant tous les 21 jours au-dessus du même point. Ces données serviront d'une part à valider les modèles hydrométéorologiques, et d'autre part à améliorer leur utilisation pour le suivi hydrologique à l'échelle régionale ou globale.
La chaine de modélisation hydrométéorologique SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM) développée à Météo-France permet de simuler l'évolution spatiale et temporelle de l'eau qui s'écoule sur les continents. Le bassin versant sur lequel nous avons choisi de mettre en place notre étude est la Garonne, situé au sud-ouest de la France. Nous sommes capables avec SIM de simuler des hauteurs d'eau toutes les 3 heures sur l'ensemble du réseau de rivières du bassin de la Garonne, avec une erreur quadratique moyenne de 40 à 50 cm sur la Garonne aval (Fig. a). Cette erreur est satisfaisante, et montre aussi le potentiel de SWOT à améliorer le modèle, puisque l'erreur de mesure du satellite sera située autour de 10 cm pour une surface de 1 km² (ou tronçon de rivière de 10 km de long et 100 m de large).
Nous avons montré que l'assimilation de données SWOT synthétiques permet d'améliorer un paramètre déterminant du modèle de transfert en rivière de MODCOU : le coefficient de rugosité ***Kstr.*** Plusieurs tests ont pu faire converger ce coefficient vers un état satisfaisant qui se rapproche de l'état « vrai », se répercutant directement sur la simulation des écoulements d'eau en rivière très sensibles à ce paramètre (Fig. b et c). Les travaux futurs devront s'articuler autour d'un meilleur réalisme des erreurs de mesure SWOT. En effet les sources d'erreur de mesure sont nombreuses (défaut de l'instrument, angle de visée, surface observée, état de l'atmosphère, etc.) et étroitement liées à la qualité des mesures du satellite. Ce travail nous permettra finalement d'améliorer la modélisation du cycle de l'eau sur la France. Les outils développés devront être testés sur d'autres bassins versants dans le monde.

8

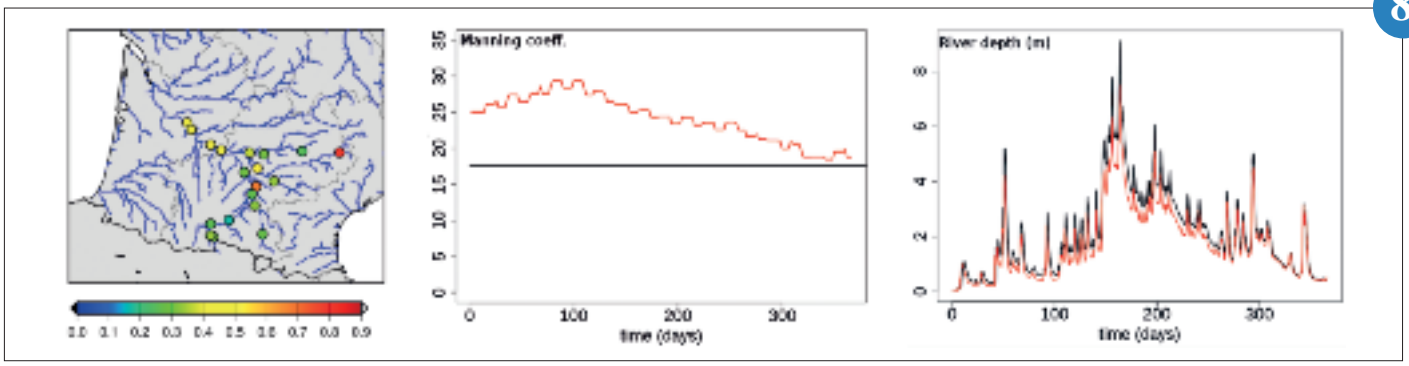
(a) Erreur quadratique moyenne journalière sur 19 stations de la hauteur d'eau (m) : période d'étude 01/08/1995-31/07/2006.
(b) et (c) Evolution temporelle de la hauteur d'eau et du coefficient de rugosité ***Kstr*** à Bergerac (rivière Dordogne, France), sur la période 1er août 1995–31 juillet 1996 (Fig. b). Les courbes rouges représentent les états analysés du ***Kstr*** et de la hauteur d'eau, et les courbes noires correspondent aux réalités vers lesquelles on souhaite tendre (Fig. c). En assimilant des données SWOT synthétiques, le ***Kstr*** se rapproche de la réalité au cours du temps ; il en est de même pour la hauteur d'eau qui dépend du ***Kstr.*** La différence entre la hauteur d'eau assimilée et « vraie » devient inférieure à 10 cm après 10 mois d'assimilation environ.

Anomalies décadaires centrées-réduites de 2008 à 2013 de (a) l'humidité du sol, (b) l'indice foliaire, (c) la biomasse aérienne, pour le Puy-de-Dôme dans une zone de céréales à paille et dans une zone de prairies naturelles (traits bleus et rouges, respectively), en unités d'écart type.





Ingrédients atmosphériques favorisant les HPEs par zone d'impact selon les 3 classes discriminantes, C1, C4, et C7 de la classification à huit classes.
Les flèches bleues désignent l'orientation du flux de basses couches. La surface des cercles grisés est proportionnelle aux nombre d'HPE par zone. « CWB » indique la présence d'un déferlement cyclonique à l'ouest du domaine. « Dy » précise que la baroclinie associée au jet de sud est de forte amplitude. « SST » rappelle que la température de la surface de la mer est plus élevée. « Bl » indique qu'une dorsale anticyclonique est présente sur l'Europe centrale. « St » : les structures de grande échelle sont stationnaires. Zones d'impact : H : Hérault, PO : Pyrénées Orientales, CM : Cévennes, CP : plaine du Gard, SA : Alpes du Sud.



Rôle de l'évaporation des pluies, du recyclage de l'eau et de la circulation sur la mousson africaine

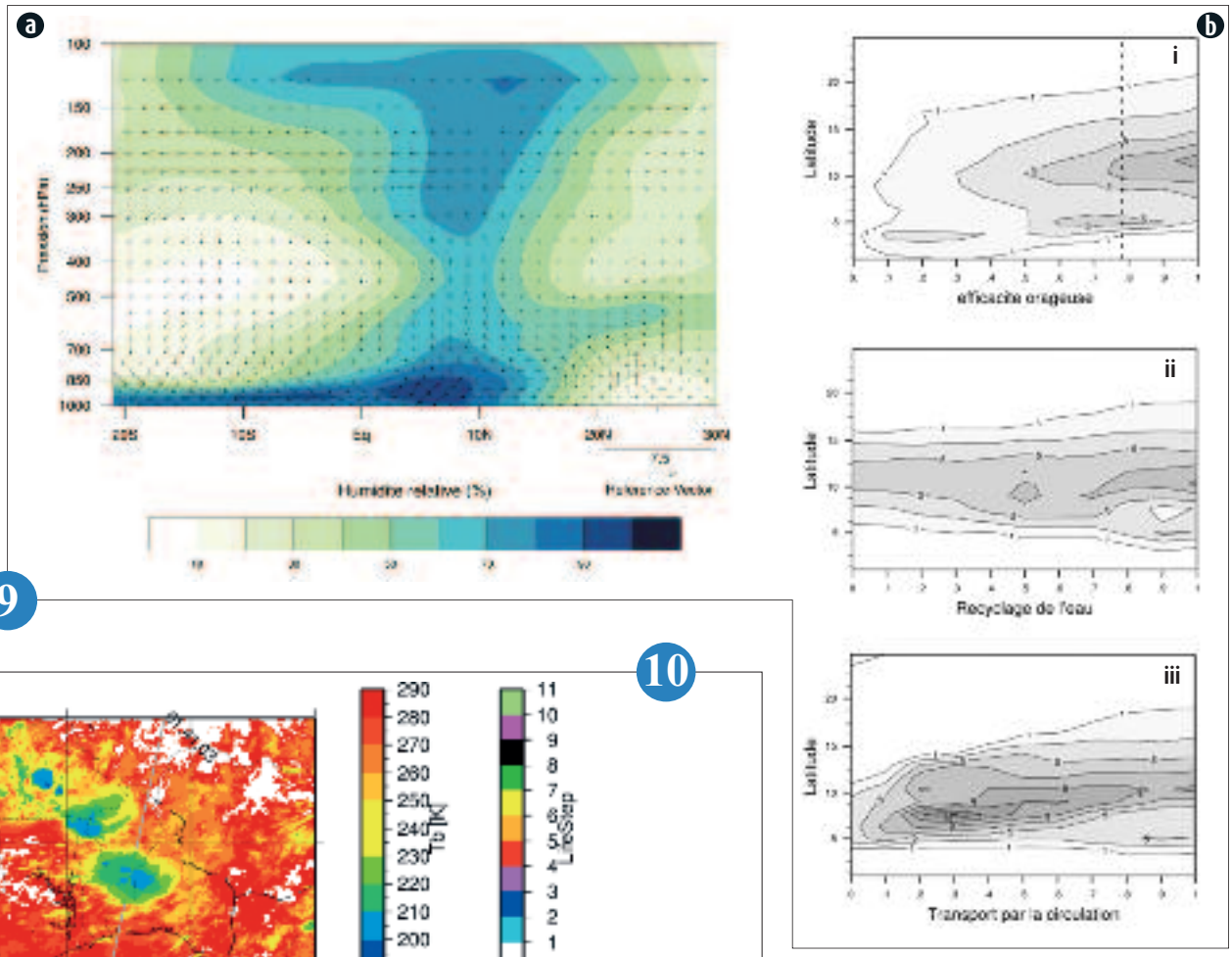
Sur l'Afrique de l'Ouest comme dans le reste des tropiques (Fig. a), les pluies de mousson résultent de l'humidité amenée sur le continent par la circulation de grande échelle entre 1000 et 700 hPa (*transport*), de la capacité des orages à convertir l'humidité atmosphérique en pluies atteignant la surface (*efficacité orageuse*) et enfin de la manière dont les pluies sont évaporées à la surface, pouvant ainsi alimenter de nouveaux orages (*recyclage de l'eau*). En dépit de cette vision simple, les systèmes de prévision et de projection climatique actuels ont des difficultés à reproduire le positionnement et l'intensité des pluies observées sur l'Afrique de l'Ouest, pointant vers un manque de compréhension du système mousson.
Un modèle numérique a donc été développé, dans lequel la mousson ouest-africaine est représentée de manière simplifiée comme une circulation de brise méridienne-verticale de très grande échelle représentant ces trois processus clé, transport, efficacité orageuse et recyclage de l'eau. L'effet des ces trois processus est ensuite modulé directement dans le modèle simplifié dans une gamme de paramètre allant de 0, où le mécanisme est entièrement supprimé, à 1 où il est efficace à 100%. A partir des résultats du modèle simplifié (Fig. b), on trouve que le principal acteur du positionnement/intensité des pluies est le transport par le vent (Fig. iii) dans les basses couches associé au flux de mousson, induisant un fort déplacement du maximum de pluie et une réduction importante de leur extension méridienne. L'efficacité orageuse (Fig. i) et le recyclage de l'eau (Fig. ii) ne sont cependant pas négligeables puisqu'ils modulent la quantité de pluies au sol ainsi que la position du maximum de pluie, mais dans une moindre mesure.
Cette approche permet de mieux comprendre le rôle du recyclage de l'eau et des orages, qui sont deux paramètres difficiles à observer, comparé à celui de la circulation atmosphérique. Elle donne ainsi une gamme de réponse du système mousson africaine à ces processus, qui pourra servir à évaluer et améliorer les modèles climatiques dans lesquels ces processus sont actifs.

9

Analyse composite du cycle de vie des propriétés physiques et radiatives des systèmes convectifs tropicaux

Les systèmes convectifs sont la principale source de précipitations et de nébulosité froide sous les Tropiques (Houze 2004). Les systèmes convectifs peuvent être décomposés en différentes sous régions (tour convective, partie stratiforme précipitante et partie stratiforme non-précipitante ou enclume) associées elles-mêmes à différents processus physiques qui évoluent au cours du cycle de vie. La documentation de l'évolution de ces propriétés physiques est aujourd'hui un enjeu si l'on veut être à même de représenter les systèmes convectifs et leur impact dans les modèles à différentes échelles.
Pour ce faire une approche composite multi-satellite a été mise en place (Bouniol et al 2015). La capacité des satellites géostationnaires à suivre l'évolution de la couverture nuageuse au cours du cycle de vie des systèmes convectifs via des algorithmes de tracking est utilisée (Fiolleau et al 2013) définissant des trajectoires de systèmes. L'intersection de ces trajectoires avec les traces des satellites défilants (A-Train dans la présente étude) permet de documenter les propriétés physiques à l'intérieur de ces systèmes à chaque étape du cycle de vie. Cette méthodologie est illustrée (Fig.).
L'évolution des propriétés macrophysiques, microphysiques et radiatives a ainsi pu être documentée dans trois régions géographiques correspondant à des environnements contrastés : l'Afrique de l'Ouest continentale et l'océan Atlantique pour la saison d'été et l'Océan Indien pendant la saison d'hiver. Les systèmes convectifs continentaux présentent un cycle de vie particulier avec une convection plus intense au début du cycle de vie. Des hydrométéores denses et de grosse taille sont alors rencontrés à haute altitude jusque dans la région cirriforme. Les systèmes océaniques présentent des caractéristiques moins variables dans le cycle de vie, suggérant une convection profonde moins intense mais active tout au long de la vie du système.

10



(a) Exemple de circulation méridienne-verticale (flèche, m/s) et de l'humidité relative (couleur, %) pour une saison d'été en moyenne sur l'Afrique de l'Ouest (10W^{-10} E) tiré des ré-analyses Era Interim.
(b) Profils méridiens de pluies (mm/j) moyens sur la saison d'été obtenus en modulant l'efficacité orageuse (i), le recyclage de l'eau (ii) et le transport d'humidité par la circulation atmosphérique (iii) dans le modèle idéalisé.

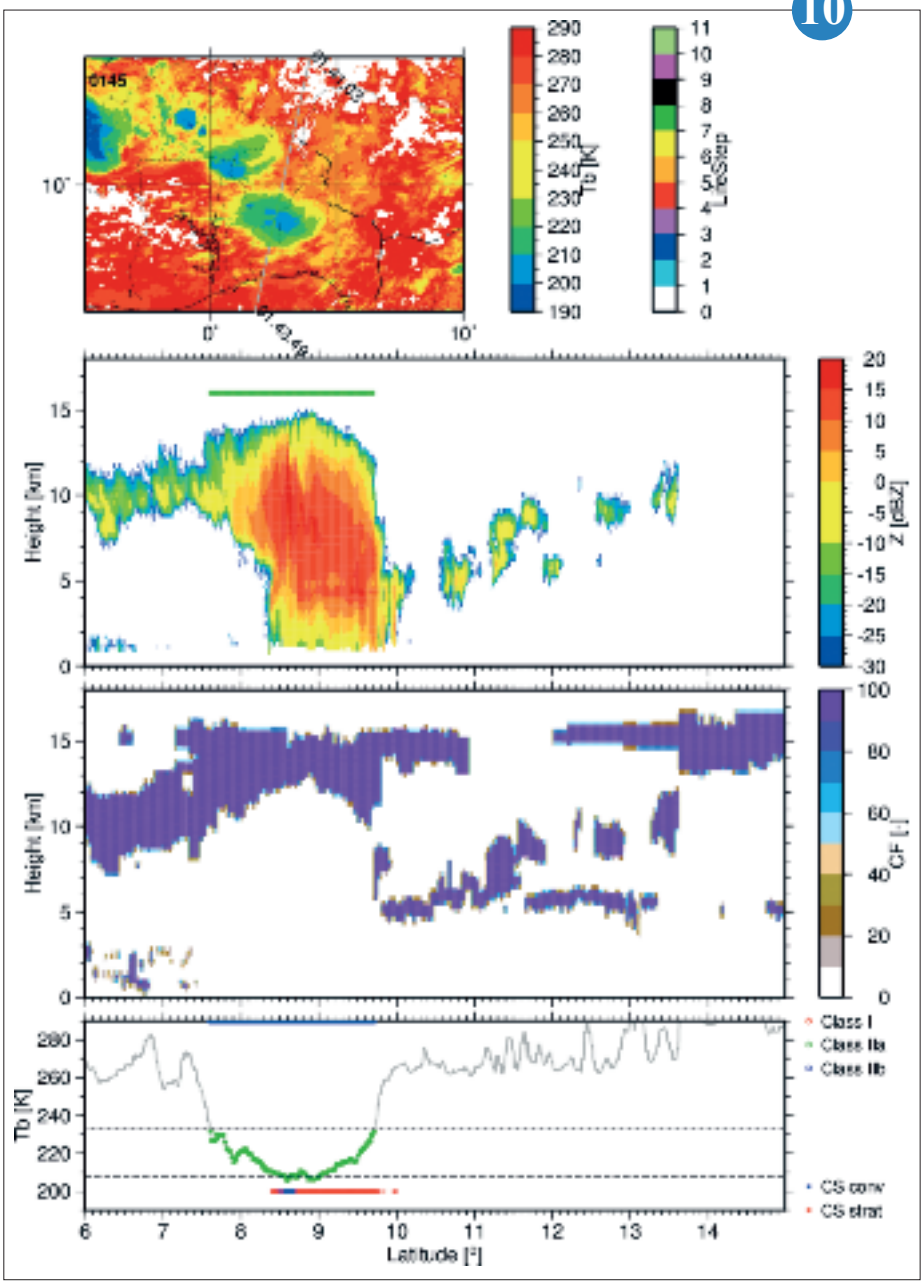


Illustration de l'échantillonnage multi-instruments d'un système convectifs en Afrique de l'Ouest. Le premier panel représente la température de brillance du satellite MSG à 10.5 µm avec en trait gris la trace au sol de l'A-Train. A cet instant, le système est dans la 6e phase de son cycle de vie (segment jaune superposé au système). Le second panel est la réflectivité radar en dBZ mesurée par le radar de CloudSat. Le troisième panel est la couverture nuageuse observée par le lidar du satellite CALIPSO. Le quatrième panel est la température de brillance mesurée par MSG extraite le long de la trace de l'A-Train avec superposés l'étape du cycle de vie et le statut du profil : convectif ou stratiforme.

Climat

Au cours de l'année 2015, les premières simulations climatiques préparatoires à notre participation au projet international CMIP6, ont été réalisées avec une nouvelle version du modèle du système climatique CNRM-CM6 et une première version du modèle du « système terre » CNRM-ESM1. En parallèle, des études de variabilité climatique, notamment sur le rôle de l'océan Pacifique tropical sur le réchauffement global, ont été menées. Dans le domaine de la régionalisation du climat, les premières études des effets des changements climatiques futurs sur les épisodes de pluies diluviennes du sud-est de la France ont tiré parti de l'excellente capacité du modèle AROME à simuler ces évènements. La description des extrêmes dans les projections climatiques doit s'appuyer sur des diagnostics les plus fins possibles, qualifiés à partir de données observées. Un nouveau diagnostic des vagues de chaleur permet ainsi de préciser l'aggravation attendue de ce risque sur le territoire métropolitain. La traduction de ce risque à l'intérieur des villes et les mesures d'adaptation pouvant en découler, ont par ailleurs été traités dans un colloque international de grande ampleur organisé par le CNRM. Les projections des évènements extrêmes climatiques ont aussi servi de base à une étude de l'évolution des risques associés.

Dans le domaine de l'étude de la prévision climatique, l'année a été marquée par la mise à disposition publique des premiers ensembles de prévision à échéance de 2 mois dans le cadre du projet international S2S. Deux applications des prévisions saisonnières aux échelles régionales ont par ailleurs connu un important développement. Il s'agit de la prévision de la banquise arctique qui bénéficie d'une approche multi-modèle et de la prévision hydrologique saisonnière en France qui s'avère un potentiel outil d'aide à la décision pour la gestion de l'eau.

D'autres développements ont concerné l'amélioration des bases de données et des diagnostics permettant de caractériser les variations climatiques observées. Des travaux ont ainsi conduit à générer un nouvel ensemble de séries de précipitations homogénéisées, à améliorer le traitement des observations de température dans la ré-analyse Safran, à engager de nouveaux développements de l'outil de spatialisation Aurelhy ou encore à préciser la détermination de l'intensité des cyclones tropicaux. Au-delà du traitement des variables climatiques, l'utilisation du modèle ISBA permet maintenant d'accéder à des diagnostics originaux des effets du changement climatique sur le cycle de la végétation en France métropolitaine.

1

Modélisation du climat et du changement climatique

CNRM-CM6 et CNRM-ESM2, nouveaux modèles pour CMIP6

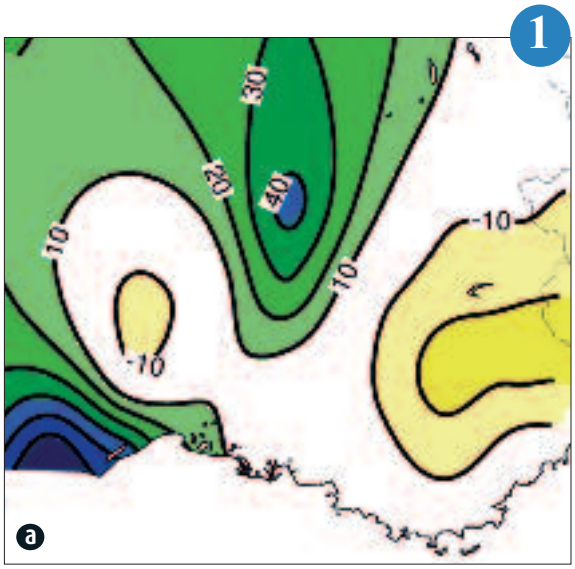
Le projet international CMIP6 a été mis en place afin de répondre à trois questions :

- Comment le système climatique répond-il à l'évolution de certains facteurs, tels que l'augmentation des gaz à effet de serre ?
- À quoi sont dus les biais des modèles de climat ?
- Quelles sont les projections du climat futur, en intégrant les incertitudes et la variabilité climatique ?

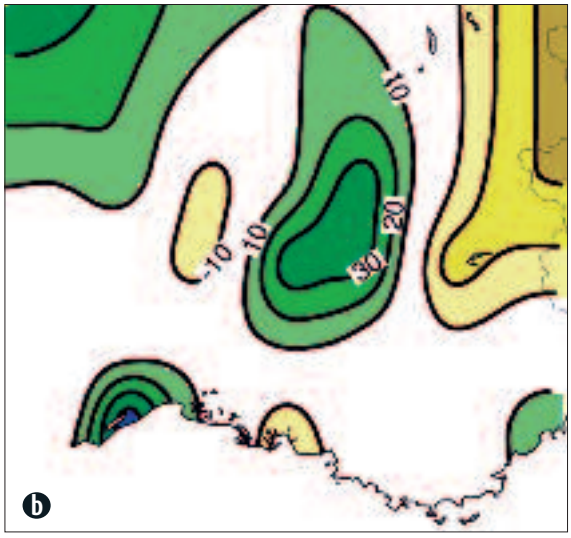
Pour les groupes de recherche en modélisation, contribuer à ce projet consistera à réaliser dès 2016 de nombreuses simulations climatiques, sur lesquelles s'appuiera le prochain rapport du GIEC.

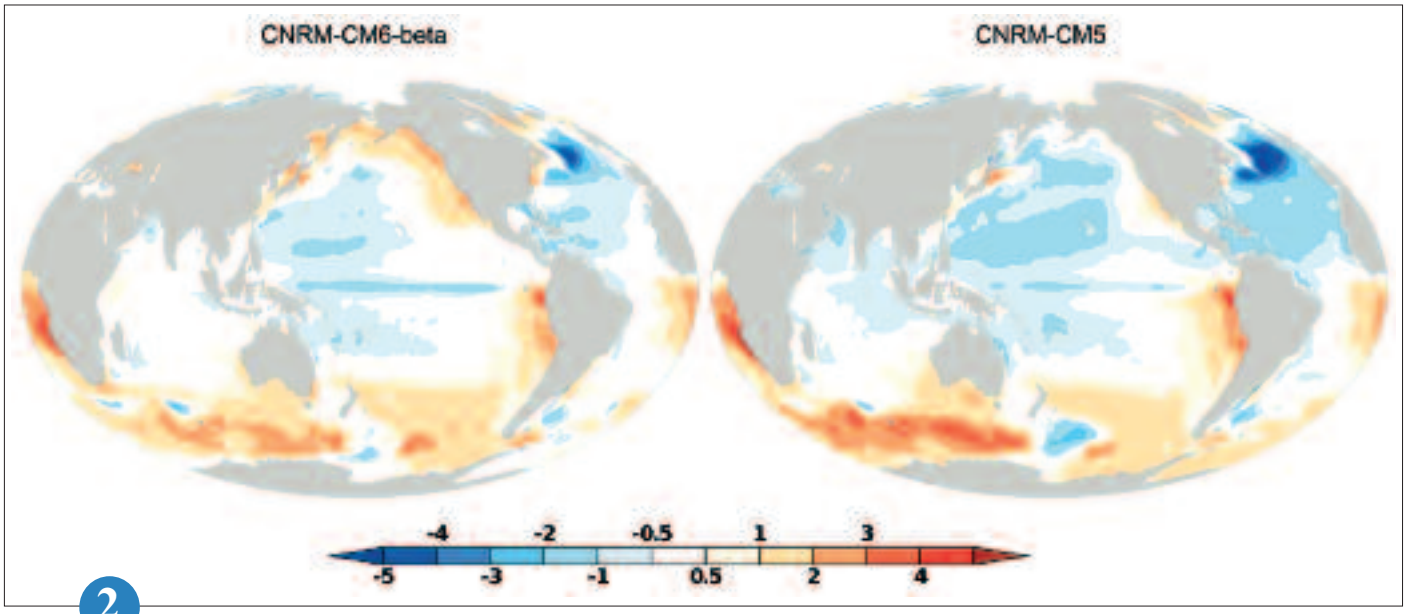
Le CNRM participera largement à cet effort en association avec le CERFACS et le LGGE. Pour cela, le modèle de système climatique CNRM-CM6 est actuellement en phase de refonte. CNRM-CM6 inclura in fine Arpège-Climat v6 et sa nouvelle physique pronostique, la plateforme de surface Surfex v8, Nemo 3.6-Gelato 6 pour la partie océan-glace, le coupleur parallèle Oasis-MCT3 et le modèle de routage des fleuves TRIP v2. Pour CMIP6, le modèle se déclinera en une version à basse résolution (CNRM-CM6-LR) et une à haute résolution (CNRM-CM6-HR). Dans CNRM-CM6-LR, les parties atmosphérique et océanique auront respectivement une résolution horizontale de 150 km et de 1°. Ces résolutions seront portées à 50 km et 0,25° dans CNRM-CM6-HR. CNRM-CM6 servira de cœur physique au modèle de système-terre CNRM-ESM2, qui comprendra une représentation du cycle du carbone global, de la chimie stratosphérique et des aérosols troposphériques, et sera également utilisé pour CMIP6. Une version préliminaire de CNRM-CM6 a déjà permis de réaliser des simulations de quelques décennies et les biais moyens du modèle sont déjà en partie réduits par rapport aux simulations de CMIP5 effectuées avec CNRM-CM5.

2



Evolution des précipitations extrêmes dans le sud-est de la France (quantile 0,999 en mm/jour) entre la période 1989-2000 et la période 2089-2100, calculée par le modèle ALADIN-Climat à 12 km de résolution (a) et par le modèle AROME à 2,5 km de résolution (b) pour le scénario d'émission RCP8.5.





Biais de la température à 2 m simulée en année 1990 perpétuelle par rapport à la climatologie HadSST pour 1980-1999 : version préliminaire de CNRM-CM6 (à gauche) et modèle CNRM-CM5 utilisé pour CMIP5 (à droite).

Modulation multi-décennale du réchauffement global par la variabilité du Pacifique tropical

Malgré l'accumulation croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le réchauffement global observé aurait, selon le dernier rapport du GIEC, légèrement ralenti de 1998 à 2012. Ce « hiatus » pourrait toutefois s'expliquer par la variabilité naturelle du climat et le fait que l'année 1998 fut particulièrement chaude en raison d'un événement El Niño. Cette hypothèse semble confortée par le fait que la moyenne des simulations historiques réalisées dans le cadre de l'exercice CMIP5 ne montre pas de fléchissement du réchauffement. Au delà du phénomène El Niño, le Pacifique est le siège d'une forte variabilité multi-décennale qui se traduit notamment par une fluctuation des vents dominants. La raison du « hiatus » serait alors la suivante : l'intensification récente des alizés aurait provoqué un transfert de chaleur de la surface vers la subsurface de l'océan Pacifique tropical, via le renforcement des courants océaniques.

Les chercheurs du CNRM-GAME ont testé cette hypothèse en réalisant des ensembles de simulations couplées océan-atmosphère focalisés sur la période 1979-2012 et menés selon deux protocoles. Le premier consiste à piloter l'évolution des anomalies de température de surface de la mer sur la Pacifique tropical, le second à piloter la dynamique de l'océan superficiel (via la tension qu'exercent les vents de surface) afin de privilégier le réalisme des échanges de chaleur entre l'atmosphère et l'océan superficiel sur ce même domaine. Comparés à l'expérience de contrôle uniquement pilotée par l'évolution observée des forçages radiatifs naturels et anthropiques, les deux ensembles montrent un ralentissement significatif du réchauffement global. Cette influence dépend en partie du protocole utilisé, les expériences en tension de vent montrant un « hiatus » moins marqué mais dont la répartition spatiale est plus conforme au réchauffement observé.

Ce résultat confirme le rôle important de la dynamique de l'océan Pacifique tropical dans la modulation multi-décennale du piégeage global de chaleur par l'océan. Il implique que le réchauffement atmosphérique a vocation à s'accélérer au cours des prochaines décennies, à moins d'être entravé par une éruption volcanique majeure.

3

Outil statistico-dynamique d'aide à la prévision d'intensité des cyclones tropicaux dans le sud-ouest de l'Océan Indien

En lien étroit et privilégié avec les prévisionnistes du CMRS de la Réunion responsables du suivi cyclonique du sud-ouest de l'Océan Indien, l'étude climatologique initiée en 2014 s'est poursuivie en 2015 pour fournir aux prévisionnistes des outils statistiques d'aide à la prévision d'intensité des cyclones. Sur la période d'étude 1999-2014, l'intensification rapide d'un système tropical évoluant sur mer a été définie statistiquement comme une variation des vents maximaux de surface strictement supérieure à 15.4 m/s en 24 heures. Cette valeur est égale au seuil officiel de l'Atlantique Nord établi à partir de vents moyens sur 1 minute alors que nous utilisons des vents moyens sur 10 minutes comme le préconise l'OMM. L'analyse des champs dynamiques et thermodynamiques de l'environnement proche du cyclone (200 à 800 km du centre) dans les données ERA-Interim a mis en évidence six « prédicteurs » pertinents pour l'intensification rapide (Fig.). Chacun d'eux a des valeurs moyennes significativement différentes au seuil de 99.9% dans les cas d'intensification rapide par rapport au reste de l'échantillon. Les prédicteurs sont : une augmentation du vent à 10 m sur les 12 heures précédentes (DVMXM12), une forte divergence d'altitude (DIV200), un faible cisaillement vertical de vent entre 850 et 200 hPa (SHR), une forte température de surface de la mer dans un rayon de 200 km (SST), un faible tourbillon potentiel d'altitude cyclonique (isentrope 350 K, PV350), et un fort flux de moment angulaire relatif d'altitude (REFC).

Un outil statistico-dynamique d'aide à la prévision d'intensité a été conçu par combinaison linéaire optimale des prédicteurs environnementaux les plus pertinents sur le bassin et sera testé sur les prochaines saisons cycloniques.

4

Amélioration de la ré-analyse de température SAFRAN par la prise en compte des températures extrêmes (projet EXTREMOSCOPE)

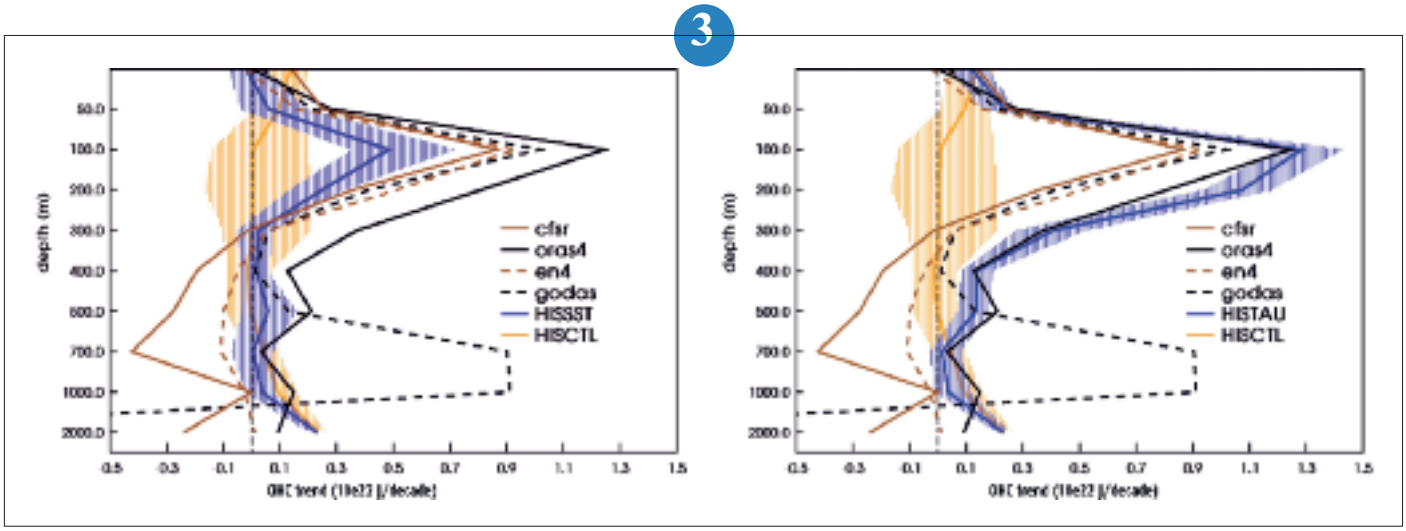
En raison de l'évolution du réseau d'observation des températures horaires dans les années 1990 (mise en place de réseaux régionaux), les systèmes de ré-analyse de température de surface utilisant ces données présentent des hétérogénéités temporelles pouvant restreindre leur utilisation pour des études climatologiques.

Pour réduire ce risque nous avons utilisé les observations quotidiennes de températures extrêmes qui sont moins touchées par l'évolution rapide des réseaux d'observation. Nous avons mis en œuvre et évalué deux méthodes pour déduire des pseudo-observations horaires de température pour un poste d'observation à partir de ses données de températures extrêmes quotidiennes. La méthode retenue (produisant des pseudo-observations non biaisées) utilise en complément des données horaires de postes voisins.

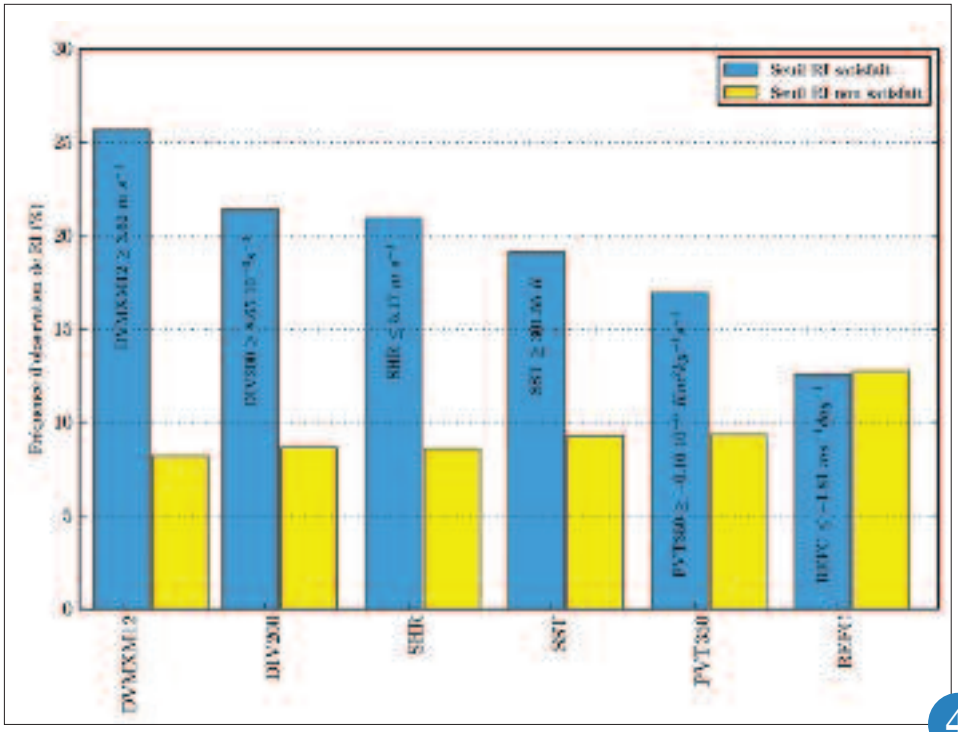
Ces pseudo-observations, utilisées en complément des observations initiales, permettent de réduire l'écart entre le nombre de données horaires fournies aux systèmes de ré-analyse au début et en fin de période. Des tests d'impact ont été effectués avec le système d'analyse de surface SAFRAN sur la période 1958-2010. L'analyse des anomalies de température obtenues comparées à celles de l'indicateur thermique national et à celles des séries homogénéisées montrent une réduction des hétérogénéités par rapport à une analyse n'utilisant que les données observées, sans toutefois les éliminer totalement.

La validation complète de ces nouvelles données ré-analysées pour une utilisation opérationnelle (indicateur thermique national et régional) est en cours de réalisation. Dès à présent elles sont utilisées dans le cadre du projet EXTREMOSCOPE pour analyser la variabilité spatiale des vagues de chaleur.

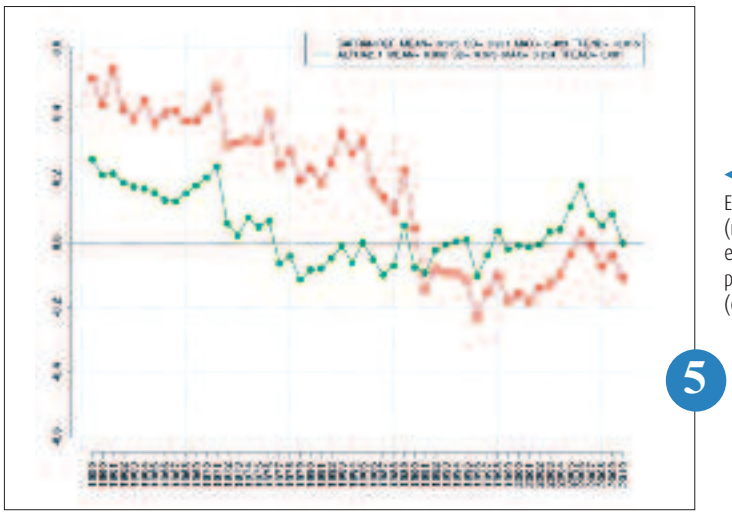
5



(a) et (b) Profils verticaux (selon la profondeur en m en ordonnée) des tendances linéaires du contenu de chaleur océanique (en 10^{22}J/dec) estimées de 1998 à 2012 sur l'Ouest du Pacifique tropical (20°S-20°N, à l'ouest de 200°E) dans quatre ré-analyses globales (parmi lesquelles ORAS4 est la plus fiable) et dans trois ensembles de simulations : HISCTL (expérience de contrôle avec océan tropical Pacifique totalement libre), HISSST (seulement sur le panel de gauche, expérience perturbée avec les températures quotidiennes de surface de l'Océan Pacifique tropical guidées vers les anomalies mensuelles observées), et HISTAU (seulement sur le panel de droite, expérience perturbée avec la tension de vent quotidienne sur l'Océan Pacifique tropical écrasée par des observations). Pour chaque ensemble, le trait épais désigne la moyenne des profils de tendance tandis que l'ombrage correspond à la plage des tendances simulées.



Probabilité d'observer une phase d'intensification rapide (RI) selon que la valeur d'un prédicteur (en abscisse) est favorable (bleu) ou non (jaune).
Le seuil de chaque prédicteur est précisé en colonne ; il correspond à la valeur moyenne du prédicteur pour les cas d'intensifications rapides.
Ex : il y a 25% de chance d'observer une intensification rapide lorsque DVMXM12 dépasse le seuil de 3.6 m/s.



Ecarts d'anomalies annuelles de température minimale pour SAFRAN Référence en rouge (n'utilisant que des observations horaires)
et SAFRAN ALPHA2_1 en vert (utilisant en plus des pseudo-observations)
par rapport aux anomalies issues de l'indicateur thermique national
(composé de 30 stations de référence)..

Prévisions saisonnière et climatique

Prévision infra-saisonnière : cas de l'été 2015

Météo-France fournit opérationnellement des prévisions jusqu'à trois jours et des prévisions saisonnières de deux à six mois, le créneau intermédiaire étant dévolu au CEPMMT. Le projet de l'OMM s2s (subseasonal to seasonal) propose de mettre en ligne des prévisions mensuelles en temps quasi-réel.
Le CNRM a choisi de participer à cet exercice en fournissant le 1er de chaque mois des prévisions à deux mois d'échéance. Une série de re-prévisions couvre la période 1993-2014 et des ensembles de 51 membres sont réalisés en temps réel depuis mai 2015. Ces prévisions sont élaborées avec le même modèle que celui employé pour la prévision saisonnière opérationnelle (système 5). Les figures a et b montrent respectivement les prévisions issues des 1er juin et 1er juillet pour la température quotidienne sur la France. Ces deux mois (surtout juillet) ont été marqués par des températures au-dessus de la normale. Le modèle n'est pas très précis dans sa chronologie, y compris les premiers jours. Il n'a pas vocation à concurrencer le système ARPEGE-AROME. Mais le panache des prévisions individuelles reste majoritairement au-dessus de la moyenne climatique 1993-2014. On remarque que la remontée des températures fin juin, qui atteint dans les observations son paroxysme le 1er juillet est anticipée par la prévision du 1er juin.
Les perspectives sont de s'appuyer sur un nombre de situations suffisamment élevé pour mesurer par des scores la capacité et les limites du modèle de prévision saisonnière à prévoir une chronologie réaliste des phénomènes de grande ampleur.

6

Prévisibilité de la banquise arctique : une approche multi-modèle

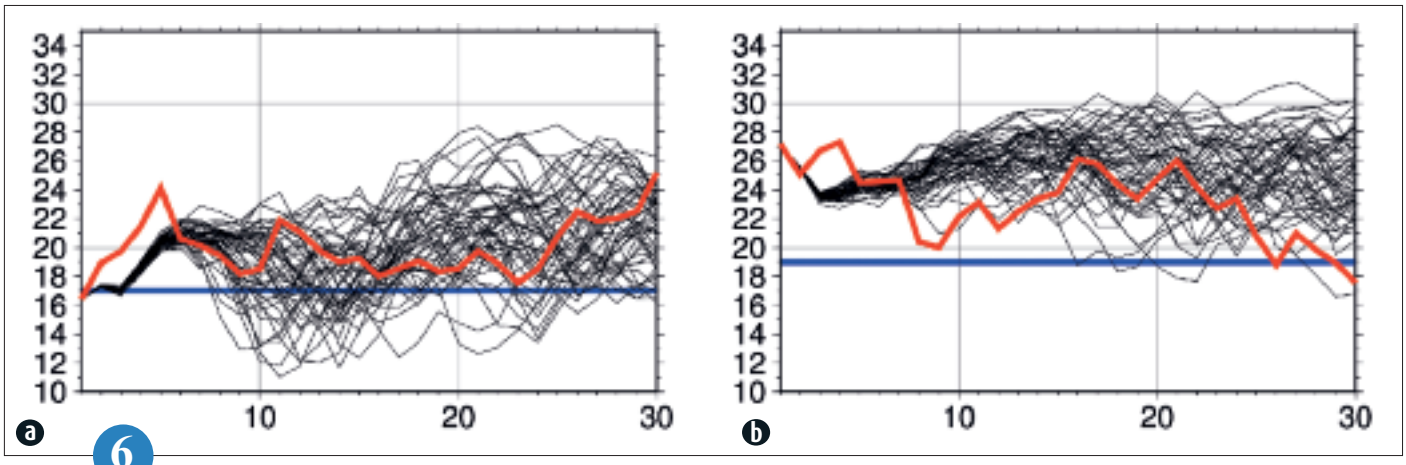
La banquise arctique, composante importante du système climatique, est une source potentielle de prévisibilité climatique à l'échelle saisonnière. La capacité à prévoir son évolution plusieurs mois à l'avance doit permettre d'améliorer les prévisions saisonnières dans les hautes latitudes, et sans doute dans les moyennes latitudes.
Dans cette étude, nous comparons les prévisions à cinq mois de l'étendue de banquise arctique des modèles couplés globaux CNRM-CM5.1 et EC-Earthv2.3. Les prévisions présentées ici sont initialisées le 1er mai de chaque année entre 1990 et 2008.
Malgré d'importants biais, les scores de prévisions d'anomalies d'étendue sur l'Océan Arctique sont significativement élevés, et comparables dans les deux modèles. C'est également le cas à l'échelle de sous-bassins, comme les mers de Barents et Kara.
La combinaison des deux modèles est meilleure que la prévision des modèles individuels pour certaines échéances. Pour la distribution spatiale de la banquise, la compensation des biais rend souvent la prévision multi-modèle plus utile que celles des modèles individuels. Cela permet d'envisager une exploitation de ces prévisions par les utilisateurs, de plus en plus nombreux dans l'Océan Arctique.
L'approche multi-modèle est prometteuse pour le développement et la qualification des futurs systèmes de prévisions saisonnières en Arctique. De plus, décliner les prévisions de banquise à l'échelle des sous-régions nous semble adapté pour mieux comprendre les mécanismes de variabilité et de prévisibilité du système couplé océan-glace-atmosphère, et mettre ainsi en évidence les possibles télé-connexions entre hautes et moyennes latitudes.

7

Une application de la prévision saisonnière pour la gestion de la ressource en eau en France

Les prévisions saisonnières sur l'Europe trouvent encore bien peu d'applications, malgré des attentes très fortes. En cause la faible prévisibilité bien sûr, mais aussi la difficulté d'intégrer une information probabiliste complexe et dont la formalisation classique s'accorde mal avec les outils des utilisateurs potentiels.
Un des principaux objectifs du projet européen EUPORIAS (2012-2016) est précisément d'encourager la communauté climatique à se rapprocher des utilisateurs, et d'évaluer, au travers de quelques cas d'étude bien documentés, l'apport de la prévision saisonnière dans les processus de décision.
Dans ce contexte, le prototype proposé par Météo-France vise à fournir aux gestionnaires de la ressource en eau des informations adaptées pour anticiper la saison à venir. Il est basé sur une chaîne de prévision hydrologique construite à partir des prévisions saisonnières ARPEGE et du modèle SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU), capable de fournir des prévisions probabilistes de débit sur la France métropolitaine. Ces travaux ont été menés en étroite collaboration avec l'EPTB Seine-Grands Lacs, gestionnaire des grands barrages de Seine.
L'évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières a pour l'instant été faite sur un des barrages, sur la prévision du 1er mai, pour l'anticipation de l'étiage. 29 décisions ont été rejouées, à l'aveugle à partir de 2 jeux de prévisions (d'une part, la prévision saisonnière hydrologique et d'autre part, un placébo où la chaine hydrologique est forcée par des scénarios tirés de la climatologie), et « sans prévision » (connaissance du niveau du barrage et des conditions hydrologiques au 1er mai). Cette expérience semble montrer que la chaîne hydrologique permet de mieux gérer les premiers mois de l'étiage.

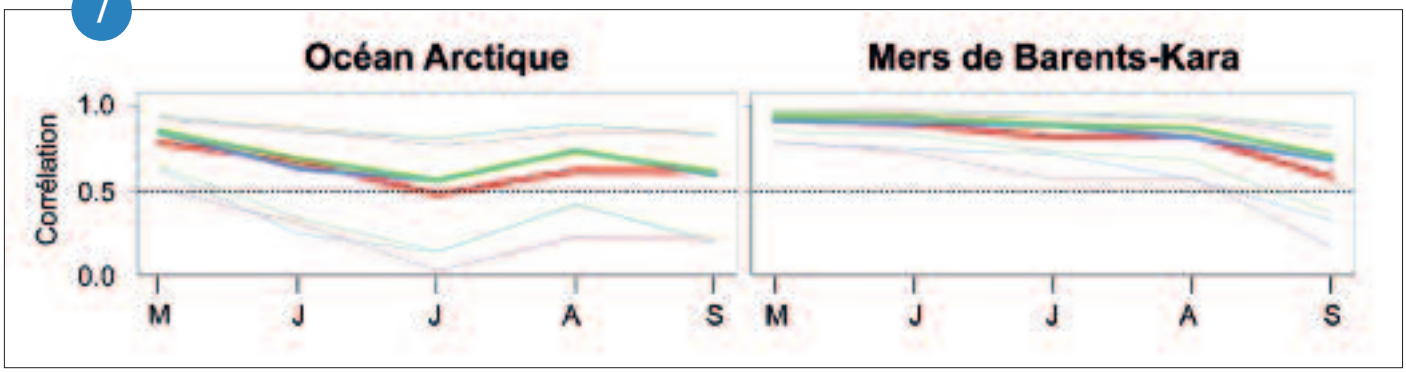
8



6

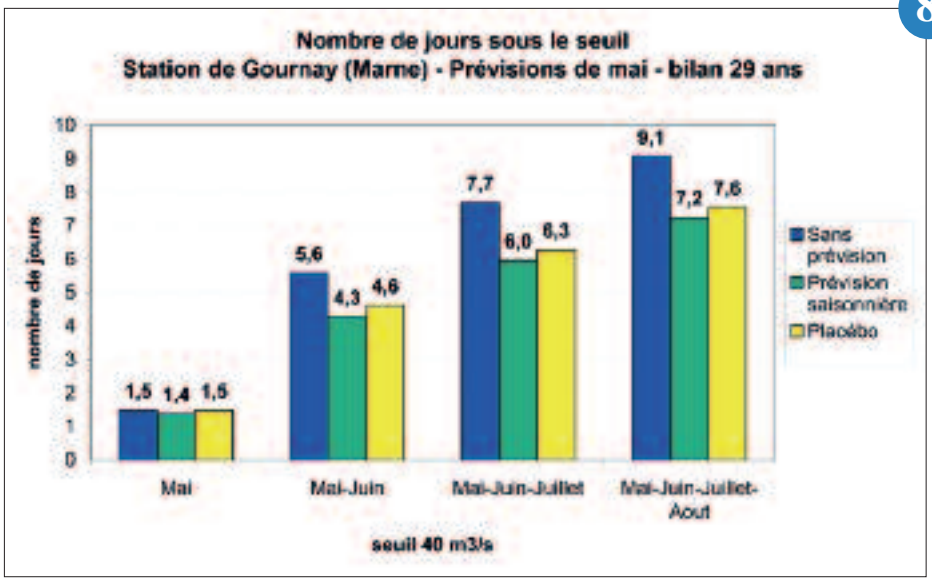
Prévisions (trait fin noir) et observations (trait gras rouge) de la température quotidienne sur la France en juin 2015 (a) et juillet 2015 (b).
Le niveau bleu est celui de la moyenne mensuelle des 22 dernières années.

7



Coefficients de corrélation entre les étendues de banquise prévues par les modèles et les étendues observées (source : NSIDC) sur l'Océan Arctique (gauche) et sur les mers de Barents et Kara (droite), en fonction du mois de prévision (date de départ : 1er mai).
Rouge : EC-Earthv2.3. Bleu : CNRM-CM5.1. Vert : combinaison des deux modèles. Les traits fins présentent les intervalles de confiance des corrélations (traits épais).

8



Bilan de 29 décisions prises au 1er mai,
sans information de prévision (en bleu),
avec la prévision saisonnière (en vert)
et avec le placébo (en jaune).
La décision parfaite conduirait
à « aucun jour sous le seuil ».
L'évaluation porte sur le 1er mois de prévision (mai),
les 2 premiers mois (mai et juin),
les 3 premiers mois (mai à juillet)
et les 4 premiers mois (mai à août).

Diagnostic et détection d'évolution climatique

La 9e Conférence Internationale de Climat Urbain

Comment éviter que les villes ne deviennent des fournaises en raison du réchauffement climatique?
Près de 600 scientifiques de 60 pays ont échangé sur les résultats de leurs études et expériences en lien avec ce thème, à Toulouse où Météo-France a organisé du 20 au 24 juillet 2015 la 9ème Conférence Internationale de Climat Urbain (ICUC9). Cette conférence a lieu tous les 3 ans et regroupe l'ensemble de la communauté scientifique en climatologie urbaine, sous l'égide de l'International Association for Urban Climate (IAUC). Depuis sa première édition en 1989, c'est la première fois que la France accueillait cet évènement scientifique international. Comme toujours, du fait des problématiques urbaines dans ces pays, les asiatiques ont formé la délégation la plus importante.
Cette conférence a permis d'approfondir les connaissances sur le climat urbain, sur la base de l'observation et de la modélisation. Un atelier sur les « zones climatiques locales » a regroupé 200 participants. Cette approche a pour but de cartographier les villes sous forme de zones homogènes, en termes de typologie urbaine et microclimat (ce qui a été vérifié par des campagnes de mesures spécifiques, comme à Nancy ou à Colombo au Sri Lanka). Ce type de cartographie, généralisable à toutes les villes du globe, offre un cadre commun à la communauté scientifique pour les futurs travaux en climat urbain.
Cette édition a aussi mis l'accent sur l'adaptation des villes au changement climatique. Par exemple, des scientifiques australiens, spécialistes de la végétation et des méthodes alternatives de gestion de l'eau en ville, recommandent de planter des arbres en ville. D'autres études menées en Chine soulignent l'intérêt de conserver des axes verts non construits pour ventiler la ville. Des études réalisées à Météo-France montrent, par la modélisation, que verdir une partie des espaces disponibles au sol tels que parkings et trottoirs diminuerait la température de quelques degrés en période de canicule.

9

Caractérisation des vagues de chaleur en climat présent et futur (Projet EXTREMOSCOPE)

Une nouvelle méthode d'analyse des vagues de chaleur, applicable aux échelles régionales et en climat présent ou futur, a été mise au point dans le cadre du projet EXTREMOSCOPE (soutenu par le MEDDE).
Dérivée de la méthode nationale utilisée pour le suivi climatique opérationnel, elle s'appuie sur une identification des évènements à partir de différents percentiles d'une série de valeurs de température moyenne annuelle et permet de caractériser des évènements en termes de durée mais aussi d'intensité et de sévérité. Cette méthode a été validée à partir des données de l'indicateur thermique national et régional, puis appliquée pour le climat présent sur le nouveau jeu de données de température moyenne Safran agrégée à l'échelle départementale et en climat futur sur les projections climatiques réalisées avec le modèle Aladin Climat (run historique et RCP 2.6, 4.5 et 8.5).
Le recensement des vagues de chaleur passées à l'échelle régionale depuis 1958 permet de construire une climatologie originale, mettant en évidence des typologies différentes selon le Sud-Est de la France (vagues plus intenses et plus sévères) et le Nord-Est (vagues plus nombreuses). En climat futur, l'analyse des projections Aladin avec les trois RCP disponibles s'accorde sur une accentuation de l'aléa au cours du XXIe siècle en nombre, durée et sévérité avec une intensité du changement fortement dépendante du scénario RCP considéré (Fig.).
Une extension de ce travail est en cours avec l'ensemble des modèles EURO Cordex ainsi qu'un focus particulier pour la caractérisation des vagues de chaleur de l'été 2015 en France.

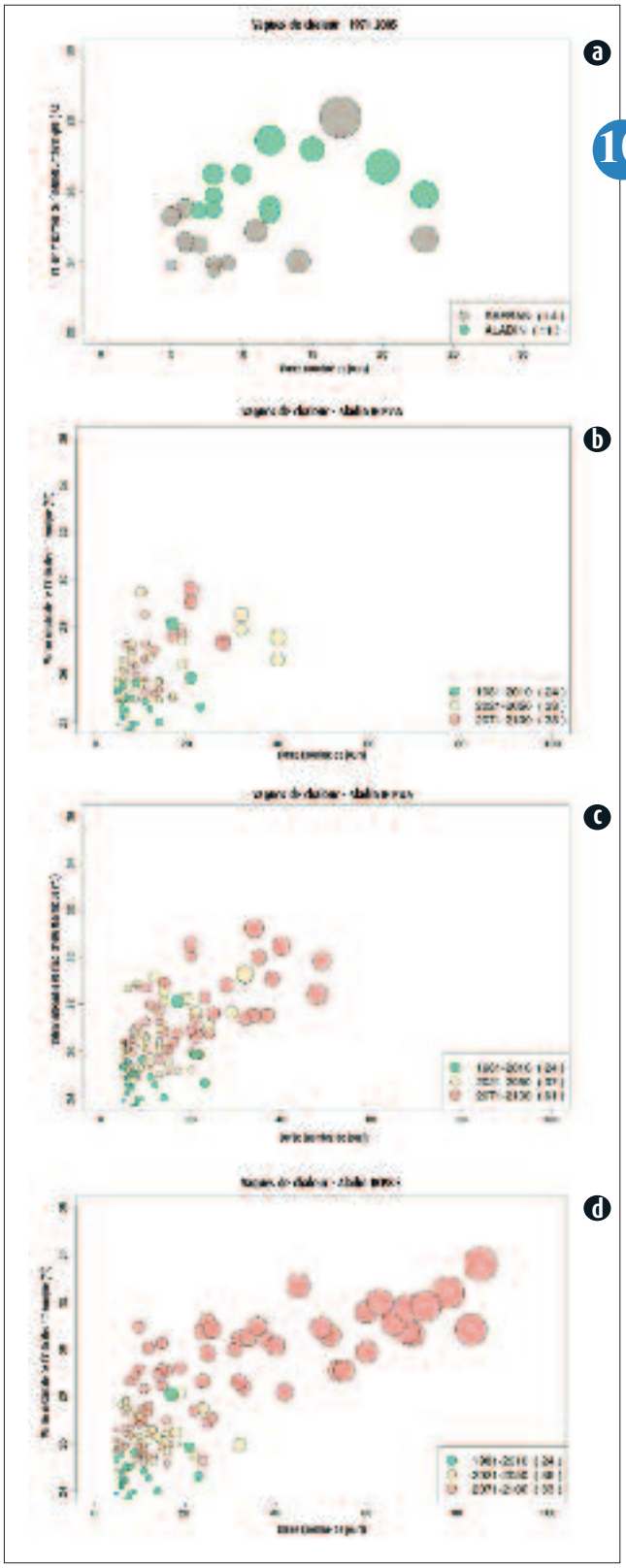
10

Un jeu de référence pour l'analyse de l'évolution des précipitations en France depuis les années 1950

Analyser les évolutions climatiques à partir de mesures météorologiques exige de disposer de séries climatologiques dont les valeurs sont comparables dans le temps. De nombreux événements sont susceptibles d'introduire dans les séries des ruptures d'homogénéité (déplacements des points de mesures, modification de leur environnement, changement de capteur...). L'homogénéisation est un traitement statistique qui permet de détecter et de corriger les ruptures liées à ces changements, pour ne conserver que le signal climatique.
En 2014, Météo-France a achevé la constitution d'un jeu de séries mensuelles de précipitations couvrant le territoire métropolitain depuis les années 50. Météo-France dispose désormais de plus de 200 séries mensuelles homogénéisées de températures et de 1100 séries mensuelles de précipitations permettant de fournir un diagnostic à l'échelle régionale. Des séries homogénéisées sont également disponibles sur certains départements d'Outre-Mer. Sur la période 1959-2009, l'analyse indique généralement une augmentation des précipitations annuelles sur la moitié nord du pays, et une diminution sur les régions méridionales. Ce contraste entre augmentation au nord et diminution au sud se retrouve en été et surtout en hiver. Cependant, à l'exception de quelques régions de l'Est de la France ou proches de la Méditerranée, les tendances des précipitations sont souvent peu marquées et sensibles à la période étudiée.
L'application Climat^{HD} (http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd) s'appuie sur les séries homogénéisées dans sa rubrique sur le climat passé. Ces séries homogénéisées seront régulièrement mises à jour pour permettre une actualisation du diagnostic.

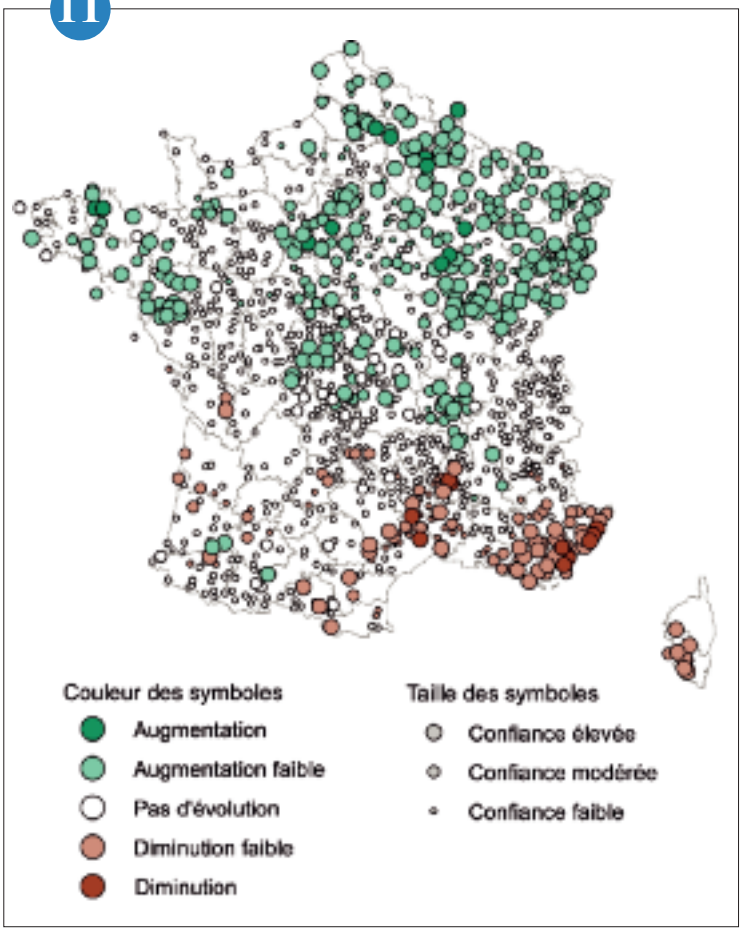
11

Participants à la "9th International Conference on Urban Climate" à Toulouse.
L'ensemble des résumés longs, des posters
et des présentations faites pendant cette conférence
est disponible sur le site internet de la conférence : http://www.meteo.fr/icuc9.



Représentation de l'évolution projetée des vagues de chaleur en France avec le modèle Aladin Climat en termes de durée (abscisse), d'intensité max (ordonnées) et d'intensité globale (taille des bulles):
(a) comparaison run historique et ré-analyse Safran sur la période 1971-2005 ;
(b) projection avec RCP2.6 (en vert la période actuelle 1981-2010,
en jaune milieu de siècle 2021-2050, en rouge fin de siècle 2071-2100) ;
(c) idem avec RCP 4.5 ;
(d) idem avec RCP 8.5.

Evolution du cumul annuel de précipitations sur la période 1959-2009,
estimée à partir des séries homogénéisées.



Evolution d'AURELHY

Météo-France a développé (Bénichou & Le Breton, 1987) une méthode innovante de spatialisation, AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie), qui s'appuie sur les moyennes aux stations et la liaison statistique avec les paramètres du relief au pas de temps climatologique. Ce logiciel, utilisé par la DCSC notamment pour produire les normales climatologiques spatialisées sur la France (Canellas et al, 2014), a cependant peu évolué depuis sa conception, alors même que la spatialisation des paramètres météorologiques a fait l'objet de nombreux travaux.

Pour cette raison, la DCSC de Météo-France a mis en place en 2014 une action pluriannuelle de modernisation du logiciel, tant sur les plans technique que méthodologique. L'année 2014 a été consacrée à l'évolution informatique du logiciel, avec le portage du code en langage R, jugé plus moderne et évolutif, et l'introduction simultanée de nombreuses fonctionnalités nouvelles. L'action s'est poursuivie en 2015 avec la réalisation d'un ensemble d'expériences de sensibilité destinées soit à optimiser la mise en œuvre de la méthode (résolution spatiale, méthode de sélection des prédicteurs, paramètres du krigeage, ...), soit à la faire évoluer (introduction de nouveaux prédicteurs, combinaison d'échelles spatiales, utilisation de classifications par type de temps, ...). Un dernier axe de travail concerne l'enrichissement des données d'entrée utilisées par la méthode (augmentation du nombre de séries d'observations utilisables par comblement des manques, utilisation de données d'autres réseaux).

L'objectif de l'action est de disposer, avec la nouvelle version opérationnelle d'AURELHY prévue pour 2016, d'un outil de spatialisation optimisé et utilisable dans une large gamme d'applications.

12

Les enjeux de l'assurance des catastrophes naturelles face au climat de demain

En 2015, Météo-France a mené des travaux de modélisation de longue durée pour la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) visant à évaluer l'impact financier du changement climatique sur le régime des catastrophes naturelles, sur la base d'un scénario médian du GIEC.

Pour permettre la comparaison entre des dommages associés au climat actuel (2010) et leurs équivalents à l'horizon 2050, la Direction des Services Météorologiques de Météo-France a produit deux simulations climatiques de 200 ans à climat stationnaire avec le support du CNRM et de la DCSC.

Ces simulations d'ARPEGE-Climat génèrent une multitude de situations météorologiques plausibles et cohérentes avec une concentration cible de gaz à effet de serre. Les résultats, à la résolution de 20 km environ sur l'Europe, sont archivés au pas de temps horaire et débiaisés sur la base de la ré-analyse SAFRAN ou de la ré-analyse ERA-Interim. Des indices d'humidité du sol sont produits par le modèle ISBA alimenté par les données simulées débiaisées.

Les modèles d'impact de la CCR, alimentés par ces simulations climatiques, ont porté sur les inondations par débordement et ruissellement, les submersions marines et la sécheresse.

Globalement, les coûts pour les assurances des dommages dus aux catastrophes naturelles causées chaque année par des événements climatiques en métropole devraient doubler d'ici 2050.

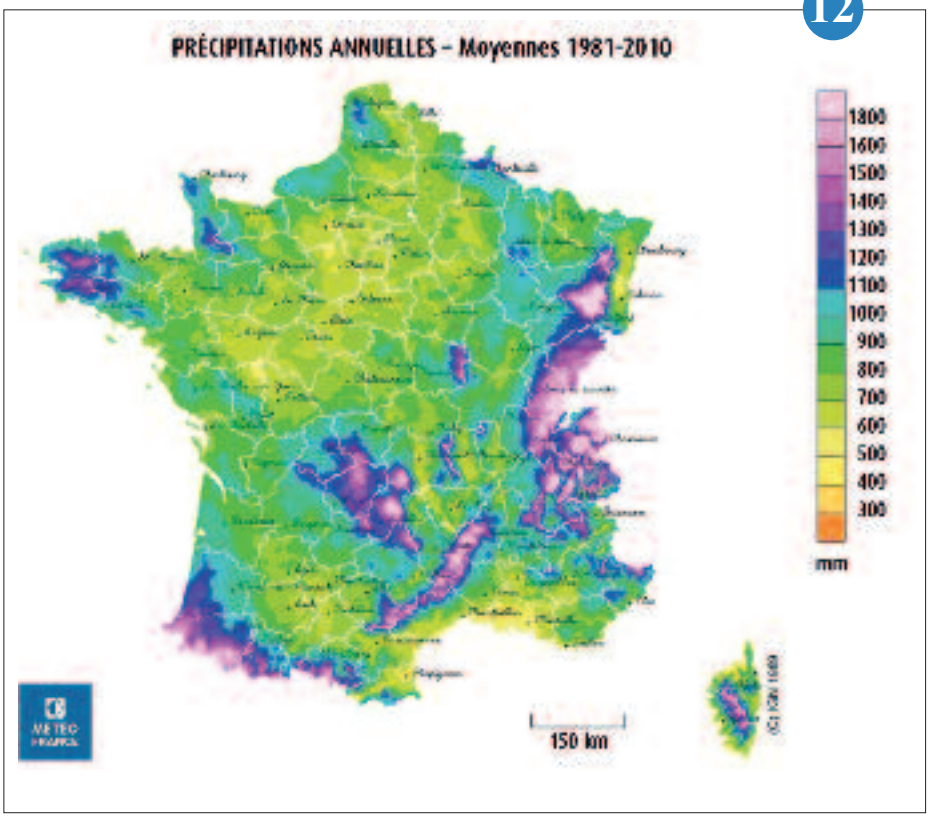
Cette hausse est majoritairement liée à l'évolution des valeurs assurées et de leur répartition géographique (plus des trois quarts de l'augmentation constatée).

Le changement climatique aura également un impact, en termes d'intensité et de fréquence des évènements, qui explique 20% de l'augmentation constatée à horizon 2050.

Ces travaux ont été présentés au cours de la conférence « Les enjeux de l'assurance des catastrophes naturelles face au climat de demain » organisée par CCR lors de la COP21.

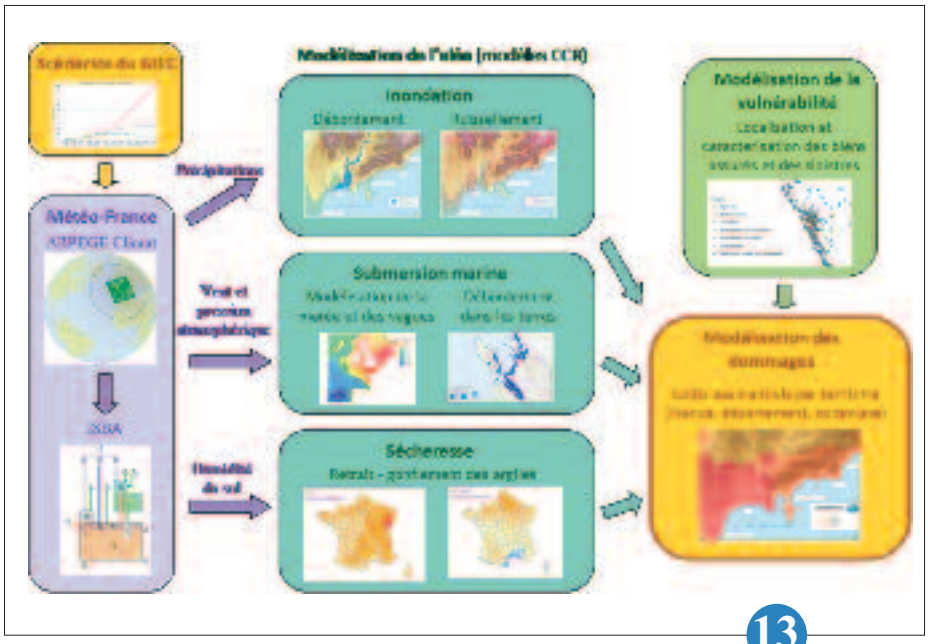
13

12



Normale AURELHY de hauteurs annuelles moyennes de précipitations (mm) sur la période 1981-2010.

Chaîne de modélisation des dommages dus aux catastrophes naturelles (source CCR).



13

Impact du changement climatique sur le cycle de la végétation en France

Le climat est traditionnellement caractérisé par des variables atmosphériques telles que la température de l'air. Dans un contexte de changement climatique, il est important de considérer aussi des variables plus directement liées au vivant comme la biomasse aérienne de la végétation ou l'humidité du sol.

Le modèle ISBA (Interactions entre le Sol, la Biosphère et l'Atmosphère) est utilisé dans les modèles atmosphériques et hydrologiques de Météo-France et permet de simuler les flux d'eau et d'énergie à un pas de temps horaire. Ce modèle permet également de simuler la photosynthèse, la croissance des plantes, et le stockage de carbone dans les sols. L'utilisation d'un ensemble de simulations climatiques régionalisées permet au modèle ISBA de caractériser quelques tendances communes à ces simulations.

Tout d'abord, une croissance plus précoce est simulée pour tous les types de végétation, partout en France. L'effet du CO_2 permet une légère augmentation de la productivité des prairies (lors de la première coupe) et des céréales à paille. En revanche, il existe une forte incertitude sur la productivité des forêts, qui est davantage sensible au modèle de climat qui est considéré. D'autres tendances présentent des caractéristiques régionales. Dans la zone Bretagne-Normandie-Picardie, ISBA simule une sénescence beaucoup plus précoce qu'aujourd'hui pour tous les types de végétation à cause d'une sécheresse estivale plus marquée. Dans le Poitou, c'est la défoliation des forêts qui serait beaucoup plus précoce qu'aujourd'hui. A l'inverse, le modèle simule une défoliation un peu plus tardive des forêts de feuillus dans les Vosges, le Jura, et le Dauphiné. Enfin, dans les régions méditerranéennes, la croissance serait beaucoup plus précoce.

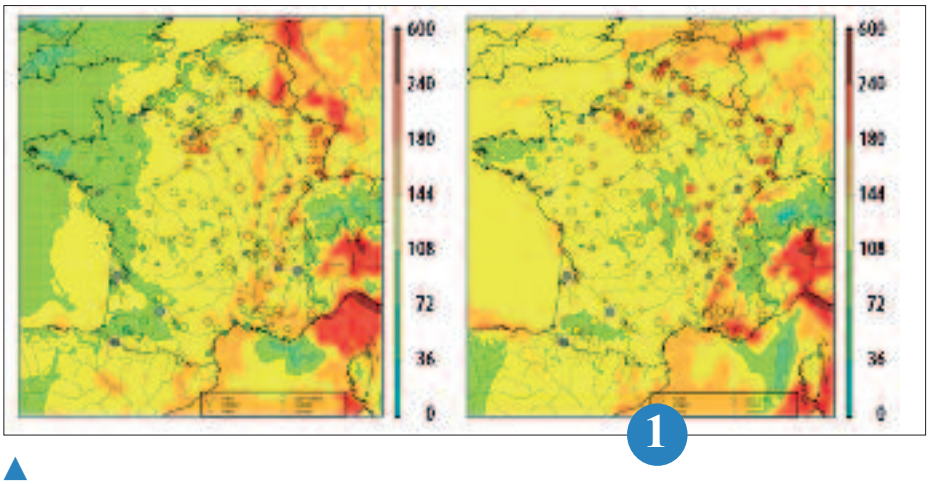
13

Grandes tendances au XXIe siècle de la phénologie d'un cycle végétatif annuel et de la production de biomasse simulées par ISBA à partir d'un ensemble de simulations climatiques.

14

Chimie, aérosols et qualité de l'air

A l'issue du projet européen MACC, Météo-France a été retenu, au travers d'une réponse à un appel d'offre du programme Copernicus Atmosphère, pour coordonner et mettre en œuvre une activité de production de prévisions multi-modèle opérationnelles de la qualité de l'air en Europe. Dans le cadre du développement de ce système, nous avons réalisé des premières études d'évaluation de la robustesse des scores de performance de l'ensemble multi-modèle dans la prévision d'épisodes de pollution à l'ozone. Dans le cadre des recherches menées sur les panaches volcaniques, c'est un nouvel outil de suivi et de visualisation des panaches qui a été développé permettant d'apporter une aide précieuse à la réalisation des campagnes de mesure. Un fait marquant de l'année 2015 a aussi concerné la validation de la représentation des aérosols inorganiques secondaires dans le modèle de chimie-transport MOCAGE, tant aux échelles régionales que globales. En particulier, les prévisions de PM10 sur la France utilisant cette nouvelle version du modèle montrent une nette amélioration, à la fois sur de longues périodes et sur des épisodes de pollutions aux particules. Par ailleurs, le dépouillement et l'analyse des données de la campagne GLAM menée dans le cadre du projet international CHARMEX, ont permis de documenter la variabilité des constituants chimiques et des particules d'aérosol au-dessus du bassin méditerranéen.



Concentrations maximales quotidiennes d'ozone en surface (en µgm^{-3}) prévues par la nouvelle version du modèle MOCAGE intégrant les aérosols inorganiques secondaires. Les prévisions correspondent à l'épisode de pollution des 2 (à gauche) et 3 (à droite) juillet 2015. Les observations correspondantes igurent dans les cercles colorés aux lieux des stations de mesure.

1

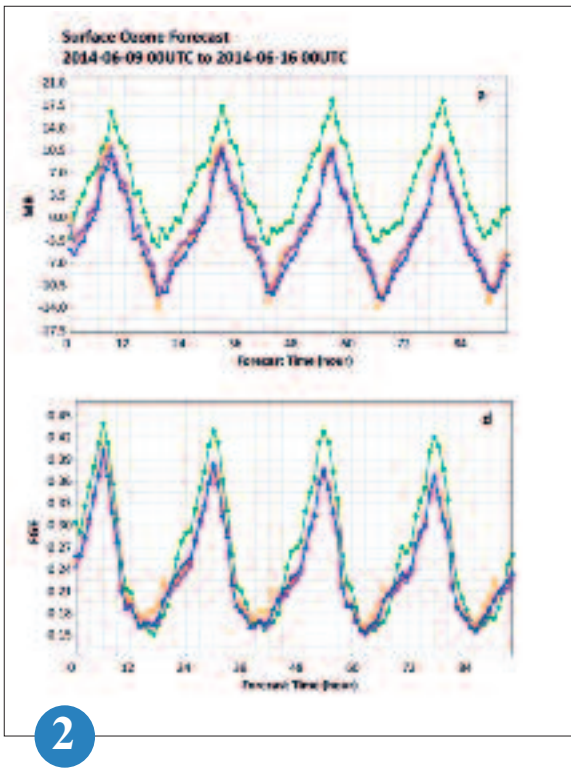
Évaluation de la robustesse des méthodes d'ensemble pour la qualité de l'air

Le « Copernicus Atmosphere Monitoring Service » dédié à la qualité de l'air fournit des prévisions et analyses des principaux polluants à l'échelle de l'Europe : de 25°O à 45°E et de 30°N à 70°N. Basé sur les sorties de 7 modèles indépendants, un ensemble multi-modèle a été développé pendant le projet de recherche MACC-II, afin d'offrir les meilleurs produits possibles. L'ensemble MACC-II emploie une approche de la médiane : pour chaque instant et pour chaque point de grille du domaine, la valeur de l'ensemble est définie comme la valeur médiane de tous les modèles individuels en ce point.

La sensibilité des performances de l'ensemble au nombre de modèles utilisés a été évaluée lors d'un épisode de pollution à l'ozone en Europe (du 9 au 15 juillet 2014). Les ensembles médians 'MEDIAN 7', 'MEDIAN 5', 'MEDIAN 3', basé respectivement sur 7, 5 et 3 modèles, et '1BEST', qui est le meilleur modèle pendant le pic d'ozone, sont comparé à des observations de surface sur l'Europe. Les résultats (figure) confirment que l'ensemble complet (MEDIAN 7) a généralement de meilleurs scores que le meilleur modèle (1BEST). Quand 5 modèles (MEDIAN 5) sont utilisés, les scores sont sensiblement identiques à MEDIAN 7. En allant vers 3 modèles (MEDIAN 3), les indicateurs statistiques sont dégradés, mais ils sont généralement meilleurs que le meilleur modèle. Cela indique qu'employer un ensemble de modèles, même s'il est réduit, est plus utile qu'un modèle unique, même s'il est parmi les meilleurs. Cela montre aussi que, si seulement 5 modèles sont disponibles, l'ensemble médian reste robuste par rapport aux observations.

Bien que robuste et fiable, l'approche de la médiane peut être surpassée par des méthodes plus évoluées, qui sont en cours d'étude.

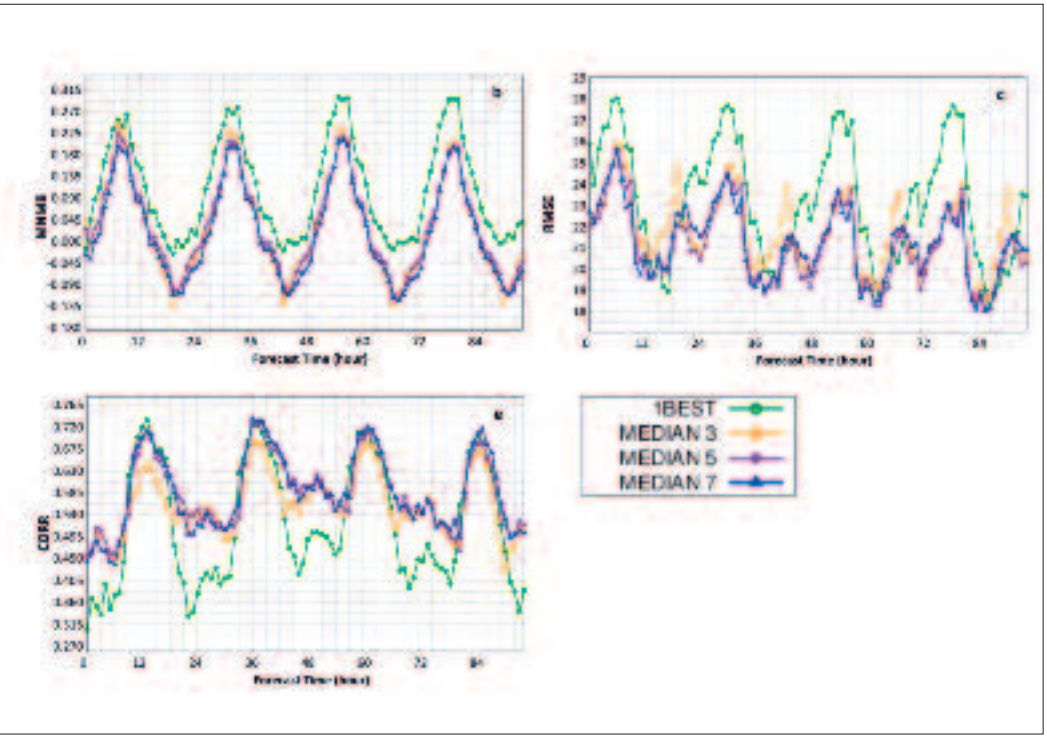
2



3

Site internet de visualisation des productions régionales Copernicus Atmosphere.

Indicateurs statistiques pour l'ozone en fonction de l'échéance de prévision (en heure) : MEDIAN 7, MEDIAN 5, MEDIAN 3 et 1BEST (voir le texte pour leur définition), comparés aux observations de surface disponibles pour la période allant du 9 au 15 juillet 2014, sur le domaine Européen de MACC-II. (a) Biais Moyen en g m^{-3}, (b) Biais Moyen Normalisé, (c) Ecart-type moyen d'erreur en g m^{-3}, (d) Forecast Gross Error et (e) Corrélation.



Production régionale Copernicus Atmosphere (CAMS50)

Les différents services du programme Copernicus s'inscrivent dans le prolongement du programme GMES (Global Monitoring for Environment and Security) de l'Agence Spatiale Européenne et de l'Union Européenne. La mise en place de ces services, en particulier ceux relatifs au suivi de la composition atmosphérique, a été déléguée par l'Union Européenne à des grands opérateurs dont le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT).

A l'issue d'une procédure d'appel d'offres, Météo-France pilotera pour trois ans le service CAMS50, production régionale opérationnelle d'un ensemble multi-modèle de qualité de l'air (Analyses, Prévisions et Réanalyses) qui s'appuie sur l'héritage des projets de recherche MACC. Météo France assurera la prestation de mise à disposition, maintien en condition opérationnelle et évolutions des données et produits issues des chaines de production. Neufs sous-traitants sont impliqués :

- l'INERIS assure un rôle de pilotage des productions ré-analyses annuelles, et apporte les sorties de son modèle CHIMERE ;
- cinq autres instituts européens fournissent les sorties de leurs modèles, MetNorway (EMEP), RIU (EURAD IM), KNMI-TNO (Lotos-Euros), SMHI (MATCH), FMI (SILAM) pour les joindre à celles du modèle MOCAGE de Météo France et de CHIMERE, cité précédemment ;
- trois pays ont été intégrés à cette proposition, en vue de préparer une extension des modèles pris en compte dans l'Ensemble, produit phare de la production régionale : UKMO (AQUM), Aarhus University (DEHM) et WUT (GEM AQ).

Au sein de MF, la collaboration de nombreux services (DSM, DSI, CNRM, DCT) et l'embauche spécifique de personnels ont été nécessaires pour offrir cette prestation d'un budget de plusieurs millions d'euros.

Ce projet, outre sa composante opérationnelle, visant à mettre à disposition de tous les sorties sous formes de données et produits, comporte également un volet développement afin d'améliorer le système, et aura de fortes interactions avec les autres projets du programme, qu'il s'agisse des composantes recherches ou relations avec les utilisateurs.

3

Assimilation des produits lidar d'Aérosols dans le modèle MOCAGE : vers l'amélioration de la distribution verticale

L'assimilation des aérosols est un domaine relativement récent comparée à celle des gaz réactifs. Même si le nombre d'inconnues concernant les aérosols est plus grand que celui des gaz, l'assimilation des aérosols permet néanmoins d'améliorer leur distribution dans le modèle.
Au CNRM-GAME, l'assimilation des aérosols est implémentée dans le modèle de chimie-transport MOCAGE depuis 2014 et permet d'assimiler deux types de données d'aérosols : 1) soit des données intégrées sur toute la colonne atmosphérique type épaisseur optique de l'aérosol, 2) soit des profils issus des mesures lidar avec différentes configurations (depuis le sol, depuis un instrument satellitaire ou depuis un avion).
Un exercice d'assimilation des profils lidar issus de l'instrument CALIOP à bord du satellite CALIPSO pendant l'été 2012 a été entrepris en terme de coefficient d'extinction. Cette période correspondait à la campagne aéroportée TRAQA-2012 et coïncide avec un événement de transport de poussière désertique depuis l'Afrique au dessus de la méditerranée.
La figure (a) montre la trajectoire des mesures d'avion par rapport à son altitude pour le 29 juin 2012 entre 10h00 et 15h00. La figure (b) montre une comparaison en termes de concentration d'aérosols des sorties du modèle et du produit assimilé par rapport aux mesures in-situ effectuées par l'avion. Clairement, l'assimilation des observations CALIOP améliore nettement la sou-estimation de la concentration prévue par le modèle surtout en haute altitude. La figure (c) montre une coupe verticale de la concentration d'aérosols issue du modèle MOCAGE comparée à celle issue de l'assimilation du produit CALIOP. L'amélioration du modèle par assimilation des profils lidar est évidente aussi bien en terme de quantité d'aérosols qu'en terme de distribution verticale.

4

La campagne aéroportée Gradient en Longitude des constituants Atmosphériques au-dessus du bassin Méditerranéen (GLAM)

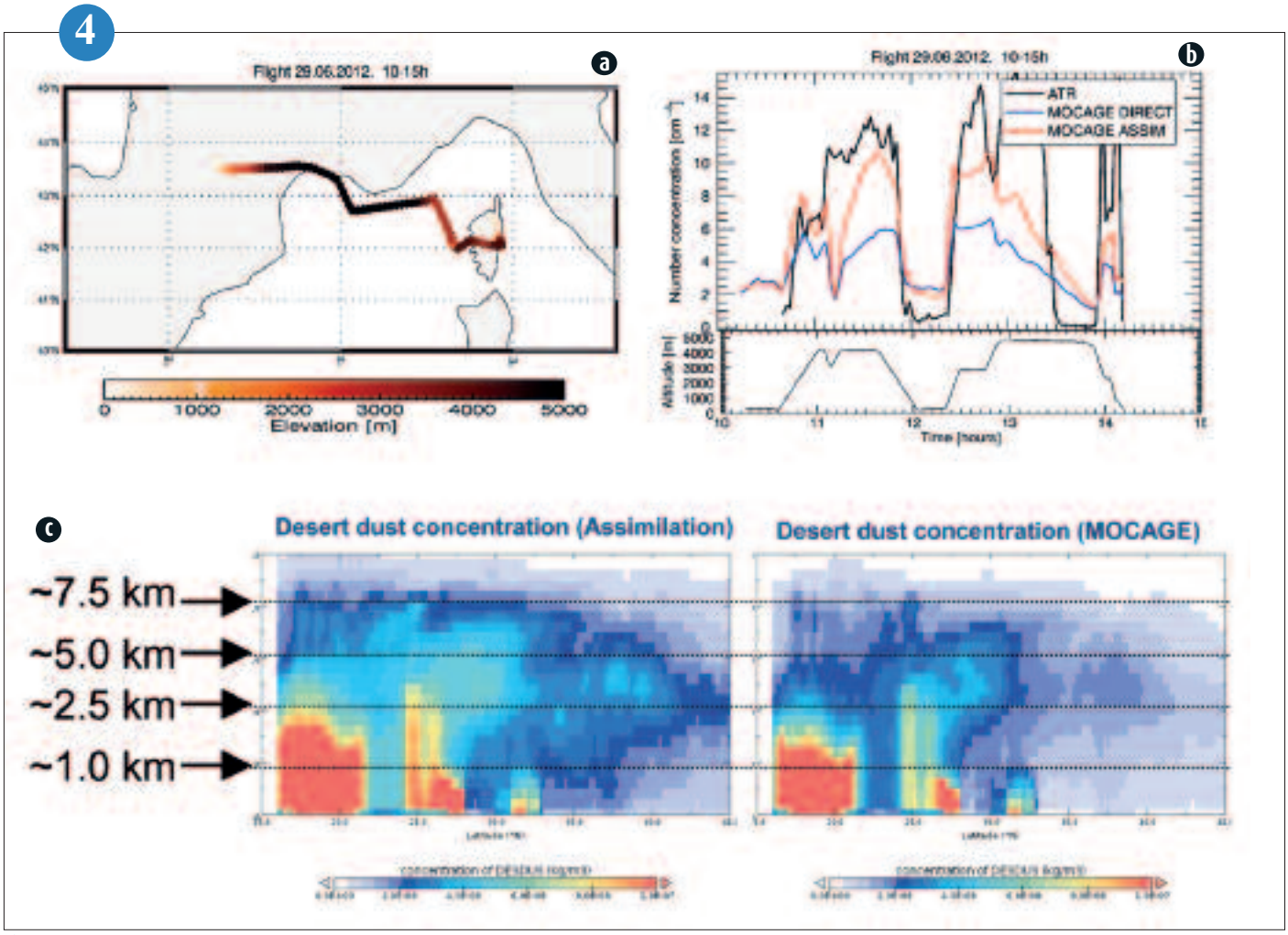
Dans le cadre du programme Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment (CHARMEX), la campagne aéroportée *Gradient en Longitude des constituants Atmosphériques au-dessus du bassin Méditerranéen* (GLAM) a été mise en place pour étudier la variabilité des constituants chimiques (polluants et gaz à effet de serre) et des aérosols entre l'Ouest et l'Est du bassin méditerranéen durant l'été 2014.
A bord de l'avion Falcon 20 de SAFIRE, on a pu mesurer les aérosols et les composés chimiques tels que l'ozone (O_3), le monoxyde de carbone (CO), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O) et de dioxyde de carbone (CO_2).
La campagne a eu lieu du 6 au 10 Août 2014 de Toulouse (France) à Larnaca (Chypre) via Minorque (Espagne), Lampedusa (Italie) et Héraklion (Crète) à 5000 m d'altitude avec des vols retour à 9000 m d'altitude.
Le long d'un axe Est-Ouest ou sur la verticale, nous avons analysé différents processus :
1 – Le transport intercontinental : des feux de biomasse à partir de l'Amérique du Nord, de la poussière du désert Saharien et des masses d'air appauvries en ozone provenant de la couche limite marine de la Mer d'Arabie ont impacté la haute troposphère du bassin méditerranéen après 10-15 jours de transport.
2 – La subsidence : la stratification verticale de l'atmosphère a permis de quantifier le taux de descente verticale sur la partie centre-est du bassin méditerranéen.
3 – La pollution : dans la couche limite maritime au large des côtes de Chypre et de Lampedusa, des épisodes de masses d'air très polluées en ozone ont été mesurés.
Nous étudions actuellement la possibilité d'une nouvelle campagne d'été pour évaluer le lien entre le bassin est Méditerranéen et l'Asie, en particulier la mer/péninsule arabique et le sous-continent indien.

6

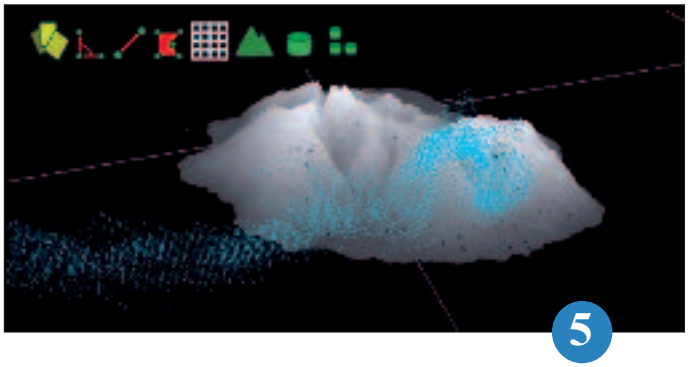
FLEXFIRE : Production et visualisation 3D de panaches volcaniques via Internet

Dans le cadre du projet ANR STRAP (Synergie Transdisciplinaire pour Répondre aux Aléas liées au Panaches volcaniques), la Cellule de Recherche Cyclone (CRC) de Météo-France à La Réunion et l'équipe « troposphère » du Laboratoire de l'Atmosphère et des Cyclones (LACy) ont développé un outil internet appelé FLEXFIRE, permettant à la fois de lancer le modèle de diffusion atmosphérique FLEXPART, utilisé pour le suivi des panaches de soufre issus d'éruptions volcaniques, et de visualiser les résultats en 3D interactive. Bien que le modèle FLEXPART tourne au CNRM et que les produits de visualisation soient créés à La Réunion, toute la chaîne de production et de représentation 3D est commandée par un simple navigateur internet. La totalité de la production (simulations et fichiers 3D) ne dépasse pas trente minutes.
La possibilité de contrôler à distance le modèle FLEXPART a été particulièrement utile lors des éruptions récentes du Piton de la Fournaise. Pendant ces dernières, les ingénieurs et chercheurs du LACy ont ainsi pu lancer, et visualiser, des simulations en tout lieu, permettant d'affiner à tout instant les plans de vol des ULM effectuant des mesures in-situ dans les panaches volcaniques.

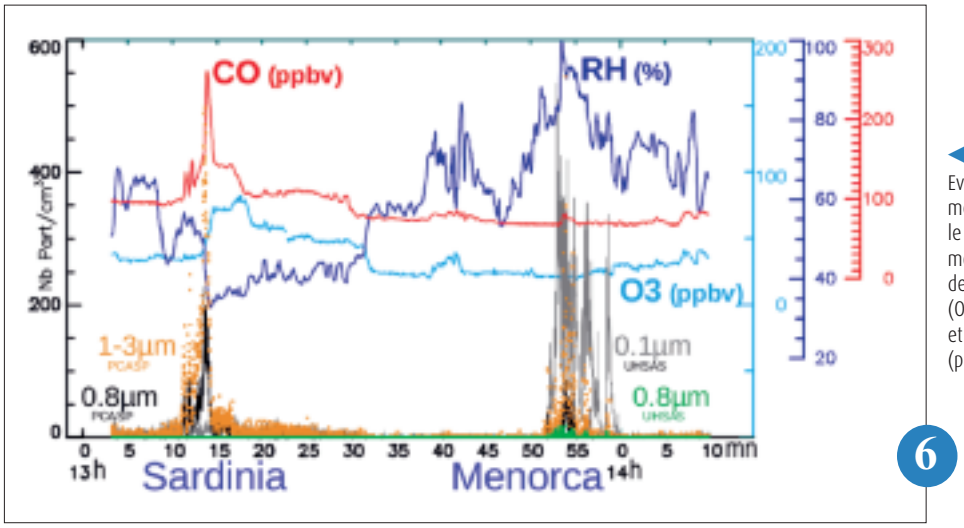
5



(a) Trajectoire des mesures d'avion par rapport à son altitude pour le 29 juin 2012 entre 10h00 et 15h00.
(b) Série temporelle de la concentration d'aérosol désertique issue du modèle MOCAGE et du produit assimilé comparées aux mesures in-situ effectuées par l'avion.
(c) Coupe verticale de la concentration d'aérosols issue du modèle MOCAGE comparée à celle issue de l'assimilation du produit CALIOP.



Interface web interactive de visualisation 3D des sorties du modèle FLEXPART.



Evolution temporelle des aérosols et des polluants mesurés durant la campagne aéroportée GLAM le 10 Août 2014 à 9 km d'altitude montrant des charges en aérosols élevées au-dessus de la Sardaigne et de Minorque, avec de forts polluants (O_3 et CO) sur la Sardaigne (feux de biomasse) et de faibles polluants sur Minorque (poussière saharienne).

Neige

La recherche en nivologie aborde une grande gamme d'échelles spatiales, depuis l'échelle microscopique où se produisent les processus incessants de transformation du matériau neige à celle du massif montagneux, pertinente pour la prévision météorologique et l'estimation du risque d'avalanches. L'échelle intermédiaire du manteau neigeux tel qu'il peut être observé visuellement illustre l'impact des multiples phénomènes responsables de son hétérogénéité. Cette dernière peut être abordée expérimentalement grâce aux techniques de cartographie laser terrestre, et permet d'évaluer les modèles numériques ayant pour objectif de simuler les processus responsables de la variabilité de l'enneigement à l'échelle de quelques mètres (notamment à cause de l'effet du vent). A plus grande échelle, les observations radar peuvent désormais être combinées aux observations conventionnelles, aux modèles atmosphériques à haute résolution (AROME) et aux modèles de manteau neigeux pour produire une estimation la plus fidèle possible des conditions d'enneigement dans un massif montagneux.

Par ailleurs, dans un souci de répondre aux questions sociétales portant sur l'impact de l'évolution du climat sur l'économie touristique de montagne, des développements spécifiques sont en cours pour représenter les effets du damage et de la neige de culture sur le manteau neigeux et mieux appréhender le comportement de cette neige travaillée. Enfin, le comportement mécanique de la neige est gouverné par l'assemblage des cristaux de glace à l'échelle microscopique, ce qui requiert la mise au point de méthodes innovantes non seulement pour acquérir des données expérimentales mais aussi de traiter la masse d'informations ainsi générées.

Du point de vue temporel, la recherche en nivologie à Météo-France balaye également une grande gamme d'échelles. Quelques heures suffisent pour constater des évolutions majeures de l'état du manteau neigeux (accumulation, humidification, érosion par le vent). En revanche, l'étude du climat passé et les projections pour le XXIe siècle font appel à des échelles de temps couvrant plusieurs décennies, mais utilisent la modélisation de l'évolution heure par heure de l'état simulé du manteau neigeux pour représenter les nombreux processus non-linéaires qui gouvernent l'évolution de la neige.

1

Approche microscopique du comportement mécanique de la neige

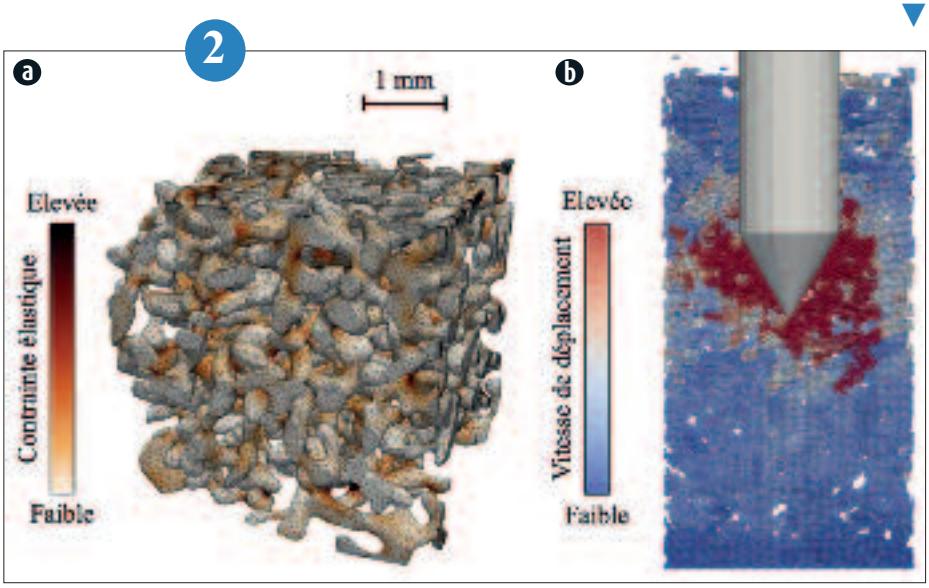
Caractériser les propriétés mécaniques de la neige et leur évolution est crucial pour la prévision du risque d'avalanche. Il n'existe pas « une » neige mais une multitude de types de neige qui se distinguent par la forme, la taille et l'arrangement spatial des particules de glace, ce qu'on appelle la « microstructure ». Celle-ci détermine ses propriétés mécaniques. Or, la grande variété de neige et la difficulté à reproduire des mesures sur ce matériau fragile et hétérogène limitent la compréhension du lien entre microstructure et propriétés mécaniques.

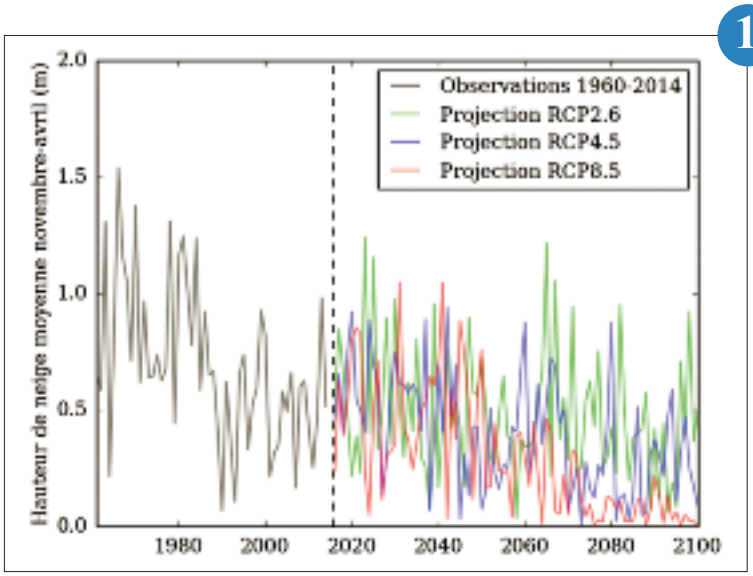
Pour éclaircir ce lien, nous avons mis en place, en collaboration avec Irstea Grenoble, un modèle mécanique basé sur la microstructure tridimensionnelle de neige obtenue par tomographie X. Il s'agit de reproduire numériquement des tests mécaniques en considérant la neige simplement comme une géométrie de glace. La difficulté de cette approche réside dans le traitement de la grande quantité d'information obtenue par tomographie à haute résolution (10 µm). Pour des sollicitations impliquant de petites déformations locales comme le comportement élastique (Fig. a), la stratégie consiste à utiliser une discrétisation fine de la structure mais une loi de comportement simple pour la glace. Pour des chargements impliquant des réorganisations structurelles complexes, comme la pénétration d'un objet (Fig. b), les degrés de liberté de la structure sont limités à des déformations inter-granulaires.

Cette méthode permet de s'affranchir de la difficulté de conduire des tests réels sur des neiges fragiles et de solliciter un même échantillon avec différents chargements contrôlés. Les progrès accomplis permettent d'améliorer nos connaissances du matériau, notamment concernant son comportement mécanique et les moyens de le caractériser.

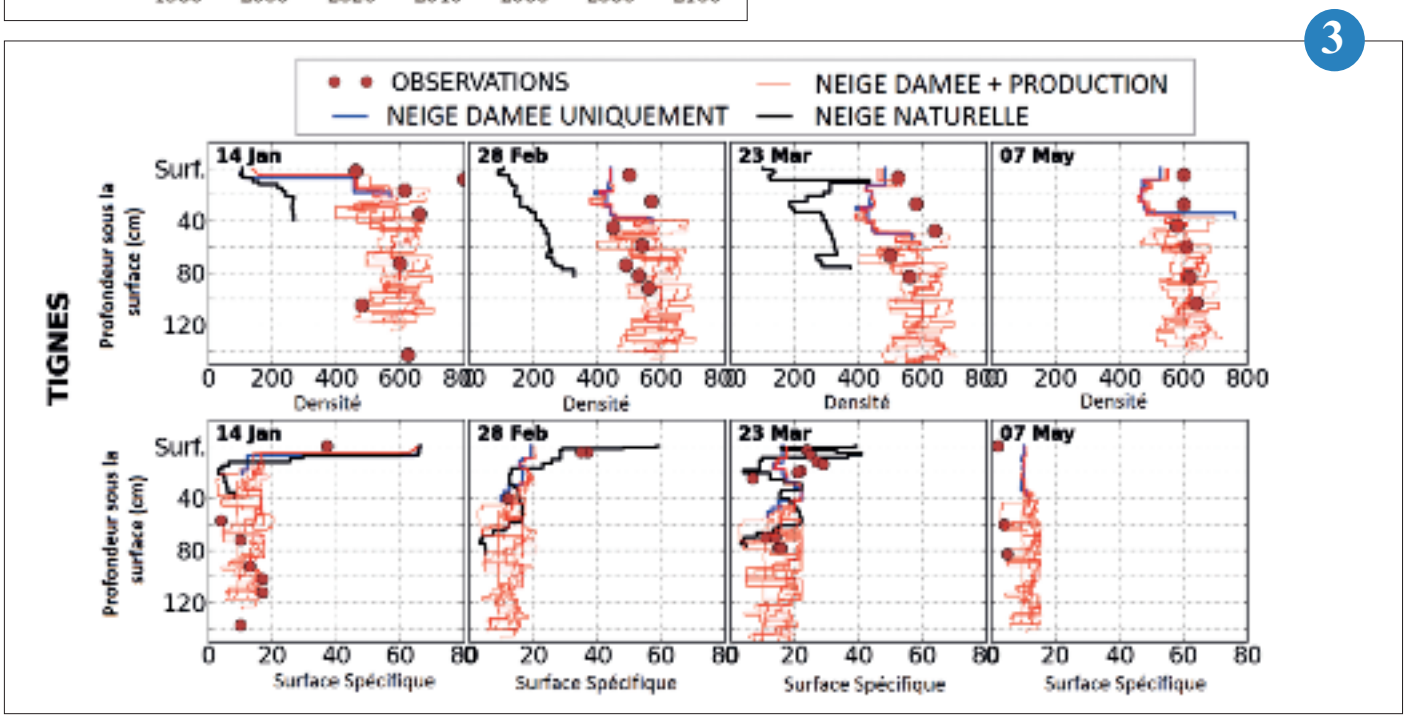
2

Deux stratégies de modélisation micromécanique :
(a) Distribution de contraintes élastiques sur un échantillon de neige soumis à une compression isostatique, modélisée par éléments finis ;
(b) Réorganisation des grains de neige durant un test de pénétration du cône, modélisée par éléments discrets.





Synthèse des observations d'enneigement réalisées de 1960 à 2014 au Col de Porte (Massif de la Chartreuse, 1325 m d'altitude), et projections climatiques pour le XXIe siècle en utilisant les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Les projections climatiques ont été effectuées en utilisant le modèle de neige Crocus alimenté par les sorties corrigées du modèle régional ALADIN, lui-même alimenté par le modèle global ARPEGE, dans la configuration utilisée pour le 5e rapport du GIEC. Tant les observations que les projections montrent une grande variabilité interannuelle, à laquelle se superpose une tendance significative de baisse quel que soit le scénario climatique considéré.



Impact de la gestion de la neige sur la densité (haut, kg m^{-3}) et la microstructure de la neige (surface spécifique, bas, m^2 kg^{-1}) sur une piste de ski à Tignes (hiver 2015). Les observations sont présentées (points) avec les simulations des conditions de neige naturelle (noir), de neige damée sans production (bleu) et damée avec production de neige (ensemble de simulations, rouge).

Intégration de la gestion de la neige dans un modèle détaillé de manteau neigeux

La gestion de la neige dans les domaines skiables revêt des enjeux socio-économiques et environnementaux cruciaux pour les régions de montagne en France qui dépendent en partie de l'industrie concurrentielle du ski. La volonté croissante d'optimisation et les défis posés par le changement climatique ont stimulé l'intérêt des opérateurs de remontées mécaniques et élus locaux pour des éléments tangibles sur l'impact de la gestion de la neige (damage, neige de culture) sur les propriétés du manteau neigeux sur les pistes de ski. Par ailleurs, la plupart des études de vulnérabilité de l'industrie du ski face au changement climatique ne prennent pas en compte ces processus de gestion tandis que leurs impacts sur le comportement du manteau neigeux sont majeurs.

Afin de simuler les conditions d'enneigement sur des pistes de ski, nous avons intégré ces processus physiques dans le modèle détaillé Crocus. Les effets du damage sur les propriétés de la neige sont reproduits (densification, modification de la microstructure) et la production de neige repose sur les conditions météorologiques courantes et sur des règles simples basées sur les pratiques des nivoculteurs professionnels. Des observations sur le terrain ont été menées au cours de l'hiver 2014-2015 dans quatre stations alpines de sports d'hiver et ont permis d'évaluer les développements du modèle. Ces travaux ont montré que ce nouveau modèle reproduit les propriétés du manteau neigeux sur la piste de manière bien plus réaliste que les simulations ne tenant compte que des processus opérant dans la neige naturelle (voir figure).

Ces développements, réalisés en collaboration avec Irstea Grenoble et des acteurs socio-économiques, ouvrent de larges perspectives d'étude sur l'enneigement des domaines skiables français par le passé, actuellement et dans des conditions climatiques futures.

Suivi de la variabilité spatiale de l'enneigement saisonnier sur un site alpin de haute altitude

En zone de montagne, la variabilité spatiale de la hauteur de neige dépend fortement de l'altitude, de l'orientation des pentes et de leur exposition au vent avec des conséquences sur l'évolution du risque d'avalanche.
Afin de mieux quantifier l'influence du transport de la neige par le vent sur cette variabilité, un scanner laser terrestre (SLT) a été utilisé au cours des hivers 2013-2014 et 2014-2015 autour du site expérimental du Col du Lac Blanc (2720 m d'altitude, massif des Grandes Rousses dans les Alpes). Ce site est fréquemment le siège d'épisodes de transport de neige par le vent. Le SLT permet d'acquérir des nuages de points tridimensionnels de la surface enneigée à haute résolution sur une superficie d'environ 25 ha avec des portées allant jusqu'à 800 m. Une chaîne de traitement spécifique permet ensuite de produire un modèle numérique de terrain (MNT) de cette surface. Connaissant le MNT du terrain sans neige, il est possible de calculer des hauteurs de neige par différence entre les deux MNT. La figure montre un exemple de cartes de hauteur de neige autour du site expérimental pour trois dates de l'hiver 2014-2015. Elle illustre la forte variabilité spatiale du couvert neigeux sur ce site. Deux zones d'accumulation de la neige transportée par le vent sont présentes au Nord et au Sud du site avec des hauteurs de neige dépassement localement 5 m (voir figure). En 2 saisons, 13 cartes de hauteur de neige ont ainsi été réalisées.
Ce travail, mené en collaboration avec Irstea Grenoble, permet de disposer d'une base de données de hauteur de neige utilisée pour évaluer les modèles numériques de transport de neige par le vent développés par les équipes de recherche de Météo-France.

4

Analyse météorologique en zone de montagne, apport des observations radar

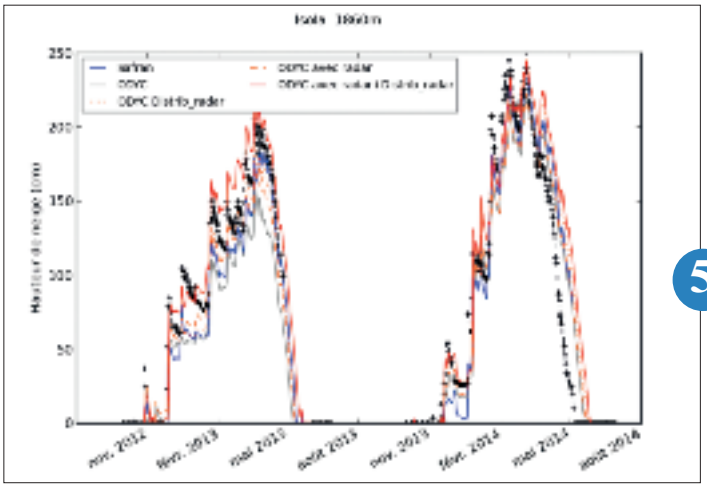
Des analyses quotidiennes de précipitations sont indispensables pour la modélisation du manteau neigeux, réalisée sur les massifs de montagne français à l'aide du modèle de neige Crocus. Actuellement le système de référence SAFRAN fournit des analyses météorologiques de surface (températures, humidité, précipitations, ...) à l'aide d'observations in-situ et en tenant compte de l'altitude, sur des zones considérées comme climatiquement homogènes appelées « massif ». Un nouvel outil d'analyse des précipitations nommé ODYC (Outil 1D-Var pour l'analYse des préCipitations en zones de montagnes) a été développé dans la continuité de SAFRAN, afin d'exploiter au mieux les informations à haute-résolution maintenant disponibles.
Le système ODYC permet de restituer des profils de précipitations analysés au pas journalier à l'aide de prévisions à courte échéance du modèle AROME et d'observations de précipitations provenant de pluviomètres et de radars météorologiques. Une évaluation de cet outil a été réalisée sur deux ans (2012 à 2014), et son impact sur la modélisation du manteau neigeux a été évalué par rapport à SAFRAN et à des observations de hauteurs de neige. La figure présente l'évolution de la hauteur de neige simulée avec le modèle Crocus sur ces deux années à la station d'observation d'Isola à 1860m dans le massif du Mercantour en utilisant un forçage venant de SAFRAN et d'ODYC avec différentes configurations (avec ou sans utilisant des observations radars pour l'analyse, avec ou sans exploitation des lames d'eau radar pour la répartition horaire des précipitations).
L'apport des observations radars est particulièrement positif pour les forts cumuls de pluie ou de neige, épisodes pouvant jouer un rôle déterminant pour la prévision du risque d'avalanches.

5

Détection de la neige par composition colorée multi-spectrale à partir de Suomi-NPP/VIIRS

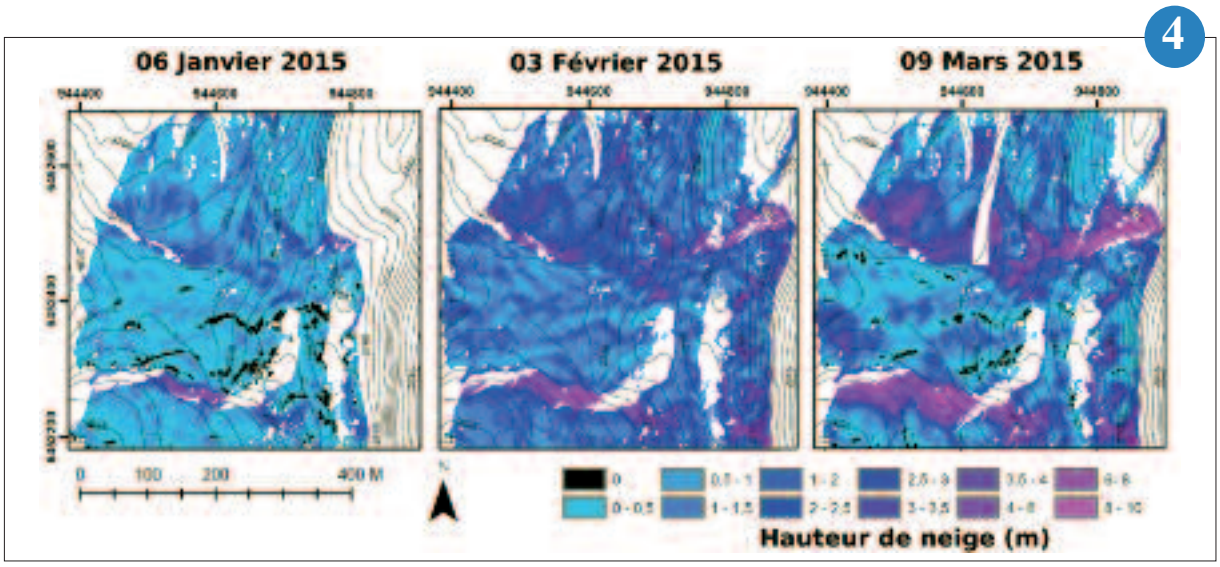
L'imagerie en composition colorée est une technique très avérée pour fournir en temps quasi réel aux prévisionnistes et aux médias des informations synthétisées sur le temps présent. Le CMS de Lannion développe ce type de produit depuis une trentaine d'années. La technique consiste en la superposition de trois images correspondantes à la trichromie rouge-vert-bleu et qui résultent de la combinaison linéaire d'observations spatiales multi-spectrales.
Un nouvel algorithme pour la détection de la neige au sol de jour a été récemment développé au CMS pour l'instrument VIIRS sur le satellite défilant Suomi-NPP. L'algorithme utilise le canal VIIRS centré à 2.25 µm pour détecter la neige au sol et le canal à 1.24 µm pour mettre en évidence la variabilité temporelle de la neige. Pour cela, des couleurs variant du jaune-ocre au rouge ont été choisies. Ces couleurs « chaudes » permettent ainsi de séparer la neige des nuages, mais aussi de la distinguer au travers des nuages fins.
La Figure (a) montre une vue d'ensemble du produit le 7 février 2015 à 12:52 UTC au-dessus de la France et une partie de l'Europe. La neige est très bien isolée des nuages et est visible dans les tons jaunes au-dessus de la plupart des massifs montagneux mais aussi sur plusieurs régions de l'est de la France et de l'Allemagne. De plus, de plus petites surfaces enneigées sont aussi perceptibles en Picardie et en Normandie. Enfin, en Lombardie, une zone de rouge plus accentuée est visible. Cette différence de couleur est due à une réflectance de la neige plus faible induite par la fonte. La Figure (b) montre une vue de la région Sud-Est le 7 mars 2015 à 12:27 UTC où l'on voit des surfaces enneigées sur le Massif Central au travers des cirrus. Ce produit est accessible à la résolution spatiale de 750 m mais pourrait être affiné à 375 m.

6

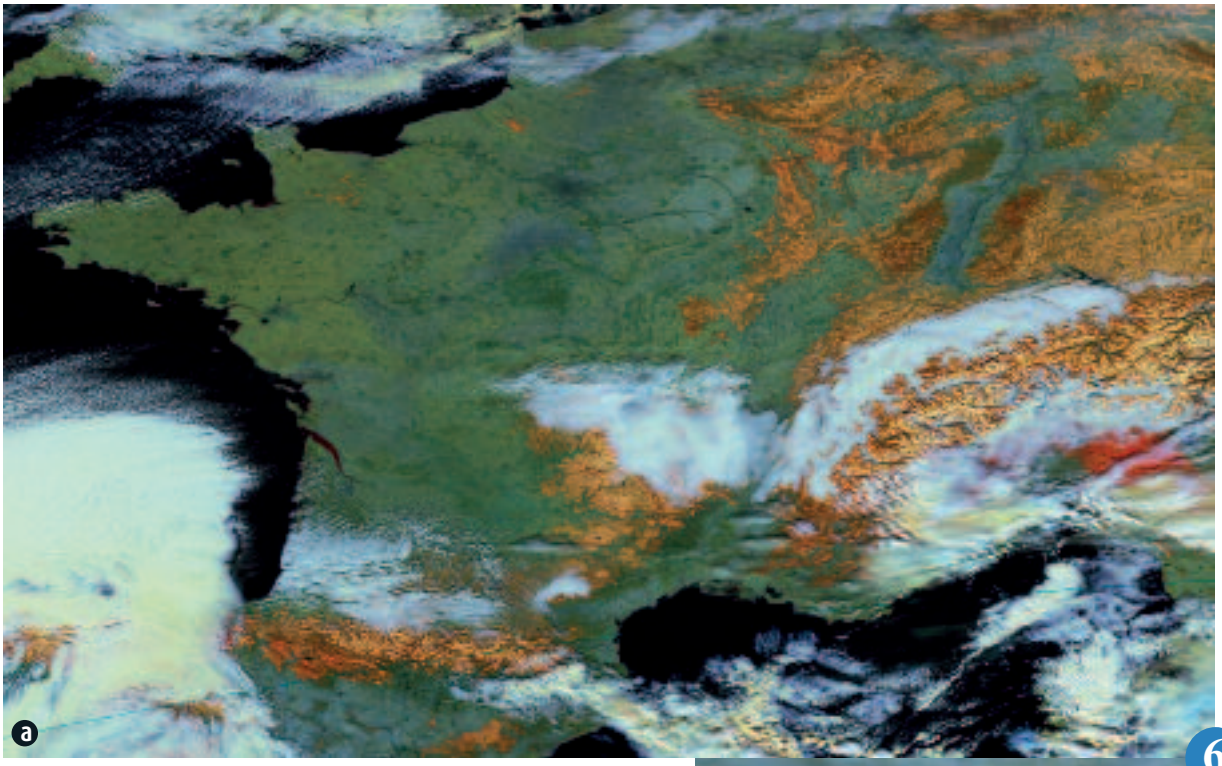


5

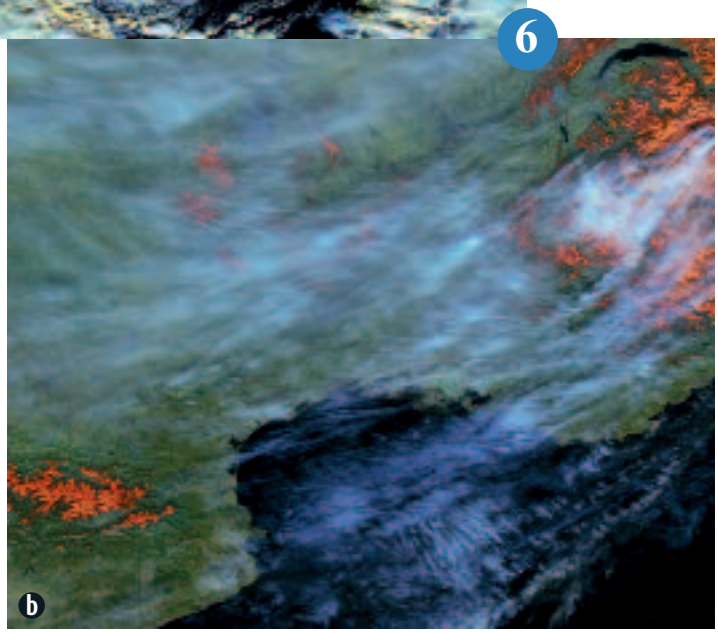
Simulations de hauteurs de neige réalisées avec le modèle Crocus, forcé par différentes analyses de précipitations sur deux ans, d'Août 2012 à Août 2014, à la station d'observation d'Isola (1860 m). Les croix noires représentent les observations, et les différentes simulations réalisées avec SAFRAN et ODYC sont tracées (« ODYC » : configuration de base, « ODYC Distrib_radar » : distribution horaire basée sur les cumuls radars horaires, « ODYC avec radar » : analyse incluant les cumuls radars journaliers, « ODYC avec radar + Distrib_radar » : analyse incluant les cumuls radars journaliers et distribution horaire est basée sur les cumuls radars horaires).



Cartes de hauteur de neige (en m) autour du Col du Lac Blanc pour 3 dates de l'hiver 2014-2015.



(a) Composition colorée de détection de la neige de jour réalisée à partir des observations de l'instrument VIIRS le 7 février 2015 à 12:52 UTC au-dessus de la France et des parties de l'Allemagne et de l'Italie. Les régions enneigées sont représentées en jaune, en orange et en rouge.



(b) Composition colorée de détection de la neige de jour réalisée à partir des observations de l'instrument VIIRS le 7 mars 2015 à 12:27 UTC au-dessus du Sud-Est de la France. La neige est détectée au travers des nuages fins par exemple au-dessus du Massif Central.

Océanographie

Les activités de recherche sur les interactions océan-atmosphère concernent l'influence de l'océan sur la couche limite atmosphérique (en particulier l'influence des états de mer sur les flux turbulents) et l'amélioration de la paramétrisation de ces flux turbulents dans les modèles de prévision numérique du temps (PNT).

Les activités d'observation en mer sont pérennes pour le CMM. A ce titre le CMM entretient trois bouées ancrées, plus deux en coopération avec le UK MetOffice. Il maintient aussi un réseau de plus de 100 bouées dérivantes dans l'Atlantique Nord (l'océan Arctique compris) pour le compte d'E-SURFMAR (service opérationnel d'EUMETNET), et de plus de 30 bouées dérivantes dans l'Océan Indien, dont le CMM surveille et diffuse les observations.

Cette année 2015 a été marquée par :

• la poursuite de la mise au point, l'intégration et le premier déploiement en mer d'une nouvelle électronique pour bouée ancrée : « MERCURY Bouée »,

• le début des opérations du projet AtlantOS, le consortium AtlantOS ayant confié à E-SURFMAR les tâches concernant les bouées dérivantes : déploiement d'un réseau de 15 bouées dérivantes dans le sud de l'Atlantique Nord, développement d'une bouée mesurant la salinité, étude de bouées équipées de chaine de thermistance,

• la poursuite de l'étude de l'impact de l'état de mer sur la simulation d'un événement précipitant intense à l'aide de simulations à fine échelle par Méso-NH utilisant les données de la SOP1 d'HyMeX,

• la poursuite de l'étalonnage, du maintien en condition et du déploiement des capteurs HyMeX, à chaque relève des bouées ancrées méditerranéennes, puis la récupération, l'analyse et la diffusion des données à l'issue,

• la poursuite de la gestion du service opérationnel E-SURFMAR.

1

Image composite de déploiements de bouées ancrées et dérivantes (SVP-B, Marisondes).

1

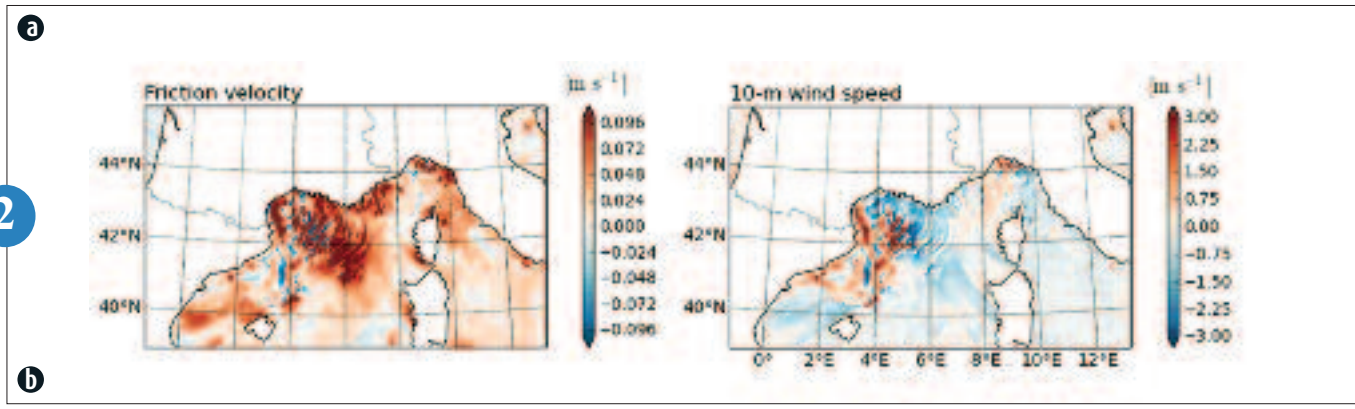
Impact de l'état de mer sur la simulation d'un événement précipitant intense (HyMeX, POI16a)

La simulation d'un événement précipitant intense survenu pendant la POI 16a de HyMeX à l'aide du modèle haute-résolution non hydrostatique Méso-NH a montré la sensibilité de ce type d'événements à l'état de mer, à travers la rugosité de surface de l'océan. Un changement de rugosité impacte la tension de vent et les flux turbulents atmosphériques à la surface (quantité de mouvement, chaleur sensible et latente).

Nous avons comparé deux simulations à haute résolution (2,5 km) qui diffèrent au niveau des vagues : sans vagues (NOWAV), ou bien avec une rugosité de surface qui dépend de l'âge des vagues, calculé par le modèle de vagues de Météo-France (WAM). La comparaison de la vitesse de frottement et du vent à la surface (Figures a et b, le 26/20/2012 à 8h TU) montre l'impact des vagues sur l'écoulement en basses couches qui remonte sur le Golfe du Lion et alimente les systèmes convectifs méso-échelle responsables des événements préci-pitants. L'augmentation de la vitesse de frottement due aux vagues se traduit par un ralentissement du vent à la surface jusqu'à 3 m/s.

Au niveau du cumul de précipitations sur 24h (Figure c), cela correspond à un changement de la quantité de précipitations et à déplacement du pic situé sur le Var, qui se rapproche de la côte, davantage en accord avec les observations pluviométriques. Les scores de la prévision des précipitations sont améliorés significativement par la prise en compte des vagues dans le modèle, ce qui montre l'intérêt d'en tenir compte pour la prévision du temps.

2



2

Des mesures sur les bouées ancrées de Météo-France pour mieux comprendre les échanges océan-atmosphère

Les bouées ancrées de Météo-France en Méditerranée mesurent depuis 1999 des paramètres atmosphériques (pression, température, humidité, vent) et océanographiques (température de surface, houle).
Depuis 2010, l'équipement de ces bouées a été renforcé : mesure des flux radiatifs solaire et infra rouge, des précipitations, de la salinité de surface et de la température de surface. Un système spécifique développé au CNRM/CMM a permis l'acquisition de ces paramètres entre 2010 et 2015. A compter de novembre 2015, ils sont acquis sur la bouée LION par la nouvelle station automatique Mercury-bouée.
Par ailleurs, les lignes d'ancrage des bouées servent de support à deux types de capteurs sub-surface (entre 0 et -260m) : 20 enregistreurs autonomes de température et pression, 2 capteurs de salinité et de température de la mer.
A l'été 2015 les plongeurs de l'INSU de Villefranche-sur-Mer ont implanté sur la ligne d'ancrage de la bouée Côte d'Azur un capteur de nitrates à - 40 m.
L'implantation de capteurs sur les lignes de mouillage reste un exercice délicat. Il faut veiller à préserver à la fois la ligne elle-même comme les capteurs. L'installation sur la chaîne, soumise à des contraintes plus importantes que le câble, est logiquement plus complexe. Avant toute implantation effective de capteur, le CMM teste l'efficience de ses systèmes de fixation en mer pendant au moins six mois.

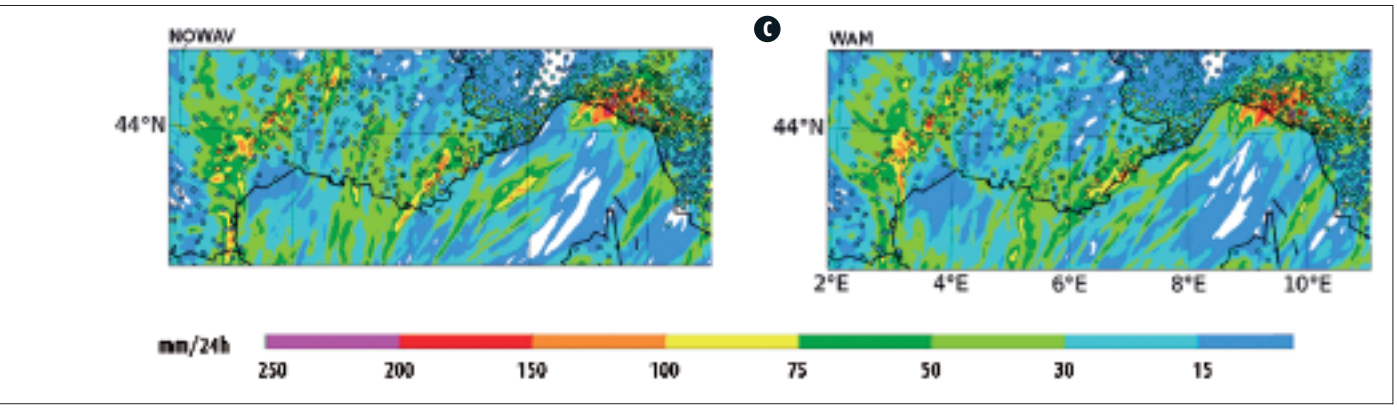
3

3

(a) Installation d'un capteur de nitrate sur la ligne d'ancrage de la bouée Côte d'Azur par des plongeurs de Villefranche-sur-Mer (crédit photographique Insu).

(b) Mise à l'eau de la première Mercury-bouée sur la position LION en novembre 2015.

Pour les vitesses de frottement (a) et de vent à 10 m (b) exprimées en m/s, différence entre les simulations WAM et NOWAV, le 26/10/2012 à 08 h TU. Cumuls de précipitations simulés sur 24h, du 26/10 à 0h au 27/10/2012 à 0h, par la simulation NOWAV (gauche) et WAM (droite), en comparaison avec les observations des pluviomètres (points colorés).



Flux de surface et fermeture des bilans de chaleur et d'eau : application à la Méditerranée occidentale

La fermeture des bilans de chaleur et d'eau dans la couche de mélange océanique est un problème fondamental pour la modélisation en océanographie. Or elle se heurte aux nombreuses erreurs qui affectent les flux de surface et qui proviennent des algorithmes d'aérodynamique de masse utilisés, des approximations physiques, du choix des constantes et de la résolution spatio-temporelle des données d'entrée. De plus, par vents faibles ou très forts, les algorithmes souffrent de larges incertitudes. Une méthode originale a été mise au point pour s'affranchir de telles incertitudes. Elle consiste à ajuster les flux turbulents et les précipitations de telle sorte qu'ils soient en accord avec l'évolution des contenus thermiques et salins déduits d'observations. La méthode a été appliquée avec succès en Méditerranée occidentale, grâce aux nombreuses données collectées lors des campagnes MOOSE, DEWEX, HYMEX en 2012 et 2013.

La méthode repose sur : (1) la simulation de profils de température et de salinité moyens sur une zone de 300x300 km² entre Corse et Baléares à l'aide d'un modèle colonne ; (2) l'optimisation statistique de coefficients affectés aux flux et à des paramètres du modèle. L'optimisation requiert un algorithme génétique pour effectuer de très nombreuses simulations et trouver la fonction coût qui minimise les paramètres ajustables. A l'issue du processus, les flux ajustés permettent de simuler l'évolution des températures et salinités de surface moyennes sur la zone avec des erreurs inférieures à 0.02°C et 0.02 psu respectivement sur une année. Les flux optimisés servent de référence pour évaluer les erreurs qui affectent les flux des modèles atmosphériques opérationnels, souvent utilisés comme forçages pour les modèles océaniques.

4

Nouveau modèle opérationnel pour prévoir les vagues à la côte

En 2012, le projet HOMONIM, conduit par Météo-France et le SHOM, a été lancé avec le soutien du MEDDE pour améliorer les outils de prévisions des surcotes et des vagues à la côte. Un des volets du projet a abouti à la mise en place d'un modèle de vagues côtier haute résolution, WaveWatch 3 (WW3), sur la chaîne opérationnelle en mars 2015.
Le modèle WW3 fournit des paramètres décrivant l'état de la mer à une résolution de 200 m près des côtes françaises en Atlantique nord-est, Manche, Mer du Nord et Méditerranée. Il a la particularité d'utiliser une maille irrégulière qui permet d'adapter sa grille à la forme des côtes. Le modèle WW3 est forcé par des vents du modèle atmosphérique Arpège et imbriqué dans le modèle régional de vagues de Météo-France MFWAM, ayant une résolution d'environ 10 km.

La mise en place de WW3 a nécessité de tester plusieurs paramétrisations et configurations et de mettre au point un maillage adapté. Le modèle a été validé par des re-jeux sur des situations choisies et sur une période longue d'un an. Le modèle WW3 retenu utilise la même physique que le modèle MFWAM en eau profonde. Cependant, 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.
La suite du projet consistera notamment à mettre en place WW3 en outre-mer et à étudier l'intérêt d'un couplage avec les courants et le niveau d'eau du modèle de surcote.

5

Assimilation des données altimétriques dans les modèles régionaux MFWAM

L'assimilation des données altimétriques dans les modèles de vagues permet de corriger les erreurs de modèle d'une manière très efficace, et par conséquent d'établir des bulletins de sécurité marine très fiables. Le lancement prochain des satellites Sentinel-3A et Jason-3 va encore augmenter la densité de données dans les bassins océaniques. Depuis le 1er novembre 2015, les modèles régionaux MFWAM de Météo-France utilisent les données altimétriques en opérationnel. Cette mise à jour permet d'améliorer la prévision des états de mer surtout dans des situations extrêmes de vagues générées par des tempêtes ou des cyclones. Par exemple, pour la dernière saison cyclonique dans l'Océan Indien, on a montré que l'assimilation des données altimétriques réduisait de 10 % les erreurs quadratiques moyennes de la hauteur significative des vagues. La figure montre la correction sur les hauteurs significatives des vagues après assimilation pour le cas du cyclone BANSI.

6

Amélioration du calcul des dérives de certains objets en mer pour le système MOTHY

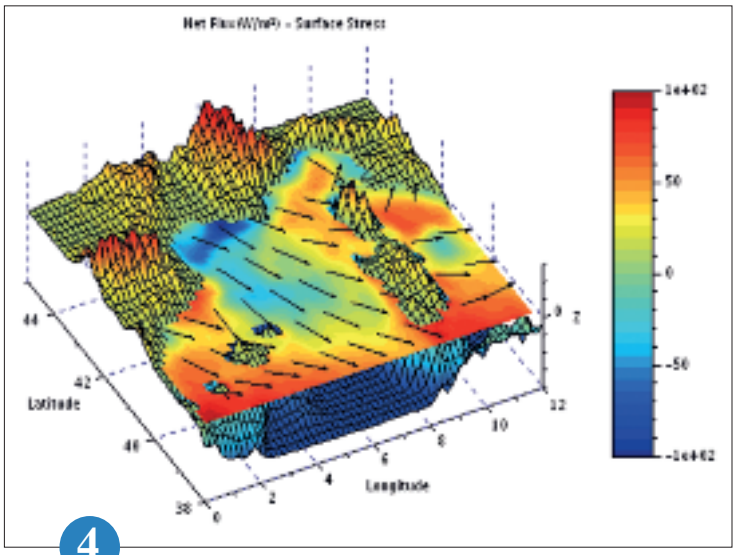
Dans le cadre de ses responsabilités nationales et internationales, Météo-France met en œuvre le modèle MOTHY de prévision de dérive en mer de nappes d'hydrocarbures ou d'objets flottants. Le système est utilisé plus de 700 fois par an pour des cas réels de déversement d'hydrocarbures ou d'opérations de recherche et sauvetage. La recherche d'objets ou de personnes constitue 80 % des demandes.
La base de données initialement utilisée a été constituée par le service des gardes côtes américains à partir d'expérimentations en mer. Elle est progressivement enrichie par des résultats d'expérimentations en mer réalisées par des organismes spécialisés ou par des retours d'expérience communiqués par les Centres régionaux opérationnels de surveillance et de sauvetage (CROSS) ou par les Maritime Rescue Coordination Center (MRCC).
Ainsi, 15 nouveaux objets ont été intégrés en 2015. il s'agit d'engins de plage (paddle, jetski), différents types de navires de plaisance ou de pêche, dont certains types utilisés dans des régions spécifiques comme le bateau de pêche polynésien poti marara. On trouve aussi de grands navires de 250 m de long dont on a pu déterminer la dérive à vide ou en pleine charge. Enfin quelques objets particuliers (barril de pétrole, mine flottante) complètent la liste.
Par ailleurs, le rendu graphique a été amélioré pour permettre une lecture plus aisée des zones de recherche.

7

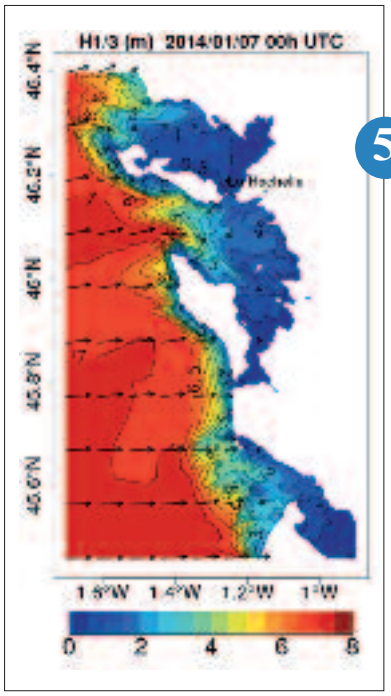
Aider à mieux prévoir les submersions marines avec le projet HOMONIM

Lancé en 2013 dans le cadre du PSR et avec le soutien de la DGPR, le projet HOMONIM, mené par Météo France et le SHOM, achève sa première phase en 2015. Il a notamment permis d'améliorer la modélisation du niveau marin et des états de mer en côtier avec la mise en place de deux nouveaux modèles dans la chaîne opérationnelle de Météo France : un modèle de surcote en 2014 puis un modèle de vagues en 2015 pour des configurations couvrant le littoral métropolitain où la résolution atteint respectivement 1 km et 200 m. En 2015, une deuxième phase de ce projet a été décidée (2015-2019), avec le financement de la DGPR et de la DGSCGC, afin de poursuivre les améliorations des outils d'aide à la gestion des submersions marines. Ainsi, les modèles de surcotes et d'états de mer seront configurés pour l'outre mer afin de fournir des prévisions opérationnelles sur leur littoral avec une résolution au moins aussi fine qu'en métro-

Flux nets de surface (couleurs) et tensions du vent (flèches) pendant un an (août 2012-août 2013) sur la Méditerranée occidentale. C'est la première fois que des flux à la surface océanique permettent de clore les bilans de chaleur et d'eau sur le bassin. En moyenne sur une année, on distingue en particulier très bien l'empreinte des vents dominants (Mistral et Tramontane) sur les flux nets négatifs dans le Golfe du Lion, alors que le bilan net devient positif dans la plupart des autres régions marines.



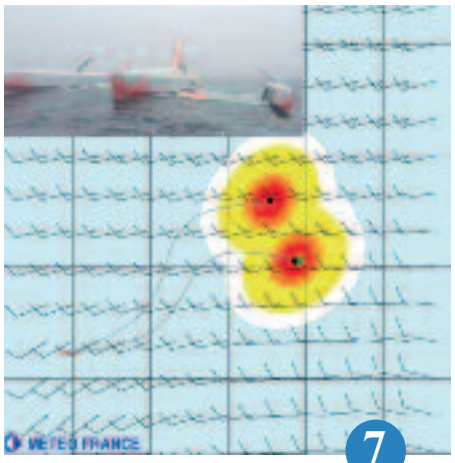
4



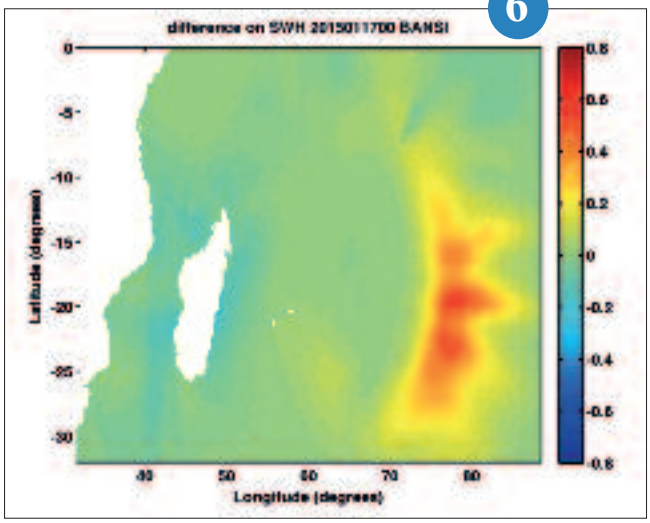
5

Hauteur significative des vagues de la mer totale (m) de WW3 le 07/01/2014 à 00h UTC.
Les flèches rouges représentent la direction de la houle.
Les variations de hauteur reflètent les effets du déferlement et de la dissipation d'énergie due à la réfraction et au fond marin.

Prévision probabiliste de dérive de trimaran retourné dans le Golfe de Gascogne. Les couleurs représentent la probabilité de présence du trimaran : 50 % en rouge ; de 67 % en rouge et orange ; de 95 % en rouge, orange et jaune ; 99 % en ajoutant le blanc. Les points noirs sont les prévisions déterministes selon deux hypothèses d'orientation initiale par rapport au vent. L'étoile rouge indique la position du chavirage. L'étoile verte donne la position où le trimaran a été retrouvé 26 heures après.



7

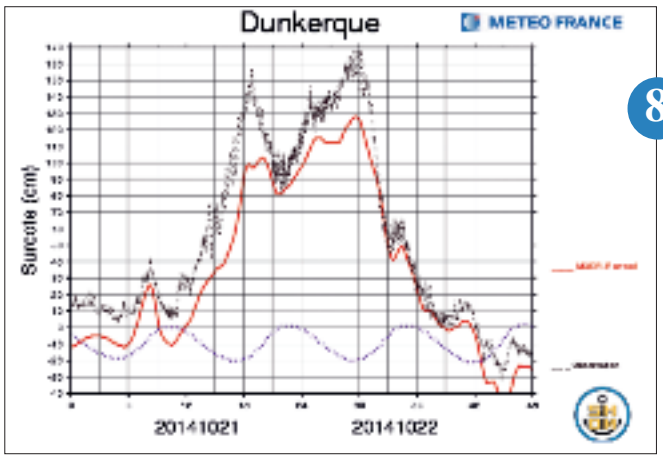


6

Différence en mètres de hauteurs significatives des vagues issues du modèle MFWAM-Réunion avec et sans assimilation pour le cyclone BANSI (17 janvier 2015 à 0:00 UTC).

Graphe temporel de la surcote (cm) calculée par Hycom2D, à Dunkerque, lors de la tempête en Mer du Nord des 21 et 22 octobre 2014. L'observation de la surcote (marégraphe du réseau Ronim du SHOM) est indiquée par la courbe en trait pointillé noir, alors que la surcote modélisée est en rouge. La courbe en bas du graphe représente l'amplitude de la marée et permet de repérer les phases de la marée. L'erreur du modèle est ainsi de 10 à 15 cm aux pleines mers (moment critique pour la submersion) et entre 40 et 50 cm lors des deux pics de surcote maximale. Cela montre la capacité actuelle du modèle à reproduire la chronologie de la surcote mais aussi les améliorations que le projet HOMONIM devra apporter pour mieux évaluer son amplitude.

pole. Par ailleurs, une prévision d'ensemble de surcote sera mise en place pour la métropole pour permettre aux prévisionnistes d'évaluer l'incertitude des prévisions et les aider à anticiper les événements extrêmes. Enfin, des études seront menées afin d'évaluer le potentiel de la haute résolution (quelques dizaines de mètres) sur une zone à enjeux, en couplant les modèles du niveau marin et des vagues.
Une attention particulière sera portée à une utilisation optimale des productions de ces modèles par le dispositif de la vigilance vagues-submersion ou par les autres acteurs institutionnels dans la gestion des submersions ou des inondations aux débouchés des fleuves (RDI, SPC).



8

Techniques, campagnes et produits d'observation

Les avions instrumentés sont un élément clé des dispositifs d'observation pour la recherche. Le programme européen EUFAR œuvre depuis plusieurs années à favoriser l'accès à ces moyens et leur utilisation par le plus grand nombre de chercheurs. Il a été renouvelé en 2014 pour une nouvelle période de 4 ans avec l'objectif ambitieux de créer une structure pérenne. L'observation aéroportée fait l'objet de développements instrumentaux permettant de réaliser de nouvelles mesures (utilisation du GPS pour l'observation des sols par exemple) et de tester des techniques spatiales (radar aéroporté KuROS pour la caractérisation des états de mer) avant qu'elles ne soient déployées sur des satellites. Le savoir-faire accumulé par l'unité SAFIRE et les laboratoires de recherche a été mis à contribution dans le projet international HAIC destiné à améliorer la sécurité aérienne.

L'utilisation de drones instrumentés se développe depuis plusieurs années. Les drones donnent accès à moindres coûts à des volumes difficilement accessibles aux avions (vols à quelques mètres au-dessus de la mer par exemple), mais avec des charges utiles bien plus limitées. Le programme VOLTIGE a démontré que ces limites peuvent être partiellement repoussées en combinant intelligemment le vol de plusieurs drones équipés de charges utiles complémentaires.

L'observation à partir du sol n'est pas en reste. Des développements ont été menés qui visent à améliorer le service rendu par les radars du réseau opérationnel de Météo-France, que ce soit en filtrant mieux les échos de sol, ou en corrigeant l'atténuation des radars en bande X déployés en région montagneuse en complément des radars en bande C ou S du réseau ARAMIS mais beaucoup plus sensible à ce phénomène. Du côté de la recherche, une tendance est à l'observation à hautes résolutions spatiales et temporelles des basses couches de l'atmosphère, notamment en zone de relief comme en témoigne la campagne Passy 2015. Elle fait appel à des innovations instrumentales comme l'application de techniques mathématiques de filtrage non linéaire à des mesures de lidars Doppler pour la restitution de paramètres turbulents dont le transfert est en cours vers l'industrie.

1

La campagne Passy-2015 : dynamique atmosphérique et qualité de l'air dans une vallée alpine urbanisée

Les conditions anticycloniques hivernales (ciel clair, nuits froides) conduisent à la formation de couches stables qui favorisent les épisodes de pollution, particulièrement en terrain montagneux.

La vallée de l'Arve est très sensible à ce phénomène, en particulier près de la ville de Passy (Haute-Savoie), 20 km en aval de Chamonix, où la qualité de l'air est une des moins bonnes de France.

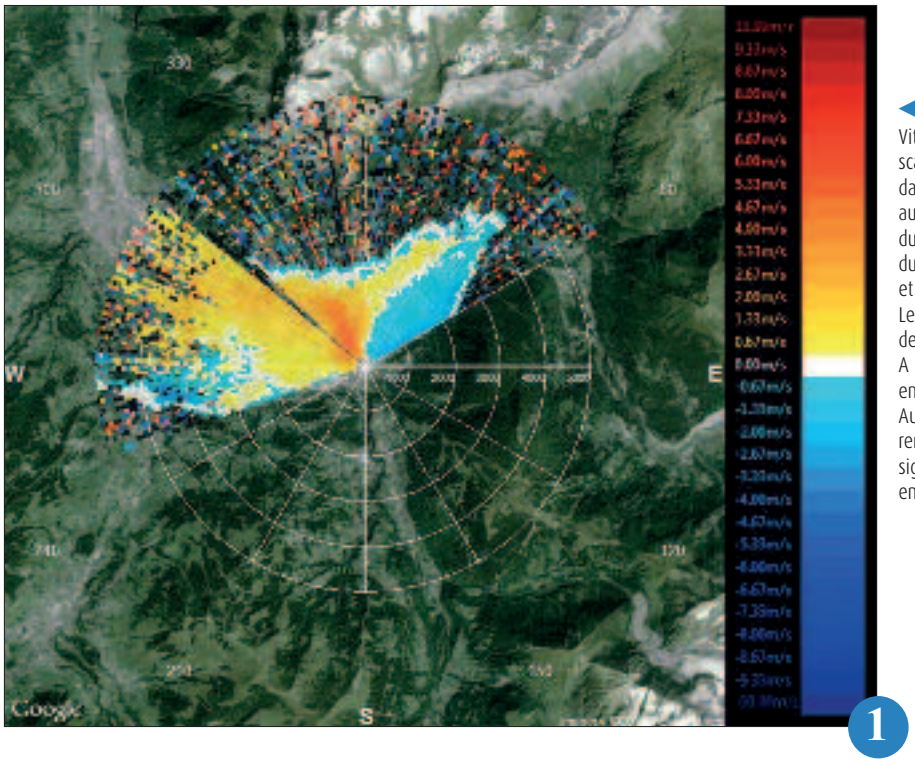
Au-delà du suivi de la qualité de l'air, tel que réalisé par Air Rhône-Alpes ou par le projet DECOMBIO piloté par le LGGE, il est primordial d'améliorer notre connaissance de la dynamique atmosphérique à l'échelle de la vallée en conditions stables pour mieux comprendre comment, couplée au cycle et à la géographie des émissions, elle pilote la dispersion des polluants.

C'est une des motivations de la campagne Passy-2015, réalisée au cours de l'hiver 2014-2015. Un ensemble assez large d'instruments (profileurs de vent, de température et de vapeur d'eau, lidars scannant, tours instrumentées...) a été déployé sur plusieurs sites dans la vallée. En février 2015, lors de deux périodes intensives d'observation, le dispositif a été complété par des radiosondages à haute cadence, un ballon captif, un drone et un sodar.

Le travail sur les données de cette campagne pilotée par le CNRM-GAME et financée par l'ADEME (projet LEFE/INSU coordonné par le LEGI) et METEO-FRANCE, s'inscrit dans une collaboration sur plusieurs années avec le LEGI, le LTHE, le LGGE, Air Rhône-Alpes et le NCAS (Royaume-Uni).

Il contribuera à affiner la prévision du temps et de de la qualité de l'air dans ce type de vallée et plus généralement en conditions stables et en zone de relief. Il s'agit en particulier d'améliorer notre capacité à prévoir des phénomènes critiques comme les températures minimales, le verglas, le brouillard ou encore les zones de pollution intense.

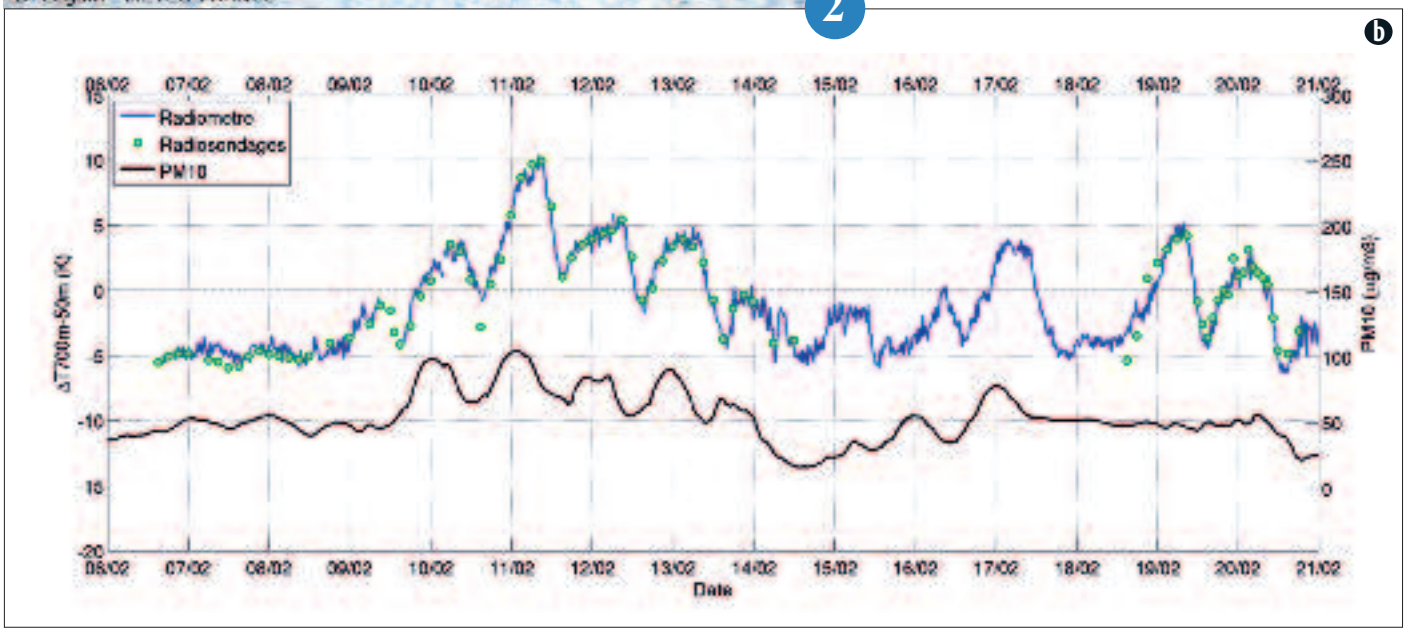
2



Vitesses radiales de vent en (m/s) mesurées par le lidar Doppler scannant WLS200S le 11 janvier 2015 à 19:45UTC dans la vallée de l'Arve en Haute-Savoie au cours de la campagne Passy-2015. La vitesse radiale du vent est la composante de vitesse dans l'axe de visée du lidar. Celui-ci était placé au centre de la mire et a réalisé un panoramique avec angle de site de 4°. Les vitesses positives correspondent à des vents qui s'éloignent de l'instrument, et inversement pour les vitesses négatives. A l'est, un cisaillement de vent apparaît nettement entre les moitiés Nord et Sud de la vallée. Au Nord, les vitesses positives indiquent que le vent remonte la vallée. Au sud, les vitesses négatives signalent la présence d'un flux en provenance de Chamonix en amont de la vallée (écoulement d'air froid).

(a) Tour instrumentée de 10m, station sol et station de mesure microphysique et brouillard en cours d'installation sur le site principal de la campagne, avec le Mont-Blanc qui se distingue en arrière-plan.

(b) Concentrations moyennes sur 12h de particules de moins de 10 microns (PM10, courbe noire) en février 2015 et stabilité de l'atmosphère dans la vallée estimée à partir des radiosondages (points verts) et du radiomètre microonde du site principal au centre de la vallée (courbe bleue).



Vecteurs d'Observation de La Troposphère pour l'Investigation et la Gestion de l'Environnement (VOLTIGE)

Au cours de la dernière décennie, la communauté scientifique a adopté l'utilisation des drones (aéronefs sans pilote à bord) comme des outils pour améliorer les observations des phénomènes atmosphériques. À cette fin, VOLTIGE (les Vecteurs d'Observation de La troposphère Pour l'enquête et la Gestion de l'Environnement) a mis au point un système d'observation pour étudier le cycle de vie de brouillard avec les vols simultanés des drones ultralégers.

Quatre plateformes à vocation scientifique ont été développées – leurs fonctions comprennent les mesures de flux solaires, de turbulence, de nuages, et de vidéo en temps-réel. Chaque plateforme a également été équipée de capteurs météorologiques. Plus de 160 vols et plus de 35 heures de vol ont été menés dans le cadre du projet VOLTIGE. Les quatre avions ont volé simultanément et la mesure des capteurs a été utilisée par le pilote automatique afin d'adapter son vol en fonction des conditions atmosphériques particulières. Quelques vols ont été effectués au cours de dissipation d'un brouillard, mais d'une manière générale, il est apparu difficile de coordonner les vols en fonction d'une prévision de brouillard dans une période de quelques semaines accordée par les autorités aériennes. Néanmoins, les profils verticaux de température et d'humidité ont été comparés au modèle de prévision opérationnel à fine échelle AROME de Météo France, et les résultats suggèrent que les modèles de prévision peuvent être améliorés en utilisant des mesures fréquentes et à une haute résolution verticale.

La Basse Couche Campagne (BAC+) a été lancé en collaboration avec le l'École de l'Aviation Légère de l'Armée de Terre (EALAT) afin d'effectuer des vols réguliers par des drones dans les Landes - une région qui a souvent du brouillard. BAC+ présente une première étape vers un réseau opérationnel de drones à Météo France.

Finalement, l'École Nationale de la Météorologie enseigne, depuis 2012, le développement et l'intégration des capteurs sur les drones dans le cadre de son programme d'études.

VOLTIGE a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche et labellisé par l'Aérospace Valley.

3

Système de reconstruction locale de l'atmosphère turbulente : un brevet et un transfert industriel

Depuis plusieurs années sont développés au CNRM des systèmes de reconstruction locale de l'atmosphère turbulente afin de fournir en temps réel une image numérique tridimensionnelle de la couche limite atmosphérique dans un volume sondé par des capteurs. Ces systèmes de reconstruction peuvent être utiles pour des actions de recherche afin d'avoir une caractérisation de la dynamique avec une cadence de l'ordre de la seconde et ce dans les premières couches de l'atmosphère. Ils peuvent aussi être déployés sur des sites industriels ou d'intérêt (fermes éoliennes, infrastructures aéroportuaires, établissements sensibles, grands évènements, ...) en vue d'obtenir à haute cadence des quantifications des paramètres de la turbulence tels que l'énergie cinétique turbulente, intensité turbulente, distribution des rafales, etc.... Couplé à des lidars, ces systèmes de reconstructions donnent une mesure en temps réel de ces paramètres toutes les 4 ou 5 secondes avec des résolutions spatiales de 20 à 40 m selon les instruments. Les développements autour de la reconstruction locale de l'atmosphère sont arrivés en 2015 à maturité et un transfert industriel démarre en 2016 afin de proposer un prototype préindustriel à l'horizon de 2017. Nous espérons pouvoir aller vers un système opérationnel dans un terme assez proche. Dans le même temps, certaines parties du système de reconstruction font l'objet d'un brevet qui sera déposé courant 2016.

4

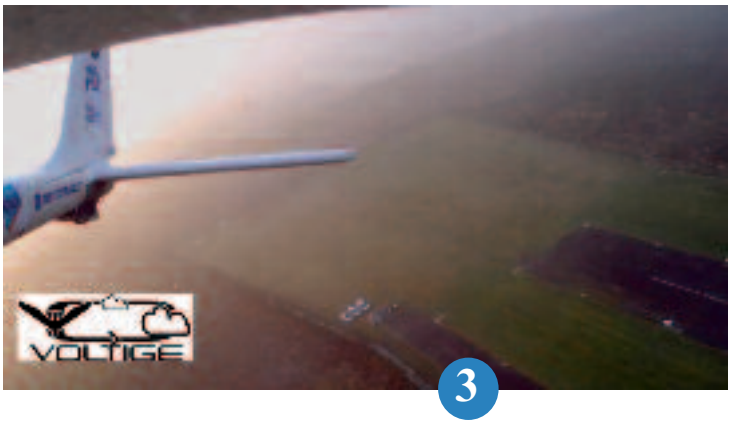
Mesure des précipitations au-dessus des Alpes par les nouveaux radars en bande X de Météo-France

Météo-France a lancé en 2012, en partenariat avec la DGPR, le projet PUMA pour compléter la couverture du réseau radar ARAMIS. Quatre radars Doppler polarimétriques en bande X ont été installés au Mont Maurel, Mont Colombis, à la station de Vars dans les Alpes du Sud et au sommet du Moucherotte près de Grenoble. Au cours de la phase de qualification qui a conduit à l'intégration des produits radar dans la mosaïque opérationnelle, les prévisionnistes locaux impliqués dans l'évaluation des produits, ont constamment signalé des améliorations dans l'estimation des précipitation, comme lors de l'épisode du 23 Août 2015, ou les cumuls horaires calculés sur les Hautes-Alpes étaient plus correct avec la mosaïque en double qu'avec la mosaïque opérationnelle (Fig. a et b).

Cependant, les radars en bande X sont affectés par l'atténuation. La chaîne de traitement actuel qui tire partie des capacités polarimétriques des radars pour corriger de l'atténuation dans la pluie, ne peut pas correctement corriger de l'atténuation due à la couche de fusion. La différence d'altitude entre le site du radar de Vars (2580m) et le site du radar du Mont Colombis (1757m) a été mise à profit pour mettre en évidence le problème. La figure c montre les réflectivités mesurées par les deux radars dans un plan vertical qui les contient. L'iso-zéro est à 2200m, 400m au-dessus du Colombis et 400m en dessous du radar Vars. Les réflectivités mesurées par le radar de Colombis sont jusqu'à 10 dB plus faibles que celles mesurées par le radar de Vars au même point en raison de l'atténuation subie par le signal radar à la traversée de la couche de fusion.

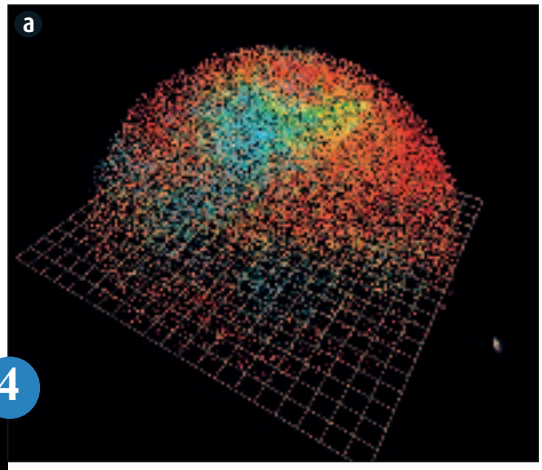
5

(a) Lame d'eau sans et (b) avec les radars en bande X, comparées aux valeurs des pluviomètres, pendant l'épisode du 23 aout 2015.
(c) Réflectivités moyennes observées, dans un même plan vertical, par les radars de Colombis et Vars, de 19:00 à 23:55, pendant l'épisode du 23 aout 2015. Le trait noir vertical est égale distance des deux radars.



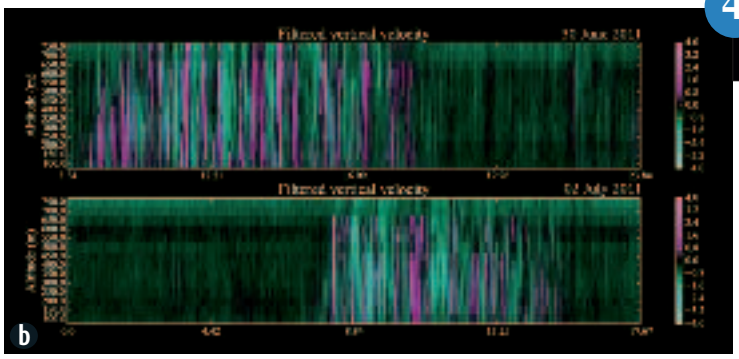
3

Vue de la dissipation du brouillard pendant un vol VOLTIGE dans les Landes.

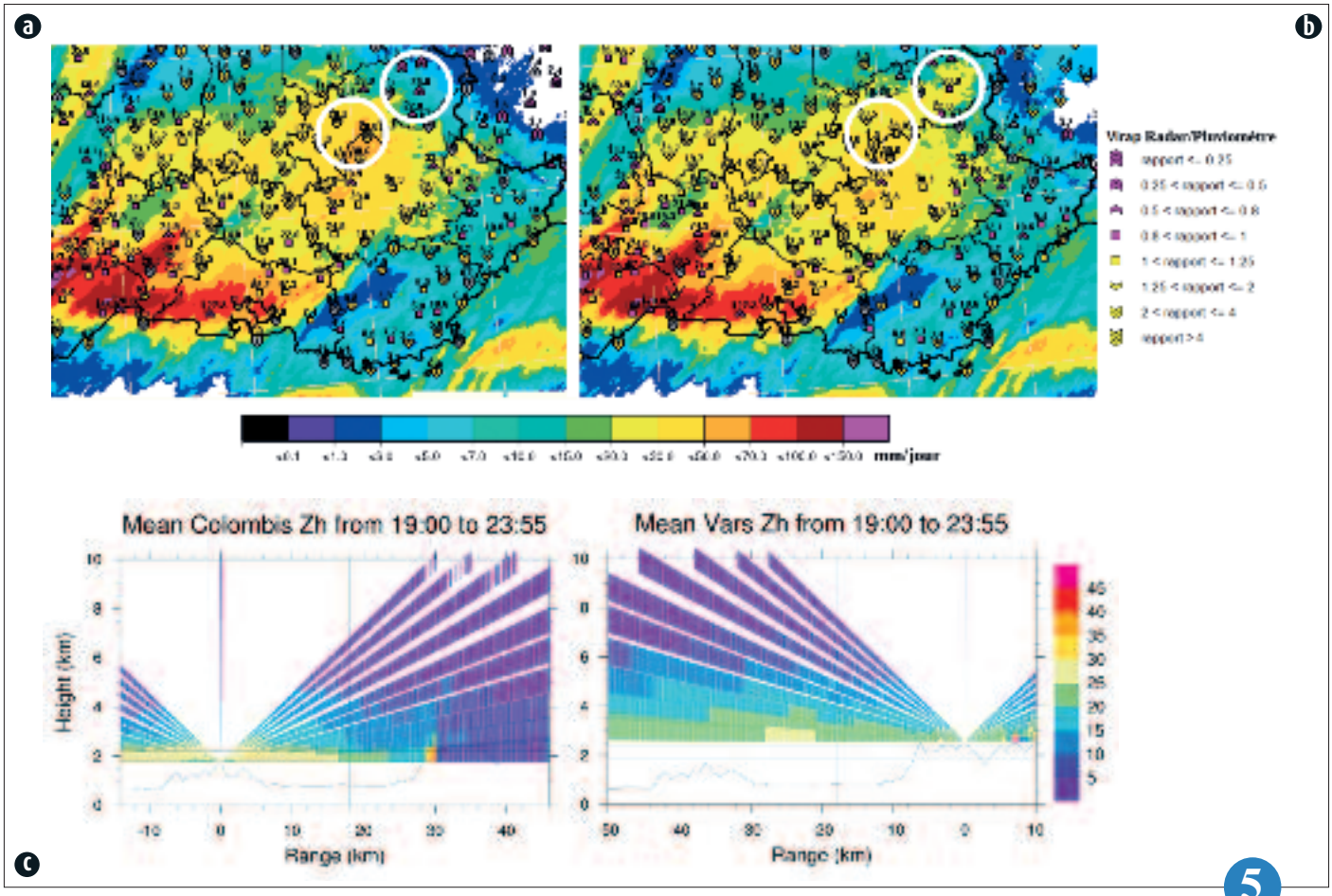


(a) Le système de reconstruction utilise une représentation de l'atmosphère locale par des particules numériques. Ces particules portent en elles les paramètres dynamiques de la turbulence. Des méthodes de filtrage non-linéaires sont utilisées pour apprendre les bonnes caractéristiques au regard des observations.

4



(b) A partir de l'atmosphère reconstruite, il est possible de tracer des profils rapides des paramètres de la turbulence, avec leur intervalle de confiance. Ici sont présentés des profils de vitesse verticales retrouvées au moyen des mesures d'un lidar vertical de Leosphere lors de la campagne de mesures BLLAST à Lannemezan (France) les 30 Juin et 2 Juillet 2011.ules portent en elles les paramètres dynamiques de la turbulence. Des méthodes de filtrage non-linéaires sont utilisées pour apprendre les bonnes caractéristiques au regard des observations.



5

Vers une solution de filtrage des échos fixes adaptée au mode d'émission des radars de Météo-France

A Météo-France, le mode d'émission en triple-PRT (Pulse Répétition Time) utilisé par les radars du réseau ARAMIS permet d'obtenir des mesures de vent radial non ambigües jusqu'à (± 60m/s) tout conservant une portée maximale de 250 km. Cependant, l'échantillonnage irrégulier du signal radar qui résulte de ce mode d'émission particulier ne permet pas d'utiliser les méthodes spectrales classiques de filtrage des échos fixes. La qualité du champ de vitesses Doppler dépend de la méthode de dépliement utilisée, des valeurs de PRF (Pulse répétition Frequency) utilisées et de l'intensité des échos fixes.
Une étape préalable à la mise en œuvre d'une solution de filtrage, consiste à optimiser la méthode de dépliement et à sélectionner le meilleur triplet. Une étude a été réalisée pour comparer deux méthodes de dépliement, l'une dite « soustractive » actuellement en service sur les radars du réseau et l'autre dite « brutale ». Les performances de chaque méthode ont été évaluées en calculant le pourcentage de bons dépliements obtenues à partir de données simulées pour différents triplets de PRF et différentes valeurs du rapport signal à échos fixes (SCR : Signal to Clutter Ratio). Les simulations sont faites pour des radars en bande C et pour chaque simulation, la vitesse Doppler de la cible est aléatoirement fixée entre ± 60m/s. Les figures a et b montrent le pourcentage de bons dépliements obtenus pour deux valeurs de SCR et pour les deux méthodes de dépliements en fonctions des valeurs de PRF utilisées, une des valeurs du triplet étant fixée à 500 Hz.
Les performances de chaque méthode sont très sensibles au choix du triplet et ce d'autant plus en présence d'échos fixes. La méthode « brutale » donne les meilleurs résultats, le triplet utilisé opérationnellement pour la méthode « soustractive » n'est pas le triplet optimal.

6

HAIC/High IWC : Etude des cristaux de glace en haute altitude pour améliorer la sécurité aéronautique

La connaissance des propriétés des cristaux de glace et des gouttelettes d'eau surfondues dans l'atmosphère est un enjeu critique pour la sécurité aéronautique. Les projets HAIC & High IWC, financés par l'Union Européenne, l'EASA & la FAA et coordonnés par Airbus et la NASA ont comme objectifs de contribuer à la révision des normes aéronautiques de définition de l'atmosphère à haute altitude, d'étudier les propriétés des zones à fort contenu en glace des nuages convectifs et de contribuer aux développements technologiques d'instruments de détection et d'évitement de ces zones dangereuses.
Suite aux premiers vols réalisés au Nord de l'Australie par SAFIRE de janvier à mars 2014, une nouvelle campagne expérimentale aéroportée a été réalisée en mai 2015 en Guyane française avec le Falcon 20, mais aussi avec deux autres avions canadien et américain. Toujours équipé avec un ensemble d'instruments scientifiques pour la caractérisation des propriétés des cristaux de glace, le Falcon 20 a ainsi réalisé plus de 100 heures de vols dans les zones de fortes concentrations en microcristaux des nuages convectifs tropicaux.
L'expertise des laboratoires français LaMP/OPGC et LATMOS/IPSL ainsi que de la NASA est en cours. L'analyse des mesures permettra de mieux comprendre ces phénomènes. Une des premières découvertes est que la distribution en taille des cristaux obtenus dans des zones à fort contenu en glace est très variable (concentrations très élevées de petits cristaux ou concentrations plutôt faibles de plus gros cristaux). De plus, sur la base des données collectées, il sera ainsi possible de définir des normes de représentation de l'atmosphère à haute altitude et ainsi d'améliorer la détection et l'évitement des zones où se produisent ces phénomènes.

7

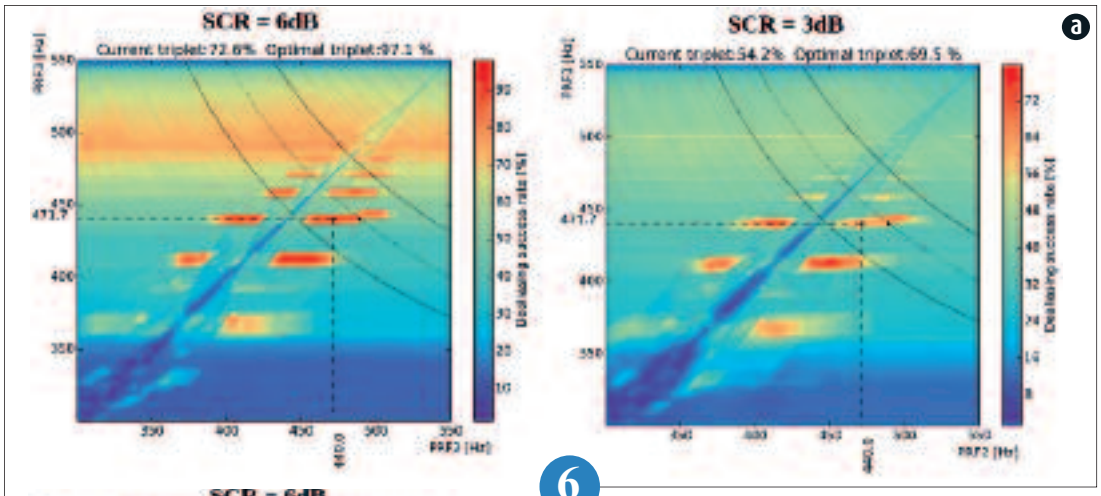
Campagnes aéroportées GLORI

En 2013-2014, le CESBIO a proposé de réaliser un récepteur GNSS-R et de l'installer sur l'avion de recherche ATR42 (SAFIRE) dans le cadre d'un financement du Comité Scientifique et Technique des Avions de Recherche. La réflectométrie GNSS (GNSS-R) consiste à récupérer les signaux électromagnétiques émis, en continu, par la soixantaine de satellites GNSS (GPS, GLONASS et Galileo) actuellement en orbite puis réfléchis à la surface de la Terre. L'analyse par corrélation entre le signal direct et réfléchi d'un même satellite permet de déterminer la position du point de réflexion au cours du temps (information géométrique), d'estimer des paramètres altimétriques, et d'autres paramètres comme l'humidité du sol, la rugosité de surface, la vitesse du vent à la surface des mers, l'épaisseur et la structure du couvert neigeux sur les plaines boréales, et les calottes polaires.
L'instrument GLORI « GLObal navigation satellite system Reflectometry Instrument » est un enregistreur, en bande L multicanaux, composé de 3 sous-systèmes :
- Antennes hémisphériques bipolarisations Zenith et Nadir ;
- Récepteur capable d'enregistrer de manière synchronisée jusqu'à 4 voies ;
- Une unité d'acquisition et de stockage basé sur un PC industriel.

Une première campagne de mesures aéroportées a eu lieu en novembre 2014 à bord de l'ATR42 de Météo-France pour permettre la certification et la qualification technique de cet instrument.
Le principal objectif de ces mesures est d'analyser le potentiel d'estimation de l'état hydrique du sol, la biomasse de la forêt et les niveaux des hydro-systèmes continentaux.
Afin de répondre aux objectifs scientifiques du projet décrits ci-dessus, différents sites (sites agricoles sur le sud-ouest, Forêt des Landes) ont été sélectionnés pour une seconde campagne aéroportée qui s'est déroulée en juin et juillet 2015 simultanément à des mesures de terrain.

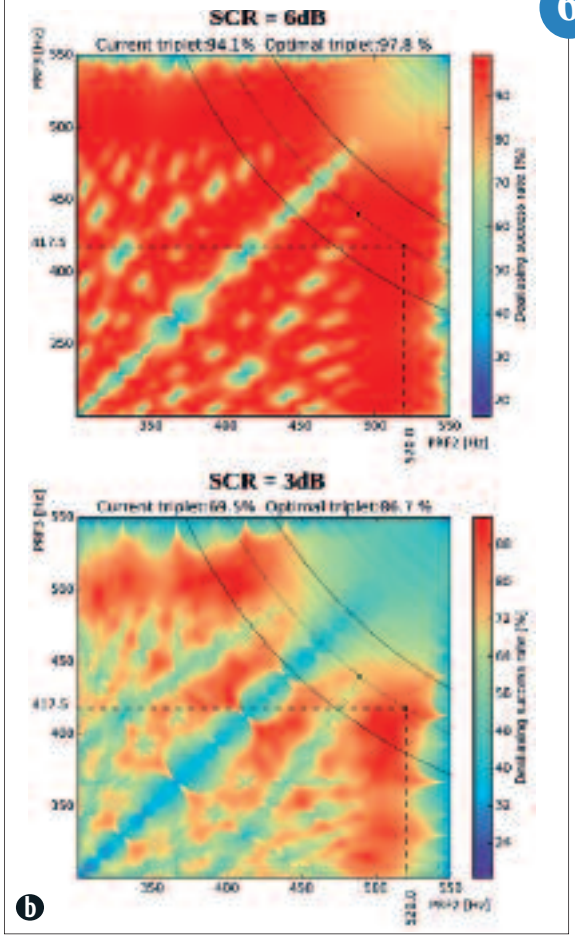
8

a

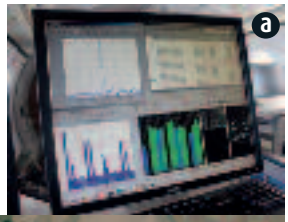


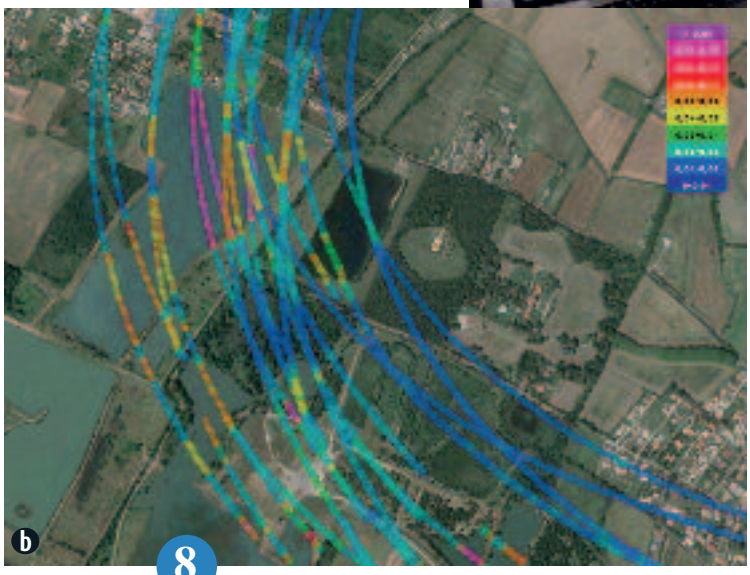
(a) Pourcentage de bons dépliements calculés pour la méthode « soustractive », quand SCR vaut 6dB (à gauche) et 3dB (à droite), pour différentes valeurs de PRF2 et PRF3, PRF1 étant fixée à 550 Hz.
Le point noir est le triplet actuellement utilisé, le triplet optimal est PRF1 = 550 Hz, PRF2 = 471 Hz, PRF3 = 440 Hz.

6



(b) Pourcentage de bons dépliements calculés pour la méthode « brutale », quand SCR vaut 6dB (en haut) et 3dB (en bas), pour différentes valeurs de PRF2 et PRF3, PRF1 étant fixée à 550 Hz.
Le point noir est le triplet actuellement utilisé, le triplet optimal est : PRF1 = 550 Hz, PRF2 = 520 Hz, PRF3 = 417 Hz.





8

(a) Détection des satellites GPS.
(b) Signaux GPS réfléchis par les surfaces continentales.

7

(a) Préparation pré-vol du Falcon 20 à Cayenne, Guyane Française.
(b) Les équipes internationales HAIC HIWC impliquées posant devant le Falcon 20 durant la campagne.

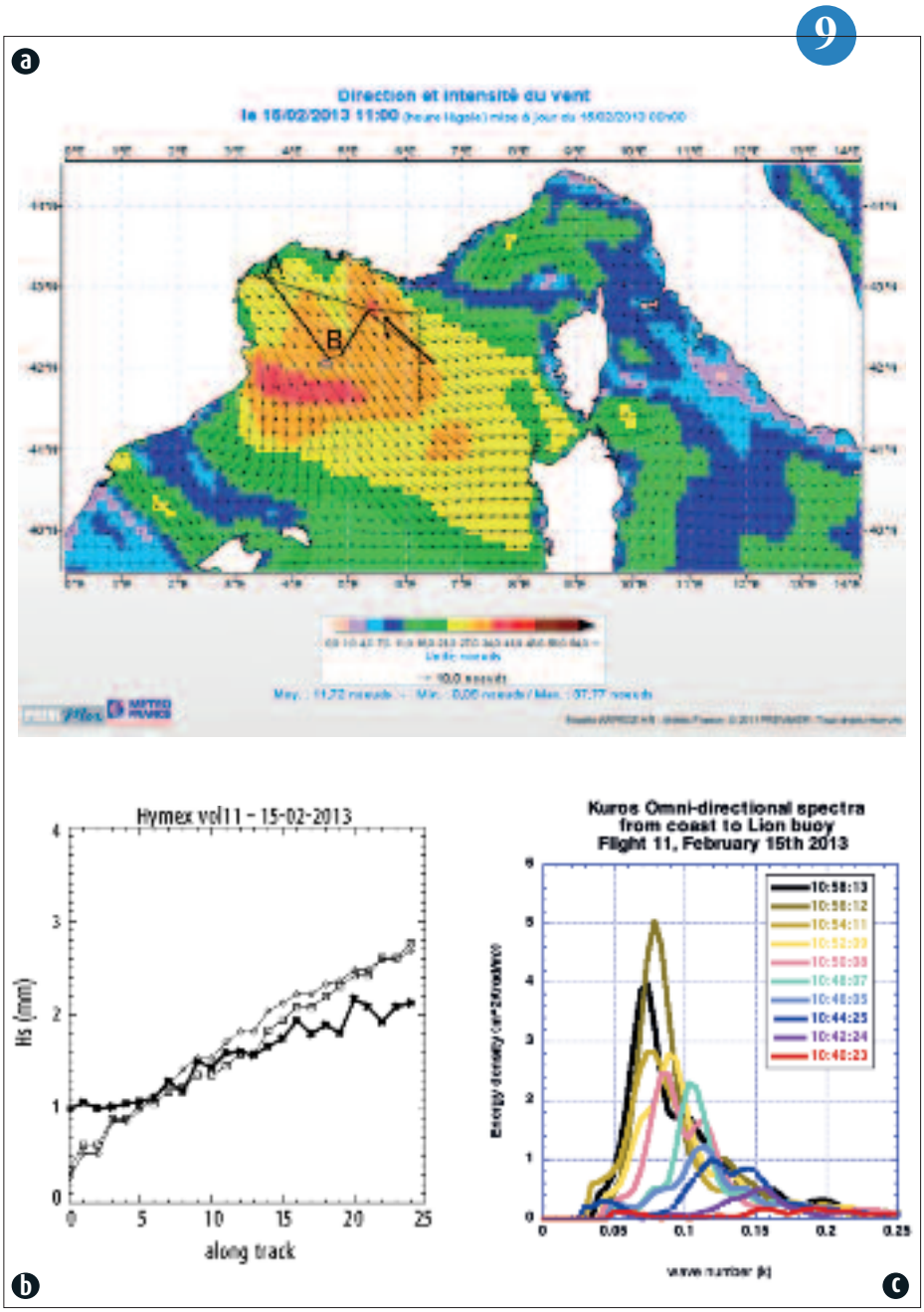
Observation des états de mer par radar embarqué sur l'ATR42 de SAFIRE

L'observation et la modélisation numérique des états de mer restent des enjeux majeurs que ce soit pour la prévision marine (sécurité des biens et des personnes) ou pour la progression des connaissances sur le système couplé océan/atmosphère.
Depuis de nombreuses années, Météo-France développe une collaboration avec le CNRS/LATMOS grâce aux moyens aéroportés de SAFIRE. Ainsi le radar KuROS a été mis au point par le LATMOS en 2012 pour être embarqué à bord de l'ATR42. Les objectifs sont multiples :

- préparation de la mission spatiale CFOSAT dédiée à l'observation globale du vent et des vagues par radar,
- étude des champs de vent et vagues, des couplages vent/vagues et vagues/courant et validation du modèle de prévision numérique des vagues MFWAM de Météo-France,
- travaux amont sur la mesure du courant de surface par radar. Ces activités reposent également sur une collaboration entre le département marine et océanographie de Météo-France et le CNRS/LATMOS.

Depuis 2013, KuROS a été mis en œuvre à bord de l'ATR 42 à plusieurs reprises. Lors de la campagne HyMeX en hiver 2013 au-dessus du Golfe du Lion (Méditerranée), une quinzaine de vols a permis de documenter les conditions d'état de mer dans des situations de forts états de mer (Mistral et Tramontane). Les situations de fortes interactions vagues/courant ont fait l'objet de sept vols avec KuROS au-dessus de la mer d'Iroise lors des campagnes océanographiques PROTEVS (SHOM, 2013), et BBWAVES (octobre 2015). L'ensemble de ces campagnes a permis une intéressante moisson de données qui sont en cours d'analyse. Les données du radar et les méthodes de traitement associées ont été validées en 2014 (Caudal et al, 2014). Des travaux combinant des observations de spectres des vagues par KuROS et des sorties du modèle de prévision des vagues MFWAM sont en cours (Fig. a, b et c). Au-delà de l'analyse en cours, qui servira la plupart des objectifs mentionnés ci-dessus, le projet est de compléter le jeu de données par des vols en mer d'Iroise en 2016 avant une mise en œuvre de KuROS dans le golfe de Gascogne pour la période la validation du satellite CFOSAT après son lancement en 2018.

9



(a) Champ de vent (modèle ARPEGE) le 15 février 2013 au moment d'un des vols KuROS pendant la campagne HyMeX. En noir : points d'acquisition des données KuROS le long de la trajectoire de l'ATR-42, lors des paliers à 2000 m (symboles fermés), et 3000 m (symboles ouverts).
Axe A-B : correspond aux résultats illustrés aux figures b et c. Point rouge en B : position de la bouée vent/vagues.
(b) Hauteur significative des vagues le long de l'axe A-B de la figure a ci-dessus, pour le 15 février 2013.
Trait gras : résultats issus du radar KuROS (traitement LATMOS).
Traits fins : modèle MFWAM aux deux points de grille les plus proches.
(c) Spectres omnidirectionnels des vagues en fonction du nombre d'onde à partir des observations KuROS acquises le long de l'axe A-B de la figure a ci-dessus.

EUFAR, le portail unique pour la recherche aéroportée en Europe

Créé en 2000 et soutenu au titre des programmes-cadres de recherche de l'Union Européenne, EUFAR est né de la nécessité de créer un réseau central et un point d'accès pour le milieu de la recherche aéroportée en Europe. EUFAR vise principalement à soutenir les chercheurs en leur facilitant l'accès aux infrastructures de recherche, techniquement ou financièrement inaccessibles dans leurs pays, et en fournissant de l'appui technique et des formations dans le domaine de la recherche aéroportée pour l'environnement et les sciences de la Terre.

Aujourd'hui, EUFAR2 (2014-2018) est constitué de 24 partenaires dont 13 opérateurs et ouvre, par leur biais, l'accès transnational à une flotte de 18 avions instrumentés et 3 instruments de télédétection. En outre, le projet soutient des activités de recherche et de réseau pour assurer un environnement favorable à l'avancement de la recherche aéroportée.

Le lancement à la mi-novembre 2015 de son tout nouveau site internet (**www.eufar.net**) reflète la volonté d'EUFAR d'améliorer en permanence l'accès, pour la communauté scientifique, aux informations les plus récentes et les plus pertinentes. Le site constitue une plate-forme centrale incontournable pour collaborer, apprendre, partager les expertises, accéder aux infrastructures et se former. Sa nouvelle interface, plus attractive et conviviale, affiche des sections dédiées aux actualités, aux articles sur les campagnes de recherche, aux évènements, aux galeries de photos.... En élaborant de nouvelles solutions pour son portail web, EUFAR rassemble, de manière interactive et dynamique, les experts, jeunes chercheurs, opérateurs, utilisateurs des données, industriels et autres membres de la communauté de recherche aéroportée.

10

(a) Page d'accueil du nouveau site web EUFAR.
(b) Sections dédiées aux actualités, aux articles sur les campagnes de recherche, et aux publications sur le nouveau site web EUFAR.

Recherche et aéronautique

Dans le cadre du programme de R&D SESAR (volet technologique du Ciel Unique Européen), Météo-France contribue activement au développement de nouveaux services MET à l'aviation. L'objectif est de vérifier l'acceptabilité de ces nouveaux services par les usagers. Dans cette optique, Météo-France contribue à la préparation et à la réalisation d'exercices de validation et de projets de démonstration à grande échelle, parmi lesquels le plus important est TOPLINK. Météo-France est aussi le leader du développement du prototype de la plateforme unique d'accès à l'information météorologique pour l'aviation à l'échelle européenne. De plus, Météo-France réalise avec succès la promotion de cette plateforme de services d'accès à l'information météorologique.

1

TOPLINK : un système collaboratif de transmission d'informations pour optimiser la trajectoire des avions

Météo-France, impliquée activement dans le programme SESAR (volet technologique du Ciel Unique Européen), étudie, avec ses partenaires européens, l'utilisation d'un nouveau système collaboratif permettant la transmission continue et en temps réel d'informations météorologiques et aéronautiques, à destination simultanément des contrôleurs aériens, du personnel au sol et du poste de pilotage.
Les informations ainsi partagées permettront de réagir au mieux face aux événements imprévus nécessitant des ajustements du plan de vol. Ce système apportera une aide aux acteurs impliqués dans la gestion du vol, pour s'assurer que, même en situation à risque (zone orageuse 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.

Testé par Brussels Airlines à l'été 2014 dans une version prototype (projet de démonstration TOPMET), le système évolue et fera l'objet d'une nouvelle campagne de tests en conditions réelles de vol à partir de début 2016 dans le cadre du projet européen TOPLINK. L'objectif sera d'approfondir la mise au point du concept et d'accélérer son déploiement envisagé d'ici deux ans. Météo-France s'associe pour ce programme de démonstration à 13 autres partenaires du réseau SESAR : THALES, AIRBUS, Finnish Meteorological Institute, Deutscher Wetterdienst, Aéroport de Paris, ENAC, DSNA, Croatia Crontrol, Austro Control, Brussels Airlines, Air France, Hop ! et Air Corsica.
Pour en savoir plus :
www.sesarju.eu/node/2100

2

Prise en compte des orages pour la gestion du trafic aérien

Les nuages convectifs intenses affectent le trafic aérien par des pertes de visibilité, courants verticaux, turbulence, givrage, foudroiement, grêle, rafales, etc. Les épisodes orageux peuvent compliquer ou interdire le trafic aérien dans de vastes zones, avec des effets sur l'économie, la sécurité des vols et l'environnement. Les systèmes convectifs sont souvent peu prévisibles, l'enjeu actuel est d'améliorer leur prévision à des échelles de quelques dizaines de kilomètres, sur des échéances d'environ 3 à 30 heures. Les paramètres déterminants sont l'intensité du phénomène, son extension verticale et sa probabilité d'occurrence, leur caractérisation nécessite des prévisions d'ensemble de modèles numériques à résolution kilométrique. Météo-France développe actuellement un tel système : la prévision d'ensemble AROME à 2,5 km de résolution, dont la première version sera opérationnelle en 2016.

L'extraction de l'information utile a nécessité des recherches spécifiques. Par exemple, une procédure de validation des prévisions par les mesures radar a été développée. Les réflectivités simulées en 3D sont filtrées pour rendre compatibles les informations modélisées et mesurées. Les cellules convectives ayant le plus d'impact sont identifiées par l'*echotop* (altitude du sommet de nuage). La visualisation des prévisions tient compte des objectifs des utilisateurs, notamment leur tolérance aux fausses alarmes. Cela facilite l'interprétation des risques prévus, par exemple pour que le routage d'aéronefs prenne finement en compte la météorologie parmi l'éventail des contraintes du trafic aérien. On a montré que cette information est objectivement supérieure à celle de systèmes de prévision déterministe, et à celle d'ensembles à moindre résolution.

4

Contributions de Météo-France au programme SESAR

En collaboration avec nos collègues anglais du UKMO et allemands du DWD, Météo-France a activement contribué aux phases finales de développement des prototypes de nouveaux services MET harmonisés et consolidés à l'échelle de l'Europe, d'observation et de prévision des phénomènes météorologiques pouvant impacter la sécurité et l'efficacité des vols et de la gestion du trafic aérien : convection, givrage, turbulence. Selon le partage des rôles au sein des partenaires EUMETNET, nous avons contribué ou effectué la vérification de certains de ces services.
Le bon avancement de ces travaux a permis aux partenaires EUMETNET de se mettre en position de proposer des projets de déploiement dans le cadre de la résolution UE appelée Pilot Common Project (PCP) et de l'appel à projets INEA CEF 2015. Trois projets de déploiement ont ainsi été finalisés avec nos partenaires EUMETNET : le service d'information sur la convection basé sur la composite radar européenne dont l'objectif est de fournir aux usagers de l'information 2D et 3D sur la convection (par exemple sommet de la cellule convective), le service de prévision harmonisée des phénomènes météorologiques impactant le trafic aérien (givrage, turbulence, convection) qui couvre l'Europe de l'Ouest et le service d'échange d'information MET (MET-GATE) pour lequel Météo-France sera leader.
Nous avons aussi contribué à la préparation des exercices de validation et à l'exécution de certains, ainsi qu'à la préparation du projet de démonstration TOPLINK. Tous les services MET utilisés durant cet exercice de démonstration ont été développés selon les concepts SWIM et sont maintenant disponibles sur le portail MET-GATE. L'exécution de TOPLINK au printemps 2016 devrait permettre la validation effective des services MET, selon les besoins des usagers aéronautiques.

3

La recherche météorologique au service de l'aviation.

Exemple d'informations météorologiques visibles depuis le cockpit sur une tablette tactile.
Copyright SESAR-TOPMET.

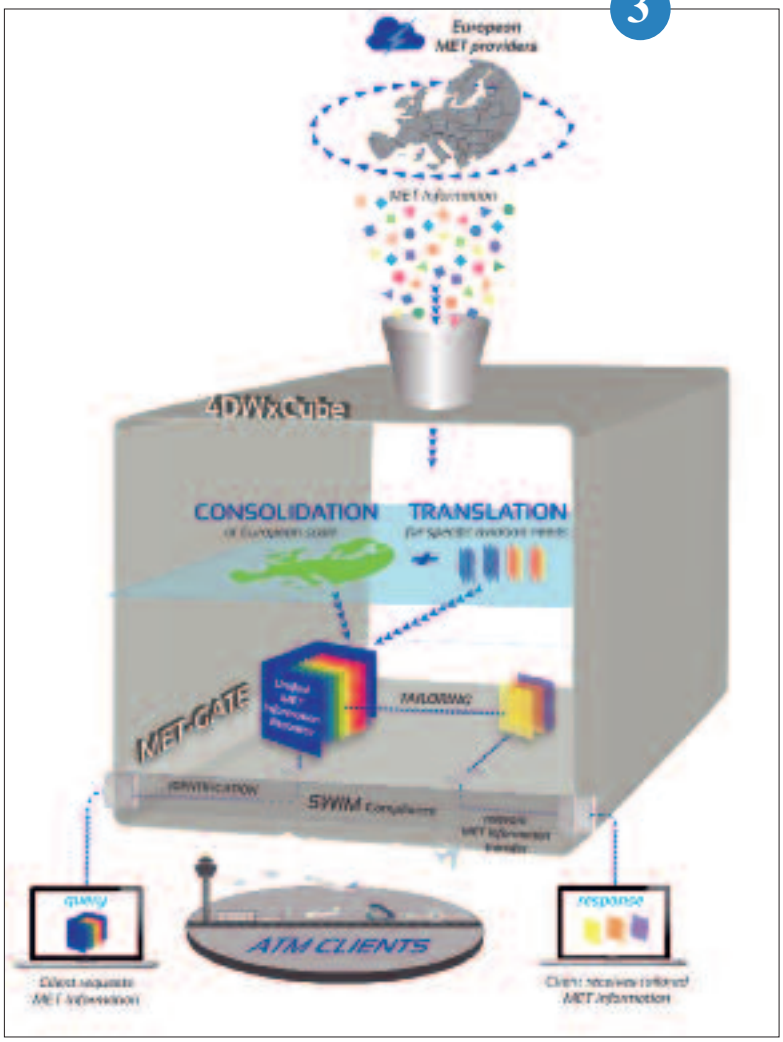
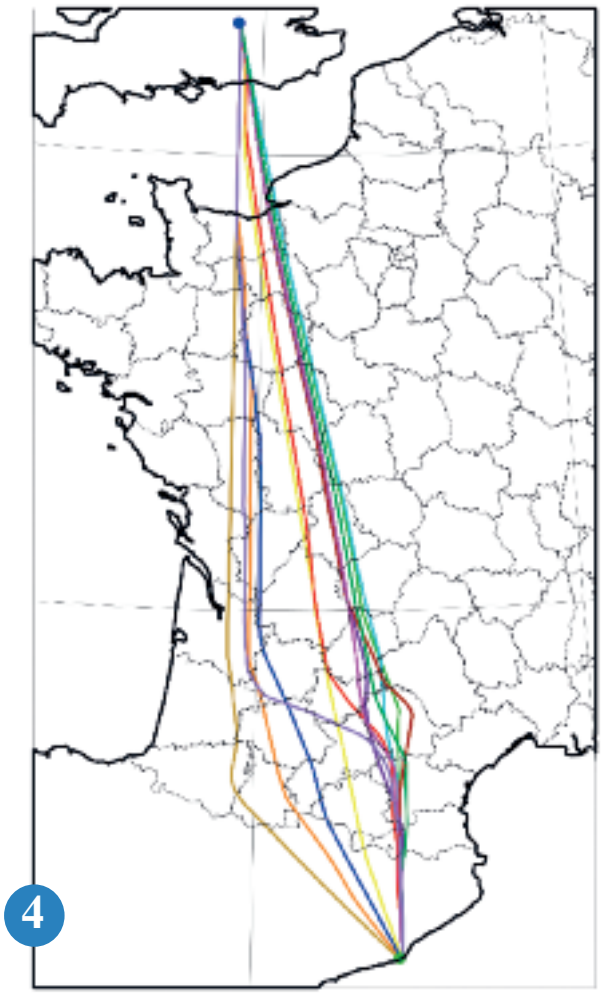


Schéma du 4DWxCube MET-GATE d'EUMETNET

Trajectoires optimales prévisibles à 24h d'avance pour un vol allant de Barcelone à Londres le 22 juin 2014 à 18h TU.
Chaque trajectoire tient compte des incertitudes sur le vent et de la convection orageuse, qui se développait ce jour-là dans le sud-ouest de la France. Le tracé correspond à 12 scénarios météorologiques équiprobables. Ce type d'information permettra d'anticiper le temps de vol et la consommation de carburant, tout en tenant compte des impératifs de sécurité aérienne.



Projet IMET 2015

Le projet IMET avait pour objectif de déterminer comment tirer profit de l'information apportée par un système de prévision d'ensemble pour optimiser les prévisions de trajectoires d'avion. Durant ses 30 mois d'activité, ce projet a évalué la sensibilité de quelques paramètres de trajectoire à l'incertitude d'une prévision météorologique.
Un paramètre essentiel, influencé par les prévisions météorologiques, est la quantité de carburant nécessaire pour un vol. Pour des vols long-courriers, une réserve d'urgence de carburant est calculée pour prévenir d'éventuels détours imprévus dus à la météorologie, aux changements de route ou aux restrictions imposées par la gestion du trafic aérien. Pour calculer cette quantité de carburant, beaucoup de compagnies aériennes utilisent une prévision déterministe du temps, un outil de prévision de trajectoire ainsi que les conditions météorologiques préalablement observées sur cette route.
L'approche du projet IMET était d'utiliser une prévision probabiliste. Chacun des membres de l'ensemble de prévision a été couplé à l'outil de prévision de trajectoire pour calculer la réserve d'urgence. La gamme des quantités de carburant prévues fournit une estimation de l'incertitude de la prévision de la réserve d'urgence liée à la météorologie (voir image). Déduire de l'incertitude dans les prévisions du temps l'incertitude de la prévision de carburant contribuera à prendre des décisions plus efficaces.
L'approche d'IMET, en quantifiant les sources d'incertitude météorologiques et leur impact sur les paramètres de trajectoire, devrait mener à des réductions du cout de vol.
Les résultats du projet ont été pris en compte par le projet de recherche industrielle sur la planification du trafic aérien, SESAR WP11.1.

5

SESAR SWIM MASTER CLASS 2015 : 1er prix pour Météo-France, porteur du projet 4DWeatherCube MET-GATE d'EUMETNET

L'échange et le partage d'informations, entre tous les acteurs d'un vol, par l'intermédiaire de services interopérables, est le cœur du futur système de gestion du trafic aérien européen développé dans le cadre du programme SESAR. Ce concept baptisé SWIM (System Wide Information Management) était encore, il y a quelques années, un concept complexe. Il devient petit à petit une réalité grâce à l'émergence de prototypes et de solutions de pointe dans tous les domaines de l'Air Traffic Management (ATM). Cette émergence est favorisée notamment par la SESAR SWIM MASTER CLASS (SMC), compétition annuelle organisée depuis quatre ans par Eurocontrol, pour laquelle concourt près d'une vingtaine de projets.
Conçu comme une plateforme unique d'accès à l'information météorologique à l'échelle européenne, le prototype 4DWeatherCube MET-GATE d'EUMETNET, porté par Météo-France, avec le soutien de MET Office, du DWD (Deutscher Wetterdienst) et de THALES, a reçu, en 2015, la plus haute récompense des SWIM MASTER CLASS dans la catégorie « services ». Ce prix représente une opportunité unique de promouvoir l'état de l'art des services coopératifs d'information météorologique au niveau européen.
Après Alticode, THALES, Airbus Defense&Space et IDS, de nombreux acteurs du monde de l'ATM ont fait part de leur vif intérêt pour le prototype 4DWeatherCube MET-GATE qui fournit actuellement huit services, clés en main, compatibles (en format et en normes) avec le concept SWIM de SESAR. L'objectif sera d'élaborer, dans les années à venir, un système MET-GATE pleinement opérationnel dans les futures activités de SESAR.

6

6

1er prix de la SESAR SWIM MASTER CLASS 2015 pour le projet 4DWeatherCube MET-GATE d'EUMETNET, catégorie « services ».

5

TP / Cost	T^1	T^2	. . .	T^m
Weather 1	t_{11}	t_{21}	. . .	t_{m1}
Weather 2	t_{12}	t_{22}	. . .	t_{m2}
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Weather n	t_{1n}	t_{2n}	. . .	t_{mn}
PDF				

Estimation de l'incertitude de la prévision de la réserve d'urgence de carburant liée à la météorologie.

Annexes

Liste des publications scientifiques 2015

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

Adloff, F., S. Somot, F. Sevault, G. Jorda, R. Aznar, M. Déqué, M. Herrmann, M. Marcos, C. Dubois, E. Padorno, E. Alvarez-Fanjul, D. Gomis, 2015: Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. Climate Dynamics, Volume: 45, Issue: 9-10, Pages: 2775-2802, Doi: 10.1007/s00382-015-2507-3. Published: NOV 2015.

Andrello, M., D. Mouillot, S. Somot, W. Thuiller, and S. Manel, 2014: Additive effects of climate change on connectivity among marine protected areas and larval supply to fished areas. Diversity and Distributions, Volume: 21, Issue: 2, Pages: 139-150, Doi: 10.1111/ddi.12250. Published: FEB 2015.

Astier, N., M. Plu, and C. Claud, 2015: Associations between tropical cyclone activity in the Southwest Indian Ocean and El Niño Southern Oscillation. Atmospheric Science Letters, Volume: 16, Issue: 4, Pages: 506-511, Doi: 10.1002/asl.589. Published: OCT-DEC 2015.

Auger, L., O. Dupont, S. Hagelin, P. Brousseau and P. Brovelli: AROME–NWC: a new now-casting tool based on an operational mesoscale forecasting system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue : 690, Pages : 1603-1611, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2463. Published: JUL 2015.

Balmaseda, M.A., F. Hernandez, A. Storto, M.D. Palmer, O. Alves, L. Shi, G.C. Smith, T. Toyoda, M. Valdivieso, B. Barnier, D. Behringer, T. Boyer, Y-S. Chang, G.A. Chepurin, N. Ferry, G. Forget, Y. Fujii, S. Good, S. Guinehut, K. Haines, Y. Ishikawa, S.,Keeley, A. Köhl, T. Lee, M.J. Martin, S. Masina, S. Masuda, B. Meyssignac, K. Mogensen, L. Parent, K.A. Peterson, Y.M. Tang, Y. Yin, G. Vernieres, X. Wang, J. Waters, R. Wedd, O. Wang, Y. Xue, M. Chevallier, J-F. Lemieux, F. Dupont, T. Kuragano, M. Kamachi, T. Awaji, Caltabiano, K. Wilmer-Becker, and F. Gaillard, 2015: The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP). Journal of Operational Oceanography, Volume: 8, Special Issue: SI, Supplement: 1, Pages: S80-S97, Doi: 10.1080/1755876X.2015.1022329. Published: 2015.

Bari, D.; Bergot, T.; El Khlifi, M., 2015: Numerical study of a coastal fog event over Casablanca, Morocco. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 690, Pages: 1894-1905, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2494. Published: JUL 2015.

Batté L., and F.J. Doblas-Reyes, 2015: Stochastic atmospheric perturbations in the EC-Earth3 global coupled model: impact of SPPT on seasonal forecast quality. Climate Dynamics, Volume : 45, Issue: 11-12, Pages: 3419-3439, Doi:10.1007/s00382-015-2548-7. Published: DEC 2015.

Bauer, H.-S., T. Schwitalla, V. Wulfmeyer, A. Bakhshaii, U. Ehret, M. Neuper et O. Caumont, 2015: Quantitative precipitation estimation based on high-resolution numerical weather prediction and data assimilation with WRF - a performance test. TELLUS Series A-Dynamic Meteorollogy and Oceanography, Volume: 67, Article Number: 25047, DOI: 10.3402/tellusa.v67.25047. Published: 2015.

Bellucci, A., R. Haarsma, S. Gualdi, P. J. Athanasiadis, M. Caian, C. Cassou, E. Fernandez, A. Germe, J. Jungclaus, J. Kröger, D. Matei, W. Müller, H. Pohlmann, D. Salas y Mélia, E. Sanchez, D. Smith, L. Terray, K. Wyser and S. Yang, 2015: An assessment of a multimodel ensemble of decadal climate predictions, Climate Dynamics, Vol. 44, Issue 9/10, Pages: 2787-2806. Doi: 10.1007/s00382-014-2164-y, Published: MAY 2015.

Benacchio, T., R. Klein, T. Dubos and F. Voitus: Comments: "A Semi-hydrostatic Theory of Gravity-Dominated Compressible Flow". Journal of the Atmospheric Sciences, Volume: 72, Issue: 7, Pages: 2850-2851, Doi: 10.1175/JAS-D-15-0111.1. Published: JUL 2015.

Bénard, P. : An assessment of global forecast errors due to spherical geopotential approximation in the shallow-water case. Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 686, Pages: 195-206, Part: A,. Doi: 10.1002/qj.2349. Published : JAN 2015.

Bergot, T., J. Escobar, V. Masson, 2015 : Effect of small scale surface heterogeneities and buildings on radiation fog: Large-Eddy Simulation study at Paris-Charles de Gaulle airport, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 686, Pages: 285-298, Part: A, Doi :10.1002/qj.2358. Published : JAN 2015.

Berre, L., Varella, H. and Desroziers, G. 2015: Modelling of flow-dependent ensemble-based background-error correlations using a wavelet formulation in 4D-Var at Météo-France. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume : 141, Issue : 692, Pages: 2803-2812, Part: A, Doi: 10.1002/ qj.2565. Published: OCT 2015.

Berthou, S., S. Mailler, P. Drobinski, T. Arsouze, S. Bastin, K. Béranger, C. Lebeaupin-Brossier, 2014: Sensitivity of an intense rain event between an atmosphere-only and an atmosphere-ocean regional coupled model: 19 September 1996, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 686, Pages: 258-271, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2355. Published : JAN 2015.

Best, M.J., G. Abramowitz, H. Johnson, A.J. Pitman, A. Boone, M. Cuntz, B. Decharme, P.A. Dirmeyer, J. Dong, M. Ek, V. Haverd, B.J.J.M van den Hurk, G.S. Nearing, B. Pak, C. Peters-Lidard, J.A. Santanello Jr., L. Stevens, N. Vuichard, 2015: The plumbing of land surface models. Journal of Hydrometeorology,Volume: 16, Issue: 3, Pages: 1425-1442, Doi: 10.1175/JHM-D-14-0158.1. Published: JUN 2015.

Birman, C., F. Karbou and J.-F. Mahfouf, 2015: Daily Rainfall Detection and Estimation over Land Using Microwave Surface Emissivities. Journal of Applied Meteorology Climatology, Volume: 54, Issue: 4, Pages: 880-895, Doi: http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0192.1, Published: APR 2015.

Boisserie M., L. Descamps and P. Arbogast: Calibrating short-range ensemble forecasts using estimated model error variances. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 687, Pages: 449-458, Part: B, Doi : 10.1002/qj.2365. Published: JAN 2015.

Bölöni, G., L. Berre and E. Adamcsek: Comparison of static mesoscale background-error covariances estimated by three different ensemble data assimilation techniques. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 687, Pages: 413-425, Part: B, Doi: 10.1002/qj.2361. Published: JAN 2015.

Bousquet, O., A. Berne; J. Delanoe; Y. Dufournet; J. Gourley; J.l Van Baelen; C. Augros; L. Besson; B. Boudevillain; O. Caumont; E. Defer; J. Grazioli; D. Jorgensen; P. Kirstetter; J.-F. Ribaud; J. Beck; G. Delrieu; V. Ducrocq; D. Scipion; A. Schwarzenboeck; J. Zwiebel, 2014: Multifrequency radar observations collected in southern France During HYMEX-SOP1. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 96, Issue: 2, Pages: 267-282, Doi:10.1175/BAMS-D-13-00076.1. Published: FEB 2015.

Brun, F., M. Dumont, P. Wagnon, E. Berthier, M. F. Azam, J. M. Shea, P. Sirguey, A. Rabatel and Al. Ramanathan, 2015: Seasonal changes in surface albedo of Himalayan glaciers from MODIS data and links with the annual mass balance. The Cryosphere, Volume: 9, Pages: 341-355, Doi: 10.5194/tc-9-341-2015, Published: 2015.

Calonne, N., C. Geindreau and F. Flin, 2015: Macroscopic modeling of heat and water vapor transfer with phase change in dry snow based on an upscaling method: influence of air convection. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Volume: 120, Issue: 11, Pages: , Doi: 10.1002/2015JF003605, Published: NOV 2015.

Calonne, N., F. Flin, B. Lesaffre, A. Dufour, J. Roulle, P. Puglièse, A. Philip, F. Lahoucine, C. Geindreau, J.-M. Panel, S. Rolland du Roscoat and P. Charrier, 2015 : CellDyM: a room temperature operating cryogenic cell for the dynamic monitoring of snow metamorphism by time-lapse X-ray microtomography. Geophysical Research Letters, Volume: 42, Issue: 10, Pages: 3911-3918, Doi: 10.1002/2015GL063541, Published: MAY 2015.

Caluwaerts, S., D. Degrauwe, P. Termonia, F. Voitus, P. Bénard and J-F. Geleyn: Importance of temporal symmetry in spatial discretization for geostrophic adjustment in semi-implicit Z-grid schemes. Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume : 141, Issue: 686, Pages: 128-138, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2344. Published: JAN 2015.

Casse, C., M. Gosset, V. Pedinotti, C. Peugeot, A. Boone, B. A. Tanimoun, and B.Decharme, 2015: The potential of satellite rainfall products to predict Niger river flood events. Atmospheric Research, Volume: 163, Special Issue: SI, Pages: 162-176, Doi: 10.1016/j.atmosres.2015.01.010. Published: SEP 15 2015

Cattiaux, J., H. Douville, R. Schoetter, S. Parey, and P. Yiou, 2015: Projected increase in diurnal and interdiurnal variations of European summer temperatures. Geophysical Research Letters, Volume: 42, Issue: 3, Pages: 899–907, Doi: 10.1002/2014GL062531. Published: FEB 16 2015.

Chambon, P., L-F. Meunier, F. Guillaume, J-M. Piriou, R. Roca and J-F. Mahfouf: Investigating the impact of the water-vapour sounding observations from SAPHIR on board Megha-Tropiques for the ARPEGE global model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 690, Pages: 1769-1779, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2478. Published: JUL 2015.

Coronel, B. , Ricard D., Rivière G., Arbogast P.: Role of moist processes in the tracks of idealized mid-latitude surface cyclones. Journal of Atmospheric Sciences, Volume: 72, Issue: 8, Pages: 2979-2996, Doi: http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-14-0337.1. Published : AUG 2015.

Coustau, M.; Rousset-Regimbeau, F.; Thirel, G.; Habets, F.; Janet, B.; Martin, E.; de Saint-Aubin, C. & Soubeyroux, J.-M. Impact of improved meteorological forcing, profile of soil hydraulic conductivity and data

assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France. Journal of Hydrology, Volume: 525, Pages: 781-792, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.022. Published: JUN 2015.

Couvreux, F., R. Roehrig, C. Rio, M.-P. Lefebvre, M. Caian, T. Komori, S. Derbyshire, F. Guichard, F. Favot, F. D'andrea, P. Bechtold, and P. Gentine, 2015: Representation of daytime moist convection over the semi-arid Tropics by parametrizations used in climate and meteorological models. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 691, Pages: 2220-2236, Part: B, Doi: 10.1002/qj.2517. Published: JUL 2015.

Dal Gesso, S., J. J. Van der Dusse, A. P. Siebesma, S. R. De Roode, I. A. Boutle, Y. Kamae, R. Roehrig, and J. Vial, 2015 : A single-column model intercomparison on the stratocumulus representation in present-day and future climate. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, Volume: 7, Issue: 2, Pages: 617-647, Doi: 10.1002/2014MS000377. Published: JUN 2015.

Darbieu, C., Lohou, F., Lothon, M., de Arellano, J. Vila-Guerau, Couvreux, F., Durand, P., Pino, D., Patton, E. G., Nilsson, E., Blay-Carreras, E. Gioli, B. Turbulence vertical structure of the boundary layer during the afternoon transition. Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 15 Issue: 17 Pages: 10071-10086 Published: 2015

Dayon, G., Boé, J., Martin, E.: Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France Journal of Geophysical. Research-Atmospheres, Volume: 120, Issue: 3, Pages: 1023-1043, Doi: 10.1002/2014JD022236. Published: FEB 16 2015.

Defer, E., Pinty, J.-P., Coquillat, S., Martin, J.-M., Prieur, S., Soula, S., Richard, E., Rison, W., Krehbiel, P., Thomas, R., Rodeheffer, D., Vergeiner, C., Malaterre, F., Pedeboy, S., Schulz, W., Farges, T., Gallin, L.-J., Ortéga, P., Ribaud, J.-F., Anderson, G., Betz, H.-D., Meneux, B., Kotroni, V., Lagouvardos, K., Roos, S., Ducrocq, V., Roussot, O., Labatut, L., Molinié, G., 2015: An overview of the lightning and atmospheric electricity observations collected in Southern France during the HYdrological cycle in Mediterranean EXperiment (HyMeX), Special Observation Period. Atmospheric Measurement Techniques, Volume: 8, Issue: 2, Pages: 649-669, Doi: 10.5194/amt-8-649-2015. Published: 2015.

Descamps, L., C. Labadie, A. Joly, E. Bazile, P. Arbogast, P. Cébron: PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system.Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 690, Pages: 1671-1685, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2469. Published: JUL 2015.

Di Biagio, C., L. Doppler, C. Gaimoz, N. Grand, G. Ancellet, J.-C. Raut, M. Beekmann, A. Borbon, K. Sartelet, J.-L. Attié, F. Ravetta, and P. Formenti, 2015: Continental pollution in the Western Mediterranean Basin: vertical profiles of aerosol and trace gases measured over the sea during TRAQA 2012 and SAFMED 2013. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Pages: 9611-9630, Doi:10.5194/acp-15-9611-2015, Published: AUG2015.

Domine, F., M. Barrere, D. Sarrazin, S. Morin and L. Arnaud, 2015: Automatic monitoring of the effective thermal conductivity of snow in a low-Arctic shrub tundra. The Cryosphere, Volume: 9, Pages: 1265-1276, Doi: 10.5194/tc-9-1265-2015. Published: MAR 2015.

Douville, H., A. Voldoire, and O. Geoffroy, 2015: The recent global warming hiatus: What is the role of Pacific variability? Geophysical Reasearh Letters, Volume: 42, Issue: 3, Pages: 880-888, Doi: 10.1002/2014GL062775, Published: FEB 2015.

Drouard M., G. Rivière and P. Arbogast: The link between the North Pacific climate variability and the North Atlantic Oscillation in terms of downstream development. Journal of Climate, Volume: 28, Issue: 10, Pages: 3957-3976, Doi: 10.1175/JCLI-D-14-00552.1. Published: MAY 2015

Duerinckx, A., R. Hamdi, J-F. Mahfouf and P. Termonia: Study of the Jacobian of an extended Kalman filter for soil analysis in SURFEXv5. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 3, Pages: 845-863, Doi: 10.5194/gmd-8-845-2015. Published: 2015.

El Ouaraini, R., Berre, L., Fischer, C., & Sayouty, E. 2015: Sensitivity of regional ensemble data assimilation spread to perturbations of lateral boundary conditions. TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography, Volume: 67, Article Number: 28502, Doi: 10.3402/tellusa.v67.28502. Published: 2015.

Elias, T., J.-C. Dupont, E. Hammer, C. R. Hoyle, M. Haeffelin, F. Burnet, and D. Jolivet: Enhanced extinction of visible radiation due to hydrated aerosols in mist and fog, Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 12, Pages: 6605-6623, Doi: 10.5194/acp-15-6605-2015. Published: 2015.

Erbland, J., J. Savarino, S. Morin, J. L. France, M.M. Frey and M.D. King, 2015: Air-snow transfer of nitrate on the East Antarctic plateau - Part 2: An isotopic model for the interpretation of deep ice-core records. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Pages: 12079-12113, Doi: 10.5194/acp-15-12079-2015, Published: 2015.

Fairbairn, D., A. L. Barbu, J.-F. Mahfouf, J.-C. Calvet, and E. Gelati: Comparing the Ensemble and Extended Kalman Filters for in situ soil moisture assimilation with contrasting soil conditions. Hydrology and Earth System Sciences, Volume: 19, Issue: 12, Pages: 4811-4830, Doi: 10.5194/hessd-12-7353-2015. Published: 2015.

Flamant, C., Chaboureau, J.-P., Chazette, P., Di Girolamo, P., Bourrianne, T., Totems, J., and Cacciani, M.: The radiative impact of desert dust on orographic rain in the Cévennes–Vivarais area: a case study from HyMeX, Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 15, Issue: 21, Pages: 12231-12249, Doi: 10.5194/acp-15-12231-2015. Published: 2015.

Flemming, F., V. Huijnen, J. Arteta, P. Bechtold, A. Beljaars, A.-M. Blechschmidt, M. Diamantakis, R.J. Engelen, A. Gaudel, A. Inness, L. Jones, E. Katragkou, B. Josse, V. Marécal, V.-H. Peuch, A. Richter, M.G. Schultz, O. Stein, and A. Tsikerdekis, 2015: Tropospheric chemistry in the Integrated Forecasting System of ECMWF. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 4, Pages: 975-1003, Doi: 10.5194/gmd-8-975-2015. Published: 2015.

Fourrié, N., É. Bresson, M. Nuret, C. Jany, P. Brousseau, A. Doerenbecher, M. Kreitz, O. Nuissier, É. Sevault, H. Bénichou, M. Amodei, F. Pouponneau, 2015: AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for the HyMeX special observation periods. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 7, Pages: 1919-1941, Doi: 10.5194/gmd-8-1919-2015. Published: 2015.

Garcia-Serrano J., V. Guemas, F. J. Doblas-Reyes, 2015: Added-value from initialization in predictions of the Atlantic multi-decadal variability. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 9-10, Pages: 2539-2555, Doi: 10.1007/s00382-014-2370-7. Published: May 2015.

Garrigues, S., Olioso, A., Calvet, J. C., Martin, E., Lafont, S., Moulin, S., Chanzy, A., Marloie, O., Buis, S., Desfonds, V., Bertrand, N., Renard, D.: Evaluation of land surface model simulations of evapotranspiration over a 12-year crop succession: impact of soil hydraulic and vegetation properties, Hydrology and Earth System Sciences, Volume: 19, Issue: 7, Pages: 3109-3131, Doi: 10.5194/hess-19-3109-2015. Published: 2015.

Garrigues, S., A. Olioso, D. Carrer, B. Decharme, J.-C. Calvet, E. Martin, S. Moulin, and O. Marloie, 2015: Impact of climate, vegetation, soil and crop management variables on multi-year ISBA-A-gs simulations of evapotranspiration over a Mediterranean crop site. Geoscientific Model Development Volume: 8, Issue: 10 Pages: 3033-3053. Published: 2015

Geoffroy, O., D. Saint-Martin, and A. Voldoire, 2015: Land-sea warming contrast : the role of the horizontal energy transport. Climate Dynamics, Volume: 45, Issue: 11-12, Pages: 3493-3511, Doi: 10.1007/s00382-015-2552-y. Published: DEC 2015.

Georgiou, S., A. Mantziafou, S. Sofianos, I. Gertman, E. Özsoy, S. Somot, and V. Vervatis, 2014: Climate variability and deepwater mass characteristics in the Aegean Sea. Atmospheric Research, Volume: 152, Pages: 146-158, Doi: 10.1016/j.atmosres.2014.07.023. Published: JAN2015.

Guemas, V., J. García-Serrano, A. Mariotti, F. Doblas-Reyes, L.-P. Caron, 2015 : Prospects for decadal climate prediction in the Mediterranean region. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 687, Pages: 580-597, Doi: 10.1002/qj.2379, Published: JAN2015.

Guyot, G., Gourbeyre, C., Febvre, G., Shcherbakov, V., Burnet, F., Dupont, J.-C., Sellegri, K., and Jourdan, O.: Quantitative evaluation of seven optical sensors for cloud microphysical measurements at the Puy-de-Dôme Observatory, France, Atmospheric Measurement Techniques, Volume: 8, Issue: 10, Pages: 4347-4367, Doi: 10.5194/amt-8-4347-2015. Published: 2015.

Hafliger, V., Martin, E., Boone, A., Habets, F., David, C.H., Garambois, P.-A., Roux, H., Ricci, S., Berthon, L., Thévenin, A. et Biancamaria, S: Evaluation of Regional-Scale River Depth Simulations Using Various Routing Schemes within a Hydrometeorological Modeling Framework for the Preparation of the SWOT Mission. Journal of Hydrometeorology, Volume: 16, Issue: 4, Pages: 1821-1842, Doi: 10.1175/JHM-D-14-0107.1. Published: AUG 2015.

Hagenmuller, P., G. Chambon and M. Naaim, 2015: Microstructure-based modeling of snow mechanics: a discrete element approach. The Cryosphere, Volume: 9, Pages: 1969-1982, Doi: 10,5194/tc-9-1969-2015, Published: 2015.

Hally, A., Caumont, O., Garrote, L., Richard, E., Weerts, A., Delogu, F., Fiori, E., Rebora, N., Parodi, A., Mihalovi , A., Ivkovi , M., Deki , L., van Verseveld, W., Nuissier, O., Ducrocq, V., D'Agostino, D., Galizia, A., Danovaro, E., and Clematis, A., 2015: Hydrometeorological multi-model ensemble simulations of the 4 November 2011 flash-flood event in Genoa, Italy, in the framework of the DRIHM project. Natural Hazards and Earth System Sciences, Volume: 15, Issue: 3, Pages: 537-555, Doi: 10.5194/nhess-15-537-2015. Published: 2015.

Hamer, P. D., K. W. Bowman, D. Henze, J.-L. Attié, and V. Marécal, 2015: The impact of observing characteristics on the ability to predict ozone under varying polluted photochemical regimes. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 18, Pages: 10645-10667, Doi: 10.5194/acp-15-10645-2015. Published: 2015.

Hopuare, M., M. Pontaud, J.-P. Céron, P. Ortéga and V. Laurent, 2015: Pacific climate drivers and observed precipitation variability in Tahiti, French Polynesia. Climate research, Volume: 63, Issue: 2, Pages: 157-170, Doi : 10.3354/cr01288. Published: 2015.

Hopuare, M., M. Pontaud, J. -P. Céron, M. Déqué and P. Ortéga, 2015: Climate change assessment for a small island: a Tahiti downscaling experiment. Climate research, Volume: 63, Issue: 3, Pages: 233-247, Doi 10.3354/cr01298. Published: 2015.

Houpert, L., P. Testor, X. Durrieu de Madron, S. Somot, F. D'Ortenzio, C. Estournel, and H. Lavigne, 2015: Seasonal cycle of the mixed layer, the seasonal thermocline and the upper-ocean heat storage rate in the Mediterranean Sea: derived from observations. Progress in Oceanography, Volume: 132, Special Issue: SI, Pages: 333-352, Doi : 10.1016/j.pocean.2014.11.004. Published : MAR 2015.

Hourdin, F., M. Gueye, B. Diallo, J.-L. Dufresne, L. Menut, B. Marticorena, G. Siour and F. Guichard, 2015: Parametrization of convective transport in the boundary layer and its impact on the representation of diurnal cycle of wind and dust emissions. Atmospheric Chemistry Physics, Volume: 15, Issue: 12, Pages: 6775-6788, Doi: 10.5194/acp-15-6775-2015. Published: 2015.

Jerez, S., I. Tobin, R. Vautard, J.P. Montavez, J.M. Lopez-Romero, F. Thais, B., Bartok, O.B. Christensen, A. Colette, M. Déqué, G. Nikulin, S. Kotlarski, E. van Meijgaard, C. Teichmann and M. Wild, 2015: The impact of climate change on photovoltaic power

generation in Europe. Nature Communications, Volume: 6, Article Number: 10014, Doi: 10.1038/ncomms 10014. Published: DEC 2015.

Joetzjer, E., C. Delire, H. Douville, P. Ciais, B. Decharme, D. Carrer, H. Verbeeck, M. De Weirdt, D.Bonal, 2015: Improving the ISBA-CC land surface model simulation of water and carbon fluxes and stocks over the Amazon forest. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 6, Pages: 1709-1727, Doi: 10.5194/gmd-8-1709-2015. Published: 2015.

Jung, T., F. J. Doblas-Reyes, H. Goessling, V. Guemas, C. Bitz, C. Buontempo, R. Caballero, E. Jokobsen, M. Karcher, T. Koenigk, D. Matei, J. Overland, T. Spengler, and S. Yang, 2015: Polar-lower latitude linkages and their role in weather and climate prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 96, Issue: 11, Pages: ES197-ES200, Doi: 10.1175/ BAMS-D-15-00121.1. Published : NOV 2015.

Keckhut, P., Y. Courcoux, J-L. Baray, J. Porteneuve, H. Vérèmes, A. Hauchecorne, D. Dionisi, F. Posny, J-P. Cammas, G. Payen, F. Gabarrot, S. Evan, S. Khaykin, R. Rüfenacht, B.Tschanz, N.Kämpfer, Ph. Ricaud, A. Abchiche, J. Leclair-de-Bellevue, and V. Duflot, 2015: Introduction to the Maïdo Lidar Calibration Campaign dedicated to the validation of upper air meteorological parameters. Journal of Applied Remote Sensing, Volume: 9, Article Number: 094099, Doi: 10.1117/ 1.JRS.9.094099. Published: APR 23 2015.

Kergoat L., P. Hiernaux, C. Dardel, C. Pierre, F. Guichard and A. Kalilou, 2015: Dry-season vegetation mass and cover fraction from SWIR1.6 and SWIR2.1 band ratio: Ground-radiometer and MODIS data in the Sahel. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, Volume: 39, Pages: 56-64, Doi: 10.1016/j.jag.2015.02.011. Published: JUL 2015.

Khain, A. P., Beheng, K. D., Heymsfield, A., Korolev, A., Krichak, S.O., Levin, Z., Pinsky, M., Phillips, V., Prabhakaran, T.,Teller, A., van den Heever, S. C., Yano, J.-I., 2015: Representation of microphysical processes in cloud-resolving models: Spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization. Reviews of Geophysics, Volume: 53, Issue: 2, Pages: 247-322, Doi: 10. 1002/2014RG000468. Published : JUN 2015.

Klingaman, N. P., S. J. Woolnough, X. Jiang, D. Waliser, P. K. Xavier, J. Petch, M. Caian, C. Hannay, D. Kim, H.- Y. Ma, W. J. Merryfield, T. Miyakawa, M. Pritchard, J. A. Ridout, R. Roehrig, E. Shindo, F. Vitart, H. Wang, N. R. Cavanauch, B. E. Mapes, A. Shelly and G. J. Zhang, 2015: Vertical structure and physical processes of the Madden-Julian oscillation: Linking hindcast fidelity to simulated diabatic heating and moistening. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Volume: 120, Issue: 10, Pages: 4690-4717, Doi: 10.1002/ 2014JD022374. Published : MAY 27 2015

Laufkötter, C., M. Vogt, N. Gruber, M. Aita-Noguchi, O. Aumont, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. Doney, J. Dunne, T. Hashioka, J. Hauck, T. Hirata, J. John, C. Le Quéré, I. Lima, H. Nakano, R. Séférian, I. Totterdell, M., Vichi, and C. Völker, 2015: Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models. Biogeosciences, Volume: 12, Issue: 23, Pages: 6955–6984, Doi: 10.5194/bgd-12-3731-2015. Published: 2015.

Le Quéré, C., R. Moriarty, R. Andrew, G. Peters, P. Ciais, P. Friedlingstein, S. Jones, S. Sitch, P. Tans, A. Arneth, T. Boden, L. Bopp, Y. Bozec, J. Canadell, L. Chini, F. Chevallier, C. Cosca, I. Harris, M. Hoppema, R. Houghton, J. House, A. Jain, T. Johannessen, E. Kato, R. Keeling, V. Kitidis, K. Klein Goldewijk, C. Koven, C. Landa, P. Landschützer, A. Lenton, I. Lima, G. Marland, J. Mathis, N. Metzl, Y. Nojiri, A. Olsen, T. Ono, S. Peng, W. Peters, B. Pfeil, B. Poulter, M. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Salisbury, U. Schuster, J. Schwinger, R. Séférian, J. Segschneider, T. Steinhoff, B. Stocker, A. Sutton, T. Takahashi, B. Tilbrook, G. van der Werf, N. Viovy, Y. Wang, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, and N. Zeng, 2015: Global carbon budget 2015. Earth System Science Data, Volume: 7, Issue: 2, Pages: 349–396, Doi: 10.5194/essd-7-349-2015. Published: 2015.

Lebeaupin Brossier, C., S. Bastin, K. Béranger, and P. Drobinski, 2015: Regional mesoscale air-sea coupling impacts and extreme meteorological events role on the Mediterranean Sea water budget, Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 3-4, Pages: 1029-1051, Doi: 10.1007/s00382-014-2252-z. Published: FEB 2015.

Largeron Y., F. Guichard, D. Bouniol, F. Couvreux, L. Kergoat, B. Marticorena, 2015: Can we use surface wind fields from meteorological reanalyses for Sahelian dust emission simulations? Geophysical Research Letters, Volume: 42, Issue: 7, Pages: 2490-2499, Doi: 10.1002/2014GL062938. Published: APR 16 2015.

Libois, Q., G. Picard, L. Arnaud, M. Dumont, M. Lafaysse, S. Morin and E. Lefebvre, 2015: Summertime evolution of snow specific surface area close to the surface on the Antarctic Plateau. The Cryosphere, Volume: 9, Pages: 2383-2398, Doi: 10.5194/tc-9-2383-2015. Published: 2015.

Locatelli R., P. Bousquet, F. Hourdin, M. Saunois, A. Cozis, F. Couvreux, J.Y. Grandpeix, M.P. Lefebvre, C. Rio, P. Bergamaschi, S.D. Chambers, U. Karstens,V. Kazan, S. Van Der Laan, H. Meijer, J. Moncrieff, M. Ramonet, B. Scheeren, C. Schlosser, M. Schmidt, A. Vermeulen, A.G. Williams, 2015: Atmospheric transport and chemistry of trace gases in LMDZ5B: evaluation and implications for inverse modelling, Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 2, Pages: 129-150, Doi: 10. 5194/gmd-8-129-2015. Published: 2015.

Lucas-Picher, P., P. Riboust, S.Somot, and R. Laprise, 2015: Reconstruction of the spring 2011 Richelieu river flood by two regional climate models and an hydrological model. Journal of Hydrometeorology, Volume: 16, Issue: 1, Pages: 36-54 Doi: 10.1175/ JHM-D-14-0116.1. Published: FEB 2015.

Mahfouf, J.-F., F. Ahmed, P. Moll, and F. N. Teferle: Assimilation of zenith total delays in the AROME France convective scale model: a recent assessment. TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography, Volume: 67, Article Number: 26106, Doi: 10.3402/tellusa.v67.26106. Published: 2015.

Mahfouf, J.-F., C. Birman, F. Aires, C. Prigent, E. Orlandi and M. Milz: Information content on temperature and water vapour from a hyper-spectral microwave sensor.Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 693, Pages: 3268-3284, Part: B, Doi: 10.1002/qj.2608. Published: OCT 2015.

Malardel, S., Ricard, D., 2015: An alternative cell-averaged departure point reconstruction for pointwise semi-Lagrangian transport schemes. Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 691, Pages: 2114-2126, Part: B, Doi: 10.1002/ qj.2509. Published : JUL 2015.

Marécal, V., V.-H. Peuch, C. Andersson, S. Andersson, J. Arteta, M. Beekmann, A. Benedictow, R. Bergström, B. Bessagnet, A., Cansado, F. Chéroux, A. Colette, A. Coman, R.L. Curier, H. A. C. Denier van der Gon, A. Drouin, H. Elbern, E. Emili, R. J. Engelen, H. J. Eskes, G. Foret, E. Friese, M. Gauss, C. Giannaros, J. Guth, M. Joly, E. Jaumouillé, B. Josse, N. Kadygrov, J. W. Kaiser, K. Krajsek, J. Kuenen, U. Kumar, N. Liora, E. Lopez, L. Malherbe, I. Martinez, D. Melas, F. Meleux, L. Menut, P. Moinat, T. Morales, J. Parmentier, A. Piacentini, M. Plu, A. Poupkou, S. Queguiner, L. Robertson, L. Rouïl, M. Schaap, A. Segers, M. Sofiev, M. Thomas, R. Timmermans, Á. Valdebenito, P. van Velthoven, R. van Versendaal, J. Vira, A. Ung, 2015: A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production. Geoscientific Model Develop-ment, Volume: 8, Issue: 9, Pages: 2777-2813, Doi: 10.5194/gmd-8-2777-2015. Published: 2015.

Marquet, P.: On the computation of moist-air specific thermal enthalpy. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 686, Pages: 67-84, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2335. Published: JAN 2015.

Masiokas, M, S. Delgado, P. Pitte, E. Berthier, R. Villalba, P. Skvarca, L. Ruiz, J. Ukita, T. Yamanokuchi, T. Tadono, S. Marinsek, F. Couvreux, L. Zalazar, 2015: Inventory and recent changes of small glaciers on the northeast margin of the South Patagonian Icefield, Argentina. Journal of Glaciology, Volume: 61, Issue: 227, Pages: 511-523, Doi: 10.3189/2015JoG14J094. Published -: 2015.

Massonnet, F., V. Guemas, N. S. Fuckar, and F. J. Doblas-Reyes, 2015: The 2015 high record of Antarctic sea ice extent, in « Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective ». Bulletin of the American Meteorological Society, Volume : 96, Issue: 9, Pages: S163-S167, Doi: 10.1175/BAMS-D-15-00093.1, Published: DEC2015.

Ménétrier B., Auligné, T.,: An Overlooked Issue of Variational Data Assimilation. Monthly Weather Review, Volume: 143, Issue: 10, Pages: 3925-3930, Doi: 10.1175/MWR-D-14-00404.1. Published: OCT 2015.

Ménétrier B., Auligné, T.: Optimized Localization and Hybridization to Filter Ensemble-Based Covariances. Monthly Weather Review, Volume: 143, Issue: 10, Pages: 3931-3947, Doi: 10.1175/MWR-D-15-0057.1 Published: OCT 2015.

Ménétrier B., Montmerle T., Michel Y., Berre L. Linear Filtering of Sample Covariances for Ensemble-Based Data Assimilation. Part II: Application to a Convective-Scale NWP Model. Monthly Weather Review, Volume: 143, Issue: 5, Pages: 1622-1643, Doi : 10.1175/MWR-D-14-00157.1. Published: MAY 2015.

Michou, M., P. Nabat, and D. Saint-Martin, 2015: Development and basic evaluation of a prognostic aerosol scheme (v1) in the CNRM Climate Model. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Pages: 501-531, Doi: 10.5194/gmd-8-501-2015, Published: MAR 2015.

Modini, R. L., A.A. Frossard, L. Ahlm, L. M. Russell, C. E. Corrigan, G.C. Roberts, L.N. Hawkins, J.C. Schroder, A. K. Bertram, R. Zhao, A.K.Y. Lee, J.P.D. Abbatt, J. Lin, A. Nenes, Z. Wang, A. Wonaschutz, A. Sorooshian, K.J. Noone, H. Jonsson, J.H. Seinfeld, D. Toom-Sauntry, A.M. Macdonald, and W.R. Leaitch, Primary marine aerosol-cloud interactions off the coast of California, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Volume: 120, Issue: 9, Pages: 4282-4303, Doi: 10.1002/2014JD022963. Published: MAY 16 2015.

Mokhtari, M., Tulet, P., Fischer, C., Bouteloup, Y., Bouyssel, F., and Brachemi, O.: Three-dimensional dust aerosol distribution and extinction climatology over northern Africa simulated with the ALADIN numerical prediction model from 2006 to 2010, Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 15, Pages : 9063-9082, Doi: 10.5194/acp-15-9063-2015. Published: 2015.

Nabat, P., S. Somot, M. Mallet, F. Sevault, M. Chiacchio, and M. Wild, 2014 : Direct and semi-direct aerosol radiative effect on the Mediterranean climate variability using a coupled regional climate system model. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 3-4, Pages: 1127-1155, Doi: 10.1007/s00382-014-2205-6. Published: FEB 2015.

Nabat, P., S. Somot, M. Mallet, M. Michou, F. Sevault, F. Driouech, D. Meloni, A. Di Sarra, C. Di Biagio, P. Formenti, M. Sicard, J.-F. Léon, and M.-N. Bouin, 2015: Dust aerosol radiative effects during summer 2012 simulated with a coupled regional aerosol-atmosphere-ocean model over the Mediterranean region. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 6, Pages: 3303-3326, Doi: 10.5194/acp-15-3303-2015. Published: 2015.

Palmiéri, J., J. C. Orr, J.C. Dutay, K. Béranger, A. Schneider, J. Beuvier, and S. Somot, 2015: Simulated anthropogenic CO_2 storage and acidification of the Mediterranean Sea. Biogeosciences, Volume: 12, Issue: 3, Pages: 781-802, Doi: 10.5194/bg-12-781-2015. Published: 2015.

Paramonov, M., V.-M. Kerminen, M. Gysel, P. P. Aalto, M. O. Andreae, E. Asmi, U. Baltensperger, A. Bou-giatioti, D. Brus, G. Frank, N. Good, S. S. Gunthe, L. Hao, M. Irwin, A. Jaatinen, Z. Jurányi, S. M. King, A. Kortelainen, A. Kristensson, H. Lihavainen, M. Kulmala, U. Lohmann, S. T. Martin, G. McFiggans, N. Mihalopoulos, A. Nenes, C. D. O'Dowd, J. Ovadnevaite, T. Petäjä, U. Pöschl, G. C. Roberts, D. Rose, B. Svenningsson, E.

Swietlicki, E. Weingartner, J. Whitehead, A. Wiedensohler, C. Wittbom, and B. Sierau, A synthesis of cloud condensation nuclei counter (CCNC) measurements within the EUCAARI network. Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 15, Issue: 21, Pages: 12211-12229, Doi: 10.5194/acp-15-12211-2015. Published: 2015.

Park,Y-S., Baehr, C., Larocque, G.R., Sánchez-Pérez, J.M., and Sauvage, S. : Ecological Modelling for Ecosystem Sustainability . Ecological Modelling, Volume: 306, Special Issue: SI, Pages: 1-5, Doi : 10.1016/j.ecolmodel.2015.04.008. Published: JUN 24 2015.

Pincus, R., E. J. Mlawer, L. Oreopoulos, A.S. Ackerman, S. Baek, M. Brath, S.A. Buehler, K.E. Cady-Pereira, J.N.S. Cole, J.-L. Dufresne, M. Kelley, J. Li, J. Manners, D.J. Paynter, R. Roehrig, M. Sekiguchi, D.M. Schwarzkopf, 2015: Radiative flux and forcing parameterization error in aerosol-free clear-skies. Geophysical Research Letters, Volume: 42, Issue: 13, Pages: 5485-5492, Doi: 10.1002/2015GL064291. Published: JUL 16 2015.

Poan, E.D., J.-P. Lafore, R. Roehrig, and F. Couvreux, 2014: West African Monsoon Intraseasonal Variability: Internal processes within African Easterly Waves. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 689, Pages: 1121-1136, Part: B, Doi: 10.1002/qj2420. Published: APR 2015.

Rawlins, M.A. , A.D. McGuire, J.K. Kimball, P. Dass, D. Lawrence,E. Burke, X. Chen, C. Delire, C. Koven, A. MacDougall, S. Peng, A. Rinke, K. Saito, W. Zhang, R. Alkama, T.J. Bohn, P. Ciais, B. Decharme, I. Gouttevin, T. Hajima, D. Ji, G. Krinner, D.P. Lettenmaier, P. Miller, J.C. Moore, B. Smith, and T. Sueyoshi, 2015: Assessment of Model Estimates of Land-Atmosphere CO2 Exchange Across Northern Eurasia. Biogeosciences, Volume: 12, Issue: 14, Pages: 4385-4405, Doi: 10.5194/bg-12-4385-2015. Published: JUL2015.

Raynaud L., O. Pannekoucke, P. Arbogast and F. Bouttier : Application of a Bayesian weighting for short-range lagged ensemble forecasting at the convective scale. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 687, Pages: 459-468, Part: B, Doi: 10.1002/qj.2366. Published: JAN 2015.

Ribes A., N. Gillett, and F. Zwiers, 2015: Designing detection and attribution simulations for CMIP6 to optimize the estimation of greenhouse gas-induced arming. Journal of Climate, Volume: 28, Issue: 8, Pages: 3435-3438, Doi: 10.1175/JCLI-D-14-00691.1.

Ricaud, P., P. Grigioni, R. Zbinden, J.-L. Attié, L. Genoni, A. Galeandro, L., Moggio, S. Montaguti, I. Petenko, and P. Legovini, 2015 : Review of tropospheric temperature, absolute humidity and integrated water vapour from the HAMSTRAD radiometer installed at Dome C, Antarctica, 2009–14, Antarctic Science, Volume: 27, Pages: 598-616, doi: 10.1017/S0954102015000334. Published: DEC2015.

Rivière G., P. Arbogast and A. Joly: Eddy kinetic energy redistribution within wind-storms Klaus and Friedhelm .Quaterly journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 688, Pages: 925-938, Part: A, Doi: 10.1002/qj.2412. Published: APR 2015.

Rivière, G. and M. Drouard, 2015: Dynamics of the Northern Annular Mode at Weekly Time Scales. Journal of the Atmospheric Sciences, Volume: 72, Issue: 12, Pages: 4569-4590, doi: 10.1175/JAS-D-15-0069.1. Published: DEC 2015.

Rodriguez-Fonseca, B., E. Mohino, C. R. Mechoso, C. Caminade, M. Biasutti, M. Gaetani, J. García-Serrano, E. K. Vizy, K. Cook, Y. Xue, I. Polo, T. Losada, L. Druyan, B. Fontaine, J. Bader, F. J. Doblas-Reyes, L. Goddard, S. Janicot, A. Arribas, W. Lau, A. Colman, M. Vellinga, D. P. Rowell, F. Kucharski, and A. Voldoire, 2015: Variability and Predictability of West African Droughts. A review in the role of Sea Surface Temperature Anomalies, Journal of Climate, Volume 28, Issue: 10, Pages : 4034-4060, Doi: 10.1175/JCLI-D-14-00130.1. Published : MAY 2015.

Rose, C., K. Sellegri, E. Freney, R. Dupuy, A. Colomb, J.-M. Pichon, M. Ribeiro, T. Bourianne, F. Burnet, and A. Schwarzenboeck: Airborne measurements of new particle formation in the free troposphere above the Mediterranean Sea during the HYMEX campaign, Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 15, Issue: 17, Pages: 10203-10218, Doi: 10.5194/acp-15-10203-2015. Published: 2015.

Roy, F., M. Chevallier, G. Smith, F. Dupont,G. Garric, J.-F. Lemieux,Y. Lu, and F. Davidson, 2015: Arctic sea ice and freshwater sensitivity to the treatment of the atmosphere-ice-ocean surface layer. Journal of Geophysical Reseach-O, Volume: 120, Issue: 6, Pages 4392–4417, Doi: 10.1002/2014JC010677. Published: JUN2015

Schnell, J. L., M. J. Prather, B. Josse,V. Naik, L. W. Horowitz, P. Cameron-Smith, D. Bergmann, G. Zeng, D. A. Plummer, K. Sudo, T. Nagashima, D. T. Shindell, G. Faluvegi, and S.A. Strode, 2015: Use of North American and European air quality networks to evaluate global chemistry–climate modeling of surface ozone. Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 18, Pages: 10581-10596, Doi: 10.5194/acp-15-10581-2015. Published: 2015

Schoetter, R., J. Cattiaux, and H. Douville, 2015: Changes of western European heat wave characteristics projected by the CMIP5 ensemble. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 1-2, Pages: 315-338, Doi: 10.1007/s00382-014-2434-8. Published: JAN 2015.

Schön, P., A. Prokop, V. Vionnet, G. Guyomarc'h, F. Naaim-Bouvet and M. Heiser, 2015: Improving a Terrain-Based Parameter for the Assessment of Snow Depth with TLS Data in the Col du Lac Blanc Area. Cold Regions Science and Technology, Volume: 114, Pages: 15-26, Doi: 10.1016/j.coldregions.2015.02.005, Published: JUN 2015.

Servonnat, J. Mignot, E. Guilyardi, D. Swingedouw, R. Séférian, and S. Labetoulle, 2014: Reconstructing the subsurface ocean decadal variability using surface nudging in a perfect model framework. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 1-2, Pages: 315-338, Doi: 10.1007/s00382-014-2184-7. Published: JAN 2015.

Sic, B., L. El Amraoui, V. Marécal, B. Josse, J. Arteta, J. Guth, M. Joly, and P. Hamer, 2015: Modelling of primary aerosols in the chemical transport model MOCAGE: development and evaluation of aerosol physical parameterizations. Geoscientific Model Development, Volume: 8, Issue: 2, Pages: 381-408, Doi : 10.5194/gmd-8-381-2015. Published: 2015.

Sofiev. M., U. Berger, M. Prank, J. Vira, J. Arteta, J. Belmonte, K.-C. Bergmann, F. Cheroux, H. Elbern, E. Friese, C. Galan, R. Gehrig, R. Kranenburg, V. Marécal, F. Meleux, A.-M. Pessi, L. Robertson, O. Ritenberga, V. Rodinkova, A. Saarto, A. Segers, E. Severova, I. Sauliene, B. M. Steensen, E. Teinemaa, M. Thibaudon, and V.-H. Peuch, 2015: Multi-model simulations of birch pollen in Europe by MACC regional ensemble, Atmospheric Chemistry and Physics, Volume: 15, Issue: 14, Pages: 8115-8130, Doi: 10.5194/acp-15-8115-2015. Published: 2015.

Soto-Navarro, J., S. Somot, F. Sevault, J. Beuvier, F. Criado-Aldeanueva, J. García-Lafuente, K. Béranger, 2015: Evaluation of regional ocean circulation models for the Mediterranean Sea at the strait of Gibraltar: volume transport and thermohaline properties of the outflow. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 5-6, Pages 1292, Doi: 10.1007/s00382-014-2179-4. Published: MAR 2015.

Spandre, P., H. François, S. Morin et E. George-Marcelpoil, 2015: Snowmaking in the French Alps Climatic context, existing facilities and outlook. Revue de Geographie Alpine-Journal of Alpine Research, Volume: 103, Issue: 2, Doi: 10.4000/rga.2913. Published: 2015.

Stolaki S., M. Haeffelin, C. Lac, J-C Dupont, T. Elias, V. Masson, 2015 : Influence of aerosols on the life cycle of a radiation fog event. A numerical and observational study, Atmospheric Research, Volume: 151, Special Issue: SI, Pages: 146-161, Doi: 10.1016/j.atmosres.2014.04.013. Published: JAN 2015.

Strajnar, B., N. Žagar, and L. Berre: Impact of new aircraft observations Mode-S MRAR in a mesoscale NWP model, Journal of Geophysical Research-Atmospheres, Volume: 120, Issue: 9, Pages: 3920-3938, Doi: 10.1002/2014JD022654. Published: MAY 16 2015.

Thibert, E., H. Bellot, X. Ravanat, F. Ousset, G. Pülfer, M. Naaim, P. Hagenmuller, F. Naaim-Bouvet, T. Faug, K. Nishimura, Y. Ito, D. Baroudi, A. Prokop, P. Schon, A. Soruco, C. Vincent, A. Limam and R. Héno, 2015: The full-scale avalanche test-site at Lautaret Pass (French Alps). Cold Regions Science and Technology, Volume: 115, Pages: 30-41, Doi: 10,1016/j.coldregions.2015-03-005, Published: JUL 2015.

Thirel, G., A. Andréassian, C. Perrin, J.-N. Audouy, L. Berthet, P. Edwards, N. Folton, C. Furusho, A. Kuentz, J. Lerat, G. Lindstrom, E. Martin, T. Mathevet, R. Merz, J. Parajka, D. Ruelland, J. Vaze, 2014 : Hydrology under change: an evaluation protocol to investigate how hydrological models deal with changing catchments. Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences, Volume: 60, Issue: 7-8, Special Issue: SI, Pages: 1165-1173, Doi: 10.1080/02626667.2015.1050027. Published: AUG 3 2015.

Thomas, M.D., A.-M. Tréguier, B. Blanke, J. Deshayes, and A. Voldoire, 2015: A Lagrangian Method to Isolate the Impacts of Mixed Layer Subduction on the Meridional Overturning Circulation in a Numerical Model, Journal of Climate, Volume: 28, Issue: 19, Pages: 7503-7517, Doi: 10.1175/JCLI-D-14-00631.1. Published: OCT 2015.

Timmermans, R.M.A., W.A. Lahoz, J.-L. Attié, V.-H. Peuch, D.P. Edwards, H.J. Eskes, P.J.H. Builtjes, 2015: Observing System Simulation Experiments for air quality. Atmospheric Environment, Volume: 115, Pages: 199–213, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.032. Published: AUG2015.

Toihir, M., H. Bencherif, V. Sivakumar, L. El Amraoui, T. Portafaix, and N. Mbatha, 2015: Comparison of total column ozone obtained by the IASI-MetOp satellite with ground-based and OMI satellite observations in the southern tropics and subtropics. Annales Geophysicae, Volume : 33, Issue : 9, Pages : 1135-1146, Doi:10.5194/angeo-33-1135-2015. Published: 2015.

Vautard, R., G.-J. van Oldenborgh, S. Thao, B. Dubuisson, G. Lenderink, A. Ribes, S. Planton, J.-M. Soubeyroux, and P. Yiou, 2015 : Extreme fall 2014 precipitation in the Cévennes Mountains, in «Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective». Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 96, Issue: 9, Pages: S56-S60, Doi: 10.1175/BAMS-D-15-00088.1, Published: DEC2015.

Verfaillie, D., V. Favier, M. Dumont, V. Jomelli, A. Gilbert, D. Brunstein, H. Gallée, V. Rinterknecht, M. Menegoz and Y. Frenot, 2015: Recent glacier decline in the Kerguelen Islands (49ºS, 69ºE) derived from modeling, field observations, and satellite data. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Volume: 120, Issue: 10, Pages: 637–654, Doi: 10.1002/2014JF003329, Published: MAR 2015.

Verma, S., D. Prakash, P. Ricaud, S. Payra, J.-L. Attié, and M. Soni, 2015: A new classification of aerosol sources and types as measured over Jaipur, India. Aerosol and Air Quality Research, Volume: 15, Pages: 985-993, Doi: 10.4209/aaqr.2014.07.0143, Published: JUN2015.

Vernay, M., M. Lafaysse, L. Merindol, G. Giraud and S. Morin, 2015: Ensemble forecasting of snowpack conditions and avalanche hazard. Cold Regions Science and Technology, Volume: 120, Pages: 251-262, Doi: 10.1016/j.coldregions.2015.04.010, Published: DEC 2015.

Verrelle, A., Ricard, D. and Lac, C. ,2015: Sensitivity of high-resolution idealized simulations of thunderstorms to horizontal resolution and turbulence parametrization. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Volume: 141, Issue: 687, Pages: 433-448, Part: B, Doi : 10.1002/qj.2363. Published : JAN 2015.

Vionnet, V., S. Bélair, C. Girard, and A. Plante, 2015: Wintertime sub-kilometer numerical forecasts of near-surface variables in the Canadian Rocky Mountains. Monthly Weather Review/American Meteorological Society, Volume: 143, Pages: 666-686, Doi: http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-14-00128.1, Published: FEV 2015.

Wang, C., Baehr, C., Lai, Z., Gao, Y., Lek, S., Li, X.: Exploring temporal trend of morphological variability of a

dominant diatom in response to environmental factors in a large subtropical river. Ecological Informatics, Volume: 29, Special Issue: SI, Pages: 96-106, Part: 2, Doi: 10.1016/j.ecoinf.2014.11.002. Published: SEP 2015.

Watson, L., G. Lacressonnière, M. Gauss, M. Engardt, C. Andersson, B. Josse, V. Marécal, A. Nyiri, S. Sobolowski, G. Siour, and R. Vautard, 2015: The impact of meteorological forcings on gas phase air pollutants over Europe. Atmospheric Environment, Volume: 119, Pages: 240-257, Doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.07.037. Published: OCT 2015.

Wautier, A., C. Geindreau, F. Flin, 2015: Linking snow microstructure to its macroscopic elastic stiffness tensor: a numerical homogenization method and its application to 3-D images from X-ray tomography. Geophysical Research Letters, Volume: 42, Issue: 19, Pages: 8031-8041, Doi: 10.1002/2015GL065227, Published: OCT 2015.

Webb, M. J., A. P. Lock, A. Bodas-Salcedo, S. Bony, J. N. S. Colen, T. Koshiro, H. Kawai, C. Lacagnina, F. M. Selten, R. Roehrig, and B. Stevens, 2015 : The diurnal cycle of cloud feedback in climate models. Climate Dynamics, Volume: 44, Issue: 5/6, Pages: 1419-1436, Doi: 10.1007/s00382-014-2234-1, Published: MAR 2015.

Xavier, P.K., J.C. Petch, N.P. Klingaman, S.J. Woolnough, X. Jiang, D.E. Waliser, M. Caian, S.M. Hagos, C. Hannay, D. Kim, J. Cole, T. Miyakawa, M. Pritchard, R. Roehrig, E. Shindo, F. Vitart and H. Wang, 2015: Vertical structure and physical processe of the Madden-Julian oscillation: Biases and uncertainties at short range. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, Volume: 120, Issue: 10, Pages: 4749–4763, Doi:10.1002/2014JD022718. Published : MAY 27 2015.

Yano, J-I, Soares, P. M. M., Koehler, M., Deluca, A., 2015: The Convective Parameterization Problem: Breadth and Depth. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume: 96, Issue: 8, Pages: ES127-ES130, Doi: 10.1175/BAMS-D-14-00134.1. Published: AUG 2015.

Yano, J.-I., 2015: Convective kinetic energy equation under the mass-flux subgrid-scale parameterization. Dynamics and Atmospheres and Oceans, Volume: 69, Pages: 37-53, DOI: 10.1016/j.dynatmoce.2014.12.001. Published: MAR 2015.

Yano J-I, J-F. Geleyn, M. Köller, D. Mironov, J. Quaas, P. M. M. Soares, V. T. J. Phillips, R. S. Plant, A. Deluca, P. Marquet, L. Stulic and Z. Fuchs: Basic Concepts for Convection Parameterization in Weather Forecast and Climate Models: COST Action ES0905 Final Report. Atmosphere, Volume: 6, Issue: 1, Pages: 88-147, Doi: 10.3390/atmos6010088. Published: JAN 2015.

Zeng, Y., Su, Z., Calvet, J. -C., Manninen, T., Swinnen, E., Schulz, J., Roebeling, R., Poli, P., Tan, D., Riihela, A., Tanis, C. -M., Arslan, A. -N., Obregon, A., Kaiser-Weiss, A., John, V. O., Timmermans, W., Timmermans, J., Kaspar, F., Gregow, H., Barbu, A. -L., Fairbairn, D., Gelati, E., Meurey, C., 2015: Analysis of current validation practices in Europe for space-based climate data records of essential climate variables. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, Volume: 42, Pages: 150-161, Doi: 10.1016/j.jag.2015.06.006. Published: OCT 2015.

Zhang, Q. J., Beekmann, M., Freney, E., Sellegri, K., Pichon, J. M., Schwarzenboeck, A., Colomb, A., Bourrianne, T., Michoud, V., and Borbon, A: Formation of secondary organic aerosol in the Paris pollution plume and its impact on surrounding regions, Atmospheric Chemistry And Physics, Volume: 15, Issue: 24, Pages: 13973-13992, Doi: 10.5194/acp-15-13973-201. Published: 2015.

Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

Belda, M., P. Skalák, A. Farda, T. Halenka, M. Déqué, G. Csima, J. Bartholy, C. Torma, C. Boroneant, M. Caian and V. Spiridonov, 2015 : CECILIA Regional Climate Simulations for Future Climate: Analysis of Climate Change Signal, Advances in Meteorology, Article ID 354727, 13 pp. Doi: 10.1155/2015/354727.

Le Bras J. and V. Masson, 2015: A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale, Front. Earth Sci., 3(27), http://dx.doi.org/10.3389/feart.2015.00027

Mallet M., F. Dulac, P. Nabat, P. Formenti, J. Sciare, G. Roberts, J. Pelon, D. Tanré, F. Parol, G. Ancellet, L. Blarel, T. Bourrianne, G. Brogniez, P. Chazette, S. Chevaillier, M. Claeys, A. Colomb, C. Denjean, Y. Derimian, K. Desboeufs, J.-F. Doussin, P. Durand, A. Féron, H. Ferré, L. Fleury, E. Freney, P. Goloub, N. Grand, E. Hamonou, M. Jeannot, I. Jankowiak, D. Lambert, J-F Léon, L. Menut, G. Monboisse, J. Nicolas, V. Pont, S. Mailler, T. Podvin, F. Solmon, S. Somot, G. Rea, J.-B. Renard, L. Roblou, A. Schwarzenboeck, K. Sellegri, M. Sicard, J. Totems, B. Torres, S. Triquet, et N. Verdier, 2015 : Intéractions aérosols-rayonnement-climat méditerranéen : impact de l'effet radiatif direct sur le cycle de l'eau. La Météorologie, 2015, N° 88, 48-55.

Mallet, M., Dulac, F.; Nabat, P.; Formenti, P.; Sciare, J.; Roberts, G.; Denjean, C.; Pelon, J.; Tanré, D.; Parol, F.; Ancellet, G.; Auriol, F.; Blarel, L.; Bourrianne, T.; Brogniez, G.; Chazette, P.; Chevaillier, S.; Claeys, M.; Colomb, A.; D'Anna, B.; Derimian, Y.; Desboeufs, K.; Doussin, J.-F.; Durand, P.; Féron, A.; Ferré, H.; Fleury, L.; Freney, E.; Goloub, P.; Grand, N.; Hamonou, E.; Jankowiak, I.; Jeannot, M.; Lambert, D.; Léon, Jean-F.; Mailler, S.; Menut, L.; Momboisse, G.; Nicolas, J.; Podvin, T.; Pont, Véronique; Rea, G.; Renard, Jean-B.; Roblou, L.; Schwarzenboeck, A.; Sellegri, K.; Sicard, M.; Solmon, F.; Somot, S.; Torres, B.; Totems, J.; Triquet, S.; Verdier, N.; Verwaerde, C.; Vignelles, D. : Interactions aérosols-rayonnement-climat en région méditerranéenne : Impact de l'effet radiatif direct sur le cycle de l'eau, La Météorologie, N°91, DOI : 10.4267/2042/57860, 2015.

Martin, E.; Salas y Mélia, D.; Badeau, V.; Delire, C.; Gattuso, J.-P.; Lemonsu, A.; Masson, V.; Pigeon, G.; Regimbeau, M. & Viguié, V Impacts, adaptation et vulnérabilité des systèmes naturels et humains en Europe La Météorologie, 2015, 88, 83-95

Pailleux, J.; Geleyn, J.-F.; El Khatib, R.; Fischer, C.; Hamrud, M.; Thépaut, J.-N.; Rabier, F.; Andersson, E.; Salmond, D.; Burridge, D.; Simmons, A.; Courtier, P. : Les 25 ans du système de prévision numérique du temps IFS/Arpège La Météorologie - N°89 - Mai 2015. Doi : 10.4267/2042/56594

Picard, G., F. Domine, G. Krinner, L. Arnaud, Q. Libois et S. Morin, 2015 : La taille des grains de neige et son influence sur le climat antarctique. La Météorologie, N° 91, Pages: 39-46, Doi: 10.4267/2042/5786, Published: NOV 2015.

Planton, S., L. Bopp, E. Brun, J. Cattiaux, F. Chauvin, M. Chevallier, P. Ciais, H. Douville, G. Giraud, J.-M. Soubeyroux, et L. Terray, 2015 : Evolution du climat depuis 1850. La Météorologie,2015, N° 88, 48-55.

Rieutord, T. : Une nouvelle méthode de détection de la hauteur de couche limite avec un lidar Doppler, La Météorologie, 2015, N° 91; p. 23-28

Smith, G.C., T. Jung, N. D. Gordon, S. Klebe, H. Goessling, P. Bauer, D. Bromwich, M. Chevallier, J. Day, F. Doblas-Reyes, M. Holland, J. Inoue, T. Iversen, Peter Lemke, A.P. Makshtas, Brian Mills, P. Nurmi, I. Renfrew, P. Reid, G. Svensson, M. Tolstykh, and Q. Yang, 2015: The Year of Polar Prediction (YOPP): Challenges and opportunities in ice-ocean forecasting. Meractor Ocean Quaterly Newsletter, N°51, 9-12.

Stroeve, J., E. Blanchard-Wrigglesworth, V. Guemas, S. Howell, F. Massonnet, and S. Tietsche, 2015: Improving Predictions of Arctic Sea Ice Extent. EOS, 96, Doi:10.1029/2015EO031431.

Wittwer, C., M. Déqué, D. Fontannaz, A. Roullé et B. Janet, 2015, Le bassin de la Garonne sous surveillance, Géosciences, 19, 78-88.

Contributions à des ouvrages ou à des rapports

E. Bazile, F. Couvreux, P. Le Moigne, C. Genthon: First workshop on GABLS-4 Intercomparison. GEWEX Newsletter, Vol 25, No 3.

Berre L. and G. Desroziers: Improved representation of forecast error dynamics using an increased size for ensemble 4D-Var data assimilation at Météo-France. WMO CAS/JSC WGNE Blue Book, Edited by J. Côté., 2015.

Claude, C., P. Spandre, A. Guerrand et C. Carmagnola, 2015 : Gestion du capital neige. Quand la recherche exporte ses conclusions sur le terrain. DSF Magazine, N° 39, Pages : 11-13, Publié : Juillet 2015.

Déqué, M. and L. Batté, 2015: A seasonal re-forecast of mid-latitude circulation over the 20th century. Reseach activities in atmospheric and oceanic modelling, 44, 6.03-6.04

Marquet P. and J-F. Mahfouf: A moist "available enthalpy" norm: definition and comparison with existing "energy" norms. WMO CAS/JSC WGNE Blue Book, Edited by J. Côté., 2015.

Marquet P.: Definition of Total Energy budget equation in terms of moist-air Enthalpy surface flux. WMO CAS/JSC WGNE Blue Book, Edited by J. Côté., 2015.

Marquet P.: An improved approximation for the moist-air entropy potential temperature θ_s. WMO CAS/JSC WGNE Blue Book, Edited by J. Côté., 2015.

Nicolet, G., N. Eckert, S. Morin and J. Blanchet, 2015 : Inferring spatio-temporal patterns in extreme snowfall in the French Alps using max-stable processes. Procedia Environmental Sciences, Volume: 26, Pages: 24-31, Spatial Statistics conference 2015, Doi: 10.1016/j.proenv.2015.05.018, Published: 2015.

Thiéblemont, D., M. Garcin, P. Négrel, O. Cerdan, G. Le Cozannet, et S. Planton, 2015 : Variations récentes du climat et géologie. Géosciences, Numéro Spécial, juillet 2015, 4-15.

Publications 2015 dans des revues à comité de lecture hors CNRM

Amodéi, M., I. Sanchez, J. Stein, 2015: Verification of the French operational high-resolution model AROME for administrative purposes. Met. App. doi: 10.1002/met.1510 .

Aouf, L., J-M. Lefèvre: On the impact of the assimilation of SARAL/Altika wave data in the operational wave model MFWAM. Marine Geodesy 38 (S1), 381-395, 2015. doi: 10.1080/01490419.2014.1001050.

Aristidi, E., Vernin, J., Fossat, E., Schmider, F. X., Travouillon, T., Pouzenc, C., Traullé, O., Genthon, C., Agabi, K., Bondoux, E., Challita, Z., Mékarnia, D., Jeanneaux, F. and Bouchez, G. "Monitoring the optical turbulence in the surface layer at Dome C, Antarctica, with sonic anemometers", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, (December 21, 2015) Vol. 454 4304-4315 First published online October 28, 2015. doi: 10.1093/mnras/stv2273.

Astier, N., M. Plu, and C. Claud, 2015: Associations between tropical cyclone activity in the Southwest Indian Ocean and El Niño Southern Oscillation. Atmosph. Sci. Lett., 16: 506–511. doi: 10.1002/asl.589 .

Auger, L., O. Dupont, S. Hagelin, P. Brousseau and P. Brovelli, 2015: AROME–NWC: a new nowcasting tool based on an operational mesoscale forecasting system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141, 1603–1611, doi: 10.1002/qj.2463.

Augros, C., O. Caumont, V. Ducrocq, N. Gaussiat, P. Tabary (2015): 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, doi: 10.1002/qj.2572.

Besson, F., E. Bazile, C. Soci, J.M. Soubeyroux, G. Ouzeau and M. Perrin, 2015: Diurnal temperature cycle deduced from extreme daily temperatures and impact over a surface reanalysis system. Adv. Sci. Res., 12, 137-140; doi: 10.5194/asr-12-137-2015.

Boisserie, M. B. Decharme, L. Descamps and P. Arbogast, 2015: Land surface initialization strategy for a global reforecast dataset, accepted manuscript online, doi: 10.1002/qj.2688 .

Bousquet, O., A. Berne, J. Delanoe, Y. Dufournet, J.J. Gourley, J. Van-Baelen, C. Augros, L. Besson, B. Boudevillain, O. Caumont, E. Defer, B. Fradon, J. Grazioli, D. J. Jorgensen, P.-E. Kirstetter, J.F. Ribaud, A. Schwarzenboeck, P. Tabary, H. Al-Sakka, A.A. Boumahmoud, J. Beck, G. Delrieu, V. Ducrocq, Y. Pointin, D. Scipion, 2015: Multiple-frequency radar observations collected in southern France during the field phase of the hydrological cycle in the mediterranean experiment (HyMeX). Bull. Amer. Meteor. Soc., doi: 10.1175/BAMS-D-13-00076.1.

Bovalo, C., C. Barthe, N. Yu and N. Bègue, 2015: Lightning activity within tropical cyclones in the South West Indian Ocean. J. Geophys. Res., sous presse. doi: 10.1002/2014JD021651.

Brenguier, J-L, F. Bouttier and J-M. Moisselin, 2015 : Les nouveaux services météorologiques pour l'aviation. La Météorologie, N°91, doi : 10.4267/2042/57862.

Brugnara, Y., Auchmann R, Brönnimann S, Allan R, Auer I, Barriendos M, Bergström H, Bhend J, Brázdil R, Compo G, Cornes R, Dominguez-Castro F, van Engelen A, Filipiak J, Holopainen J, Jourdain S, Kunz M, Luterbacher J, Maugeri M, Mercalli L, Moberg A, Mock C, Pichard G, Rezníčková L, van der Schrier G, Slonosky V, Ustrnul Z, Valente, Wypych A, and Yin X, 2015: A collection of sub-daily pressure and temperature observations for the early instrumental period with a focus on the "year- without a summer" 1816, Clim. Past, 11, 1027–1047, doi:10.5194/cp-11-1027-2015.

Coustau, M., F. Rousset-Regimbeau, G. Thirel, F. Habets, B. Janet, E. Martin, C. de Saint-Aubin and JM. Soubeyroux, 2015: Impact of improved meteorological forcing, profile of soil hydraulic conductivity and data assimilation on an operational Hydrological Ensemble Forecast System over France. J. Hydrol.; doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.04.022.

Cram, T., Compo G,Yin X, Allan R, McColl C , Vose R, Whitaker J, Matsui N, Ashcroft L, Auchmann R,Bessemoulin P, Brandsma T, Brohan P, Brunet M, Comeaux J,Crouthamel ,Gleason B, Groisman P, Hersbach H,Jones P, Jónsson T, Jourdain S, Kelly G, Knapp K, Kruger A, Kubota H, Lentini G, Lorrey A, Lott N,Lubker S, Luterbacher J,Marshall G, Maugeri M, Mock C, Nordli O, Rodwell M,Ross T,Schuster D,Lidija Srnec L, Valente M, Zsuzsanna Vizi s, Wang X, Westcott N, Woollen J and Worley S, 2015: The International Surface Pressure Databank version 2, doi: 10.1002/gdj3.25.

Descamps, L., C. Labadie, A. Joly, E. Bazile, P. Arbogast and P. Cébron, 2015: PEARP, the Météo-France short-range ensemble prediction system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141,1671–1685, doi: 10.1002/qj.2469.

Fourrié, N., E. Bresson, M. Nuret, C. Jany, P. Brousseau, A. Doerenbecher, M. Kreitz, O. Nuissier, E. Sevault, H. Benichou, M. Amodei and F. Pouponneau, 2015 : AROME-WMED, a real-time mesoscale model designed for the HyMeX special observation periods. Geosci. Model Dev., 8, 1919-1941; doi: 10.5194/gmd-8-1919-2015.

Gibelin, A-L., Dubuisson B., Corre L., Deaux N., Jourdain S., Laval L., Piquemal J.M., Mestre O., Dennetière D., Desmidt S., Tamburini A., 2014 : Évolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence. La Météorologie, 87, 45-53, doi : 10.4267/2042/54336.

Hopuare, M., M. Pontaud, J.P. Céron, P. Ortéga and V. Laurent, 2015: Climate change, Pacific climate drivers and observed precipitation variability in Tahiti, French Polynesia. Clim. res., 63, 157-170; doi: 10.3354/cr01288.

Hopuare, M., M. Pontaud, J.P. Céron, M. Déqué and P. Ortéga, 2015: Climate change assessment for a small island: a Tahiti downscaling experiment. Clim. res., 63, 233–247; doi: 10.3354/cr01298.

Jewell, S.A., N. Gaussiat, 2015: An Assessment of Kriging Based Rain Gauge-Radar Merging Techniques. Q. J. R. Meteor. Soc. doi: 10.1002/qj.2522.

Jourdain, S., É. Roucaute, P. Dandin , J.P. Javelle , I. Donet , S. Ménassère, N. Cénac, 2015 : Le sauvetage de données climatologiques anciennes à Météo-France, de la conservation des documents à la mise à disposition des données. La Météorologie, 89, 47-55; doi : 10.4267/2042/56598.

Kafando, P., F. Chane Ming and M. Petitdidier, 2015: Stratospheric variability of wave activity and parameters in equatorial coastal and tropical sites during the West African Monsoon. doi: 10.1007/s00382-015-2764-1 .

Marsouin, A., Le Borgne, P., Legendre, G., Péré, S., and Roquet, H. 2015: Six years of OSI-SAF METOP-A AVHRR sea surface temperature. Remote Sensing of Environment, doi: 10.1016/j.rse.2014.12.018.

Martin, E., D. Salas y Mélia, V. Badeau, C. Delire, J.P. Gattuso, A. Lemonsu, V. Masson, G. Pigeon, M. Regimbeau and V. Viguié, 2015 : Impacts, adaptation et vulnérabilité des systèmes naturels et humains en Europe. La Météorologie, 88, 83-95; doi: 10.4267/2042/56364.

Planton, S., L. Bopp, E. Brun, J. Cattiaux, F. Chauvin, M. Chevallier, P. Ciais, H. Douville, G. Giraud, J.M. Soubeyroux et L. Terray, 2015 : Evolution du climat depuis 1850. La Météorologie, 88, 48-55; doi: 10.4267/2042/56361.

Réchou, A. and Kirkwood, S., 2015 : Investigation of weather anomalies in the low-latitude islands of the Indian Ocean in 1991, Ann. Geophys., 33, 789-804, doi: 10.5194/angeo-33-789.

Ribaud, J.F., O. Bousquet, S. Coquillat, H. Al-Sakka, D. Lambert, V. Ducrocq and E. Fontaine, 2015: Evaluation and application of hydrometeor classification algorithm outputs inferred from multi-frequency dual-polarimetric radar observations collected during HyMeX. Q.J.R. Meteorol. Soc., doi: 10.1002/qj.2589.

Scovell, R., and H. al-Sakka, 2015: A Point Cloud Method for Retrieval of High Resolution 3D Gridded Reflectivity from Weather Radar Networks for Air Traffic Management. J. Atmos. Oceanic Technol. doi: 10.1175/JTECH-D-15-0051.1.

Soula S., E. Defer, M. Fullekrug, O. van der Velde, J. Montanya, O. Bousquet, S. Coquillat, Jean-Pierre Pinty, W. Rison, P. R Krehbiel, R. Thomas, S. Pedeboy, 2014: Time and space correlation between sprites and their parent lightning flashes for a thunderstorm observed during the HyMeX campaign. J. Geophys. Res. doi: 10.1002/2015JD023894.

Stein, J., J. Pailleux, F. Stoop, M. Amodei, O. Dupont, M .Mayoka, F. Pouponneau et I. Sanchez, 2015 : La Vérification des prévisions météorologiques à Météo-France. La Météorologie n°90. Doi : 10.4267/2042/56837 .

Tonnelier, J.P., S. Guidotti, B. Lossec, F. Baraer et J. Desplat, 2015 : La météorologie et les pics de pollution.Étude de cas de décembre 2013 et mars 2014. Revue Pollution atmosphérique. Climat, santé, société, n° spécial mars 2015. article.

Trulsen, K., J. C. Nieto Borge, G. Odin, L. Aouf, J-M. Lefèvre : Crossing sea state and rogue wave probability during the Prestige accident. Journal of Geophysical Research: Oceans, 120, 7113-7136, doi: 10.1002/2015JC011161.

Vidot, J., A. J. Baran, and P. Brunel 2015: A new ice cloud parameterization for infrared radiative transfer simulation of cloudy radiances: Evaluation and optimization with IIR observations and ice cloud profile retrieval products, J. Geophys. Res. Atmos., 120, doi: 10.1002/2015JD023462.

Thèses soutenues en 2015

Bari, D., 2015 : "Etude du brouillard en zone côtière par modélisation des processus physiques de la couche limite atmosphérique : cas du grand Casablanca (Maroc)", Thèse de l'Université de Toulouse, soutenue le 15 octobre 2015.

Campi, A., 2015 : "Reconstitution par filtrage non linéaire de milieu turbulent et rétrodiffusant à l'aide d'une combinaison de LIDARs Doppler et aérosols" le mercredi 9 décembre 2015 à 14h en salle MIP à l'Institut de Mathématiques de Toulouse. Accès au résumé.

Coronel, B., 2015 : "Impact des processus humides sur les dépressions des latitudes tempérées" le mercredi 25 novembre 2015 à 14h en salle Joël Noilhan. Accès au résumé.

Freville, H., 2015 : "Observation et simulation de la température de surface en Antarctique : application à l'estimation de la densité superficielle de la neige" le mardi 24 novembre 2015. Accès au résumé.

Guth, J., 2015 : "Modélisation des aérosols à l'aide du modèle de chimie transport MOCAGE : application à la qualité de l'air sur le bassin méditerranéen" le lundi 14 décembre 2015 à 14h en salle Joël Noilhan. Accès au résumé.

Haefliger, V., 2015 : “Préparation à l’assimilation de hauteurs d’eau SWOT dans un modèle hydrologique distribué régional” Thèse de l’Université de Toulouse, soutenue le 23 novembre 2015.

Ichard, C., 2015 : “Estimation jointe de milieu et processus aléatoire par des techniques de filtrage non-linéaire : application aux prévisions météorologiques d’ensemble et aux trajectoires avions” le 25 septembre 2015. Accès au résumé.

Le Bras, J., 2015 : “Le micro-climat urbain à haute résolution : mesures et modélisation”, Thèse de l’Université de Toulouse, soutenue le 24 juin 2015.

Legrand, R., 2015 : “Utilisation des déformations spatiales en assimilation de données” le jeudi 10 décembre 2015 à 14h en salle Joël Noilhan. Accès au résumé.

Oger, N., 2015 : “Observation adaptative : limites de la prévision et du contrôle des incertitudes” le 2 juillet 2015. Accès au résumé.

Planton, Y., 2015 : “Source de la variabilité interannuelle de la langue d’eau froide atlantique” le mardi 10 novembre 2015 à 14h en salle de conférences Joël Noilhan. Accès au résumé.

Rainaud, R., 2015 : “Modélisation couplée océan-atmosphère pour l’étude des évènements météorologiques intenses en Méditerranée occidentale”, Thèse de l’Université de Toulouse, soutenue le 19 octobre 2015.

Ribaud,J.F., 2015 : “Étude tridimensionnelle de l’activité électrique, microphysique et dynamique d’une ligne de grain observée pendant la campagne HyMeX”,Thèse de l’Université de Toulouse, soutenue le 9 octobre 2015.

Rottner, L., 2015 : “Reconstruction de l’atmosphère turbulente à partir d’un lidar Doppler 3D et étude du couplage avec Meso-NH” le mercredi 2 décembre 2015 à 14h au CIC. Accès au résumé.

Verrelle, A., 2015 : “Modélisation de la turbulence dans les nuages convectifs profonds aux résolutions kilométrique et hectométrique”, Thèse de l’Université de Toulouse, soutenue le le 19 juin 2015.

Glossaire

Organismes et Laboratoires

Organismes

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

Laboratoires ou unités de recherche/développement

3SR	Laboratoire Sols – Solides – Structures – Rhéologie, UJF Grenoble/CNRS/Grenoble INP
CEREA	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOsphère
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM-GAME	Groupe d'études de l'Atmosphère MEtéorologique
CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques
CRA	Centre de Recherches Atmosphériques
DSO	Direction des Systèmes d’Observation (Météo-France)
GAME	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique
GSMA	Groupe de spectrométrie moléculaire et atmosphérique, UMR 7331 CNRS Université de Reims Champagne Ardennes
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l’Aménagement et des Réseaux
IGN	Institut Géographique National
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
LaMP	Laboratoire de Météorologie Physique

LATMOS	Laboratoire ATmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LAVUE	Laboratoire Architecture, Ville, Urbanisme, Environnement
LCP	Laboratoire Chimie et Procédés
LEGI	Laboratoire des écoulements physiques et industriels
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
LHSV	Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant
LIRIS	Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information
LISST	Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LPCEE	Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace
LPED	Laboratoire Population Environnement Développement
LRA	Laboratoire de Recherche en Architecture
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
RIU	Rhenish Institute for environmental research at the University of Cologne
SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement
WUT	Warsaw University of Technology (Politechnika Warszawska)

Programmes et projets nationaux et internationaux

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

Campagnes expérimentales

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

Autres sigles, abréviations ou acronymes

AIRS	Sondeur Infrarouge avancé
ALADIN	Aire Limitée Adaptation Dynamique et développement InterNational
AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
AMSU	Advanced Microwave Sounding Unit
AMSU-A	Advanced Microwave Sounding Unit-A
AMSU-B	Advanced Microwave Sounding Unit-B
ANASYG	ANAlyse Synoptique Graphique
ANTILOPE	ANalyse par spaTIaLisation hOraire des PrEcipitations
ARAMIS	Application Radar A la Météorologie Infra-Synoptique
ARGO	Array for Real time Geostrophic Oceanography
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Échelle
AROME-COMB	AROME - COMBinaison
AROME-PERTOBS	AROME (OBServations PERTurbées aléatoirement)
AROME-WMED	Configuration AROME sur la Méditerranée occidentale
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
AS	Adaptations Statistiques
ASAR	Advanced Synthetic Arperture Radar
ASCAT	Advanced SCATterometer
ASTEX	Atlantic Stratocumulus Transition EXperiment
ATM	Air Traffic Management - Contrôle du trafic aérien
ATMS	Advanced Technology Microwave Sounder
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BAS	British Antarctic Survey
BPCL	Ballon Pressurisé de Couche Limite
BSS	Score probabiliste « Brier Skill Score »
CALIOP	Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CANARI	Code d'Analyse Nécessaire à ARPEGE pour ses Rejets et son Initialisation
CAPE	Convective Available Potential Energy
CAPRICORNE	CAractéristiques PRIncipales de la COuveRture NuageusE
CARIBOU	Cartographie de l'Analyse du RIsque de Brume et de brOUillard
CAROLS	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
Cb	Cumulonimbus
CFMIP	Cloud Feedback Intercomparison Project
CFOSAT	Chinese-French SATellite
ChArMEx	Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment
CISMF	Centre Inter-armées de Soutien Météorologique aux Forces
CLAS	Couches Limites Atmosphériques Stables
CMC	Cellule Météorologique de Crise
CMIP5	5e phase du Coupled Model Intercomparison Project
CNRM-CM5	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM
CNRM-RCSM	Regional Climate System Model
COP	Contrat d'Objectifs et de Performances
COPAL	COmmunity heavy-PAyload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences
CPR	Cloud Profiling Radar
CrIS	Cross-track Infra-Red Sounder
CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France
DCSC	Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
DCT	Diffraction Contrast Tomography
DEM	Discrete Element Method
DMT	Dropplet Measurement Technologies
DP	Direction de la Production
DPR	Dual frequency Precipitation Radar
DPrévi	Direction de la Prévision
DSI	Direction des Systèmes d'Information (Météo-France)
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts
ECOCLIMAP	Base de données de paramètres de surface
EGEE	Etude du golfe de GuinEE

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

Organigramme du Centre National de Recherches Météorologiques

A la date du : 31.12.2015

Directeur : **Philippe Bougeault**

Directeur adjoint - Toulouse : **Marc Pontaud**
Directeur adjoint scientifique - Toulouse : **Philippe Dandin**
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**

CENTRE DE MÉTÉOROLOGIE MARINE — CMM - Brest
Chef de division : **Gilbert Emzivat**

GROUPE DE MODÉLISATION POUR L'ASSIMILATION ET 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 : **Serge Planton**

GROUPE DE MÉTÉOROLOGIE DE MOYENNE ÉCHELLE — GMME - Toulouse
Chef de division : **Véronique Ducrocq**

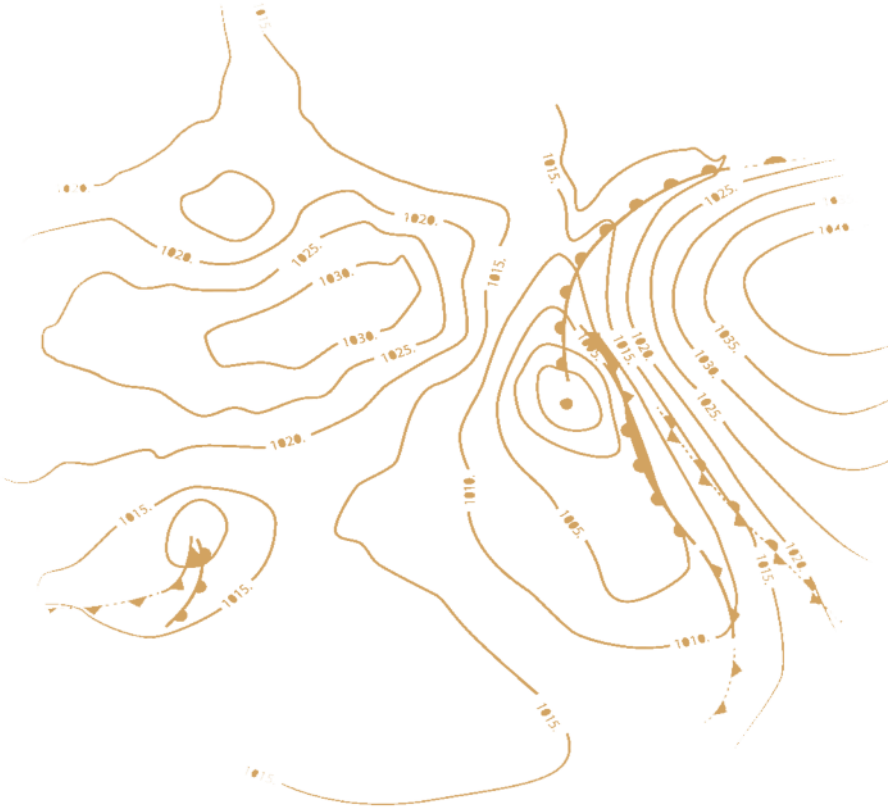
SERVICES COMMUNS — SC - Toulouse
Responsable : **Marc Pontaud**

Nota :
Le GAME est l'Unité Mixte de Recherche entre Météo-France et le CNRS.
Les unités sur fond bleu foncé sont entièrement incluses dans le GAME,
celles sur fond bleu clair sont partiellement incluses dans le GAME.

SAFIRE 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

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 60 07 96 00
http://www.cnrm-game.fr
Mail : contact@cnrm.meteo.fr



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Création DIRCOM/CGN

Météo-France est certifié ISO 9001
par Bureau Veritas Certification
© Météo-France 2016
Dépôt légal avril 2016
ISSN : 2116-438X