



Météo-France

**Rapport
Recherche
2011**



METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

Rapport Recherche 2011

Sommaire

Modèles pour la prévision du temps ● page 6

Prévision numérique du temps
Recherche et développements autour du modèle AROME
Prévision d'ensemble

La recherche au service de l'aéronautique ● page 18

Étude des phénomènes météorologiques ● page 20

Étude du climat et du changement climatique ● page 26

Climat
Changement climatique

Études environnementales liées à l'atmosphère ● page 32

Hydrométéorologie
Océanographie (modélisation et instrumentation)
Chimie atmosphérique et qualité de l'air
Étude du manteau neigeux et des avalanches

Instrumentation et campagne d'observation pour la recherche ● page 42

Instrumentation *in situ* – télédétection
Campagnes de mesures

Annexes ● page 50



La politique de recherche de Météo-France a pour finalité principale d'aider l'établissement à remplir de mieux en mieux sa mission, « surveiller l'atmosphère, l'océan superficiel et le manteau neigeux, anticiper leurs évolutions et diffuser les informations correspondantes ». Le décret de création de Météo-France précise également que les activités de recherche doivent « participer à l'amélioration de l'observation et de la connaissance de l'atmosphère et de ses interactions avec les autres milieux naturels, les activités humaines et le climat ».

Ce Rapport Recherche 2011 illustre bien la variété des activités auxquelles conduisent les missions évoquées ci-dessus. Le développement des outils de la prévision numérique du temps et du climat se poursuit à un rythme accéléré. L'exploitation des grandes campagnes de mesures fournit son lot de résultats scientifiques. La mise au point de nouvelles techniques de mesures et stratégies d'observations est également un axe majeur d'activités, notamment au service des missions de Météo-France au service de l'aéronautique. La recherche à Météo-France couvre ainsi un ensemble d'activités allant de l'amont aux applications, déployées aussi bien dans des laboratoires associés au CNRS ou aux Universités que dans des services plus proches de l'opérationnel.

Au centre de ce dispositif, le Centre National de Recherches Météorologiques a la triple mission de conduire des recherches de haut niveau, de coordonner la R&D des autres services de l'établissement et de promouvoir les partenariats avec d'autres organismes nationaux ou étrangers. Il porte notamment l'essentiel de la participation de Météo-France à AllEnvi, l'alliance des organismes de recherche sur l'environnement.

L'année 2011 a marqué une étape importante dans le rapprochement entre le CNRM et l'Observatoire Midi-Pyrénées de Toulouse, structure universitaire forte de près de mille chercheurs et ingénieurs en environnement. Météo-France est maintenant tutelle de l'Unité Mixte de Service qui gère les moyens de l'OMP, et représenté dans le Conseil d'Administration de ce dernier. Nous avons également décidé de recaler nos contrats quinquennaux avec l'AERES et le CNRS sur ceux de l'OMP. Une évaluation intermédiaire a été demandée à l'AERES, et réalisée début 2012. Elle a confirmé le haut niveau et la productivité croissante du GAME, le laboratoire associé au CNRS qui comprend la presque totalité des équipes du CNRM. D'ici à 2014, une prospective scientifique pleinement intégrée avec les laboratoires de l'OMP sera préparée.



© Camille Luxen

En 2011, le CNRM-GAME a finalisé sa contribution au 5ème rapport du GIEC. Il a mis en chantier de nouvelles évolutions des systèmes de prévision numérique du temps, et il a conduit plusieurs expériences de terrain. Il a fortement contribué à la définition des objectifs du Contrat d'Objectifs et de Performance 2012-2016 de Météo-France, et à l'exercice quinquennal de Prospective Océan-Atmosphère du CNRS. Les divers articles du présent rapport illustrent ces contributions.

Bonne lecture !



Philippe Bougeault
Directeur du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
et du Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique (GAME).

Modèles pour la prévision du temps

Prévision numérique du temps

Les applications opérationnelles de prévision numérique du temps mises à disposition des prévisionnistes de Météo-France et de ses clients connaissent une phase de consolidation. Ainsi, le jeu de quatre systèmes à domaine limité à résolution de 8 km Aladin déployé sur quatre régions outre-mer a été complété par des analyses des conditions de surface. Les systèmes d'observation assimilés ont continué d'être enrichis. On en trouvera des exemples dans les pages qui suivent, choix incomplet qui ne peut évoquer tous les instruments dont on prépare l'utilisation. Dans cet esprit de consolidation, un défaut bien connu du modèle global ARPEGE reçoit un début de solution : une modification du schéma de convection profonde, décrite avec plus de détails plus loin, limite la formation de vortex de petite taille intempestifs au sein des dépressions actives. Le modèle AROME d'échelle convective bénéficie quant à lui d'une remise à niveau du réseau de données d'humidité déduite du GPS, d'une amélioration de la prévision de nuages bas et d'un nouveau diagnostic de risque de grêle (figures A et B). Quelques nouveautés significatives se préparent pour l'année prochaine, par exemple du côté de l'assimilation et la prévision d'ensemble. La phase actuelle est aussi mise à profit pour avancer sur des projets de fond qui échappent à la lumière des projecteurs mais préparent l'avenir. Une refonte ambitieuse du code commun avec le CEPMMT et les pays Aladin et HIRLAM est désormais engagée. L'appel d'offres pour le prochain calculateur et les versions nouvelles d'étalonnage des modèles qui l'accompagnent est lancé. Une nouvelle infrastructure commune à l'expérimentation numérique et à l'exploitation des modèles commence à prendre forme, avec l'objectif de simplifier le passage de l'une à l'autre.

1

Autour de la prévision de chute de grêle d'AROME du 23/08/2011 00 UTC pour les échéances +5h à +9h (les couleurs jaune et rouge du champ prévu indiquent l'intensité), quelques éléments de vérification : une image de réflectivité à 06 UTC en haut à gauche, une image du satellite NOAA16 un peu plus tard, alors que le système approche la frontière en bas à gauche et quelques grêlons tombés à Bavay (59) vers 07 UTC (d'après une photo mise à disposition par le site de l'association Keraunos, <http://www.keraunos.org>).

Modélisation de la dynamique spatio-temporelle des corrélations d'erreur de prévision

Dans les systèmes d'assimilation de données, la distribution géographique des covariances d'erreur de prévision permet de spatialiser les écarts entre observations et ébauche de champ. La modélisation de ces covariances s'appuie sur une assimilation d'ensemble, composée actuellement de six membres, et qui simule l'évolution des erreurs d'analyse et de prévision. Elle repose aussi sur des outils qui filtrent le bruit d'échantillonnage lié à un ensemble de petite taille. Ces outils ont d'abord été développés pour les variances locales d'erreur, tandis que les corrélations spatiales restent actuellement homogènes et statiques. Une modélisation en « ondelette » est expérimentée pour extraire une information robuste sur la dynamique spatio-temporelle des cor-

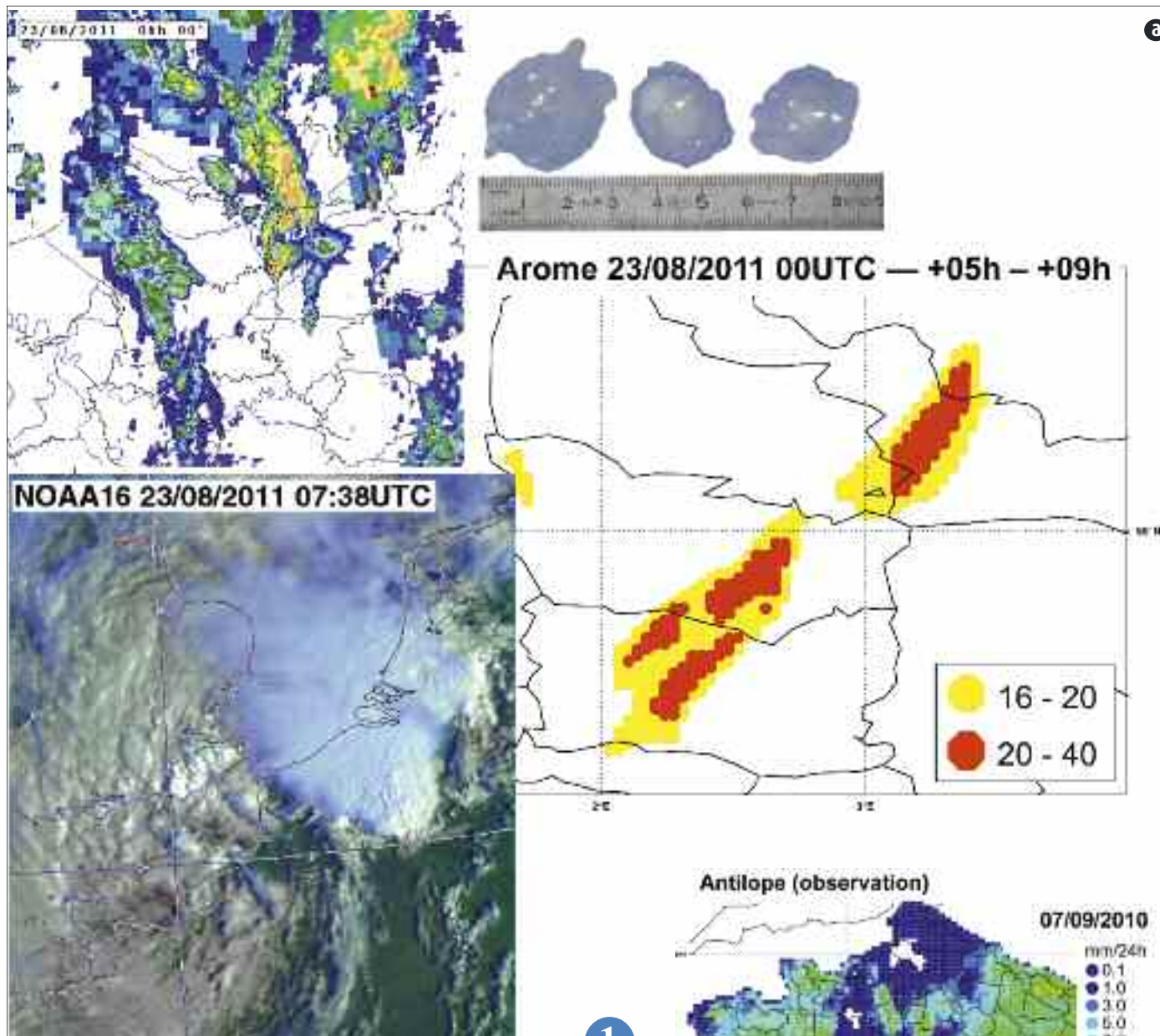
rélations. Cela est illustré sur la figure ci-jointe, qui correspond aux variations géographiques des portées des corrélations du vent, pour une période hivernale de quatre jours. On peut noter que les portées sont plus grandes sous les Tropiques, en lien avec les ondes tropicales de grande échelle. Sur cette période là, les portées sont petites à l'Est des Etats-Unis et à proximité de l'Europe, ce qui est relié à l'occurrence de cyclogenèses marquées par des gradients de vent relativement forts.

Les études d'impact indiquent que l'utilisation d'une telle moyenne temporelle glissante des corrélations sur quelques jours a un impact positif sur la qualité des prévisions, par rapport aux corrélations homogènes et statiques. Ces résultats confortent

également l'idée d'augmenter la taille de l'ensemble utilisé, afin de décrire plus précisément la dynamique des corrélations d'une journée à l'autre, ainsi qu'au sein d'une même journée. Cela permettrait aussi de mieux initialiser la prévision d'ensemble associée.

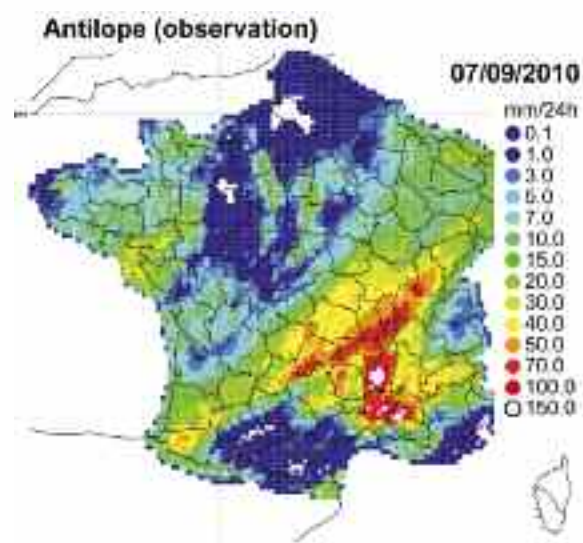
2

Portées horizontales (en km) des corrélations d'erreur de prévision du vent vers 500 hPa (iso-couleurs, en hPa), moyennées sur la période du 24 au 27 février 2010. La portée d'une fonction locale de corrélation est une mesure de son extension spatiale.

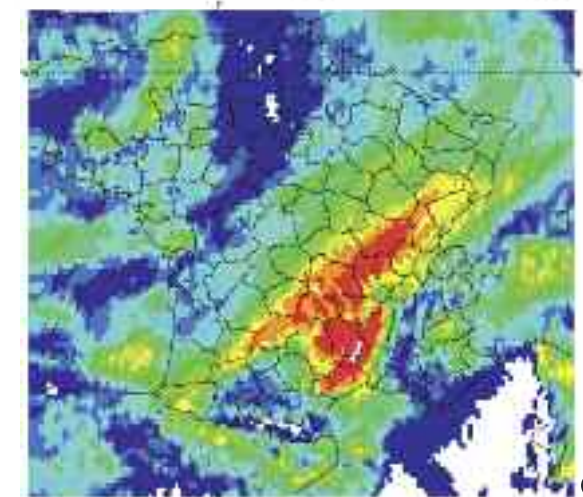
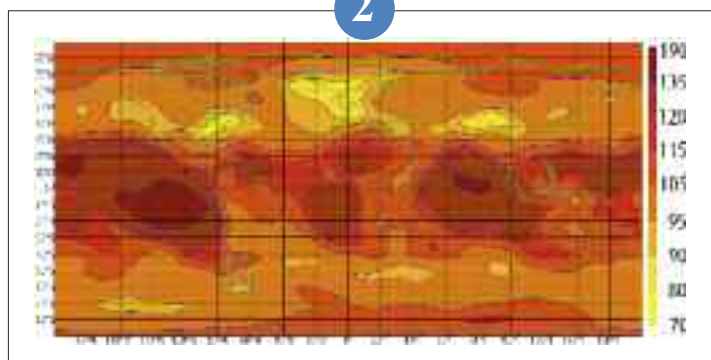


1

Prévision de la situation d'alerte rouge de septembre 2010 effectuée avec ARPEGE muni d'une nouvelle version de son schéma de paramétrisation de la convection profonde. En haut, une indication des précipitations observées en 24h le 07/09/2010, en bas, la prévision. La prévision opérationnelle était déjà très informative : il s'agit ici de vérifier que, bien que plus actif au voisinage de systèmes frontaux, le schéma de convection préserve son comportement dans le contexte d'une situation cénovole convective. La prévision du maximum de précipitations est un peu améliorée.



2



Modification du schéma de convection profonde dans ARPEGE

La convection profonde joue un rôle essentiel en prévision du temps comme dans le climat terrestre. Mais elle se tient à petite échelle. Aussi, une paramétrisation physique est utilisée dans les modèles globaux de prévision du temps et de climat pour représenter les processus associés et leurs effets sur l'évolution temporelle des variables d'état du modèle.

Dans le modèle ARPEGE, cette paramétrisation présente des faiblesses, notamment une sous-estimation des transferts verticaux d'énergie dans certaines conditions, conduisant à l'occurrence de sous-systèmes hyperactifs de petites dimensions spatiales au sein de dépressions actives. Des modifica-

tions ciblées ont été réalisées dans ce schéma pour le rendre plus énergétique en fonction de caractéristiques locales de l'écoulement, telles qu'une importante vitesse verticale dans les basses couches. L'idée est de rendre le mélange vertical convectif plus actif lorsqu'apparaissent les prémices d'une circulation cyclonique locale irréaliste. Ce changement limite sensiblement la formation de vortex de petite taille intempestifs, sans affecter le comportement général du modèle et ses scores. La capacité du système ARPEGE à simuler les tempêtes aux moyennes latitudes est conservée. Cette modification affecte aussi les cyclones tropicaux qui se creusent moins.

Une révision complète de la paramétrisation de la convection est engagée par ailleurs avec le développement d'un nouveau schéma incluant plusieurs variables convectives comme nouvelles variables d'état, mémoire de l'activité convective au fil de l'évolution.

3

Assimilation des données du radiomètre SEVIRI sensibles à la surface dans le modèle ALADIN

Les données dans l'infrarouges du radiomètre SEVIRI à bord du satellite géostationnaire MSG sont assimilées dans les modèles à domaine limité AROME et ALADIN. Les mesures sont effectuées dans 12 canaux spectraux avec une résolution spatio-temporelle sans précédent (1 image toutes les 15 minutes, à 3 km de résolution horizontale). Elles donnent des informations utiles sur l'état de l'atmosphère (en température et humidité) à différentes altitudes. Toutefois, les observations de SEVIRI qui renseignent sur les très basses couches de l'atmosphère sont rejetées au-dessus des continents. Cela vient d'une représentation trop peu précise de la température de surface. Pour améliorer cela, une nouvelle température de surface a été déduite des observations de SEVIRI. Elle utilise un atlas d'émissivité de surface. La comparaison de cette température à des estimations indépendantes a fourni des résultats satisfaisants. Grâce à cette température restituée, les observations de SEVIRI sensibles à la surface ont pu être assimilées dans le modèle ALADIN sur une période de 3 mois. Par rapport aux analyses/prévisions du modèle opérationnel (sans données SEVIRI sur terre), on peut noter l'assèchement significatif de l'air au-dessus de l'Espagne étayé par d'autres observations d'humidité. Ces développements seront prochainement utilisés dans les versions opérationnelles du modèle AROME.

4

Amélioration de la représentation des processus de surface dans les ALADIN Outre-Mer

Des systèmes de prévision ALADIN ont été déployés fin 2010 sur trois zones d'Outre-Mer : la Polynésie, la Nouvelle-Calédonie et la région Antilles-Guyane. Ils sont venus compléter celui qui existe depuis plusieurs années sur le sud-ouest de l'océan Indien avec comme vocation première la prévision des cyclones tropicaux en soutien au CMRS de La Réunion. Ces modèles, qui disposent de leur propre système d'assimilation de données, permettent de disposer de champs météorologiques plus précis que ceux élaborés par les modèles globaux.

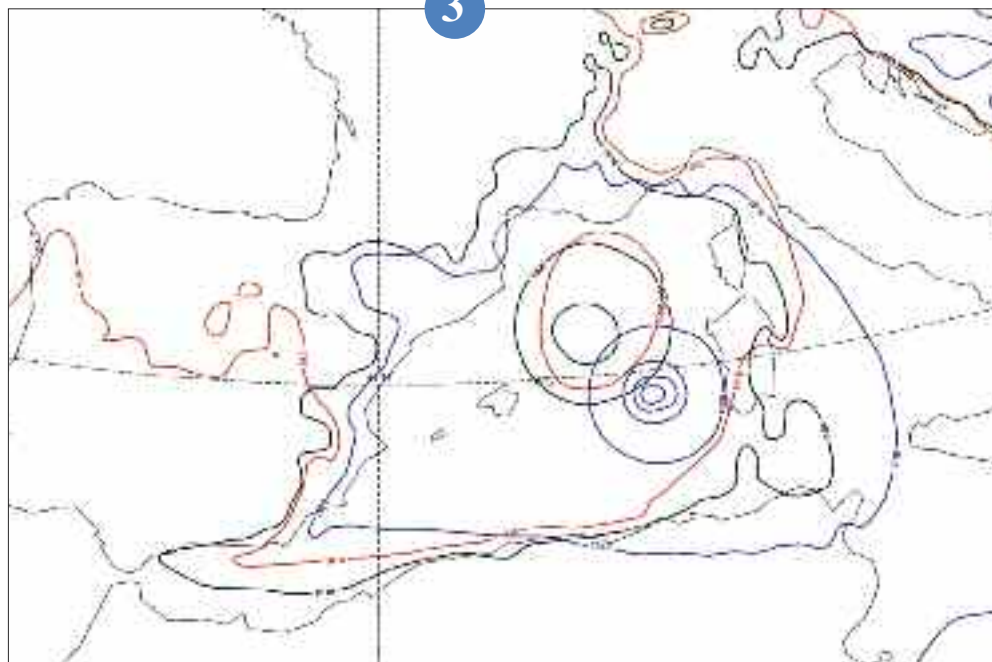
Plusieurs développements menés en 2011 ont été introduits opérationnellement en septembre ; ils améliorent notamment la représentation des processus de surface. En premier lieu, le relief et le masque terre-mer du modèle sont déterminés à partir de bases de données plus récentes et surtout plus fines (1 km au lieu de 5 km). L'utilisation du schéma pronostique CANOPY, qui décrit les

variables atmosphériques sur plusieurs niveaux définis très près de la surface sur les continents, permet de mieux simuler la couche limite de surface, en particulier le cycle diurne. Enfin, une analyse de ces variables de surface est maintenant réalisée, à partir d'observations conventionnelles, toutes les 6 heures.

Les prochains travaux se concentreront sur la mise en œuvre d'une version plus sophistiquée du schéma de surface lui-même (SURFEX) et la simplification des formats de sortie des données pour en faciliter l'accès aux utilisateurs.

5

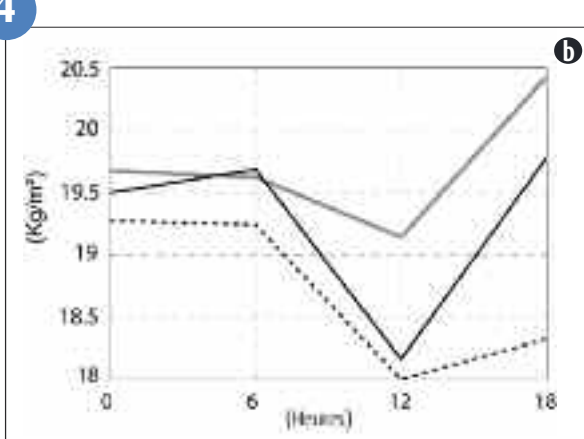
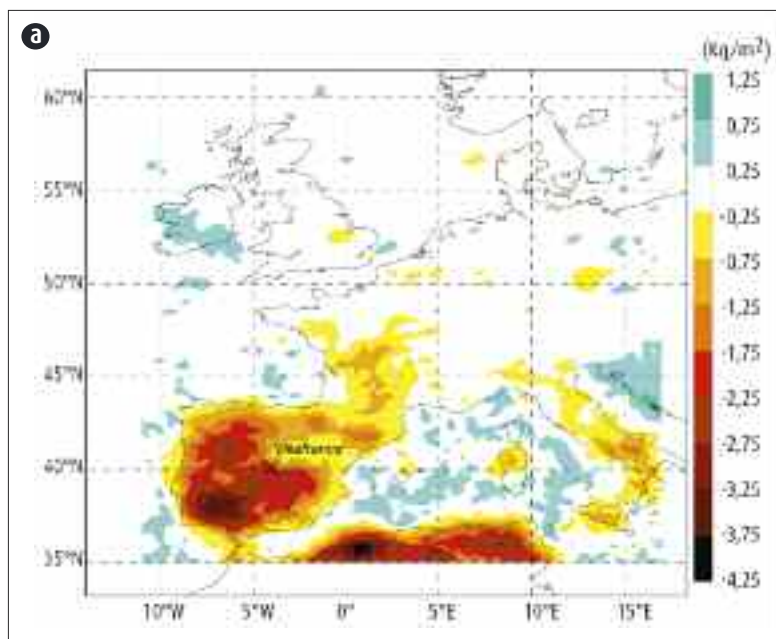
3



Pressions au niveau de la mer (en hPa) valides pour le 8 novembre 2011 à 0h UTC : analyse (en rouge) et prévisions à 72h d'échéance par deux versions du modèle Arpege, avec (en noir) et sans (en bleu) les modifications de convection.

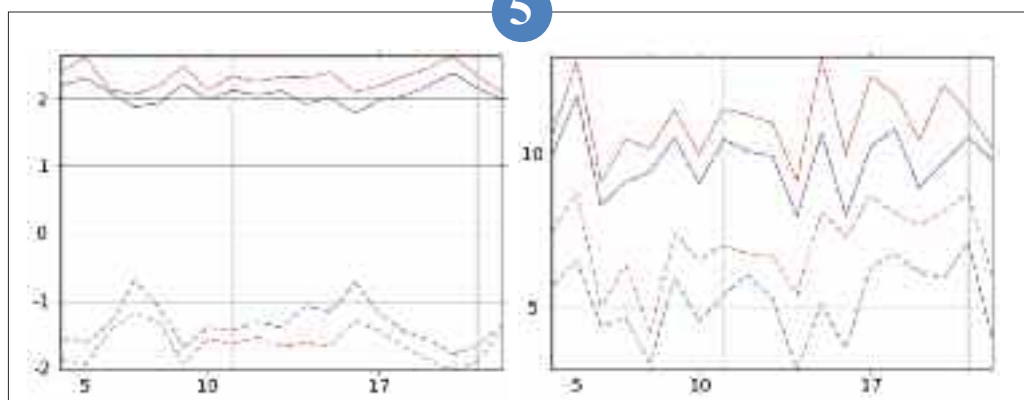
Valeurs moyennes de TCWV mesurées à la station Villafranca (courbe pointillés noirs), analysées dans EXP (avec SEVIRI sur terre, courbe noire) et dans CTL (courbe grise) à 0, 6, 12, et 18 UTC et sur une période de 45 jours (1 Septembre - 15 Octobre 2009).

4



Différences moyennes d'analyses à 12h de contenu intégré en vapeur d'eau (TCWV) entre une expérience avec SEVIRI sur terre (EXP) et une expérience de contrôle (CTL, sans SEVIRI sur terre) sur une période de 45 jours (1^{er} Septembre - 15 Octobre 2009). Le dégradé de rouge (bleu) indique un assèchement (humidification) de l'analyse EXP.

5



Exemple d'amélioration sur le domaine Antilles-Guyane : comparaison aux observations de surface de 19 prévisions d'échéance 24h, extraites d'une simulation réalisée du 3 au 21 juillet 2011 (dates précisées sur l'échelle horizontale), pour la température à 2 mètres (graphique du gauche) et l'humidité à 2 mètres (graphique du droite). Les courbes en bleu correspondent à la nouvelle version du modèle, celles en rouge à l'ancienne ; en trait plein est représenté l'écart quadratique moyen des différences modèle-observation, en trait pointillé le biais de ces différences, exprimés en degrés pour la température et en pourcentage pour l'humidité.

Simulations 1D de couches limites nuageuses évolutives dans le cadre du projet EUCLIPSE

La représentation des nuages dans les modèles de prévision numérique et de climat est un enjeu primordial ; ainsi, les rétroactions nuageuses constituent une source majeure d'incertitude dans l'analyse du changement climatique. Cette problématique est au cœur du projet européen EUCLIPSE (2010-2014).

Dans le cadre de ce projet, des simulations ont été réalisées avec la version « colonne » (SCM) des modèles globaux ARPEGE, opérationnel et Climat, et du modèle de méso-échelle Arome. La comparaison des processus nuageux simulés par les modèles haute résolution (LES) et les SCM permet d'identifier et d'évaluer les déficiences des représentations de ces processus dans les modèles de grande échelle. Les situations étudiées sont des cas de transitions, entre des nuages à faible développement vertical type stratocumulus vers des nuages plus développés type cumulus, fréquemment observées sur les océans tropicaux.

Les résultats des trois modèles testés sur l'expérience ASTEX (1992) exhibent généralement une sous-estimation de l'altitude du sommet du nuage et de l'élévation de la base du nuage, sauf pour le modèle Arome pour lequel la base du nuage est trop élevée. Dans le cas du modèle de climat, ce défaut est lié à un processus de convection trop actif ; l'introduction d'une valeur minimale de l'altitude du nuage de convection améliore nettement le développement vertical du nuage simulé.

Ces cas 1D de transition stratocumulus/cumulus contribuent à l'élaboration d'une importante base de tests 1D pour évaluer et calibrer les représentations des processus sous-maille dans les différents modèles de Météo-France.

6

Estimation de la déformation de champs texturés : application à l'assimilation de données

Quel est le point commun entre la sirène d'une ambulance lancée à pleine vitesse, la photographie d'une pelouse et une erreur de prévision en météorologie ? Bien que ces trois exemples évoluent dans des dimensions d'espaces différentes, ils partagent une propriété commune, celle d'être « modélisable » par la déformation d'un motif à l'origine stationnaire. La texture d'une photographie est déformée par l'effet de la perspective. Le son d'une sirène est déformé par effet Doppler. Enfin, les erreurs de prévisions météorologiques sont localement déformées notamment par le flux atmosphérique. L'estimation et la représentation des covariances d'erreurs de prévision est un sujet de recherches actives en assimilation de données. Cette nouvelle modélisation s'appuie donc sur des idées et algorithmes développés dans la communauté de la vision

artificielle. Plus précisément, l'algorithme consiste à effectuer la convolution des signaux avec des « ondelettes » continues de différentes échelles et orientations, afin de repérer les directions où le signal est étiré. Il est ensuite possible d'estimer le gradient relatif de la déformation, puis de retrouver la déformation elle-même. Une première application à l'échelle convective montre que la méthode permet de représenter des fonctions de structure réalistes, en particulier anisotropes. La méthode semble particulièrement adaptée aux contraintes de l'assimilation de données en grandes dimensions. Elle devrait enfin faire l'objet d'une extension en géométrie sphérique dans le cadre du chantier MoMa du RTRA-STAE.

7

Potentiel des méthodes de correction des conditions initiales pour la prévision de phénomènes météorologiques remarquables

Les erreurs dans l'analyse de l'état initial de l'atmosphère sont une source importante de défaillance des modèles. Un outil permettant de corriger l'état initial du modèle global de Météo-France, ARPEGE, a été développé au Laboratoire de prévision et utilisé pour mener une étude de sensibilité aux conditions initiales d'humidité sur la situation du 14 au 15 Juin 2010 marquée par de très fortes précipitations sur la région de Draguignan (Var).

La comparaison entre les images du satellite Meteosat dans les canaux vapeur d'eau et le champ d'humidité de moyenne troposphère permet de critiquer les conditions initiales et de proposer des corrections. Le champ de topographie d'une surface d'humidité spécifique donnée est alors modifié en accord avec les observations satellites, les corrections étant ensuite reportées sur la verticale de l'atmosphère par une méthode variationnelle 1D.

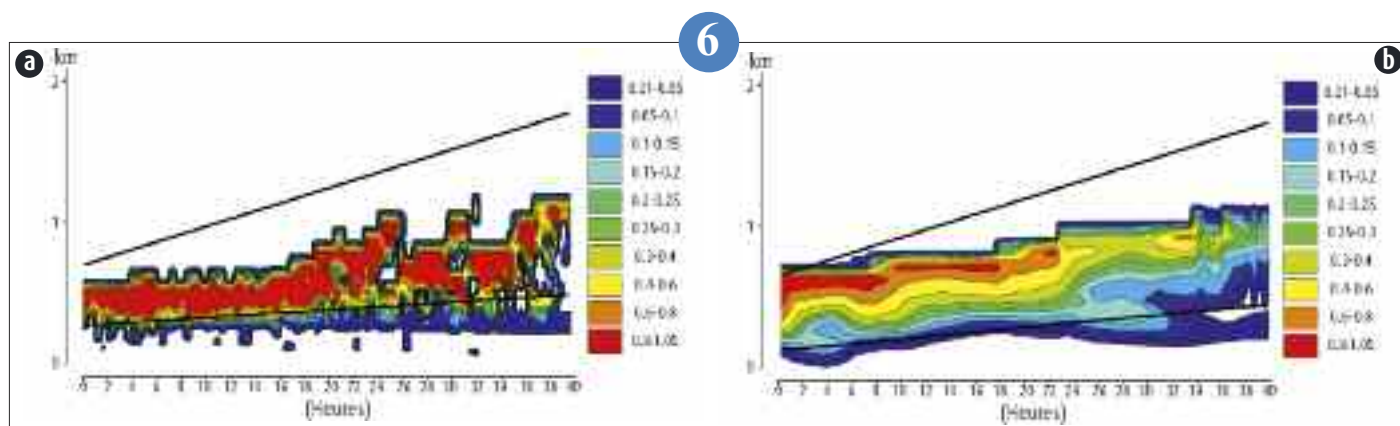
Une correction a été apportée dans le sens d'humidifier la condition initiale dans la région d'apparition de la convection organisée et d'assécher en amont (figure a). La figure b montre un impact significatif de la modification sur la lame d'eau prévue. La phase initiale du système est également mieux prévue (non montré ici) avec des forts cumuls dès les premières échéances.

Cette méthode de modification des conditions initiales permet de relier un effet (dans la prévision du temps sensible) à une cause (dans les conditions initiales) et ouvre de larges perspectives dans la compréhension des phénomènes météorologiques intenses tels que les tempêtes ou les orages violents.

8

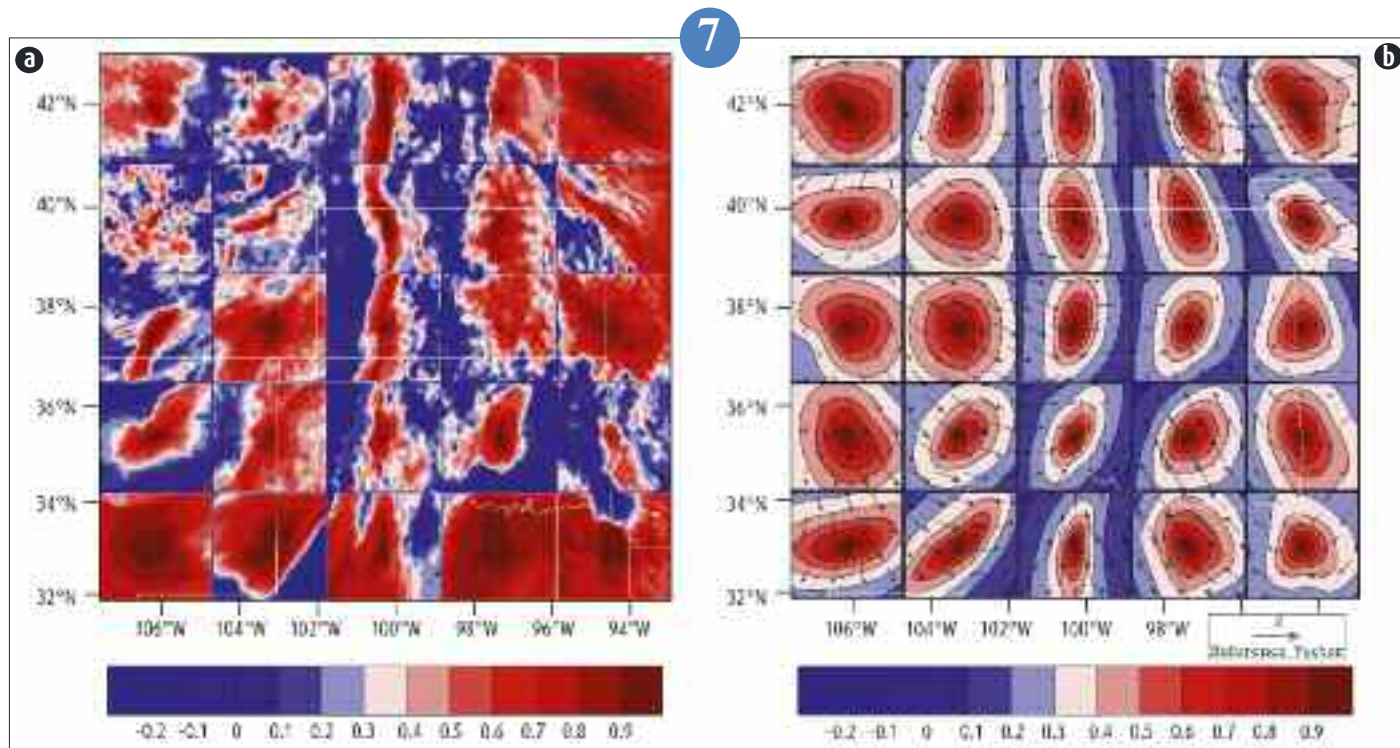
La figure de gauche représente l'humidité relative à 600 hPa de l'analyse ARPEGE (contours marrons tous les 10%). En gras=90%) superposée à l'image vapeur d'eau Meteosat dans le canal 7.3 m (le 15 juin à 06 UTC). La figure met en évidence une région d'air relativement sec dans les observations (zone sombre), orientée nord-sud, s'étendant du Languedoc à l'Afrique du nord et mal représentée dans les conditions initiales. On humidifie donc la condition initiale dans la région d'apparition de la convection organisée (contours rouges tous les 35%) et on assèche en amont (contours bleus). Sur la figure de droite est représenté le champ d'humidité relative à 600 hPa, après modification, superposé à l'image Meteosat.





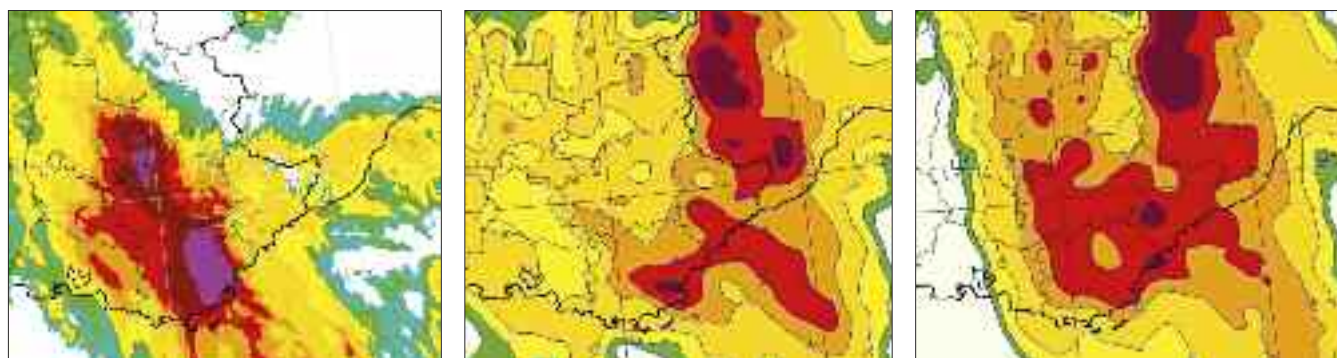
▲ Évolution du profil vertical de la nébulosité durant les 40 heures de simulation. Les deux lignes noires correspondent à la base et au sommet du nuage simulés dans les expériences haute-résolution (LES).

a) Version Climat d'ARPEGE. b) Version opérationnelle d'ARPEGE.



▲ Fonctions de structure de l'assimilation en 5x5 points du domaine de prévision (a) échantillonnées directement sur un ensemble de 30 membres et (b) modélisées par la méthode des déformations spatiales (corrélations spatiales des erreurs de prévision de la variable humidité spécifique à la surface en Mai 2007 lors d'une situation orageuse au dessus des Etats-Unis). La méthode des déformations spatiales (b) permet de représenter l'étiement des fonctions de structure au centre du domaine suite à la présence d'une ligne de convergence ainsi que leur élargissement au bord du domaine dû au couplage avec un modèle de plus grande échelle, tout en filtrant le bruit de petite échelle apparent sur l'échantillonnage brut (a).

Lame d'eau observée (à gauche) et prévue entre le 15 juin à 06 UTC et le 16 juin à 06 UTC. (Rouge=70-100mm, Marron=100-150mm et Rose >150mm).
Au milieu, prévision opérationnelle du 15 à 06 UTC et à droite, prévision obtenue après modification du champ d'humidité. On notera une augmentation des précipitations à l'intérieur des terres sur le Var avec les prévisions modifiées ainsi qu'une diminution sur mer en accord avec les observations.



Tracés objectifs des ANASYG-PRESYG

Des études de tracés objectifs des ANASYG et PRESYG sont effectués depuis plusieurs années au laboratoire de prévision. Le but est de faciliter le travail des prévisionnistes en leur fournissant une ébauche de tracé de ces documents à partir des sorties de modèles numériques. Charge ensuite aux prévisionnistes de finaliser et valider le document à partir de l'ébauche.

Les procédures actuelles du LABO sont conçues pour tracer automatiquement les champs de pression réduite au niveau de la mer, les courants jet, les anomalies de PV

(Potential Vorticity dont la traduction française est Tourbillon Potentiel), d'altitude ainsi que les fronts (froids, chauds, occlusions, pseudo-fronts).

Des améliorations ont été apportées au cours des deux années écoulées concernant le tracé des fronts, avec en particulier l'utilisation de l'entropie de l'air humide à la place de la température pseudo-potentielle saturée, pour avoir des gradients horizontaux plus intenses et mieux discriminants. De plus, une partie des algorithmes de Tim Hewson, qui a codé le tracé des fronts dans les modèles du CEPMMT,

a été utilisée pour obtenir des limites frontales plus nettes et plus continues. Un exemple de comparaison entre les tracés objectifs faits au LABO et ceux faits par les prévisionnistes est présenté (figures a et b).

Des cartes produites de manière quotidienne vont être mises en visibilité pour les prévisionnistes à partir de l'hiver 2011-12, dans l'attente de développements qui permettraient de manipuler les objets (à valider/modifier/enlever).

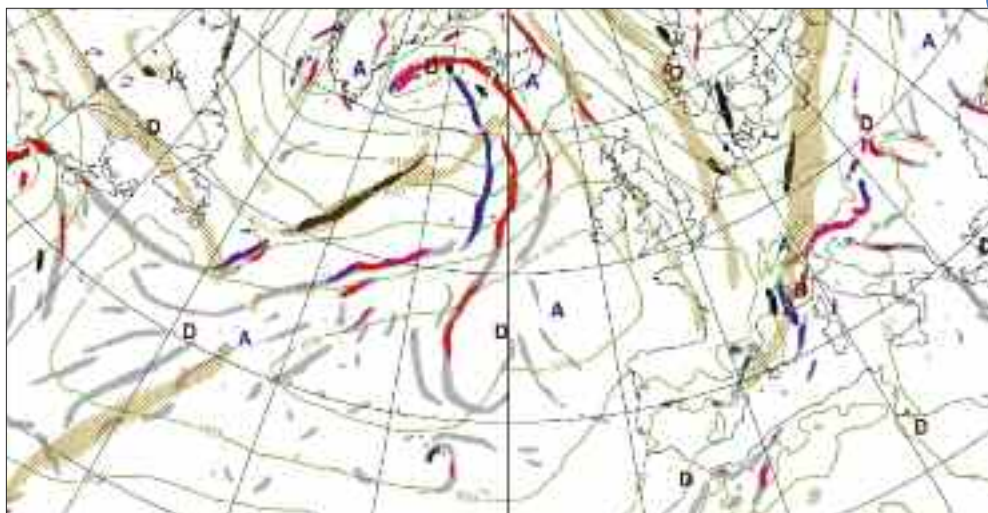
9

a



Tracé du PRESYG fait par le Centre National de Prévision de Météo-France à Toulouse et correspondant à la figure a.

9



Tracé objectif du PRESYG correspondant à une prévision à 24h d'échéance pour le modèle ARPEGE (base le 19 octobre 2011 à 00 UTC, pour le 20 à 00 UTC). Par comparaison avec la figure b, on remarquera un assez bon placement des courants jet (zones hachurées marron), des anomalies d'altitude (lignes noires épaisses) ainsi que des fronts chauds (rouge) et froids (bleu). Les fronts (chauds, froids ou occlus) correspondent à des limites bien visibles à la fois en terme de contraste « thermique » (en fait pour l'entropie humide) et en terme de tourbillon absolu. Les pseudo-fronts correspondent à de simples limites « thermiques » et ils sont indiqués en gris. Ils permettent de prolonger ou de relier entre elles les vraies structures frontales.

Recherche et développements autour du modèle AROME

Utilisation accrue des données GPS terrestres dans le modèle AROME-France

Le réseau européen de stations de réception de GPS est déployé dans un contexte à la fois géodésique et météorologique. Les données collectées sont traitées par plusieurs centres d'analyse qui produisent des délais zénithaux (ZTD) disponibles en temps quasi-réel. Ces ZTD sont fortement corrélés au contenu intégré en vapeur d'eau et sont utilisables directement dans les assimilations de type variationnel. Ils ont été introduits dès 2006 dans le modèle opérationnel ARPEGE et en 2008 dans AROME, avec toutefois une grande prudence face à un réseau en forte croissance et à la qualité erratique.

Ces dernières années, le réseau de GPS terrestre a continué de s'étoffer et la qualité des données a atteint un niveau remarquable. Ainsi, près d'un millier de stations sont désormais disponibles sur le domaine AROME-France. Plusieurs études d'impact ont été menées pour évaluer l'intérêt d'une augmentation substantielle de leur utilisation. Avec cinq fois plus de données assimilées, les résultats sont positifs en termes de scores classiques, mais aussi d'amélioration de la prévision localisée. C'est notamment le cas pour l'épisode de précipitation exceptionnel du Var (15 juin 2010) qui a été rejoué dans le cadre d'un modèle AROME-WMED centré sur la Méditerranée, en préparation de la campagne HYMEX. La prévision à très courte échéance du début de l'épisode pluvieux a été significativement améliorée par l'accroissement du nombre de ZTD (voir illustration). Sur la base de ces résultats, l'utilisation extensive des GPS terrestres a été rendue opérationnelle dans AROME en septembre 2011.

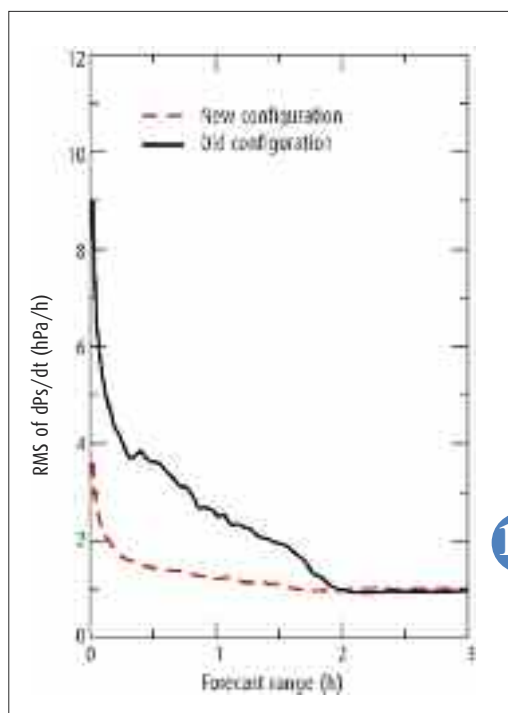
10

Augmenter la fréquence des analyses d'AROME

Le système de prévision opérationnel AROME, résolvant l'échelle des gros systèmes convectifs, a besoin d'incorporer régulièrement un maximum d'observations afin de suivre au plus près la réalité de l'évolution météorologique observée. Ce procédé dit d'assimilation de données est actuellement réalisé toutes les 3 heures. L'augmentation de sa fréquence doit permettre de tirer profit des observations à haute fréquence temporelle comme les données des radars. La faisabilité de cette augmentation est limitée par la présence d'une phase d'ajustement physico-numérique dans les premières échéances d'une prévision (« spin-up ») : pour des cycles d'assimilation de période inférieure à 3 heures, ces déséquilibres s'accumulent d'un réseau à l'autre au détriment de la qualité des prévisions. Des travaux initiaux portant notamment sur le choix du fichier de couplage initial et des statistiques d'erreur du modèle représentatives des

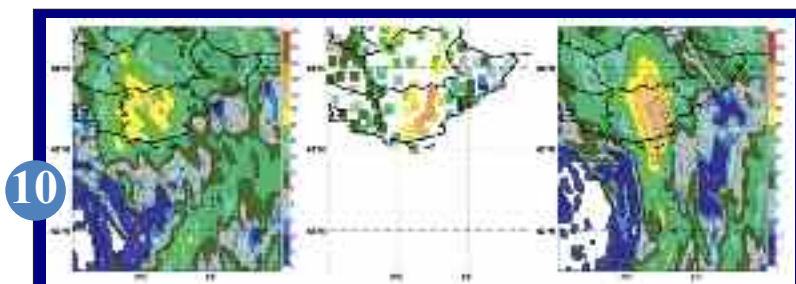
échelles résolues par celui-ci, ont permis la mise en place d'un cycle d'assimilation de période 1 heure en réduisant fortement les sources de « spin-up » (voir figure). Le nombre d'observations radar et d'observations de couche limite assimilées dans le système s'en trouve alors multiplié par trois. Toutefois, la qualité des prévisions qui en sont issues n'est pas meilleure en moyenne pour le moment, et certains scores sont même détériorés par rapport au cycle de période 3 heures. L'utilisation de méthodes de filtrage numérique est donc en cours d'évaluation pour tenter d'éliminer le spin-up résiduel pouvant être encore à l'origine de ces dégradations. D'autres pistes d'amélioration sont envisagées concernant notamment le poids relatif de certains types d'observations.

11



Évolution au cours d'une prévision d'AROME de l'écart type de la tendance de pression de surface sur tout le domaine d'intégration. Les fortes valeurs non météorologiques dans les premières échéances, signature de la présence de « spin-up » ou d'ajustement initial, sont fortement réduites entre l'ancienne (courbe noire pleine) et la nouvelle (courbe rouge en petits tirets) configuration du système. Cette réduction est une condition nécessaire pour effectuer des analyses plus fréquentes.

11



10

Prévision à très courte échéance des précipitations en mm cumulées sur 6h dans le cas du Var (le 15 juin 2010 de 09 UTC à 15 UTC). À gauche : la prévision réalisée avec un faible nombre de GPS terrestres. À droite : celle avec une utilisation extensive des GPS terrestres. Au centre : les observations de pluviomètres.

Vers une interprétation sous la forme d'objets probabilistes des prévisions de précipitations AROME

Les modèles à haute résolution reproduisent avec un grand réalisme des structures météorologiques complexes. Néanmoins, il est fréquent d'observer des décalages dont l'ordre de grandeur est une des tailles caractéristiques de la structure elle-même. Il est donc important de proposer une solution pour spatialiser l'information et estimer l'incertitude.

En collaboration avec l'équipe Fluminance de l'INRIA, nous avons mis au point dans ce but un algorithme de suivi automatique de structures précipitantes prenant en compte la texture des précipitations prévues par le modèle. Un tel objet est défini par un ensemble de contours 2D et par un histogramme de précipitations. Le déplacement de l'objet est obtenu en déplaçant chaque contour avec un champ de vitesse déduit de la conservation du flot optique. En tenant compte de l'information contenue dans la prévision, tous les contours ainsi déplacés et déformés

ne sont pas satisfaisants : une étape de sélection est nécessaire. Si l'histogramme des précipitations associé à un contour donné est proche de celui caractérisant la structure, alors ce contour est sélectionné. À l'inverse, le contour est délaissé. La position de l'objet est alors donnée par le contour moyen, tandis que l'incertitude est caractérisée par la variance des positions de l'ensemble de contours (voir figure).

La prévision de pluie est alors spatialisée au sens où la prévision en un point intérieur au contour moyen est donnée par l'histogramme caractérisant l'objet. La validation à l'aide d'un score de Brier montre que la prévision ainsi exprimée en terme d'objets présente une qualité supérieure à la sortie directe du modèle.

12

Simulations idéalisées 3D de super-cellules convectives avec le modèle AROME

Des simulations idéalisées 3D de super-cellules sont réalisées avec le modèle AROME dans le but d'évaluer ses performances pour la modélisation de cas d'orages aux échelles kilométrique et subkilométrique.

Une bulle chaude dans les basses couches permet de déclencher la convection dans un environnement homogène conditionnellement instable avec un fort cisaillement de vent. Une première simulation avec une résolution horizontale de 1 km montre la capacité du modèle AROME à reproduire le développement d'une cellule convective qui se divise en deux systèmes : celui de gauche évolue en un système multicellulaire, celui de droite en une super-cellule avec des structures caractéristiques : zones d'ascendances et de subsidences, structure en crochet, méso-cyclone... Comme pour les études antérieures, l'évolution des systèmes convectifs dépend bien du cisaillement vertical de vent, un cisaillement faible ne générant pas de super-cellule.

L'impact de la résolution horizontale (testée de 4 km à 500 m) montre que plus la résolution est fine, plus les systèmes convectifs sont intenses : plus de précipitations, extrema de vitesses verticales élevés, plages froides sous orage plus intenses, trajectoires de la super-cellule plus incurvées vers la droite... Une comparaison avec le modèle Méso-NH, dont le cœur dynamique est différent, montre que les deux modèles simulent des systèmes convectifs assez similaires avec cependant des structures plus fines, des vitesses verticales plus intenses et des trajectoires de super-cellule plus incurvées pour Méso-NH.

L'enjeu est maintenant de disposer de simulations de référence de type LES (avec des mailles de l'ordre de 100 m) notamment pour déterminer le type de turbulence à utiliser à 500 m de résolution.

13

Les premiers pas d'AROME pour la prévision des cyclones

Malgré les progrès apportés par Aladin-Réunion pour la prévision des cyclones tropicaux, les prévisions d'intensité demeurent incertaines, en particulier pour anticiper les changements brusques d'intensité.

L'intensification des cyclones tropicaux est liée à des processus externes, comme par exemple les interactions avec l'environnement atmosphérique et océanique. Mais l'évolution de la structure interne du cyclone et la représentation des processus de la convection jouent aussi un rôle important. Un modèle capable de résoudre explicitement la convection profonde tel qu'AROME devrait donc améliorer sensiblement les prévisions d'intensité.

Pour la première fois, des simulations d'une phase complète d'intensification (pendant 4 jours) d'un cyclone tropical (Ivan, 2008) avec AROME ont été effectuées. Les conditions initiales provenaient des analyses du modèle Aladin-Réunion. À 2,5 km de résolution horizontale, le domaine d'intégration d'AROME était suffisamment grand pour reproduire l'évolution d'Ivan. Les résultats ont montré la très bonne capacité du modèle à reproduire la trajectoire et l'intensité d'Ivan. De plus, la structure simulée du cyclone atteint un réalisme que les modèles à plus basse résolution ne peuvent représenter.

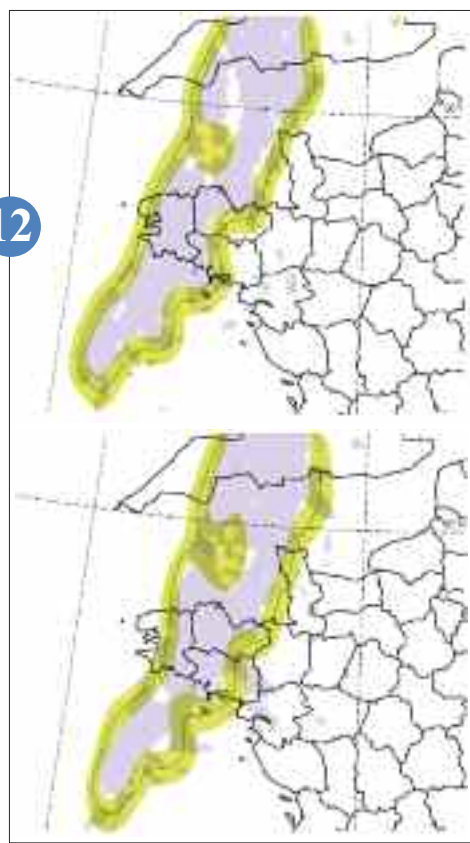
Ces simulations ont aussi permis d'évaluer la sensibilité des prévisions à divers paramètres numériques, comme par exemple le pas de temps. La sensibilité des prévisions d'intensité au pas de temps se révèle importante. Il reste donc du travail à faire pour optimiser l'utilisation d'AROME pour simuler l'intensité et la structure des cyclones. En particulier, il s'agira d'évaluer l'intérêt du couplage avec l'océan et l'opportunité d'utiliser un système d'assimilation de données.

14

Structure du cyclone Ivan simulée par AROME à 82 heures d'échéance. Les forces de vent à 10m et les lignes de flux en basses couches (panneau du haut) montrent un écoulement cyclonique convergent intense. La coupe verticale sur des niveaux isobares (panneau du bas), indiquée par le trait de coupe bleu, met en évidence un mur de l'œil penché et des vents extrêmes vers 900 hPa. La force du vent est exprimée en m/s.

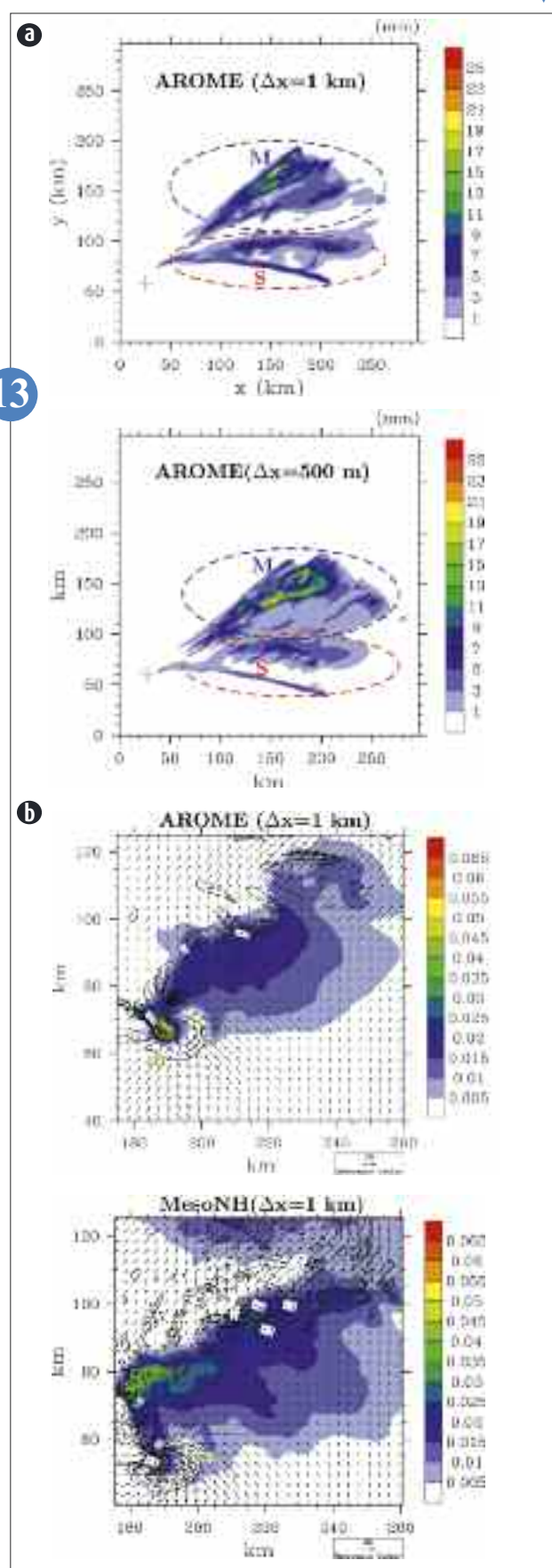
12

Précipitations supérieures à 1 mm/h prévues par le modèle AROME (en violet) superposées au contour moyen (en vert foncé) et à la représentation de l'incertitude relative à la position du contour de l'objet (en vert clair) à l'instant t (à gauche) et à t+1h (à droite).

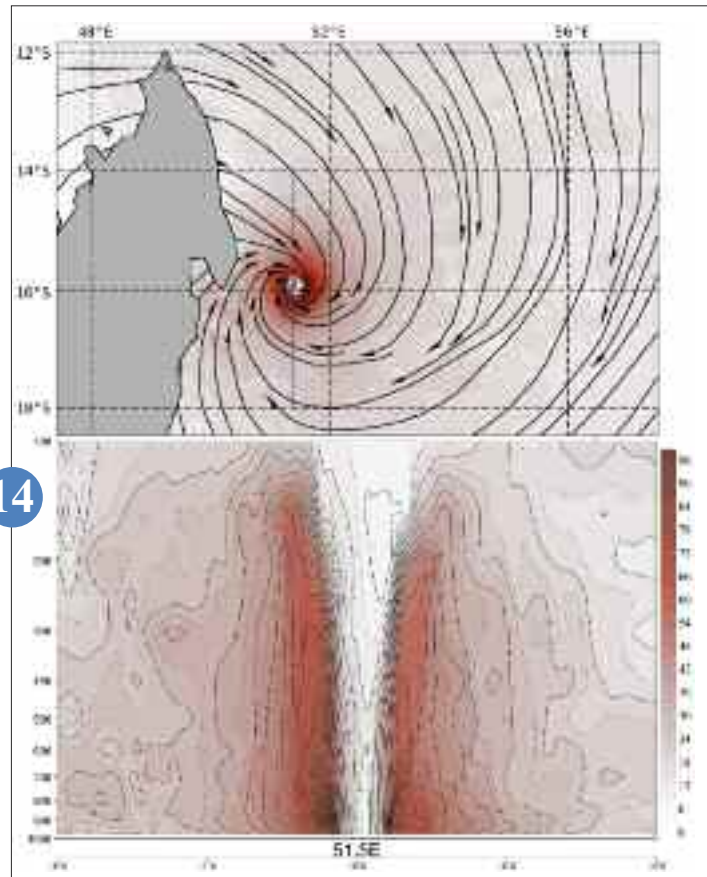


Précipitations accumulées sur 180 minutes (en mm) montrant la trace au sol d'une cellule convective qui se divise en engendrant un système multicellulaire (M) se propageant vers la gauche et une super-cellule (S) se propageant vers la droite pour des simulations du modèle AROME ayant une résolution horizontale de 1 km (à gauche) et de 500 m (à droite). La croix verte indique la position de la bulle chaude initiale.

13



14



Zoom sur la super-cellule : en couleur (kg/kg), la somme de la neige, de la pluie et des grâpels intégrés entre 950 et 500 hPa, en vecteur (m/s), le vent à 950 hPa et en trait noir, les vitesses verticales à 900 hPa (m/s, zones subsidentes en pointillés et fort courant ascendant en trait plein associé au méso-cyclone m) pour des simulations avec les modèles AROME (à gauche) et Méso-NH (à droite).

Prévision d'ensemble

PEARP : un système de prévision d'ensemble global et à méso-échelle sur la France

Depuis juin 2004, Météo-France dispose d'un système de prévision d'ensemble global à courte échéance. Composé de 11 membres à ses débuts, celui-ci a beaucoup évolué ces dernières années. L'ensemble comprend aujourd'hui 35 membres, la méthode de perturbation des conditions initiales tient compte des erreurs du passé au travers de l'utilisation de l'ensemble d'assimilation et de la dynamique future du système au travers de l'utilisation des vecteurs singuliers. L'erreur de modélisation est également prise en compte puisque l'ensemble effectue ses prévisions grâce à 10 différentes représentations des processus sous-maille tirées au sort pour chaque membre. Sa résolution horizontale de 15 km sur la France permet aujourd'hui d'anticiper quelques jours à

l'avance des risques de phénomènes dits de méso-échelle, comme les pluies intenses ou les vents forts. Plusieurs produits de visualisation comme les quantiles, probabilités ou trajectoires des dépressions permettent une utilisation synthétique du système de prévision via l'intranet de Météo-France. La figure illustre le comportement de l'ensemble sur un cas de fortes précipitations ayant donné lieu à des vigilances rouge hydrologique et orange météorologique début novembre 2011 dans le sud-est de la France.

15

Représentation de l'erreur de modélisation dans la prévision probabiliste de Météo-France

La prévision probabiliste s'appuie sur un échantillon de prévisions données par un système de prévision d'ensemble. Ce système doit représenter les incertitudes inhérentes à la détermination des conditions initiales mais aussi la représentation imparfaite des mécanismes physiques dans les modèles de prévision numérique. Actuellement, cette source d'erreur, appelée erreur de modélisation, est prise en compte en faisant varier quelques options des paramétrisations des phénomènes sous-maille. Cependant, cette approche est coûteuse en maintenance et ne traite qu'une partie de l'erreur. On souhaite donc évoluer vers une représentation plus objective de l'erreur de modélisation reposant sur des connaissances statistiques de cette erreur, comme son amplitude. L'estimation de celle-ci est un problème en soi que l'on résout en faisant l'hypothèse de l'indépendance statistique entre les deux sources d'erreur de prévision,

les erreurs issues de la détermination des conditions initiales et les erreurs de modélisation. Les vignettes a et b de la figure montrent à la fois l'accumulation de l'erreur de modélisation estimée au fur et à mesure des échéances et la variabilité spatiale importante avec un maximum d'incertitude aux latitudes tempérées des deux hémisphères, régions aux sein desquelles se développent les dépressions.

Une nouvelle approche pour représenter l'erreur de modélisation est envisagée. Elle consiste à introduire de manière systématique des perturbations aléatoires dont l'amplitude correspondrait aux estimations de l'amplitude des erreurs de modélisation.

16

Prévision des trajectoires cycloniques : élaboration de cônes d'incertitude à partir de la prévision d'ensemble

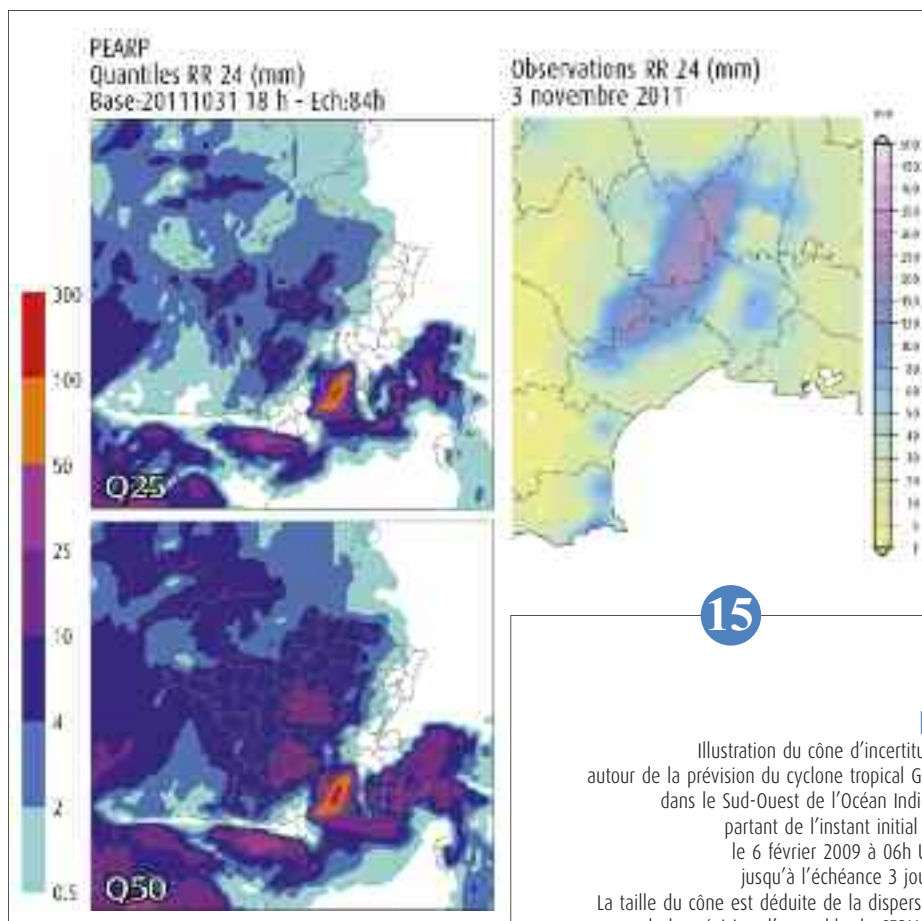
La prévision cyclonique repose en premier lieu sur une bonne prévision de trajectoire. Même si les prévisions de trajectoire ont beaucoup progressé ces dernières années, leur erreur demeure parfois importante et, du fait de la nature chaotique des équations de l'atmosphère, elle existera toujours. Les utilisateurs de la prévision cyclonique ont donc non seulement besoin de la meilleure prévision possible, mais aussi d'une mesure fiable de son incertitude.

Ainsi, la plupart des centres mondiaux de prévision cyclonique (comme par exemple Miami et Tokyo) affichent un cône d'incertitude autour de la trajectoire officiellement prévue. La taille du cône est fixée par un seuil d'erreur climatologique calculé à partir des prévisions cycloniques effectuées les années précédentes. Le Centre Météorologique Régional Spécialisé (CMRS) de Météo-France à La Réunion a développé une nouvelle méthode, où la taille du cône est calculée à partir d'un système de prévision d'ensemble, espérant qu'un tel cône calculé « au jour le jour » apporte une information plus pertinente qu'un cône climatologique.

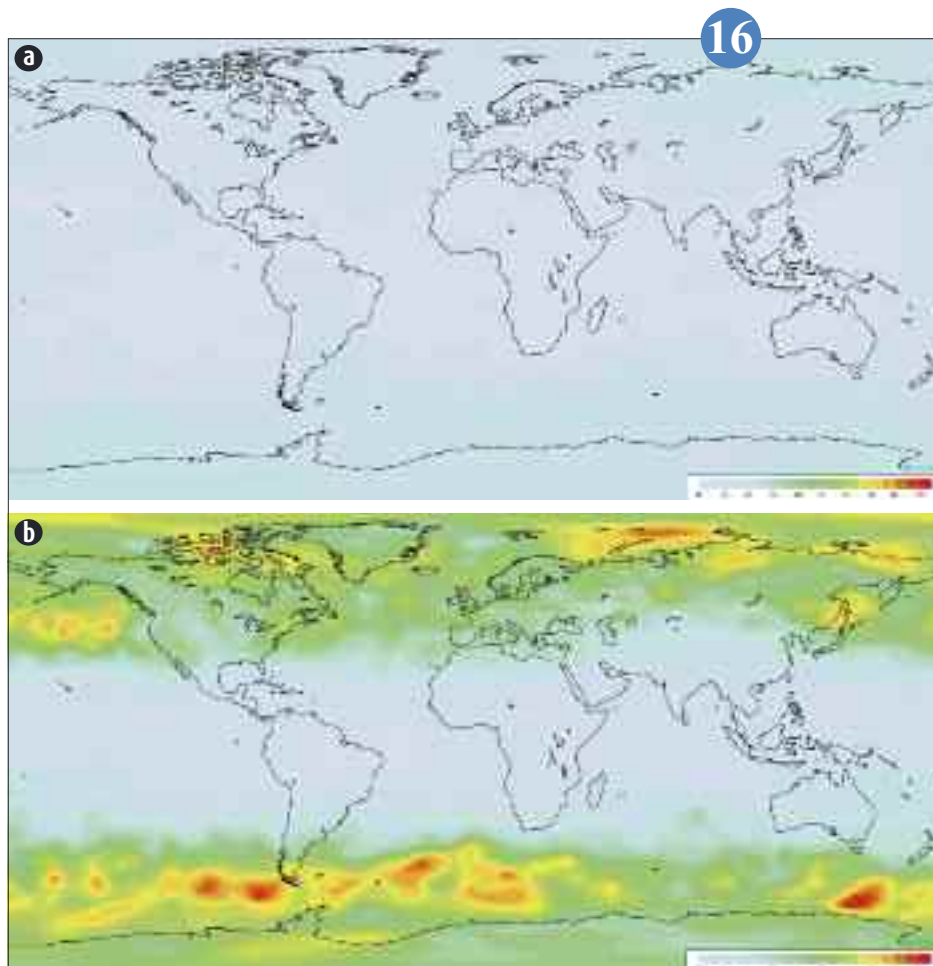
Cette méthode a été validée avec succès pendant deux saisons cycloniques en utilisant la prévision d'ensemble du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Il a ainsi été montré que la taille de ces cônes d'incertitude s'adapte à l'incertitude de la prévision jusqu'à 3 jours d'échéance. Ils apportent donc un supplément d'information par rapport à un cône issu de l'erreur climatologique.

Ces cônes d'incertitude sont opérationnels au CMRS de La Réunion à partir de la saison cyclonique 2011-2012.

17



Les 2 premiers quantiles de précipitations cumulées sur 24h du système de prévision d'ensemble global de Météo-France. Q25 signifie que 75% des membres prévoient que le cumul atteindra au moins la valeur affichée (Q50 pour 50% des membres). Pour cet épisode du 3 novembre 2011, il était prévu plus de trois jours à l'avance et pour la majeure partie de l'ensemble des cumuls de pluie entre 100 et 300 mm dans le sud-est de la France. Les cumuls observés ont en effet dépassés les 250 mm ce jour-là.



Écart type (ou amplitude) de l'erreur de modélisation à une échéance de 12 heures de la hauteur du géopotential à 500 hPa.

Écart type (ou amplitude) de l'erreur de modélisation à une échéance de 102 heures de la hauteur du géopotential à 500 hPa.

La recherche au service de l'aéronautique

L'aviation est un des principaux utilisateurs de la météorologie, mais du fait des contraintes relatives à la réglementation de la circulation aérienne et à la certification des aéronefs, l'aviation n'a pas pleinement bénéficié des développements les plus innovants en observation et prévision du temps, comme en attestent l'utilisation de messages codés alphanumériques pour échanger l'information météorologique.

Confrontées à l'augmentation du trafic aérien et du coût des carburants et à la nécessité de réduire les risques et l'impact environnemental de l'aviation, les agences de régulation de la circulation aérienne ont lancé des programmes ambitieux de restructuration à l'horizon 2020-30 : SESAR (Single European Sky ATM Research) en Europe et son programme miroir NEXTGEN aux USA.

SESAR offre ainsi aux services météorologiques une opportunité unique de revisiter l'ensemble de leurs services à l'aviation et de concevoir des approches innovantes en s'appuyant sur de nouveaux systèmes d'échange de l'information à haut débit (System Wide Information Management, SWIM).

L'aviation est surtout concernée par l'observation, pour la prise de décision tactique face au risque météorologique, et les échéances courtes de prévision pour la planification des vols. Les 4 articles qui suivent illustrent ces problématiques avec la conception de nouvelles techniques d'observation dédiées à la détection des vortex de sillage et cisaillement de vent sur aéroport, le développement de nouveaux outils de prévision immédiate pour la planification des aéroports, et enfin la recherche de solutions opérationnelles pour réduire la formation des trainées de condensation et l'impact environnemental de l'aviation.

Détection des tourbillons de sillage dans le cadre du programme SESAR

Le programme SESAR est le volet technologique du projet de ciel unique Européen. SESAR vise à moderniser les systèmes de contrôle actuels afin d'optimiser la gestion du trafic et de réduire les émissions de l'aviation. Météo France contribue au projet SESAR1 WP 12.2.2 Wake Vortex dont le but est d'évaluer, par des expériences en conditions réelles, l'apport des outils d'observation et de prévision de la turbulence de sillage sur la gestion du trafic aérien dans la zone d'approche de l'aéroport.

Entre mai et juin 2011, le CNRM a ainsi déployé et opéré deux systèmes d'observation par télé-détection lors de l'expérience dite « XP0 » sur l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle: un sodar, réalisant des profils verticaux de vent jusqu'à 350m d'altitude à la résolution de 10m et à la fréquence 10', et un profileur de vent UHF réalisant des profils verticaux de vent entre 500m et 5km d'altitude toutes les 15' à la résolution de 350m (figure a). Un rapport portant sur l'analyse des performances des instruments météorologiques installés pendant la campagne de mesure et comportant notamment des comparaisons entre les capteurs dédiés à la mesure du vent (profileurs de vent UHF, sodar, lidar vent) à été fourni à Thalès (figure b). Cette première expérimentation devrait permettre de spécifier des recommandations sur le type de capteurs qui devront être déployés lors des prochaines expériences (XP1 et XP2) du projet SESAR.

Vue du profileur UHF dans son enceinte électromagnétique et du sodar au bout de la piste 09L de l'aéroport Roissy Charles de Gaulle.

Diagramme de dispersion des vitesses et directions du vent mesurées par le profileur UHF et le sodar à 350m d'altitude.

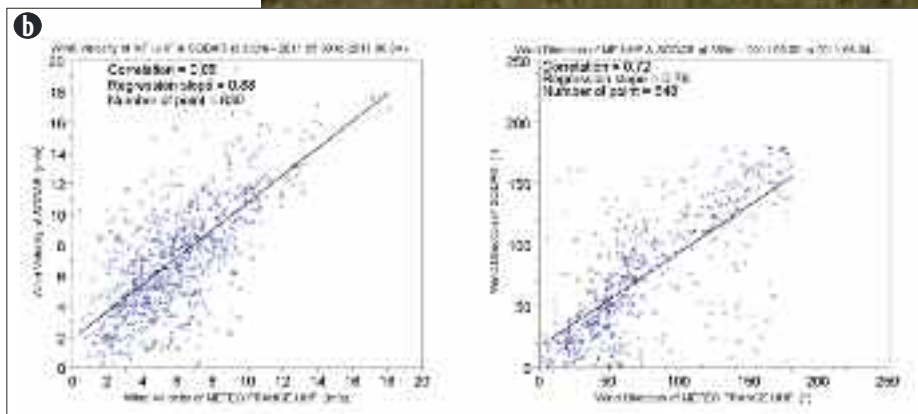


Image de vitesse radiale mesurée par le radar de Nice à l'élévation 3° le 05/06/2011 à 11h10 UTC. Le radar est au centre de l'image. Les couleurs jaunes indiquent des vents s'éloignant du radar et les couleurs bleues des vents se rapprochant du radar. Les flèches vertes matérialisent la direction du vent. Cet exemple illustre un cas de renverse avec arrivée près de l'aéroport d'une composante de vent d'est dans un flux d'ouest au départ. Il a donné lieu à des remises de gaz.

Des projets pour étudier les traînées de condensation

Dans un contexte de croissance du trafic aérien, les traînées de condensation émises par les avions à haute altitude font l'objet d'une attention croissante. Les gaz et particules émises par les moteurs contribuent à l'augmentation de l'effet de serre en altérant à la fois le bilan radiatif global et l'équilibre chimique de l'atmosphère.

C'est dans ce cadre que l'unité SAFIRE a participé au montage des projets TC2 et HYPATIE. Ces deux projets ont été élaborés pour répondre aux demandes du CORAC (Conseil pour la Recherche Aéronautique Civile), créé en juillet 2008 à partir d'engagements pris lors du « Grenelle de l'Environnement ».

Le projet TC2 (Traînées de Condensation et Climat) a pour objectif de mieux caractériser les conditions de formation et d'évolution des traînées de condensation. Le Falcon 20 de l'unité

SAFIRE sera mis à contribution pour réaliser des mesures de chimie, d'aérosols et de microphysique, dans des traînées de condensation émises par des avions de ligne. Il s'agira de valider les modèles qui auront été développés dans le cadre du projet.

Le projet HYPATIE s'intéresse plus spécifiquement au développement d'hygromètres pour les basses humidités, avec l'objectif à terme de les embarquer à bord d'avions commerciaux. Cela permettrait d'acquérir des données sur les zones sursaturées afin de paramétrer les modèles climatiques, et de fournir aux pilotes des aéronefs les moyens de détecter et d'éviter les zones propices à l'apparition de traînées de condensation. Les hygromètres développés dans le cadre d'HYPATIE seront testés à bord du Falcon 20 de SAFIRE.

2

Vers une spécification d'un radar dédié à l'observation des plates-formes aeroportuaires à fort enjeu

Dans le contexte de l'amélioration du service rendu par Météo-France à la navigation aérienne, et plus particulièrement de l'amélioration du suivi des situations de cisaillement de vent, un système combinant un radar Doppler polarimétrique en bande X (loué, avec son calculateur et son système de visualisation, à la société SELEX) et un lidar Doppler a été testé sur l'aéroport de Nice pendant 6 mois. L'évaluation du radar devait permettre d'instruire les questions techniques suivantes :

Est-il pertinent de placer le radar sur l'aéroport ou vaut-il mieux le déplacer de quelques kilomètres ?

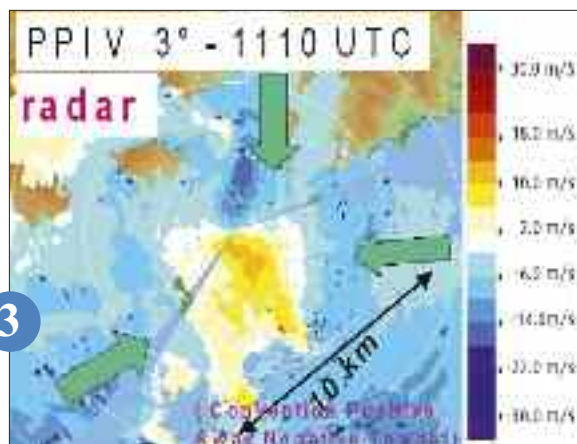
Peut-on, en situation de précipitation, obtenir des mesures de vent de qualité avec un radar en bande X ?

Quel est le mode d'exploitation optimal pour le radar afin de suivre, voire d'anticiper au mieux les situations de cisaillement ?

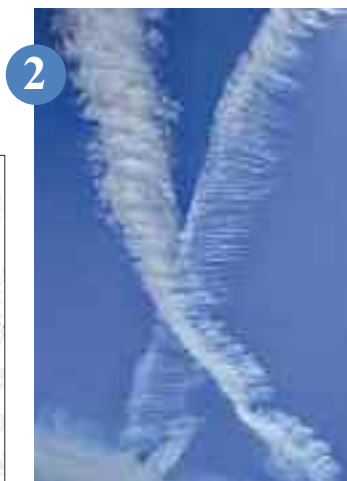
Un résultat préliminaire, basé sur l'analyse de plusieurs situations, est qu'un placement sur l'aéroport est a priori viable et n'obère pas la capacité de mesure à très courte distance

(1 km) à condition d'appliquer un filtrage efficace des échos fixes et des échos de seconde trace. Un placement sur l'aéroport est intéressant car il permet l'observation directe dans les plans d'atterrissage et de décollage des avions (pentes à environ 3°). D'autre part, plusieurs tests ont permis de converger sur un mode d'exploitation optimal. Ce mode optimal comporte, par 5 minutes, 10 angles de site entre 1 et 50°, le site 3° étant revisité deux fois, ainsi qu'un RHI dans l'axe des pistes, et permet d'obtenir des données de vitesse radiale de très bonne qualité jusqu'à 60 km du radar. L'expérimentation se termine fin novembre 2011. Les spécifications finales du radar d'aéroport sont attendues pour début 2012.

3



3



▲ Traînées de condensation.

Evaluation du prototype AROME-PI horaire

Des phénomènes de méso-échelles vus par les systèmes d'observations peuvent maintenant être analysés et prévus par la modélisation numérique, principalement en raison des progrès portant sur la résolution et l'assimilation de données radar.

Ce constat a motivé le développement d'AROME-PI.

AROME-PI est un modèle à aire limitée dont les conditions initiales et aux limites sont apportées par les prévisions les plus récentes du modèle opérationnel AROME France. Il est prévu d'être lancé à fréquence horaire, 15 minutes après l'heure réseau suivant un compromis entre souhait de disposer rapidement des prévisions (30 minutes après l'heure réseau) et nécessité d'assimiler un volume suffisant de nouvelles observations. Les prévisions sont dites denses : résolution horizontale de 2,5 km et cadence de 15 mn.

L'évaluation d'AROME-PI par comparaison au modèle AROME France opérationnel, montre qu'AROME-PI est meilleur sur l'analyse et sur les deux premières heures de prévision. L'apport principal d'AROME-PI réside dans la fourniture de prévisions recalées avec les observations, rafraîchies toutes les heures, avec un délai de mise à disposition très court et des sorties denses.

L'aéronautique est un domaine d'application privilégié d'AROME-PI. A échéance de 2015, AROME-PI sera disponible sur le domaine FABEC. Dans le cadre du programme SESAR, des démonstrations temps-réel d'un AROME-Aéroport basé sur AROME-PI produiront des prévisions à très haute résolution sur l'aéroport. La valorisation d'AROME-PI passera également par le développement de méthodes de fusion PI-PN comme une prévision immédiate non linéaire des orages et des précipitations mêlant données observées et simulées.

4



Illustration des capacités d'AROME. Bande étroite de front froid sur le nord de la France observée par le réseau radar (en haut) et prévue par AROME (en bas). Réflectivités du 19 mai 2009. Assimilation des données radar doppler et prévision à une heure d'échéance.

Étude des phénomènes météorologiques

L'étude des phénomènes météorologiques est une activité de recherche importante de Météo-France mettant en œuvre des outils de modélisation et de simulation physique de pointe, tels que le modèle de recherche MESO-NH ou la veine hydraulique du CNRM, ainsi que l'exploitation d'observations le plus souvent collectées lors de campagnes de mesures dédiées. Ces travaux contribuent in-fine à améliorer la représentation de ces phénomènes météorologiques dans les modèles de prévision numérique du temps et du climat de Météo-France.

Dans le cadre de nos recherches sur le brouillard, un verrou technologique a été levé en 2011 avec la réalisation d'une simulation LES à très haute résolution d'un cycle de vie complet du brouillard, i.e. de la formation à la dissipation du brouillard. Cette simulation, unique dans ce domaine, nécessite des résolutions horizontales de l'ordre de 2 m pendant la phase de formation et atteignant une dizaine de mètres en phase de dissipation. On a ainsi pu mettre en évidence pour la première fois une zone très hétérogène au sommet de la couche de brouillard dans la phase mature au sein de laquelle se propagent des ondes.

Dans le domaine de l'étude des aléas et risques hydrométéorologiques, le phénomène météorologique ayant conduit aux inondations du Var en juin 2010 a fait l'objet d'une action de recherche afin de caractériser sa prévisibilité et d'améliorer la compréhension de l'évènement. Ces travaux ont confirmé une plus faible prévisibilité de l'évènement par rapport à d'autres événements du même type, qui est à relier à une situation complexe avec de nombreuses interactions à méso-échelle de la région du Var jusqu'à l'Afrique du Nord.

Comme illustré dans ce chapitre ci-après, l'année 2011 a vu aussi plusieurs autres avancées significatives dans le domaine de la compréhension des systèmes nuageux et précipitants aux latitudes tempérées et tropicales et de leurs interactions avec les aérosols, ainsi que dans le domaine de la connaissance de la variabilité intra-saisonnière de phénomènes météorologiques (mousson, perturbations synoptiques).

1

Étude des précurseurs des transitions entre les régimes de temps

La variabilité de basse fréquence de la circulation atmosphérique peut être caractérisée par des fluctuations autour d'un petit nombre d'états quasi-stationnaires de l'atmosphère appelés régimes de temps et dont la durée de vie est d'environ 8 à 10 jours. Il existe quatre régimes de temps principaux sur le domaine Europe-Atlantique qui déterminent le climat sur l'Europe : le blocage scandinave, l'anticyclone groenlandais, la dorsale atlantique et le régime zonal. Le but de cette étude a été de déterminer les précurseurs des transitions d'un régime à un autre.

La transition la plus fréquente sur la période 1958-2001 est celle du régime zonal vers le régime de blocage. Elle possède un premier précurseur qui agit environ une semaine

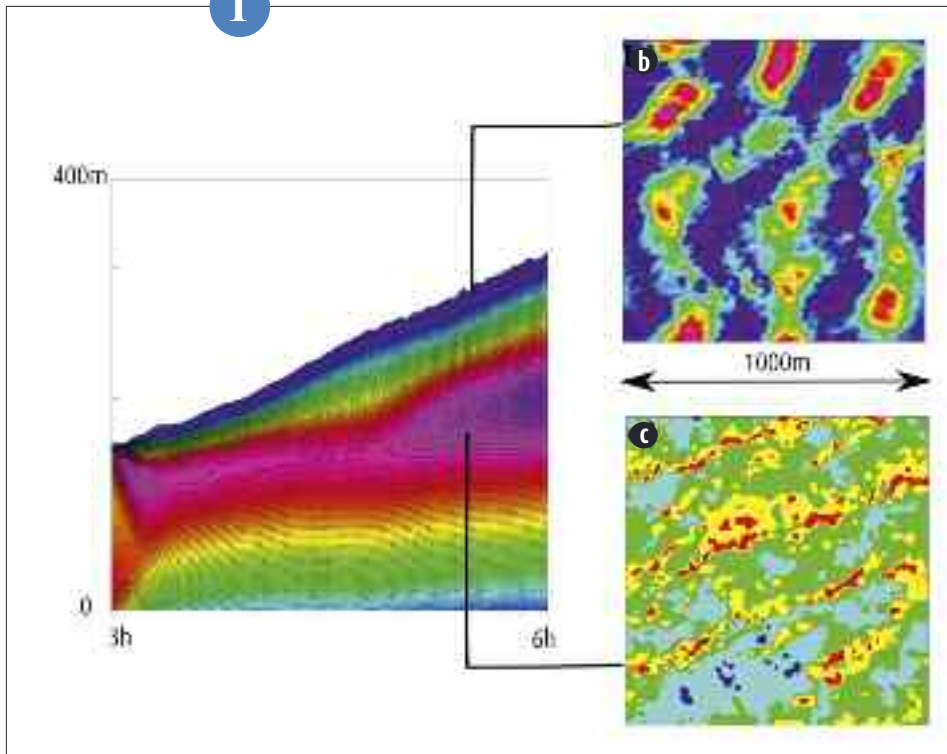
avant l'apparition du régime de blocage prenant la forme d'un train d'onde de basse fréquence. Celui-ci apparaît sur la figure par la succession de dorsales et de thalwegs (contours noirs) se propageant depuis l'Atlantique subtropical vers la Scandinavie (avant le pic du blocage qui est l'instant 0), puis vers l'Asie (après l'instant 0). La présence de ce train d'ondes est également révélée par les flèches précisant la direction de propagation de l'énergie ondulatoire. Les anomalies lentes du rayonnement infrarouge, qui indiquent les zones de convection (couleurs froides) et de subsidence (couleurs chaudes), suggèrent que le train d'ondes est amorcé dans l'Atlantique subtropical entre autres par des anomalies subsidentes à 30°N.

Les ondes les plus rapides, dites baroclines et associées aux dépressions de surface, constituent le deuxième précurseur. Ces ondes, telles des vagues, déferlent et ainsi, renforcent le blocage naissant.

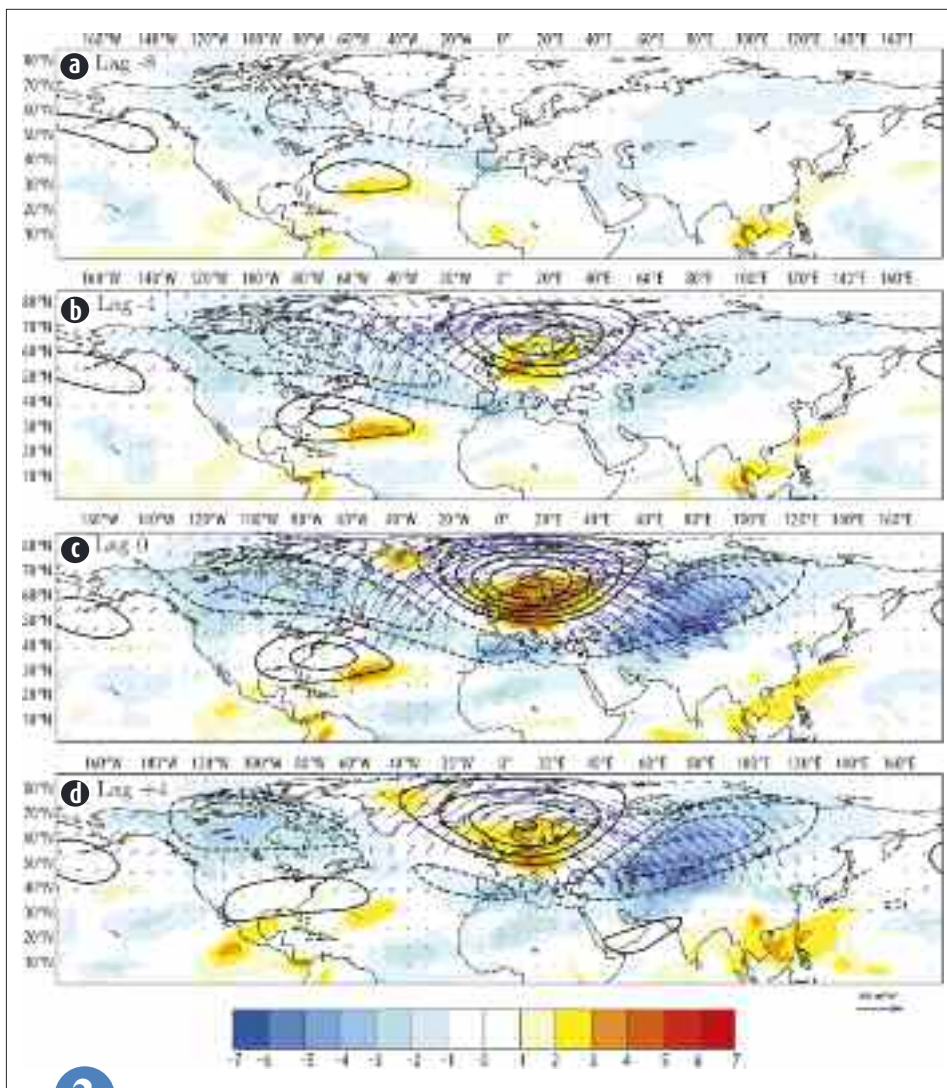
Une des perspectives de ce travail est d'étudier le rôle des cyclogenèses lors de l'évolution du blocage en lien avec les déferlements d'ondes baroclines.

2

1



◀ LES de la phase mature du brouillard :
 (a) l'évolution temporelle entre 3 et 6 heures de simulation d'un profil de contenu en eau moyen montre qu'il est maximum à environ 2/3 de l'épaisseur du brouillard ; les coupes horizontales de la température potentielle montrent des structures turbulentes organisées en bandes parallèles au flux dans la couche de brouillard (c) et orthogonales au flux au sommet du brouillard (b).



◀ Évolution temporelle des anomalies atmosphériques à variabilité lente lors du blocage scandinave. Ces anomalies ont été obtenues par régression entre différents champs atmosphériques de basse fréquence (périodes supérieures à 10 jours) et un indice de blocage couvrant la période 1974-2001. Les contours noirs pleins et avec tirets représentent respectivement les anomalies positives et négatives de la fonction de courant (intervalle : $2 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Les plages colorées correspondent aux anomalies du rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère (intervalle : 1 W.m^{-2}). Les flèches représentent le flux d'activité des ondes calculé à partir des anomalies de fonction de courant et sont colinéaires à la direction de la vitesse de groupe.

2

Couplage convection et poussières durant la campagne AMMA de 2006

Le modèle AROME à une résolution de 5 km couplé à un module de poussières désertiques a été mis en œuvre sur un vaste domaine couvrant l'Afrique de l'Ouest. Cette version a été validée à l'aide de comparaisons détaillées avec les données de la campagne AMMA de 2006. Un cas de tempête de poussières de mars 2006 a permis d'étudier les mécanismes de soulèvement des poussières associés à l'arrivée d'air froid extra-tropical et à sa canalisation par les reliefs. L'utilisation du tourbillon potentiel a permis d'expliquer la rétroaction positive des poussières sur la dynamique de cette tempête.

Cette version a été utilisée pour simuler l'ensemble du mois de juin 2006 correspondant à la période de mise en place de la mousson et coïncidant avec un second maximum de poussières en suspension après celui du printemps précédemment étudié. AROME est capable de simuler de manière réaliste le panache de poussières moyen sur le mois et sa forte variabilité. L'exploitation des simulations couplées et non-couplées avec les poussières ont permis d'étudier les mécanismes de soulèvement des poussières en juin et leurs impacts thermodynamiques, dynamiques et sur la convection aux échelles du mois et du cycle diurne. On note le rôle majeur des courants de densité associés à la convection non-précipitante pour soulever les poussières. L'impact global des poussières est un affaiblissement de la dépression thermique saharienne.

Le travail se poursuit dans le cadre du projet FENNEC d'étude de la dépression thermique saharienne. A l'occasion de la campagne d'observation de juin 2011, une chaîne opérationnelle ALADIN (25 km) et AROME (5 km) couplés aux poussières a été mis en place. Ces prévisions ont guidé les opérations et les vols du Falcon 20 de Safire et du Bae146 anglais. L'apport d'AROME a été particulièrement remarqué pour prévoir les soulèvements de poussières associés à la convection.

3

Développement d'un schéma d'éclairs parallélisé dans Méso-NH pour simuler de multiples nuages électrisés sur grandes grilles

Un schéma électrique explicite unique a été développé dans le modèle méso-échelle Méso-NH pour simuler des nuages électrisés sur de grandes grilles en terrain complexe, sur des machines parallèles.

Le schéma prédit la charge électrique portée par les particules nuageuses et les ions. Ces particules acquièrent des charges électriques, qui sont transférées entre particules et transportées par les mouvements ascendants et subsidents au sein du nuage. Ainsi, des pôles de charge se structurent à l'échelle du nuage. Le champ électrique résultant est déduit de la distribution de charges grâce à l'équation de Gauss. Quand il atteint un seuil de rupture ($\sim 100 \text{ kV m}^{-1}$), un éclair est déclenché. Le traitement des éclairs est le point original du schéma. Ils sont composés d'un éclair principal bidirectionnel vertical suivi d'une extension horizontale obéissant à une loi fractale dans les zones électriquement chargées.

Le schéma électrique a été testé sur différents orages en multiprocesseurs. Pour l'orage du 10 juillet 1996 (campagne STERAO1), Méso-NH reproduit bien l'évolution d'une multi-cellule à une super-cellule, ainsi que l'ordre de grandeur et la tendance du taux d'éclairs.

Ceci ouvre un large champ d'applications avec pour objectifs premiers la simulation de cas météorologiques réels sur de grands domaines dans le contexte d'HyMeX, et l'étude de l'activité électrique associée aux variations d'intensité des cyclones tropicaux dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien.

4

Pluies intenses en Méditerranée Origine et transport de l'humidité

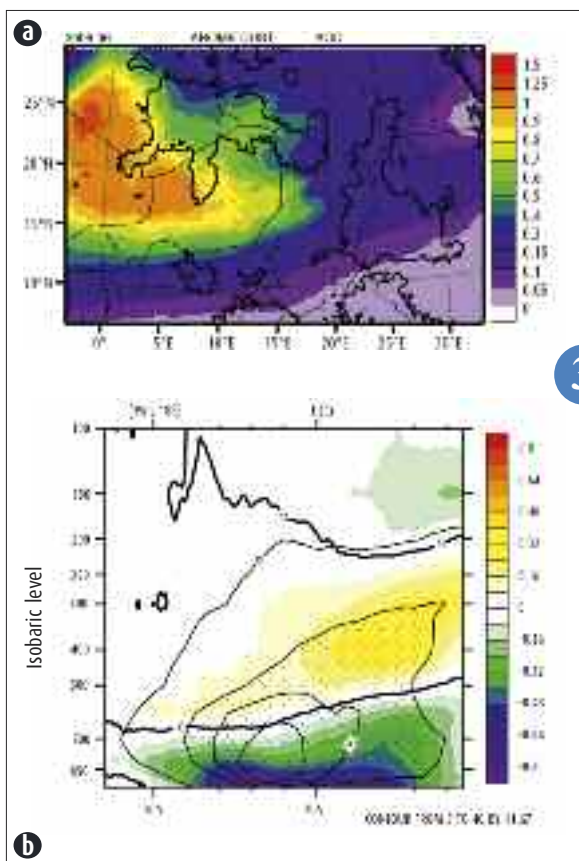
Les régions côtières de la Méditerranée sont régulièrement touchées par des épisodes de pluies intenses à l'origine de crues rapides dévastatrices. Un des ingrédients météorologiques majeurs de ces épisodes est le transport d'humidité vers les côtes. Afin de mieux comprendre et de mieux prévoir ces phénomènes extrêmes, nous avons documenté les propriétés de l'alimentation en humidité des systèmes fortement précipitant associés à plus d'une dizaine d'épisodes sur le Sud-Est de la France et la Corse.

Une approche basée sur des simulations numériques multi-échelles et combinant une analyse lagrangienne par rétro-trajectoires et le calcul de bilans en eau, a été adoptée. Il est ainsi apparu que l'humidité alimentant les systèmes fortement précipitants provient d'une part de l'évaporation de la Méditerranée dans les deux derniers jours avant l'épisode, et d'autre part du transport sur plus de 3-4 jours d'humidité provenant de sources lointaines extérieures à la Méditerranée – dans l'océan Atlantique et en Afrique équatoriale. L'humidité des sources lointaines est concentrée dans les basses

couches en arrivant sur la Méditerranée, suivant des courants subsidents de grande échelle ou sous le vent du relief côtier. Elle se dirige ensuite vers les côtes françaises en suivant deux branches de transport privilégié au-dessus de la Méditerranée, au large des côtes espagnoles ou le long de la Sardaigne et de la Corse. Au cours de ce transport marin, l'évaporation de la Méditerranée contribue à humidifier davantage la masse d'air dans la couche limite. Cet apport de la Méditerranée constitue la principale source d'humidité lorsque des conditions anticycloniques prédominent avant les épisodes.

Ces résultats contribuent à la préparation de la campagne HyMeX qui porte sur le cycle de l'eau en Méditerranée avec un volet sur les épisodes de pluies intenses.

5

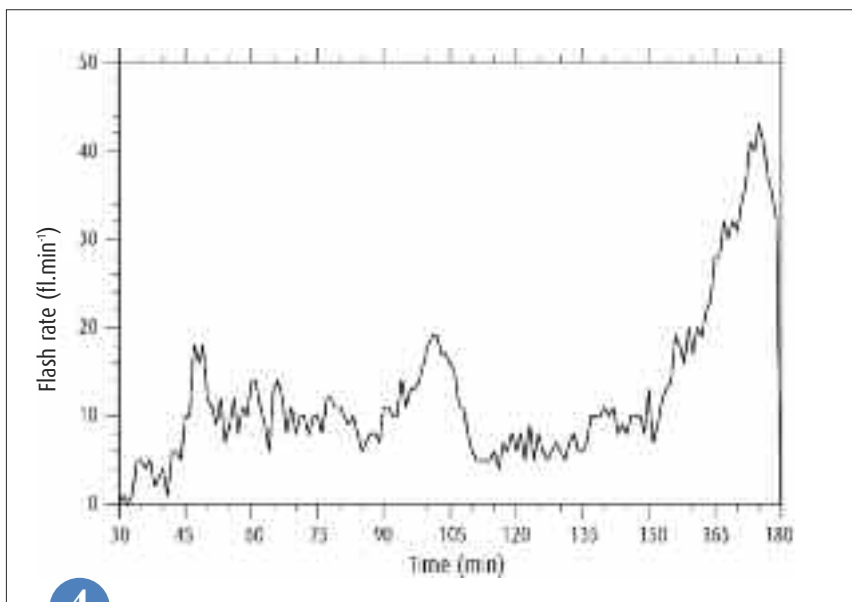


◀ Carte des épaisseurs optiques des poussières moyenne sur le mois de juin 2006 simulée par AROME. Les zones de relief supérieur à 600m sont délimitées par l'isoline épaisse noire. Le panache de poussières très dense (épaisseur optique moyenne jusqu'à 1,5m) se bloque sur les flancs sud à ouest du relief du Hoggar et est alimenté en grande partie par les rafales sous orages associés à la forte évaporation des pluies dans l'air sec au-dessus de sols secs dénudés de végétation avant l'arrivée des pluies de mousson. Le panache est initié à l'Est (16°E) dans la zone d'accélération des vents de Nord du Bodélé au sud du relief du Tibesti.

3

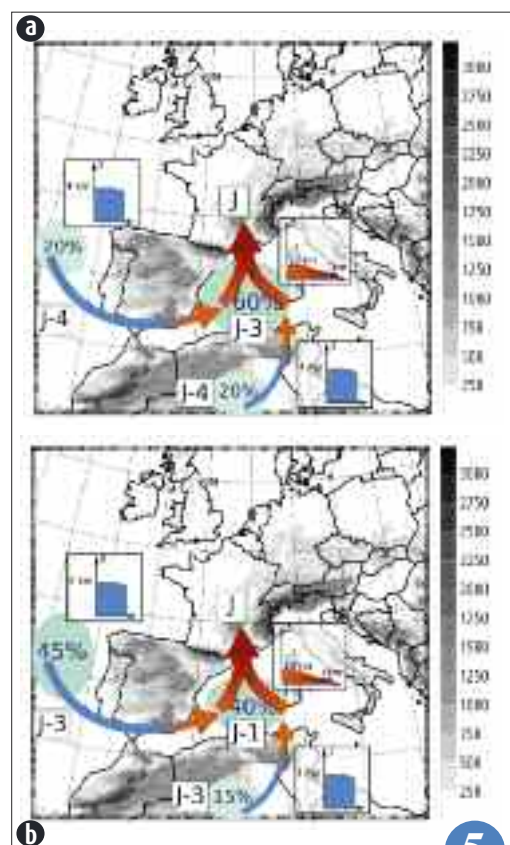
◀ Coupe verticale méridienne moyenne dans le panache (3°N ; 18°E) sur tout le mois de juin 2006 de la différence de température entre les simulations AROME couplées et non-couplées aux poussières. La structure verticale du panache de poussières est fournie par les isolignes d'extinction et zones pointillées. L'absorption du rayonnement solaire par les poussières provoque un fort réchauffement de la partie supérieure du panache (au-dessus de 3-4 km jusqu'à 0,3°C), tandis que son atténuation réduit fortement le rayonnement incident à la surface conduisant à un fort refroidissement des basses couches (jusqu'à -0,8°C en surface). Il s'en suit une diminution de la dépression thermique saharienne pouvant retarder le déclenchement de la mousson.

Schéma conceptuel synthétisant les caractéristiques spatiales et temporelles de l'alimentation en humidité des épisodes de pluies intenses sur le Sud-Est de la France précédés de conditions anticycloniques (a) et cycloniques (b).



4

▲ Évolution temporelle du taux d'éclairs simulé par Meso-NH (éclairs min⁻¹) pour l'orage du 10 juillet 1996 lors de la campagne STERAO. Meso-NH reproduit bien la transition observée entre une multi-cellule (~20 éclairs min⁻¹) et une super-cellule, et l'augmentation et le pic d'activité électrique (~50 éclairs min⁻¹) lors de ce dernier stage orageux.



5

Modélisation des lacs

Le modèle de lac Flake, développé pour représenter les lacs dans les modèles météorologiques, traite les échanges d'humidité, d'énergie et de quantité de mouvement entre les surfaces des lacs et l'atmosphère et résout le cycle diurne en faisant évoluer sa température de surface. Afin d'améliorer la compréhension et la paramétrisation du modèle Flake dans les modèles numériques de prévision du temps (Meso-NH, Arome) et d'étude du climat (Arpege-Climat), il a été implémenté récemment dans le module de surface « externalisé » SURFEX, plate-forme interfacée avec ces modèles.

Jusqu'à maintenant, la plupart des études avec Flake ont été réalisées en mode forcé par des observations, permettant de vérifier la bonne intégrité du modèle et sa capacité à reproduire les caractéristiques du cycle diurne (figure a). La campagne de mesures THAUMEX menée durant l'été 2011 sur l'étang de Thau dans le sud de la France et réalisée en collaboration avec l'université d'Evora au Portugal et l'Ifremer de Sète, a permis de renforcer les connaissances du modèle et de son comportement en eaux peu profondes. Dans un premier temps, Flake a été utilisé en mode forcé par les observations (figure b) pour contrôler la bonne spécification de certains paramètres caractéristiques des lacs comme la profondeur ou le coefficient d'extinction de la lumière dans l'eau. Le modèle a ensuite été couplé avec l'atmosphère lors de simulations numériques faites avec Meso-NH, visant à documenter simultanément la couche limite atmosphérique et le profil thermique dans l'eau lors d'épisodes de brises marines.

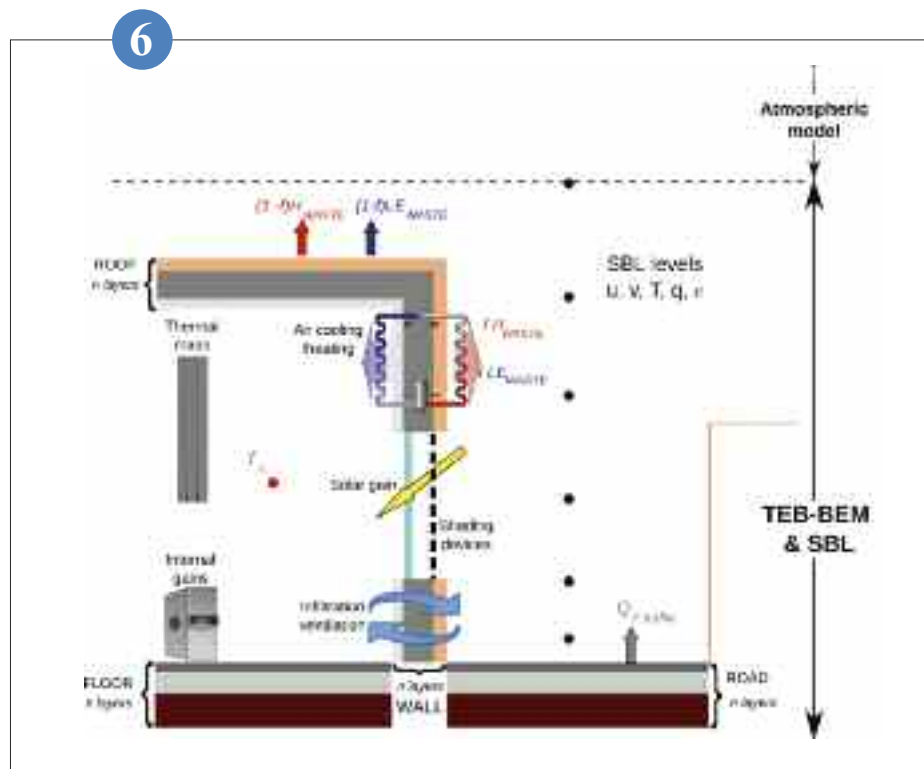
6

Le plein d'énergie dans le modèle de ville TEB !

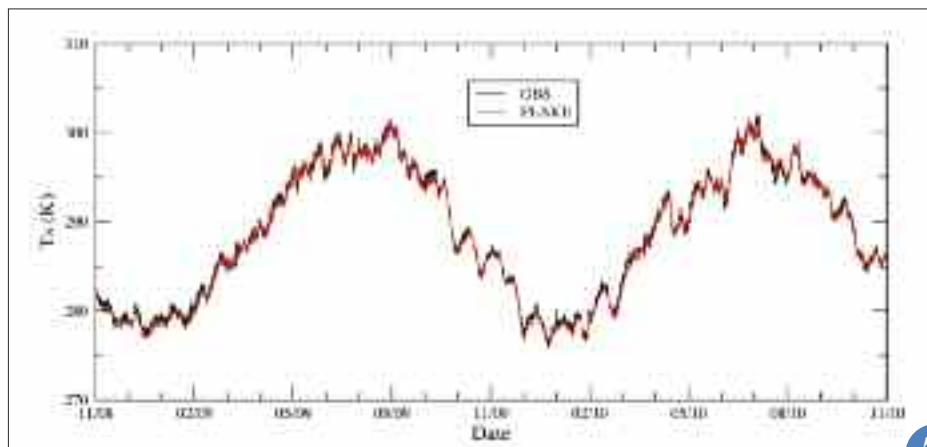
Plusieurs études ont montré que l'utilisation massive de systèmes de climatisation impacte les températures urbaines. De manière générale, le fonctionnement énergétique des bâtiments engendre des rejets de chaleur qui se répercutent sur le climat urbain. Par ailleurs, les scénarios d'adaptation des villes au changement climatique incluent des évolutions au niveau des bâtiments.

Ainsi, pour être capable de prévoir le climat urbain, un modèle d'énergétique du bâtiment (BEM) a été développé dans le modèle d'échanges ville-atmosphère pour tenir compte des principaux processus au sein des bâtiments. La définition géométrique des bâtiments est restée simple avec une seule zone thermique et les structures massives internes sont représentées sous la forme d'une seule masse thermique pour reproduire l'inertie thermique (figure a). Le modèle tient compte des apports solaires par les vitrages, du renouvellement d'air et des charges internes. Il en déduit les besoins de chauffage ou de climatisation puis les rejets associés selon le type de systèmes utilisés (système idéal, réel avec rejets secs ou humides). Enfin le modèle permet de représenter des dispositifs passifs tels que les protections solaires et la sur-ventilation naturelle. BEM a passé de manière satisfaisante différents processus d'évaluation comprenant des comparaisons avec le modèle d'énergétique du bâtiment EnergyPlus et avec des données de terrain issues de la campagne CAPITOU.

7



▲ Représentation schématique des différents processus inclus dans le modèle TEB-BEM.



◀ Comparaison entre la température de surface de l'eau mesurée sur l'étang de Thau et modélisée par Flake forcé par les observations in situ, entre novembre 2008 et novembre 2010.

7



▲ Vue de la plate-forme instrumentée utilisée durant la campagne THAUMEX.

Étude du climat et du changement climatique

L'activité de recherche sur ce thème a été marquée en 2011 par la fin de la réalisation des simulations du climat futur dans le cadre du projet international CMIP5 servant de base à l'AR5 (« Assessment Report » 5 du GIEC). Leurs résultats, comme ceux des simulations du climat passé, sont rendus disponibles à la communauté internationale au travers d'un nœud du réseau de base de données distribuée « Earth System Grid Federation » (ESGF) mis en œuvre au CNRM. Des progrès notables ont aussi été obtenus en ce qui concerne le développement d'un prototype de modèle couplé climat-carbone incluant ISBA-CC et le modèle de biogéochimie marine PISCES de l'IPSL. Dans le domaine de la régionalisation du climat, l'année 2011 est la dernière année du projet ANR SCAMPEI avec notamment l'ouverture de la base de données de diagnostics de changement climatiques. Par ailleurs, en préparation aux projets HyMeX et MedCORDEX, une première configuration d'un modèle du système climatique régional a été mise en place. Sur le thème des études de prévisibilité, une nouvelle version du modèle de prévision saisonnière proche de celle utilisée pour les simulations CMIP5, a été testée. Elle sera utilisée en mode opérationnel dans le prochain système du projet européen EUROSIP. Par ailleurs, des études sur la prévisibilité aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord ont montré le rôle potentiellement important de la stratosphère sur la prévisibilité. Dans le domaine de l'étude de l'environnement global, la validation du modèle ARPEGE-Climat avec chimie on-line (CNRM-CM) s'est conclue par une publication. Ce modèle sera utilisé pour revisiter les résultats du projet QUANTIFY concernant l'impact du transport aérien sur l'environnement et le climat global. D'autre part, nous participons à l'exercice international d'intercomparaison de modèles chimiques globaux ACCMIP (« Atmospheric Chemistry and Climate ») qui servira lui aussi de base à l'AR5 et les premiers résultats semblent prometteurs.

1

Climat

Contribution potentielle des tropiques à la prévision saisonnière estivale

Dans les systèmes opérationnels de prévision saisonnière dynamique, les scores demeurent particulièrement faibles en été boréal, saison à laquelle l'Oscillation Australe (ENSO) exerce une influence moindre sur la circulation atmosphérique extratropicale. Dans le cadre du projet ANR IRCAAM (<http://www.cnrn.meteo.fr/ircaam/>), nous avons néanmoins tenté de mettre en évidence le potentiel de prévisibilité extratropicale associé à une meilleure prévision des climats de mousson qui représente comme l'ENSO une source majeure de chauffage diabatique tropical relativement variable d'une année sur l'autre. La technique utilisée est celle du « nudging en point de grille » qui permet de guider un modèle atmosphérique global (ici celui du CNRM-GAME ou de l'IPSL) vers des analyses dans tout ou partie de la ceinture tropicale. Les résultats obtenus soulignent notamment le rôle de l'Atlantique tropical comme source de forçage de la forte anomalie anticyclonique observée sur l'Europe pendant l'été 2003, et montrent plus généralement qu'une amélioration de la prévisibilité tropicale aurait des retombées très positives pour la prévision saisonnière à nos latitudes. Reste à améliorer la prévision des moussons, ce qui semble possible au vu de l'amélioration récente des télé-connexions ENSO-mousson constatées dans le modèle couplé océan-atmosphère du CNRM-GAME.

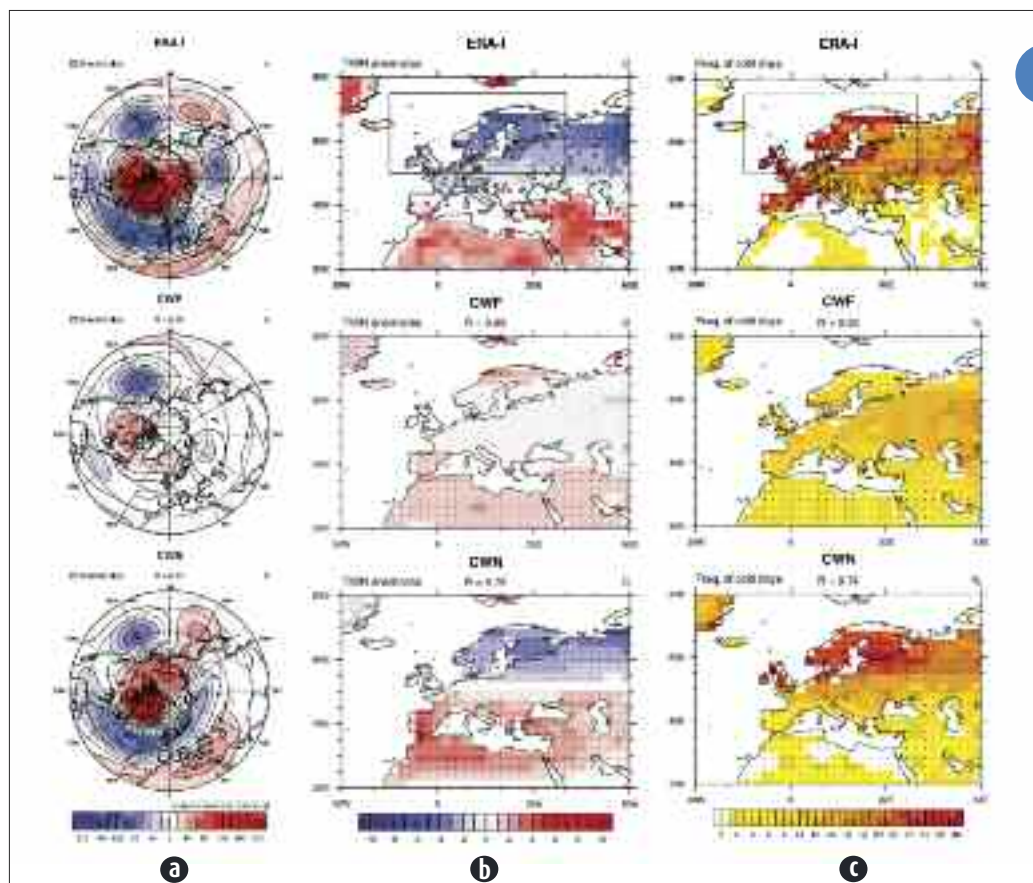
2

Albédo de surface de l'océan : vers l'intégration d'un nouveau couplage biophysique

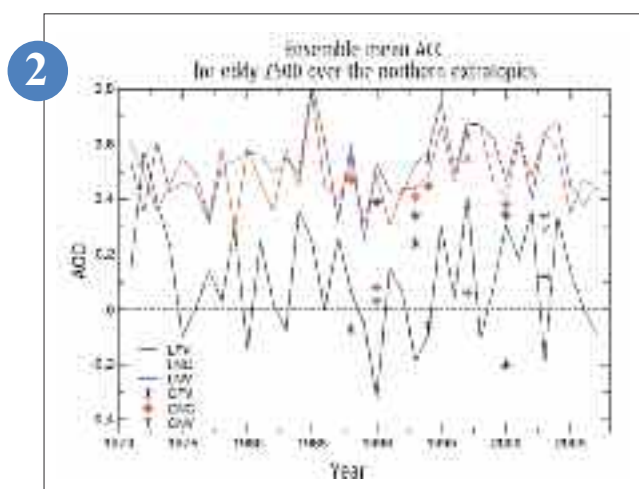
L'albédo de surface de l'océan est un paramètre essentiel du système climatique terrestre car il contrôle au premier ordre l'énergie emmagasinée par l'océan global. Comme en attestent les images satellites des produits « couleur de l'eau » SeaWiFS ou MODIS, il présente une grande variabilité spatio-temporelle (~15-20%). Pourtant, la représentation de ce paramètre est assez frustrante au sein des modèles numériques d'océan (e.g. NEMOv3.2) ou des modèles couplés globaux tel que CNRM-CM5.1. Cette représentation consiste à fixer ad hoc l'albédo de surface de l'océan à une valeur climatologique (environ 6.6%) invariante spatialement et temporellement ou à considérer qu'il varie uniquement en fonction de l'angle zénithal du soleil. Néanmoins, des formulations plus complexes existent. Elles dépendent de nombreuses variables physiques mais aussi de

variables biogéochimiques comme la couleur de l'eau. L'intégration de la biogéochimie marine au sein du modèle CNRM-CM5.1 par l'implémentation du modèle PISCES (LSCE) a été l'occasion de tester une nouvelle représentation de l'albédo de surface de l'océan. Cette représentation dépend de l'angle zénithal, du vent de surface et de la concentration de chlorophylle à la surface de l'océan. La modulation de l'albédo de surface de l'océan par le vent et la chlorophylle de surface est importante spatialement (figure 1) mais aussi temporellement. En particulier durant l'été, l'albédo de surface de l'Océan Austral est nettement supérieur à sa valeur climatologique. Un tel changement induit un refroidissement des températures de surface de l'océan sur l'Océan Austral d'environ 0.5°C.

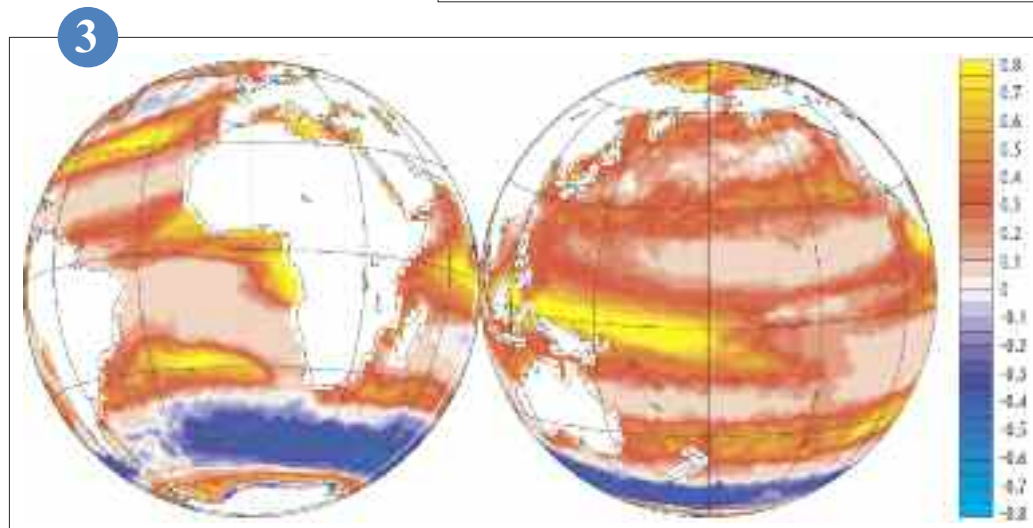
3



◀ Comparaison d'ensembles de 30 simulations atmosphériques de la période d'octobre 2009 à mars 2010 réalisées avec le modèle ARPEGE-Climat forcé par les températures de surface de la mer observée (CWF et CWN), aux ré-analyses ERA-Interim (ERA-I). CWN diffère de CWF par l'inclusion d'un rappel de la stratosphère vers des analyses au nord de 25°N. Sont reproduits : les anomalies moyennes du Z500 quotidien (a) et de Tmin (b), ainsi que le nombre de jour froids (c) de l'hiver 2009/2010. Le rappel de la stratosphère améliore la comparaison aux observations des simulations de cet hiver froid, montrant une amélioration potentielle de la prévisibilité saisonnière (voir Ouzeau et al., GRL 2011, pour plus de détails).



◀ Carte d'anomalies d'albédo de surface de l'océan en moyenne annuelle par rapport à sa valeur climatologie (6.6%). Seules les contributions du vent et de la chlorophylle de surface sont prises en compte ici.



◀ Coefficient de corrélation entre les anomalies de géopotential à 500 hPa observées et simulées aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord et moyennées de Juin à Septembre. Le modèle ARPEGE-Climat (symboles) a été testé sur quelques études de cas (simulations d'ensemble de 30 membres initialisées le 15 mai) alors que le modèle LMDZ (trait plein, 10 membres pour chaque été) a couvert l'ensemble de la période 1971 à 2008. Les expériences de contrôle (CFV et LFV, en noir) sont uniquement forcées par les températures de surface de la mer observées et montrent des scores très inférieurs aux expériences nudgées sous les tropiques, qu'elles soient forcées par des températures observées (CNC et LNC) ou climatologiques (CWF et LWF).

Impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France : les résultats du projet CLIMSEC

Le projet CLIMSEC (2008-2011) mené par la Direction de la Climatologie avec le soutien de la Fondation MAIF a permis de caractériser les événements de sécheresse en métropole sur la période 1958-2008 et d'établir un diagnostic sur leurs évolutions attendues au cours du XXI^e siècle.

L'étude en climat présent s'est appuyée sur une modélisation rétrospective de l'humidité du sol sur 50 ans avec la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou (SIM). Les différents types de sécheresse (météorologique, agricole, hydrologique) ont été caractérisés à partir d'indicateurs standardisés, permettant de construire une climatologie spatialisée des

sécheresses dont la valeur a été reconnue par l'attribution du prix Norbert Gerbier Mumm de l'Organisation Mondiale de la Météorologie en 2011.

La deuxième partie de l'étude a été consacrée à l'évaluation des caractéristiques futures des sécheresses sous changement climatique à l'aide des indices standardisés précédant et en s'appuyant sur les différentes projections climatiques régionalisées disponibles en métropole. L'analyse a particulièrement mis en évidence les différentes sources d'incertitude, liées aux modèles climatiques globaux, aux scénarios socio-économiques et aux méthodes de régionalisation.

Des résultats généraux ont pu être établis : dès le milieu du XXI^e siècle, une aggravation importante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes liés au déficit d'humidité des sols

En fin de siècle, avec un scénario d'aggravation des sécheresses météorologiques en été et automne, une évolution vers des événements de caractéristiques (intensité, durée, extension spatiale) inconnus à ce jour.

Rapport complet disponible sur Internet : <http://www.cnrm-game.fr/projet/climsec>

4

Suivi de la sécheresse de 2011 avec des indicateurs liés à la végétation

Le printemps 2011 a été exceptionnellement sec et chaud. La sécheresse a été particulièrement marquée dans le nord et dans l'ouest de la France. Des simulations de l'indice foliaire de la végétation (LAI), de l'indice d'humidité du sol (SWI), et de la photosynthèse (ou production primaire brute, GPP), réalisées avec le modèle ISBA-A-gs, montrent que cet événement a eu un impact important sur le développement de la végétation. Dans un premier temps, les fortes températures et le fort éclaircissement ont favorisé la photosynthèse et conduit à des valeurs de LAI plus élevées que d'habitude, en particulier en avril. Dans un second temps, la sécheresse a conduit à des valeurs anormalement basses de la photosynthèse et du LAI, de mai (dans l'ouest de la France) à juin. En revanche, juillet a été plus humide, ce qui a permis un redémarrage de la végétation. Au printemps, les indicateurs de sécheresse liés à la végétation ont un comportement différent de l'humidité du sol. En effet, les facteurs qui conduisent à un accroissement de la photosynthèse et du LAI tendent à augmenter l'évaporation et donc à diminuer le SWI. L'impact négatif de la sécheresse sur la végétation apparaît plus tard que l'impact négatif sur le SWI, c'est à dire lorsque le SWI est trop faible pour permettre la croissance des plantes. Cette sécheresse intense, suivie de précipitations supérieures à la climatologie, montre que la variabilité de la croissance de la végétation d'une année sur l'autre a un impact sur les simulations de l'humidité du sol, et que la possibilité de produire conjointement des indicateurs de sécheresse liés à la végétation et à l'humidité du sol pourrait améliorer le suivi de l'impact des événements climatiques sur la production agricole.

5

Mise à disposition de nouveaux outils pour la réalisation d'atlas par types de temps

Certaines études ont établi le lien entre les régimes de temps et les paramètres météorologiques locaux comme le projet CYPRIM avec la partie régimes de temps et précipitations intenses cévenoles ou le projet IMFREX avec la partie régimes de temps et tempêtes.

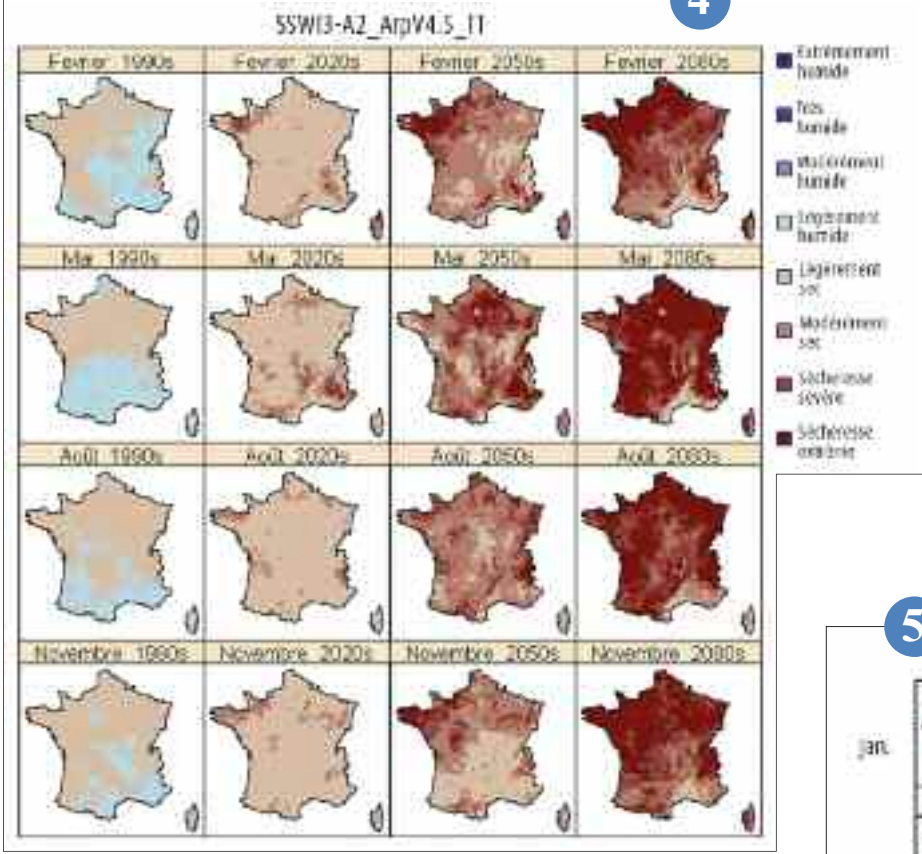
Dans la poursuite de cette démarche, une étude sur la classification par types de temps en vue d'une climatologie du vent en France métropolitaine a été menée. Cette étude a permis d'explorer différents outils relatifs à l'ensemble des étapes de la classification : retrait du cycle annuel par décomposition en séries de Fourier sur le géopotential à 700 hPa, détermination du nombre de classes par classifications mixtes -k-means suivie d'une classification hiérarchique ascendante-, coupure dynamique des dendrogrammes, vérification de la reproductibilité de la classification à l'aide du test dit de concordance, élaboration de « saisons mobiles » différentes d'une année sur l'autre, examen de la fréquence d'occurrence des classes sur les 4 réseaux journaliers. La classification finale fournit 5 classes pour les périodes hivernales et également 5 classes pour les périodes estivales. Les roses de vent observées relatives aux 5 classes hivernales et aux 5 classes estivales ont été élaborées pour l'ensemble des dates correspondant aux différentes classes et également par réseau.

Un guide méthodologique pour les classifications par types de temps a été créé. Ce document est un guide technique détaillant les différentes étapes d'une classification telles que la préparation des données, les méthodes de classification avec les fonctions R correspondantes, la validation statistique et météorologique, le choix de dates représentatives des types de temps, des exemples d'études et une bibliographie. Ces différents outils statistiques apporteront un soutien pour la réalisation d'atlas régionaux par types de temps.

6

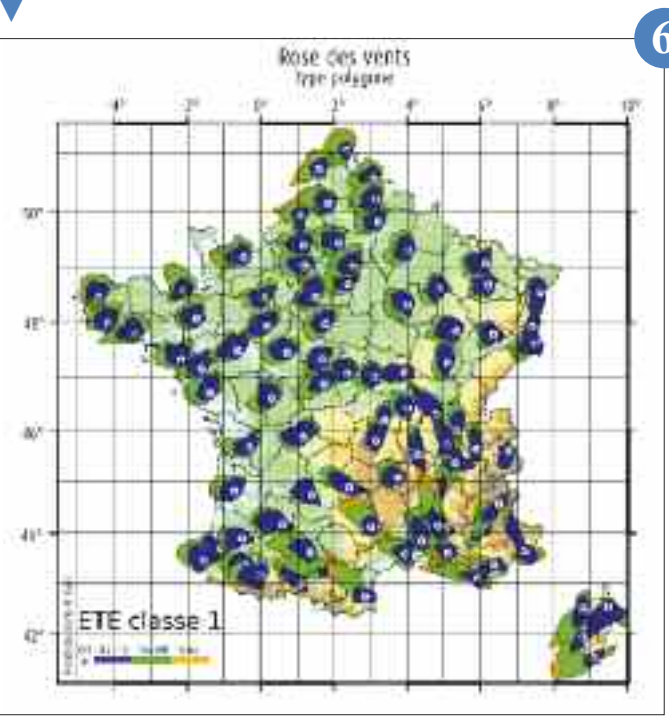


4



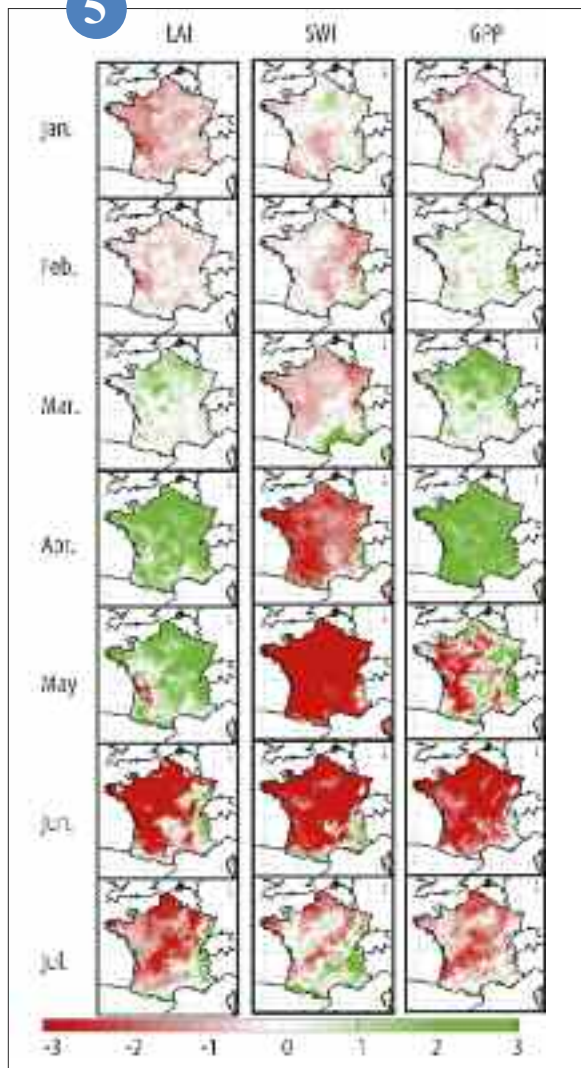
Évolution temporelle saisonnière sur le XXI^e siècle de la moyenne de l'indice de sécheresse agricole SSWI sur 3 mois établie à partir des projections climatiques Arpège V4.6 scénario A2, régionalisée par la méthode types de temps.

Composite de géopotential à 700 hPa et roses de vent associées correspondant à un des cinq types de temps des périodes estivales.



6

5



Évolution temporelle de trois indicateurs de sécheresse, de janvier à juillet 2011 : anomalies normalisées (de gauche à droite) de l'indice foliaire de la végétation (LAI), de l'humidité du sol (SWI), et de la photosynthèse (GPP).

Changement climatique

Le climat du XXI^e siècle simulé par le nouveau modèle CNRM-CM5

La contribution du CNRM-GAME au prochain rapport du GIEC (2013) se traduit notamment par la réalisation d'un total de près de 9000 ans de nouvelles simulations climatiques dans le cadre du projet international CMIP5. Le nouveau modèle climatique couplé global CNRM-CM5 a été développé à cette fin en collaboration forte avec le Cerfacs. Il s'appuie sur le cœur couplé océan-atmosphère NEMO v3.2 (IPSL)/ARPEGE-Climat v5 (Météo-France). Les échanges surface-atmosphère, la glace de mer et l'écoulement des fleuves au sein de CNRM-CM5 sont respectivement représentés par SURFEX v5, Gelato v5 et TRIP. Ce nouveau modèle, d'une résolution horizontale proche de 150km, est couplé par OASIS3.

De nouveaux scénarios d'évolution des gaz à effet de serre et des aérosols atmosphériques ont été définis dans le cadre de CMIP5. Ces nouveaux scénarios sont établis en fonction d'un forçage-cible atteint en fin de XXI^e siècle. Ainsi les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5

correspondent à un forçage radiatif en 2100 de 2,6W.m⁻², 4,5W.m⁻² et 8,5W.m⁻² par rapport aux conditions préindustrielles (vers 1850). CNRM-CM5 simule respectivement une augmentation de la température moyenne de 1,3°C, 2,1°C et 3,5°C entre les périodes 1970-1999 et 2070-2099. Forcé par le scénario le plus pessimiste, CNRM-CM5 simule une augmentation de la température en moyenne annuelle supérieure à 4°C sur les continents et proche de 10°C en Arctique. Comme lors des précédents exercices, on remarque que quelque soit le scénario, la température augmente plus rapidement sur les continents que sur les océans, et que le niveau de réchauffement varie en fonction de la latitude. L'amplification du réchauffement climatique simulée dans les régions polaires est notamment due à la régression du manteau neigeux et de la banquise.

7

L'avenir de la neige dans les montagnes françaises soumises au réchauffement anthropique

Le raffinement à l'échelle de la France des scénarios de changement climatique est un enjeu à la fois pour les mesures d'adaptation d'ici le milieu du siècle et pour une meilleure connaissance des risques encourus à la fin du siècle en l'absence de mesures d'atténuation.

Dans le projet ANR/SCAMPEI nous avons développé une approche originale pour estimer l'enneigement à l'échelle de ses impacts. Les trois modèles de climat régionaux français ont simulés des périodes de 30 ans sur la France à haute résolution (12 km pour ALADIN). Les sorties de ces modèles ont été adaptées statistiquement pour avoir la même distribution climatologique que les analyses horaires de SAFRAN sur les 615 zones SYMPOSIUM pour diverses tranches d'altitudes espacées de 300 m.

On dispose ainsi de quinze séries de 30 ans dont trois ont le même climat que la période de référence 1961-1990, six un climat possible au milieu du XXI^e siècle et six un climat possible à la fin du XXI^e siècle en l'absence de mesures d'atténuation. Les variables météorologiques de ces séries ont été utilisées en entrée pour le modèle de sol-végétation ISBA-ES qui a recalculé un manteau neigeux plus précis. La figure montre, pour ALADIN et la fin du XXI^e siècle selon le scénario A2 du GIEC la forte réduction la hauteur moyenne de neige en hiver en montagne. On trouvera bien plus de résultats et des données librement téléchargeables sur www.cnrm.meteo.fr/scampe/.

8

Analyse des tendances sur les débits des grands bassins et mise en évidence de la fonte du pergélisol

Selon le dernier rapport du GIEC, les conséquences hydrologiques du réchauffement global demeurent très incertaines, y compris à l'échelle continentale. Comprendre les tendances observées sur les débits des grands bassins représente donc un enjeu crucial pour contraindre les projections hydrologiques du XXI^e siècle. Dans le cadre du projet RTRA CYMENT, le modèle hydrologique ISBA, associé au modèle de routage des fleuves TRIP, a été forcé par des ré-analyses corrigées de leurs biais systématiques afin de simuler globalement les débits des grands fleuves sur la période 1950-2006. Des observations satellitaires de variations des stocks d'eau (mission gravimétrique GRACE lancée en 2002) ont par ailleurs été utilisées pour valider les bilans d'eau simulés à l'échelle des grands bassins. Cette comparaison témoigne du bon comportement du modèle ISBA, aussi bien en terme de cycle annuel que de variabilité interannuelle. Elle renforce ainsi la confiance que l'on peut avoir dans les débits simulés, dont la variabilité interannuelle et multi-décennale est conforme aux observations pour la plupart des grands bassins mais montrent une tendance contradictoire pour les bassins dont l'embouchure se situe au nord de 60°N (cf. figure). Ce résultat souligne la nécessité de représenter le pergélisol (et sa fonte récente) dans le modèle ISBA comme dans la plupart des modèles de climat qui négligent encore cette composante du système climatique dont le dégel aura par ailleurs des conséquences importantes sur le cycle du carbone.

9

Publication de projections climatiques avec l'Earth System Grid (ESG)

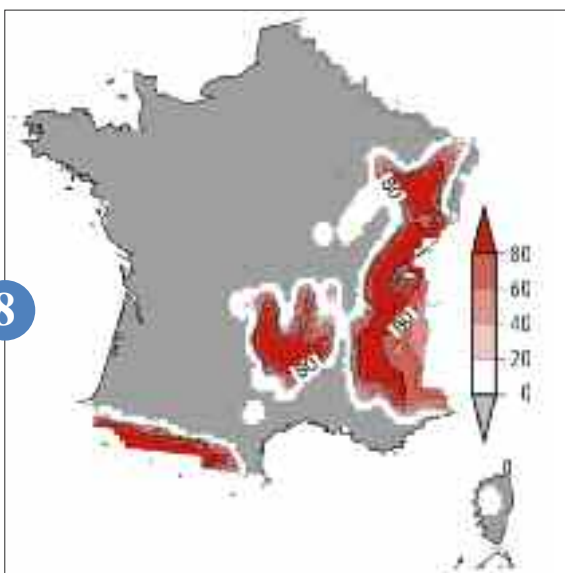
La contribution du CNRM-GAME aux travaux du GIEC passait cette année par la mise à disposition de la communauté internationale des résultats de simulations longues produites par le modèle climatique CNRM-CM5 dans le cadre de CMIP5.

Cette mise à disposition s'est réalisée par une participation à l'Earth System Grid (ESG). L'ESG est un réseau d'ordinateurs, hiérarchisés en « portails d'accès » et en « nœuds de données ». Les portails permettent à une vaste communauté scientifique de découvrir et choisir les données, alors que les nœuds hébergent et délivrent effectivement ces données. Le CNRM-GAME met en œuvre un des nœuds de données, qui héberge aussi les résultats des simulations décennales réalisées par le CERFACS en utilisant CNRM-CM5. Son installation a été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut Pierre-Simon Laplace. Ce nœud de données est connecté au réseau RENATER par un accès direct à haut débit. Les principaux portails d'accès aux résultats CMIP5 sont quant à eux mis en œuvre par le PCMDI (États-Unis), le BADG (Royaume-Uni) et le DKRZ (Allemagne). Le CNRM publie ainsi plus de 60 téraoctets de données, parmi les 3 pétaoctets qui devraient être disponibles à terme pour l'ensemble du projet CMIP5. L'effort réalisé pour une mise en œuvre précoce de ce système, dans la suite d'un calendrier serré de réalisation des simulations, a permis d'assurer une très bonne visibilité des projections climatiques, et leur valorisation par la communauté scientifique. La compétence acquise sur les technologies concernées sera valorisée par la réutilisation de ce système pour publier d'autres jeux de données d'intérêt international.

10

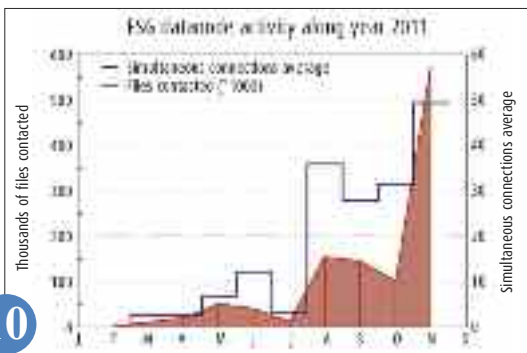
Réduction (%)
de la hauteur de neige moyenne en hiver pour
un climat possible en fin de XXI^e siècle
(scénario A2 du GIEC)
par rapport un climat de référence (1961-1990).
Les zones grisées correspondent aux régions
avec moins de 1 cm en moyenne
pour le climat de référence.

8

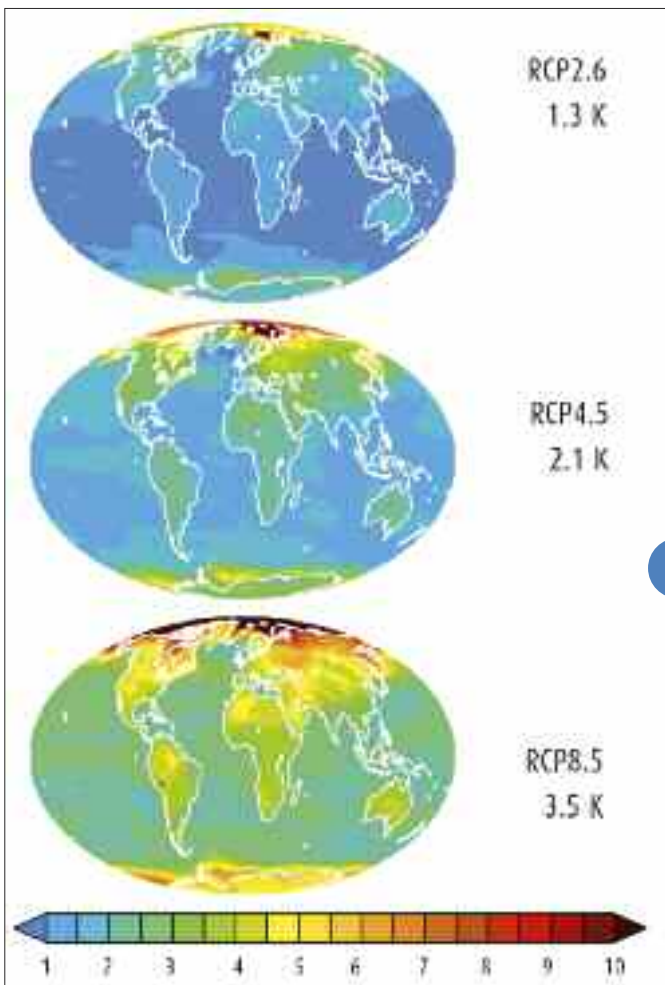
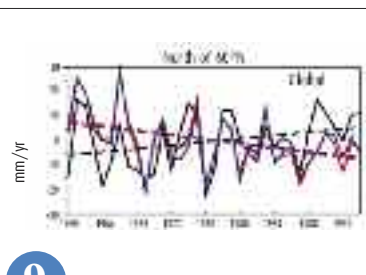


Activité du nœud de données CNRM
de l'Earth System Grid au cours de l'année 2011 :
la courbe bleue montre le nombre moyen de connections
simultanées (voir l'échelle à droite),
les plages grisées montrent le nombre total
de fichiers contactés (échelle sur la gauche)

10



9



Change-
ment
de température moyenne
annuelle à 2 mètres (°C)
entre la période
1970-1999 et la période
2070-2099 simulé
par le modèle CNRM-CM5 en
fonction du scénario d'émis-
sion de gaz à effet de serre
considéré.

7

Études environnementales liées à l'atmosphère

En 2011, de nombreuses actions de recherche ont été réalisées dans les domaines de l'hydrométéorologie, de l'océanographie, de la neige et de la modélisation de la qualité de l'air. Hormis les sujets développés dans ce chapitre, nous retiendrons également les travaux sur la simulation des crues rapides dont l'approche ensembliste intègre maintenant une perturbation des champs du modèle atmosphérique déterministe, la validation du modèle de lac FLAKE sur la base des mesures de la campagne THAUMEX conduite à l'automne sur l'étang de Thau et le développement d'un modèle d'énergie du bâtiment pour une meilleure représentation des échanges ville-atmosphère.

Hydrométéorologie

RHYTMME : mise en production de la chaîne radar V1 et perspectives pour la V2

Le projet RHYTMME a pour finalité d'apporter aux gestionnaires locaux du risque des outils d'anticipation (dits services) des aléas naturels liés aux précipitations (crues, avalanches, feux de forêt...). Il focalise sur les régions montagneuses, très vulnérables aux aléas naturels ; la zone pilote couvre les Alpes du sud.

Une étape indispensable est d'améliorer la couverture hydrologique de ce territoire. Pour cela, le projet a installé, fin 2010, un radar au sommet de la Montagne Maurel (Alpes de Haute Provence) et les données d'un radar pré-existant (Mont Vial, Alpes Maritimes), propriété du CNRS et opéré par NOVIMET, sont exploitées. Ces deux radars sont Doppler, polarimétriques et fonctionnent en bande X. Une chaîne de traitement des données a été mise au point : séparation des échos météorologiques (pluie, neige, grêle) et non météorologiques (échos de sol, insectes, ...), correction des effets de l'atténuation due aux précipitations et production d'images de réflectivité et de lames d'eau individuelles et mosaïques, intégrant les radars environnants du réseau Météo-France.

Une première version de la chaîne radar RHYTMME tourne depuis juin en temps réel et alimente une plate-forme de services mise à disposition d'un groupe testeur dès cet automne. Cette chaîne constitue une innovation sur les plans scientifique (bande X) et de l'ingénierie (production en central de tous les produits radar à partir des données brutes), précurseur de la future chaîne opérationnelle de Météo-France.

Une deuxième version inclura une meilleure estimation des pluies fortes et une identification des hydrométéores (distinction pluie/neige sèche/neige mouillée/grêle, ...). Cette V2 se substituera à la V1 au printemps 2012.

1

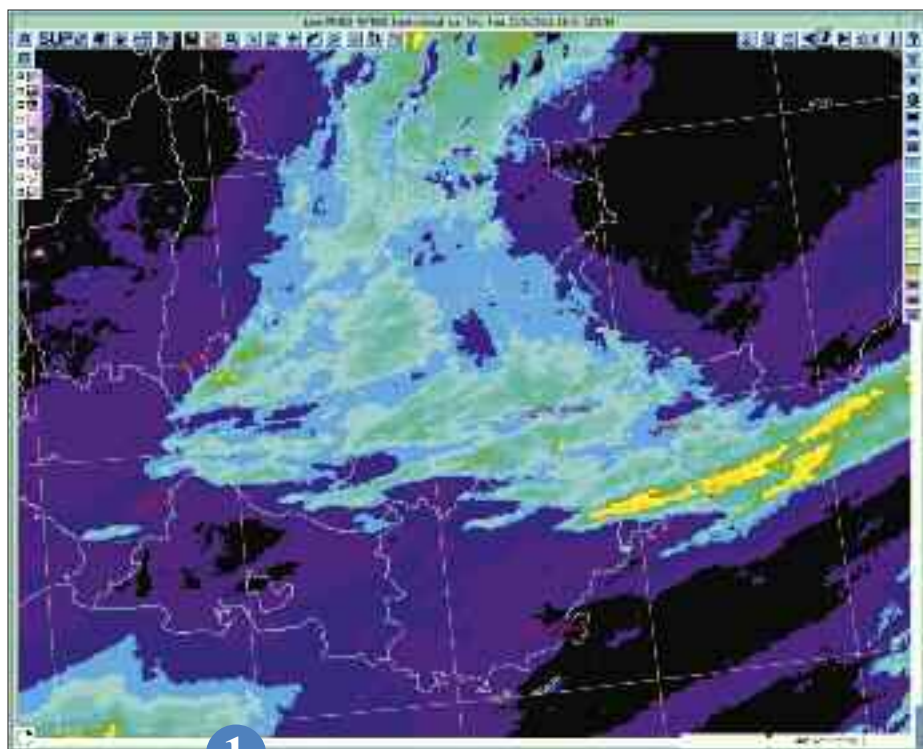
Contribution du CNRM au projet RHYTMME

Le Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale (GMEI) du CNRM opère depuis janvier 2011 un ensemble de capteurs dans la basse vallée du Var. Cette expérimentation a pour objectif d'évaluer les mesures de réflectivité des deux premiers radars en bande X du réseau RHYTMME et de tester de nouveaux moyens d'améliorer la lame d'eau radar en fond de vallée. Ce dispositif expérimental (figure a), composé d'une station sol, d'un pluviomètre, d'un disdromètre et d'un radar pluviométrie à visée verticale (MRR), est installé sur le toit de la gendarmerie de Puget-Théniers, située approximativement à mi-chemin des radars du Mont Maurel et du Mont Vial. Les instruments, opérés et surveillés à distance depuis Toulouse par l'intermédiaire d'une liaison 3G, vont rester en place jusqu'en juin 2012 avant d'être redéployés dans les Cévennes pour le projet HyMeX.

Le Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision (GMAP) est également impliqué dans le projet RHYTMME et travaille sur l'utilisation dans le modèle AROME, des données de vent radial et de réflectivité collectées par les radars en bande X du réseau. L'assimilation de ces deux observables permet en effet de recalculer des structures précipitantes mal prévues via l'analyse conjointe de la dynamique de basses couches et de l'intensité des précipitations. Les premières études d'impact sur des situations ciblées montrent un apport d'informations du premier radar en bande X du réseau. Son assimilation dans le modèle AROME se traduit en effet par l'amélioration des prévisions de cumuls précipitations au delà des six premières heures d'échéance (figure b).

2

Mosaïque de lame d'eau RHYTMME cumulée
entre le 19/10/2011 à 13h00 UTC
et le 20/10/2011 à 13h00 UTC.



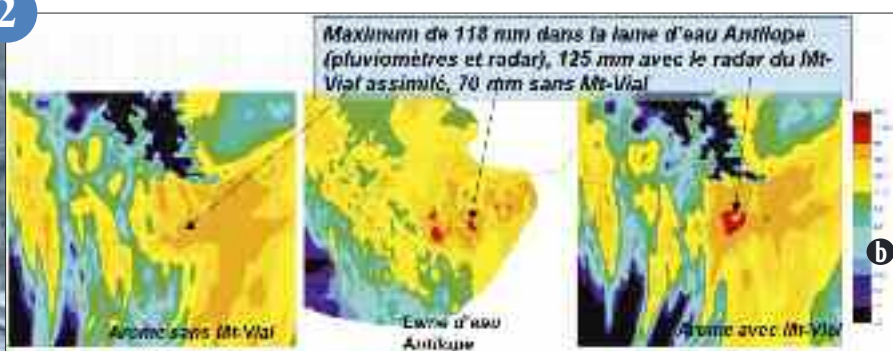
1

Vue d'ensemble du dispositif expérimental
déployé à Puget Théniers.



a

2



b

Précipitations cumulées entre 14h et 19h le 31/10/2010 issues,
au milieu, de la lame d'eau Antilope (combinaison pluviomètres et lame d'eau radar),
puis d'une prévision entre 2h et 7h d'échéance du modèle AROME, à gauche,
sans assimilation du radar bande X du Mt-Vial et à droite,
avec assimilation du radar bande X du Mt-Vial.

Océanographie (modélisation et instrumentation)

En 2011 le CMM a poursuivi son rôle dans la mise en oeuvre de stations d'observations sur les océans, contribuant ainsi à la visibilité internationale du CNRM et de Météo-France. Si une bonne partie des activités concerne les besoins de l'observation opérationnelle, le CMM joue un rôle très important dans les campagnes de mesure de la communauté scientifique. Un réseau de 100 bouées dérivantes (type SVP-B) a été maintenu sur l'Atlantique Nord dans le cadre du programme européen ESURFMAR que dirige le CMM. Une trentaine de bouées dérivantes est déployée régulièrement dans l'Océan Indien pour la surveillance cyclonique et une meilleure observation du grand sud. Le maintien de cinq stations fixes en haute mer a été assuré, deux sur le proche Atlantique en collaboration avec le UK Met-Office, deux en Méditerranée et une aux large des Antilles. Le renforcement des observations sur les deux bouées ancrées pour l'étude de l'interface océan-atmosphère et de la couche de mélange océanique a été réalisé dans le cadre de HyMex. Le CMM accompagne également la préparation des campagnes en mer avec le déploiement et la récupération de bouées dérivantes. La contribution à la validation des mesures fournies par le satellite SMOS se fait par la mise en mer de bouées dérivantes qui mesurent la salinité de surface de la mer dans le Golfe de Gascogne et au large de l'Amazonie. En 2011 le CMM a également eu un rôle moteur dans le développement des capteurs de températures de surface de la mer plus précis sur les bouées dérivantes de type SVP pour répondre aux besoins de la communauté scientifique.

L'activité de recherche spécifique pour mieux comprendre l'impact des vagues sur les flux entre l'océan et l'atmosphère s'est poursuivie en 2011. Cela passe par la collecte, le traitement de données in situ et les interactions avec la paramétrisation expérimentale des modèles de prévision numérique.

3

Apport d'un nouveau modèle de vagues régional forcé par ARPEGE

Un modèle de vagues global de 3ème génération (MFWAM), fruit de travaux de recherche et développement en collaboration avec le SHOM, le CEPMMT et l'IFREMER est opérationnel à Météo-France. Un nouveau paramétrage de la dissipation a été implémenté en décembre 2010. Les scores globaux ont été sensiblement améliorés et sont parmi les meilleurs au niveau mondial, malgré une résolution spatiale (55 km) moins importante que pour d'autres systèmes.

En juin 2011, une version régionale de MFWAM forcée par le modèle ARPEGE a été installée pour bénéficier de la résolution maximale d'ARPEGE qui est de 10 km environ sur la zone Europe-Atlantique. Ce modèle a pour vocation de fournir des prévisions de vagues sur les zones proches de notre littoral métropolitain, cohérentes avec les prévisions de vent ARPEGE, pour la production des bulletins réguliers et pour la vigilance vagues submersion. Ce modèle a fait l'objet de nombreux tests et a été validé sur plusieurs mois. La réduction des erreurs systématiques (biais) et aléatoires (indice de dispersion) par rapport au modèle de vagues précédent, forcé par ARPEGE avec la même résolution, est très significative (voir figures a et b).

Ce modèle fournira également les conditions limites au prochain modèle MFWAM/AROME à 2.5 km de résolution, qui fera l'objet d'une validation et d'éventuels ajustements grâce, entre autres, à la modélisation mise en place dans le cadre de la campagne HYMEX et grâce aux données du nouveau radar altimètre en bande Ka du CNES, plus adapté aux zones côtières, et qui sera embarqué sur un satellite indien avec un lancement prévu avant mi-2012.

4

Ondes solitaires dans l'océan superficiel

Les ondes internes, ondes se propageant au sein d'un milieu stratifié, interviennent dans de nombreux processus atmosphériques et océaniques. Elles font intervenir des échelles telles que leur mesure in situ est difficile et que leur représentation explicite dans les modèles numériques n'est possible que pour des domaines très limités. La simulation physique constitue de ce fait un outil intéressant pour améliorer notre compréhension des phénomènes complexes associés à ces ondes.

Ces ondes peuvent se développer au niveau d'une interface de densité, par exemple à la base de la couche de mélange océanique (la pycnocline). Sous certaines conditions, elles peuvent se propager sur plusieurs centaines de kilomètres en conservant leur forme et leur énergie. Ces ondes sont appelées des ondes solitaires.

Elles ne sont pas rares dans certaines régions, et peuvent avoir un impact important sur les structures en mer (plates-formes, usines, navires, ...). Leur prévision est donc un enjeu important pour l'industrie maritime. Elles ont également un impact sur la couche de mélange océanique difficile à paramétrer car leur source n'est pas locale.

Des expériences de laboratoire sont menées sur ces ondes dans l'équipe de simulation physique du CNRM-GAME, en collaboration avec le Laboratoire d'Aérodynamique et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Elles concernent en particulier les ondes générées à la pycnocline par une dorsale océanique, soit de façon directe comme en Mer de Sulu, soit de façon indirecte comme dans le Golfe de Gascogne.

Ces travaux permettront de mieux connaître les conditions favorables à la formation de ces ondes de grande amplitude, mais aussi de mieux quantifier leur rôle dans le maintien de la circulation générale océanique et dans les échanges océan-atmosphère.

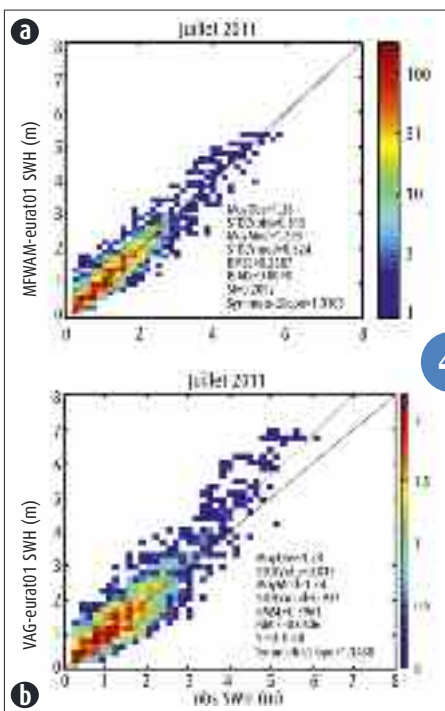
5



3

Bouée dérivante SVP-B en mer. ▲

Diagramme de dispersion représentant la densité de données modèle MFWAM-observations. Le modèle MFWAM est forcé par ARPEGE, les données sont issues des bouées localisées en Manche, Mer du nord et Méditerranée.



4

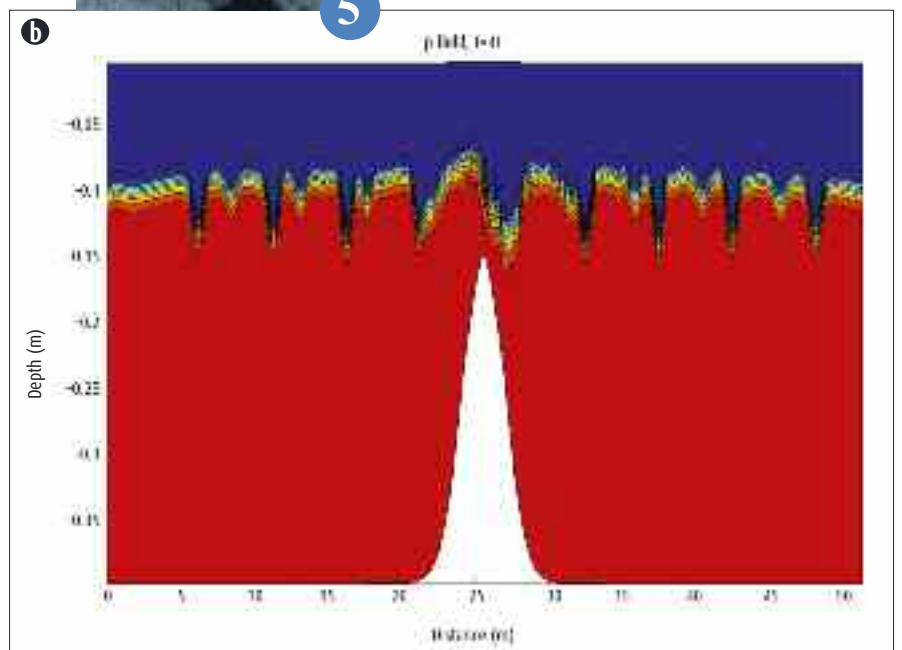
Diagramme de dispersion représentant la densité de données modèle VAG-observations. Le modèle VAG est forcé par ARPEGE, les données sont issues des bouées localisées en Manche, Mer du nord et Méditerranée.



◀ Déformation de la surface de l'océan induite par la propagation d'ondes solitaires à la base de la couche de mélange océanique. Cette image prise en mer de Sulu est issue d'un radar à ouverture synthétique (©ESA 1998).

Génération primaire d'ondes solitaires au niveau d'une pycnocline au-dessus d'un mont gaussien dans une simulation numérique directe réalisée avec le modèle Symphonie.

5



Des mesures continues en mer pour mieux comprendre les échanges océan-atmosphère

Dans le cadre du programme HyMex du Chantier Méditerranée et du SOERE MOOSE, le CNRM a procédé comme prévu au renforcement de l'équipement des bouées ancrées Golfe du Lion et Côte d'Azur. Ces bouées fournissent depuis une dizaine d'années des mesures des paramètres atmosphériques (pression, température, humidité, vent) et océanographiques (température de surface, houle). Ces observations servent ensuite à contraindre les modèles de PNT. Le début de la période d'observation longue de HyMex était l'occasion d'équiper les bouées en davantage de capteurs des paramètres d'intérêt. Disposer de mesures horaires sur des périodes longues permet de s'intéresser à des phénomènes à toutes les échelles de temps : de l'arrivée d'un phénomène convectif, sur quelques heures aux manifestations saisonnières ou même aux dérives climatiques sur le long terme. Les deux bouées mesurent maintenant, en plus des paramètres atmosphériques standard, les flux radiatifs solaire et infra rouge et la salinité de surface. Un test de mesures de précipitations a lieu, avec notamment deux modèles de pluviomètres différents sur la bouée Côte d'Azur. Une vingtaine de capteurs de température permettent de suivre l'évolution de la température de la mer de la surface jusqu'à 250 m. Pour améliorer la co-localisation de ces mesures avec celles des températures de la mer du mouillage profond maintenu par l'Observatoire de Banyuls, la bouée Lion a été rapprochée du mouillage lors de son dernier remplacement en septembre 2011. Sur ce point, les températures de l'eau sont donc maintenant mesurées sous forme d'un profil quasi continu, de la surface jusqu'à 2000 m de profondeur.

6

Amélioration de la précision des mesures de température de la mer sur bouées dérivantes

Les bouées dérivantes constituent la principale source d'observation in situ de la température de surface de la mer (SST) utilisée pour valider les mesures faites par satellite (voir illustration). Météorologistes et océanographes gèrent un réseau opérationnel d'environ 1300 bouées sur toutes les mers du globe, dans le cadre du Data Buoy Cooperation Panel (DBCP). Ces bouées transmettent leurs mesures en temps réel avec une résolution de 0,1K et la précision des mesures de température avoisine 0,2K.

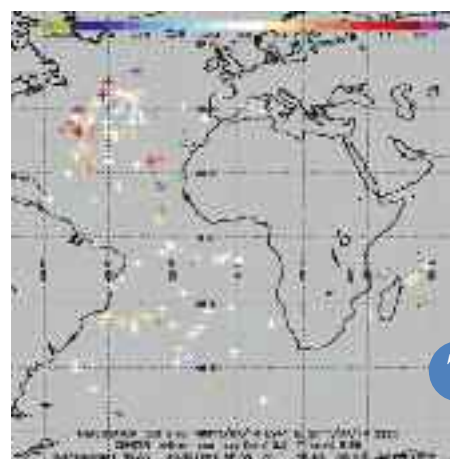
En 2010, le GHRSSST a exprimé le besoin de disposer de données plus fines (précision 0,05K, résolution 0,01K). Météo-France a proposé que les bouées mises en œuvre dans le cadre de ESURFMAR soient à même de répondre à la demande. Une première génération de bouées, appelées HRSST-1 a été construite et mise en œuvre. Les données et positions (GPS) sont transmises à terre via Iridium puis sur le SMT sous forme de messages BUFR. Les sondes de température, plus précises que les précédentes, ne sont toutefois pas étalonnées après intégration dans les bouées. Les valeurs d'étalonnage du fabricant des sondes sont utilisées. Le convertisseur A/N est intégré à la bouée. Fin octobre 2011, environ 140 bouées de ce type avaient été mises à l'eau, dont 110 dans l'Atlantique Nord et 30 dans l'Océan Indien.

La prochaine étape consiste à équiper les bouées (HRSST-2) de sondes de température numériques démontables afin de faciliter leur étalonnage avant mise à l'eau, voire après récupération éventuelle des bouées. Le convertisseur A/N sera alors intégré à la sonde de température. Les premières bouées de ce type devraient être mises au début de l'année 2012.

7



▲ La bouée Golfe du Lion lors de son remplacement, avec notamment les capteurs de flux radiatifs et de précipitations.



▲ Comparaisons entre mesures de bouées et données du capteur SEVIRI embarqué sur le satellite MSG.

► Moyennes zonales mensuelles de colonnes totales d'ozone climatologiques pour deux périodes de 10 ans, 1980-1989 (première ligne) et 1990-1999 (seconde ligne), pour les observations Bsv2.7 (colonne de gauche), et les simulations CNRM-ACM (colonne centrale) et CNRM-CCM (colonne de droite).

Chimie atmosphérique et qualité de l'air

Utilisation de forçages AROME pour la prévision de la qualité de l'air avec MOCAGE

Au cours de l'été 2011, les prévisions opérationnelles MOCAGE ont utilisé les forçages d'ARPEGE pour prévoir la qualité de l'air sur la France. En parallèle, des prévisions ont tourné quotidiennement au CNRM en utilisant des forçages AROME pour le premier jour de prévision.

Dans un premier temps, les forçages AROME sont utilisés à la résolution actuelle de MOCAGE, soit 0.1° sur la France. Pour l'été 2011, les résultats sont satisfaisants, au sens où les scores de MOCAGE ne sont pas perturbés par le changement de forçages, ce qui constitue un bon point de départ avant de réduire la résolution horizontale. Le tableau ci-dessous illustre la robustesse des prévisions des maxima d'ozone en différentes régions couvrant l'ensemble de la France. L'été 2011 n'a pas présenté d'épisode de pollution important, et n'a donc pas permis d'étudier la réponse de la nouvelle configuration en situation de canicule.

L'objectif désormais est d'utiliser les forçages AROME à la résolution horizontale de 0.025°, ce qui devrait cette fois modifier nettement les scores de MOCAGE. L'intérêt de la haute-résolution repose en partie sur l'utilisation de l'Inventaire National Spatialisé (1km/1h) qui sera prochainement disponible.

8

Validation du modèle de climat CNRM - CCM incluant une représentation détaillée de la chimie stratosphérique

Les modèles tridimensionnels de circulation atmosphérique qui incluent une représentation interactive de la chimie stratosphérique sont appelés Modèles de Chimie-Climat (MCCs). Ce sont des outils clés pour l'attribution et les prévisions de l'évolution de la couche d'ozone stratosphérique liées aux effets combinés des changements dans les concentrations des gaz à effet de serre et des gaz qui détruisent la couche d'ozone. Nous présentons ici les résultats d'une activité de modélisation qui a conduit à la définition et à la mise en place d'une nouvelle version du MCC du CNRM, dénommé « CNRM-CCM ». CNRM-CCM inclut des différences fondamentales avec la version précédente (CNRM-ACM) évaluée de manière très approfondie dans le contexte de l'activité WRCP/SPARC/CCM Val-2. Les différences les plus importantes

concernent le schéma radiatif du Modèle de Circulation Générale (MCG), et l'inclusion du schéma de chimie stratosphérique de notre Modèle de Chimie Transport MOCAGE en ligne dans le MCG. CNRM-CCM simule des champs dynamiques et chimiques satisfaisants dans la stratosphère (voir figure). Parmi les défauts identifiés, on peut citer les températures trop élevées dans la haute stratosphère (entre 5 et 1 hPa) où les concentrations de NO₂, N₂O₅ et O₃ apparaissent biaisées. Malgré cela, nous montrons que ce nouveau MCC du CNRM est un outil tout à fait adapté pour étudier les interactions entre la chimie et le climat, en particulier aux échelles saisonnière et décennale.

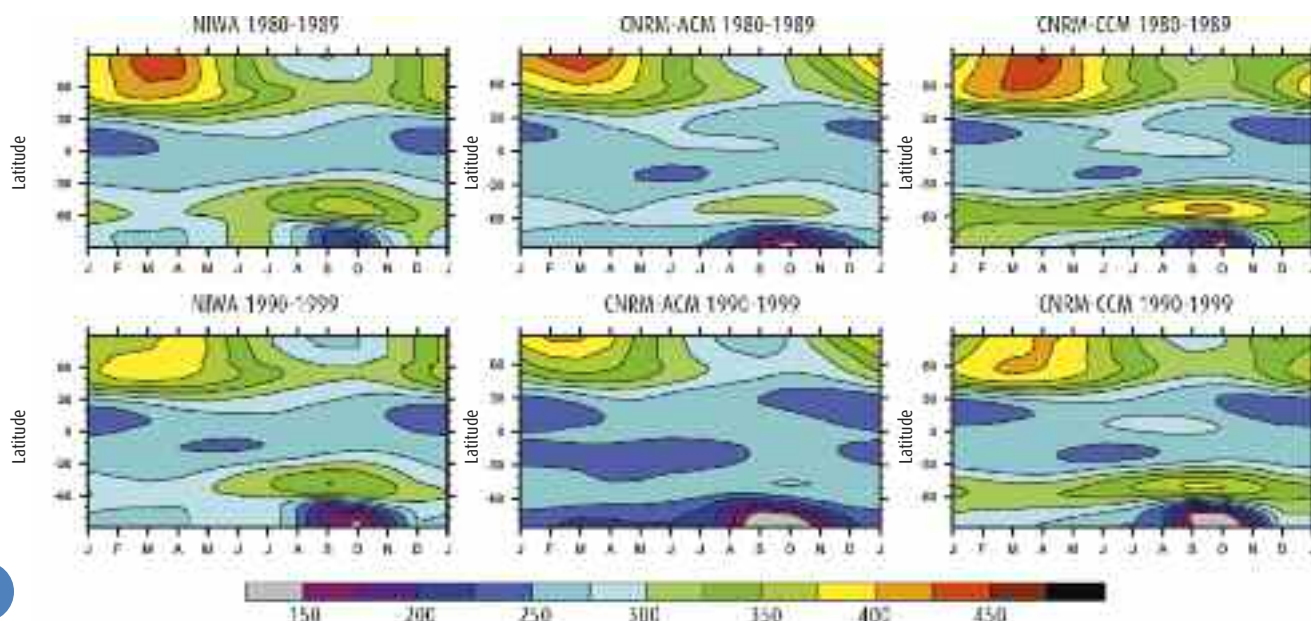
9

8

	ARPEGE	AROME
Ouest	0,73	0,72
Paris & Nord	0,70	0,71
Est	0,69	0,70
Sud-Ouest	0,67	0,64
Sud-Est	0,66	0,66

Été 2011 : effet des forçages météorologiques sur les prévisions MOCAGE. Médiane des corrélations entre les maxima quotidiens d'ozone prévus et observés pour les stations de classe 1 à 8, ce qui revient à ne pas prendre en compte les stations les plus polluées qui sont les moins représentatives (Joly & Peuch 2011).

9



Étude du manteau neigeux et des avalanches

En 2011, des travaux en vue d'améliorer la modélisation et la prévision de la stabilité du manteau neigeux ont été intensifiés. En particulier, plusieurs campagnes de mesures du transport de neige par le vent ont été menées au Col du Lac Blanc (par laser ou filets) afin de valider les simulations réalisées avec Méso-NH. Les travaux sur la télédétection du manteau neigeux ont permis le développement d'un modèle de propagation électromagnétique des ondes Ku et X dans le manteau neigeux, ainsi que des avancées sur la détermination de propriétés de la cryosphère via des mesures satellitaires (émissivité, taille des grains de surface,...). Les travaux sur la physique de la neige se sont poursuivis, notamment pour la prise en compte de nouveaux paramètres dans les modèles de neige (la surface spécifique de la neige ou la conductivité thermique par exemple) et pour affiner le lien entre les échelles micro et macro (en particulier via la réalisation en laboratoire d'expériences de métamorphoses sous fort gradient thermique et l'amélioration de l'analyse des données à micro-échelle). Les interactions entre cryosphère et climat ont été étudiées selon plusieurs axes : comparaison de la climatologie modélisée des Pyrénées avec des données MODIS, poursuite de l'étude de l'évolution de l'enneigement alpin sous l'effet du changement climatique au cours du siècle, modélisation des ressources en eau pour des bassins versants nivo-glaciaires. Le CEN a également assuré de nombreuses activités de soutien à la prévision opérationnelle du risque d'avalanche, comme la mise en place d'un nouveau Bulletin d'Estimation du Risque d'Avalanche, l'installation d'une nouvelle station Nivose dans le Beaufortain ou l'organisation au mois de septembre de la 16^e réunion des services européens de prévision du risque d'avalanche à Grenoble.

10

Activité avalancheuse naturelle et conditions nivo-météorologiques associées ces 50 dernières années dans les Alpes Françaises

Le projet ECANA (Etude Climatologique de l'Activité avalancheuse Naturelle des 50 dernières années dans les Alpes françaises) est financé par la DGPR du MEDDTL et porté conjointement par le Centre d'Étude de la Neige (Météo-France/CNRM) et le CEMAGREF/ETNA. Il a pour principaux objectifs de :

- dresser une climatologie des événements avalancheux naturels des 50 dernières années sur les Alpes Françaises,
- investiguer la corrélation entre l'évolution des indicateurs moyens de l'activité avalancheuse (intensité et fréquence des événements) et l'évolution des indicateurs moyens nivo-météorologiques (température, précipitations, enneigement).

La première étape a été de construire une base de données intégrant :

- un indice d'activité avalancheuse basé sur les données de l'Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) gérée par le CEMAGREF,
- un indice d'activité avalancheuse (IAA) codifiée par le réseau nivo-météorologique de Météo-France,
- un indice synthétique du risque d'avalanches analysé par le modèle MEPRA,
- les résultats de la chaîne SAFRAN-Crocus pour les variables nivo-météorologiques,
- un indice composite (IC) basé sur les indices EPA et MEPRA.

Les premiers résultats sur des moyennes annuelles (cf. figure) font apparaître :

- une bonne cohérence et complémentarité entre les bases de données du CEMAGREF et de Météo-France,
- une absence de tendance significative d'évolution de l'activité avalancheuse observée ces 50 dernières années,
- un indice de risque MEPRA très représentatif dans les situations hivernales mais à améliorer en situation printanière.

L'étude devrait être poursuivie pour des échelles spatiales et temporelles plus petites puis ouvrir la porte à un travail sur la relation évolution du climat/avalanches.

11

Dix-huit ans de données nivo-météorologiques pour l'évaluation et le développement de modèles hydro-nivologiques au col de Porte

Le site expérimental du col de Porte (1325 m d'altitude, massif de la Chartreuse, près de Grenoble, France) est consacré depuis 1960 à l'étude du manteau neigeux. En particulier, ce site expérimental intègre toute l'instrumentation nécessaire, parfois issue de développements internes, pour mesurer en continu les conditions météorologiques (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent, rayonnement solaire et thermique incident, précipitations solides et liquides) et certaines propriétés du manteau neigeux (hauteur, albédo, écoulement basal, équivalent en eau). En outre, des mesures hebdomadaires manuelles complètent la caractérisation de

l'état du manteau neigeux (type de grain, température, masse volumique, teneur en eau liquide). Ce jeu de données unique a été utilisé dans le passé pour développer et évaluer les modèles numériques permettant de simuler l'évolution temporelle des propriétés du manteau neigeux, tel le modèle Crocus développé au CEN. En 2011, les données horaires acquises depuis 1993 ont été rassemblées et décrites de façon unifiées afin d'en permettre un usage plus large par la communauté scientifique pour les besoins de la modélisation hydro-nivale. Elles seront transmises au service climatologique de Météo-France pour être incluses dans les bases de données ad-hoc,

et diffusées librement à la communauté scientifique en parallèle d'une publication scientifique décrivant ce jeu de données. La poursuite des développements concernant le modèle de neige Crocus se fonde pour une partie importante sur l'instrumentation utilisée au col de Porte ; plusieurs projets collaboratifs sont en cours sur ce site, concernant par exemple le bilan énergétique de surface et l'impact de la présence d'impuretés au sein du manteau neigeux.

12



10

Dispositif expérimental de mesure du transport de neige par le vent sur le site du Col du Lac Blanc (2800 m d'altitude, Alpes françaises).



12

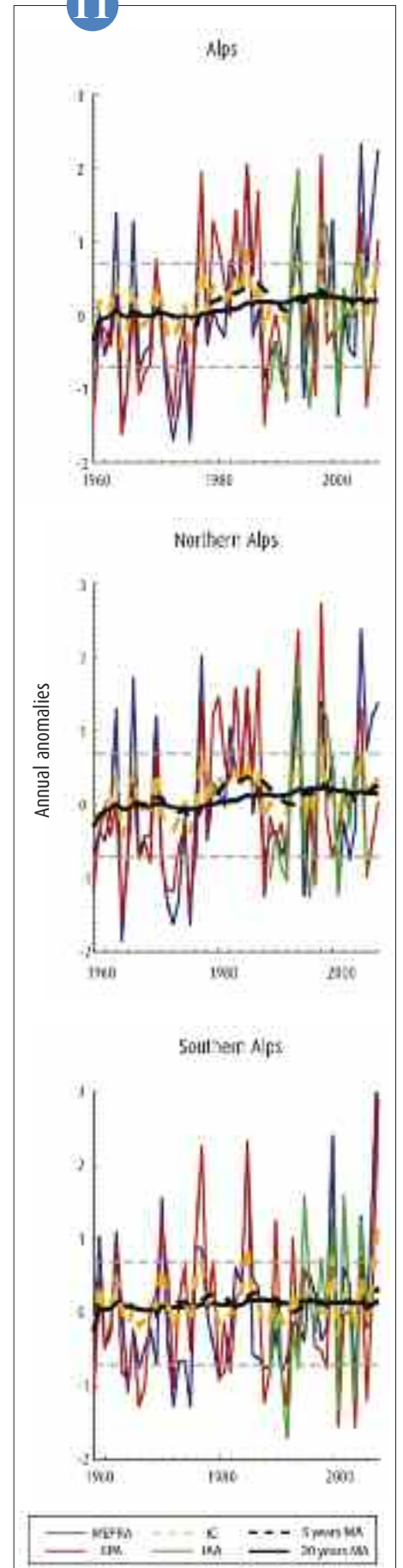
Vue d'ensemble du site nivo-météorologique du col de Porte et détail de quelques uns des instruments situés dans le parc de mesures.

Capteurs de précipitation (1, 2), de vitesse du vent (3), d'écoulement basal (4), de hauteur de neige et de suivi de la hauteur des couches dans le manteau neigeux (5), de température et d'humidité de l'air (6), de rayonnement incident et réfléchi dans le domaine solaire et thermique (7 et 8), de rayonnements cosmiques pour la mesure de l'équivalent en eau de la neige (10). Sont également présents sur le site une webcam (11) et une station automatique Nivose (12). Les sondages hebdomadaires du manteau neigeux sont effectués dans une zone dédiée (14).

Les mesures d'équivalent en eau de la neige sont obtenues via une collaboration fructueuse avec EDF au travers de la Direction Technique Générale.

Crédits photos : D. Poncet, B. Lesaffre (CNRM-GAME/CEN).

11



Anomalies annuelles des indicateurs d'activité avalancheuse EPA, MEPA et IC (50 dernières années) et IAA (20 dernières années).

Investigations expérimentales et numériques de la conductivité thermique de la neige

La conductivité thermique de la neige gouverne les échanges de chaleur au sein du manteau neigeux. C'est une variable importante pour quantifier et simuler les gradients verticaux de température qui sont le moteur des transformations morphologiques de la neige au cours du temps (métamorphisme). Pour étudier l'impact de la structure tridimensionnelle de la neige (microstructure) sur sa conductivité thermique, des calculs numériques ont été menés à partir d'images 3D obtenues par tomographie. La figure a présente quelques-unes des trente images utilisées pour cette étude, et illustre la grande variété de formes que peut prendre la neige au cours de ses transformations. Les calculs ont été effectués en collaboration avec le laboratoire 3S-R et ont permis de calculer les termes de la conductivité thermique de la neige dans les trois dimensions de l'espace. Il a été constaté que, contrairement aux consensus internationaux qui prévalaient jusqu'alors, la conductivité thermique moyenne de la neige est d'une part très fortement corrélée à sa masse volumique, et d'autre part nettement sous-estimée par certaines méthodes de mesures de terrain (aiguille chauffée) (figure b). En outre, les résultats numériques ont mis en évidence une anisotropie de la conductivité thermique, c'est à dire l'existence d'une direction dans laquelle la chaleur est préférentiellement transmise. Les calculs ont également confirmé que la conduction dans l'air interstitiel, bien que 100 fois moins efficace que dans la glace, joue un rôle crucial pour la conduction thermique dans la neige. Ces résultats, importants pour améliorer la représentation des processus thermiques dans les modèles de manteau neigeux, seront intégrés dans le schéma numérique de neige Crocus.

13

Comparaison des données d'enneigement satellitaires MODIS-Terra avec celles du modèle de neige SAFRAN-Crocus

L'objectif du projet européen Fluxpyr (2009-2012) est l'étude des flux d'eau, carbone et énergie des sols pyrénéens. Tous ces flux étant fortement modifiés par la présence de neige, une bonne connaissance du couvert neigeux s'avère nécessaire pour leur évaluation. Compte tenu de la grande variété des pentes concernées et du faible nombre de points de mesure de l'enneigement, disposer d'un enneigement modélisé aux différentes altitudes, expositions et inclinaisons des pentes des massifs pyrénéens constitue un atout majeur. Encore faut-il que cet enneigement, que fournit la chaîne nivologique SAFRAN-Crocus, soit conforme à la réalité. Pour le savoir, une comparaison avec des données d'enneigement observées ponctuelles a déjà été effectuée. L'opportunité de réaliser une comparaison sur l'ensemble des Pyrénées, grâce aux données d'enneigement satellitaires MODIS-Terra, s'est présentée avec le projet Fluxpyr. Elle a porté sur la période 2000-2010 (celle de l'existence des données), et concerne le seul paramètre disponible, à savoir la présence/absence de neige.

Les résultats de cette comparaison révèlent une très bonne correspondance globale entre les deux types de données. Analysés plus finement, ils indiquent cependant que les écarts sont plus importants dans les zones (fluctuantes) de limite d'enneigement. D'autre part, les massifs situés dans la partie est de la chaîne pyrénéenne comportent également plus de divergences. A l'inverse, les zones de forêts ne présentent pas plus d'écarts que les autres.

Ainsi crédité d'une validation sur l'ensemble du relief, l'enneigement modélisé sur les Pyrénées permet d'une part de répondre aux demandes de climatologie nivale, d'autre part constitue une base de données de référence dans l'étude des climats présent et futur.

14

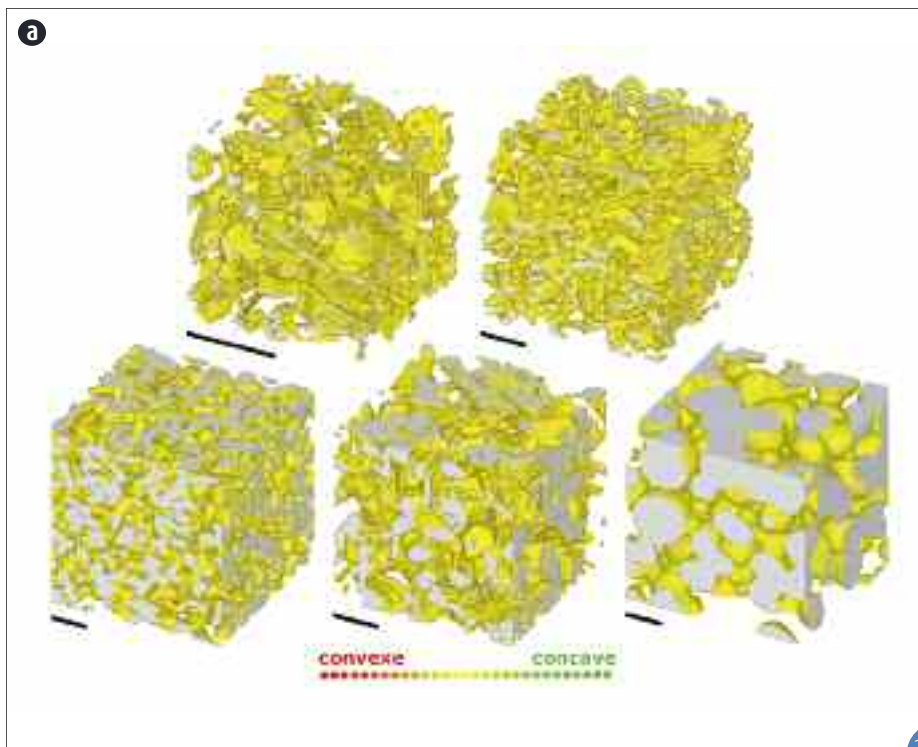
Campagne de mesure sur le transport de neige par le vent sur le Col du Lac Blanc

En montagne, le transport de neige par le vent entraîne une redistribution du manteau neigeux ainsi qu'un changement de qualité de la neige au sol. Il s'agit d'un facteur aggravant pour le danger d'avalanches, que ce soit pour les avalanches spontanées ou les départs provoqués par les pratiquants de la montagne. Pour étudier ce phénomène, un site de mesure a été installé sur le site du Col du Lac Blanc (2700m d'altitude) à proximité immédiate du domaine skiable de la station de l'Alpe d'Huez (Isère).

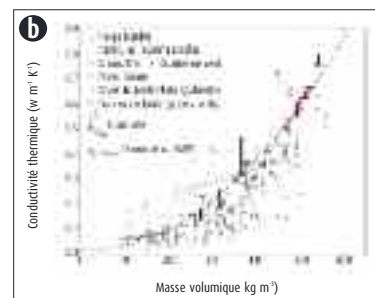
Ce site, sur lequel interviennent depuis plus de 20 ans le CEN et le Cemagref a accueilli en février et mars 2011 une campagne de mesures destinée à mieux décrire le phénomène du transport de neige par le vent. L'instrumentation du site a été renforcée par des mesures manuelles et automatiques de flux de particules à différents niveaux. La télé-détection terrestre par laser a permis de documenter les variations spatiales de hauteur de neige avec une précision d'une dizaine de centimètres sur la zone du Col. Trois épisodes de transport ont pu être documentés.

Cette campagne s'inscrit dans le cadre d'un projet du programme national LEFE/IDAO, auquel participent le CNRM-GAME, le Cemagref, le LEGI et le LGGE. Les mesures par laser ont été réalisées par l'université des ressources naturelles et sciences de la vie de Vienne. L'ensemble de ces données serviront à améliorer et valider les simulations de ce phénomène dans les modèles atmosphériques à échelle fine à vocation recherche, comme Méso-NH, ainsi que les modèles opérationnels utilisés pour la prévision du risque d'avalanches.

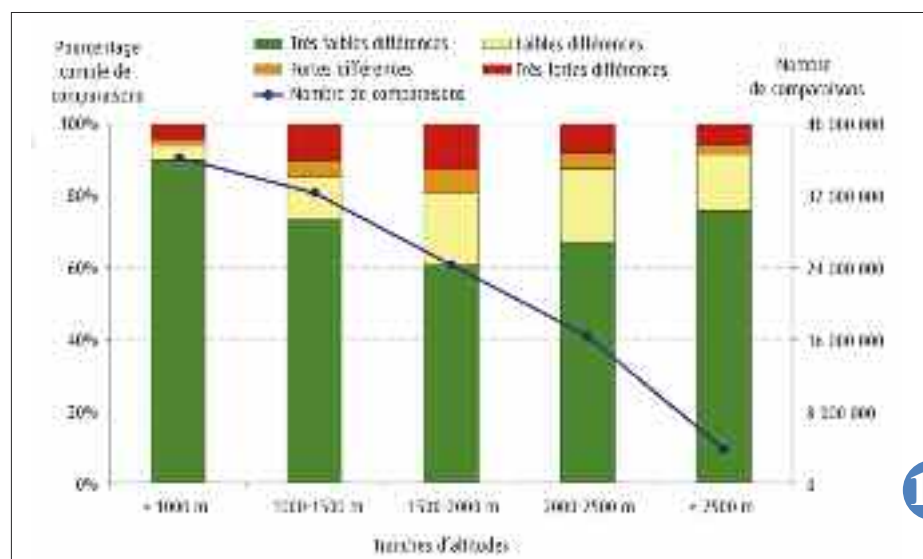
15



Visualisation tridimensionnelle de cinq échantillons typiques de neige utilisés pour cette étude (de gauche à droite et de haut en bas : neige fraîche, particules reconnaissables, grains fins, givre de profondeur, grains ronds). L'échelle est indiquée par le tiret noir, de longueur 1 mm. Lors de sa chute initiale, la neige est constituée de particules de précipitation (en haut à gauche), pour finalement atteindre le stade des grains ronds (en bas à droite), en passant par un ou plusieurs états intermédiaires. Les images présentées ont été obtenues en collaboration avec l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) ou le laboratoire 3S-R.



13



Synthèse des résultats de l'étude : présentation des valeurs issues du calcul numérique de la conductivité thermique de la neige en fonction de sa masse volumique. Les couleurs et symboles se réfèrent au type de neige concerné. Les symboles en forme de « T » indiquent le sens et l'ampleur de l'anisotropie de la conductivité thermique de la neige, qui est maximale pour les cristaux facettés et le givre de profondeur. Les symboles grisés correspondent à une compilation de mesures expérimentales, qui se révèlent quasi-systématiquement inférieures aux calculs numériques réalisés.

14

Répartition selon l'altitude des différences entre l'enneigement modélisé par la chaîne nivologique SAFRAN-Crocus et celui vu par le satellite MODIS-Terra (périodes novembre à mai de 2000 à 2010).

15



Le site du Col du Lac Blanc (2700m d'altitude, Isère).
 Au niveau du col : le champ de mesures avec les différents mâts de mesures météorologiques, de flux de neige transportée, de hauteur de neige et le chalet abritant les centrales d'acquisition.
 Au premier plan : le laser terrestre mesurant la hauteur du manteau neigeux sur la zone.

Instrumentation et campagne d'observation pour la recherche

Dans le domaine de l'observation, les activités de R&D conduites à Météo-France ont un double but : améliorer le réseau opérationnel et ses capacités, et explorer la physique de l'atmosphère pour mieux la connaître et la représenter dans les modèles numériques.

Dans le domaine de l'observation opérationnelle, l'année 2011 aura été marquée par le déploiement de la première version de la chaîne de traitement polarimétrique des radars opérationnels, étape importante d'un effort entamé dès 2004 pour doter Météo-France d'un réseau radar de pointe.

Dans le domaine spatial, un événement attendu a été le lancement réussi du satellite franco-indien Megha-Tropiques dédié à l'observation des nuages. Il suivi du démarrage des opérations de calibration/validation dans lesquels les moyens de recherche aéroportés de l'unité SAFIRE, basés pour l'occasion aux Maldives, ont été mis en œuvre.

Depuis son lancement en 2006 à bord de METOP-A, le sondeur hyper-spectral IR IASI est l'objet d'une intense activité à Météo-France. Outre des développements algorithmiques destinés à étendre le domaine d'utilisation de l'instrument, on notera cette année l'arrivée des premiers résultats de la campagne CONCODIASI conduite en 2010 en Antarctique sous la direction du CNRM.

Du côté des activités expérimentales, deux campagnes ont rythmé les activités des équipes instrumentales. Conduite dans le cadre du programme PREVIBOSS, une première campagne dédiée à l'étude du brouillard a eu lieu au SIRTa pendant l'hiver 2010-2011. Elle sera poursuivie par deux autres campagnes hivernales. La deuxième campagne, dénommée BLLAST, a eu lieu pendant l'été sur le site instrumenté de l'Observatoire Midi-Pyrénées de Lannemezan. Conduite sous la responsabilité du Laboratoire d'Aérodynamique et dédiée à l'observation de la couche limite de fin de journée, elle a été l'occasion pour le CNRM de tester avec succès des développements instrumentaux récents – sondage double sous ballon libre et mesure de la turbulence sous ballon captif.

L'année 2012 sera riche en activités expérimentales avec les campagnes liées aux programmes internationaux HYMEX et CHARMEX du Chantier Méditerranée. Leur préparation a mobilisé des forces importantes, elles constitueront un enjeu de recherche majeure pour la communauté française dans les années qui viennent.

Instrumentation in situ – télédétection

Évaluation de l'intérêt météorologique de la mesure de réfractivité par un radar précipitation

Le principe consiste à exploiter les retours des cibles fixes des radars précipitation pour en extraire des informations sur l'atmosphère entre le radar et la cible en exploitant les changements de l'indice de réfraction du milieu qui se traduisent par des variations mesurables de la phase du signal radar reçu de la cible fixe. L'enjeu est d'obtenir des mesures spatialisées de l'humidité en basse couche, qui seraient utiles pour améliorer la prévision météorologique à travers l'assimilation par le modèle numérique.

À la DSO, les efforts ont porté sur :

– la vérification de la faisabilité de la mesure avec les radars du réseau opérationnel ARA-MIS dont la fréquence émise peut varier. Une

nouvelle formulation théorique du signal radar a été proposée pour prendre en compte ces dérives en fréquence, et déterminer des facteurs correctifs. Cette avancée a été validée par un travail d'inter comparaison entre les mesures du radar opérationnel de Falaise et des mesures in-situ (figure a).

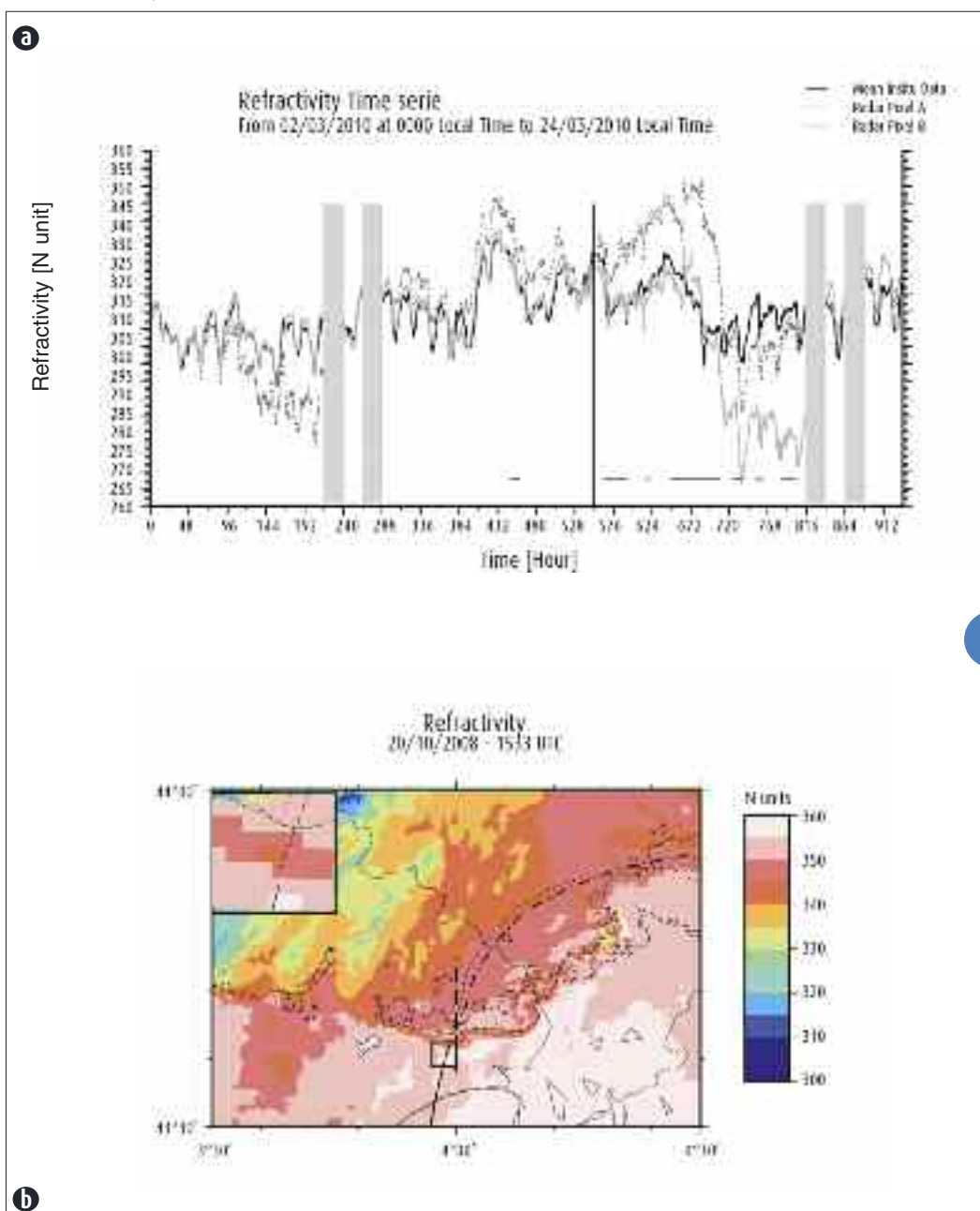
– en utilisant des sorties haute définition de MESO-NH pour l'événement convectif du 20 octobre 2008 dans la région SE, nous avons mis en évidence (figure b) qu'une anomalie notable de réfractivité se situe à l'avant de la convection, ce qui montre le potentiel de la méthode. Ce travail a aussi permis de comprendre la dépendance de problèmes d'ambiguïté de mesure avec la longueur

d'onde radar, le temps de revisite, les temps et distances d'intégration.

L'objectif est maintenant de progresser vers la mise en opérationnel de la mesure : adaptation de la méthode aux longueurs d'onde courtes (5cm, 3cm), pour lesquelles les problèmes d'ambiguïté sont les plus difficiles, mise en place en temps réel, validation à l'échelle du réseau par comparaison avec les mesures in-situ.

1

Variation temporelle, sur une durée de 40 jours, de la réfractivité mesurée par le radar de Falaise, et par des capteurs in situ. Jusqu'à l'arrivée de la pluie, matérialisée par les traits horizontaux, les mesures radar sont en très bon accord avec les mesures in situ pour le « pixel B » (traits pleins en gris), provenant d'une antenne de communication, alors que des problèmes sont visibles dès le second jour pour le « pixel A » (traits pointillés en gris), qui vient d'une falaise orientée obliquement. Extrait de Errors caused by long-term drifts of magnetron frequencies for refractivity measurement with a radar. Theoretical formulation and initial validation. Chiraz Boudjabil, Lucas Besson and Jacques Parent du Chatelet, submitted to JAOT.



▲ Coupe horizontale (20 octobre 2008, 15h33 UTC) d'une simulation Meso-NH à l'altitude 15m de la réfractivité, superposée à la réflectivité (iso contours 40 dBZ en pointillés). On observe un minimum marqué de la réfractivité à l'avant de la convection. On observe (images non montrées ici) que ce minimum correspond au maximum de CAPE, à une baisse de la température et de l'humidité, ainsi qu'à une confluence des vents horizontaux. Extrait de Links between weather phenomena and characteristics of refractivity measured by precipitation radar. Lucas Besson, Chiraz Boudjabil, Olivier Caumont and Jacques Parent du Chatelet 2011. Boundary Layer Meteorology, DOI 10.1007/s10546-011-9656-7.

Introduction opérationnelle et perspectives de la diversité de polarisation

La polarimétrie est devenue au fil des ans le standard technologique des radars météorologiques opérationnels. En émettant deux ondes, l'une polarisée horizontalement et l'autre polarisée verticalement, le radar polarimétrique permet une meilleure identification du type d'écho ainsi qu'une correction de l'atténuation par les précipitations. Cette dernière est réalisée par le biais d'un paramètre de phase mesuré directement par le radar, insensible aux masques et aux biais de calibration, et quasiment proportionnel à l'atténuation. Une première version de chaîne de traitement polarimétrique, incluant correction d'atténuation, élimination des échos non météorologiques et suivi de la qualité des observables polarimétriques, a été déployée en opérationnel le 21/09/2011 sur les radars de Trappes, Abbeville et Montclar. Cette date marque l'aboutissement d'un long travail de R&D démarré en 2004 avec l'installation du premier radar polarimétrique à Trappes et conclu en 2009 – 2010 par près d'une année de fonctionnement en double sur la dizaine de radars polarimétriques que compte le réseau ARAMIS en 2011.

L'évaluation par rapport aux pluviomètres a montré que l'intégration de la correction d'atténuation dans l'algorithme de lame d'eau radar (incluant le module d'ajustement temps réel par les pluviomètres) permet de réduire la sous-estimation de la lame d'eau radar sur les fortes pluies (> 10 mm en 1 heure) d'un facteur deux et la surestimation sur les faibles pluies (< 1 mm en 1 heure) également par 2. Le déploiement sur les autres radars polarimétriques va se poursuivre progressivement jusqu'au début de l'année 2012. Une version 2 est déjà en développement. Elle inclura l'identification des hydrométéores et une meilleure estimation des fortes pluies.

2

Microphysique des nuages de glace pour simuler les radiances nuageuses dans le spot IASI

Les principaux centres météorologiques opérationnels ont commencé à assimiler les données nuageuses des sondeurs IASI et AIRS. Mais cela reste surtout limité aux situations marines de nuage opaque, homogène et en phase liquide qui sont décrites avec une bonne précision par un modèle de transfert radiatif nuageux « classique ». L'assimilation des situations de nuages en phase glace ou semi-transparents nécessite de calculer avec précision l'effet radiatif induit par la microphysique du nuage. Ce travail a été initié pour estimer la qualité actuelle des modèles simulant la microphysique en IR et se donner des critères de sélection dans une assimilation de ces données. Pour cette étude, nous avons utilisé les modèles de transfert radiatif RTTOVv10 (SAFNWP) et HISCRTM (Université du Texas) pour simuler les nuages de glace et établir des comparaisons avec les observations des campagnes de mesure Lindenberg et Concordiasi. La figure a est un exemple entre le spectre observé par IASI et celui

simulé par RTTOVv10 pour un nuage semi-transparent élevé, en utilisant les profils du contenu en eau et en glace de la prévision du CEPMMT. La forte pente du spectre observé entre 800 et 1000 cm^{-1} a été bien restituée par le modèle ce qui n'est pas le cas si on ne tient pas compte de la microphysique du nuage. La figure b montre les statistiques entre spectres observés et calculés pour des nuages de glace lors de Concordiasi. L'utilisation de la microphysique (courbes bleues) a fortement diminué les résidus comparé à un calcul nuageux classique (courbes rouges) en utilisant la hauteur du nuage et son émissivité effective. Il reste cependant encore un travail important et de longue haleine avant de pouvoir utiliser avec confiance la modélisation microphysique dans une assimilation nuageuse.

3

Mesures in situ des propriétés microphysiques du brouillard

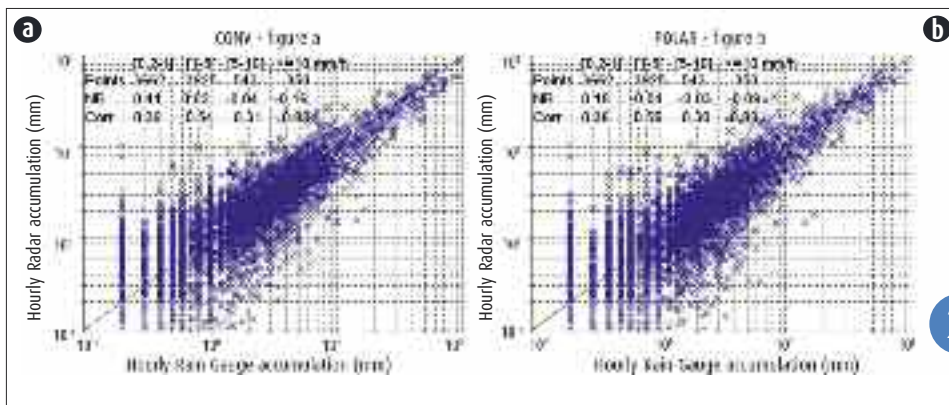
L'objectif du projet PreViBOSS, en collaboration avec le CNRM-GAME, l'IPSL et la société Hygeos, est d'améliorer le diagnostic sur les distributions spatiale et temporelle de la visibilité à la surface, ainsi que la prévision de la variabilité de cette visibilité dans le cycle de vie des brouillards, à partir d'observations sol et satellite.

Dans ce cadre l'équipe GMEI/MNPCA du CNRM-GAME a déployé sa plate-forme instrumentale de mesures au sol des propriétés microphysiques de l'aérosol et du brouillard lors de la première campagne qui s'est déroulée au SIRTa pendant l'hiver 2010-11. Un point fort de ce dispositif concerne la mesure in situ des particules nuageuses : le Palas-Welas qui mesure la distribution dimensionnelle entre 0.4 et ~ 10 μm de diamètre a été en effet complété par un Fog-Monitor de DMT qui mesure la distribution des gouttelettes entre 2 et 50 μm et un PVM de Gerber Scientific Inc. qui mesure le contenu en eau liquide et la surface intégrée des particules

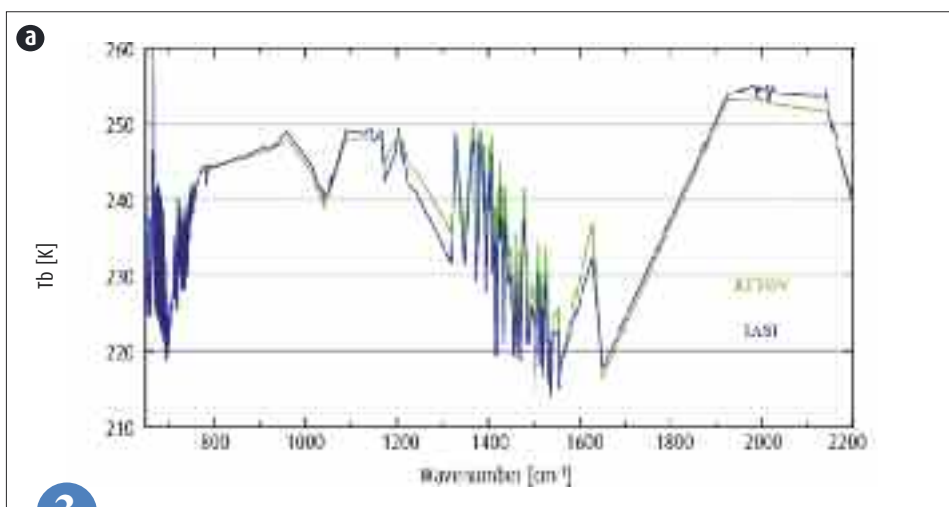
(proportionnelle à l'extinction) sur la même gamme. Ces données sont actuellement en cours d'analyse afin de caractériser les propriétés microphysiques du brouillard et de les relier aux propriétés initiales de l'aérosol (distribution dimensionnelle et hygroscopicité des particules).

Ce dispositif complètera les moyens d'observation du SIRTa (télédétection active et passive, mâts instrumentés) pour deux autres campagnes au cours des hivers 2011-12 et 2012-2013, afin de constituer une base de données permettant l'étude de l'interaction entre les différents processus radiatifs, dynamiques et microphysiques mis en jeu dans le cycle de vie du brouillard.

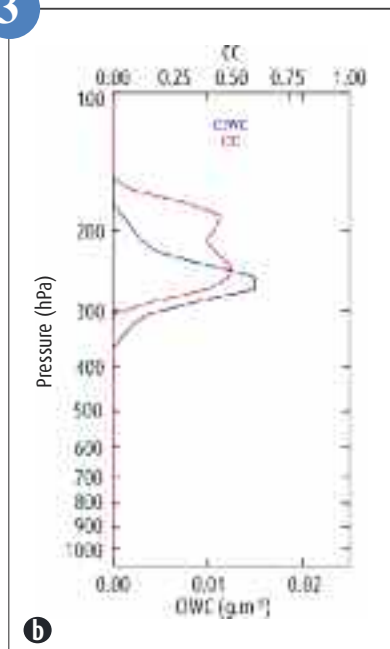
4



Évaluation des lames d'eau conventionnelles et des lames d'eau polarimétriques (cf. figure a et figure b) sur 11 épisodes pluvieux (entre l'été et l'hiver 2010). Les résultats sont présentés sous forme de diagrammes de dispersion avec en abscisse le cumul horaire pluviomètre et en ordonnée le cumul horaire de la lame d'eau.



Radiances nuageuses IASI simulées (vert) avec RTTOVv10 et le profil prévu de contenu en glace du CEPMMT (droite) et comparées aux observations (bleu) pour un nuage semi-transparent vers 260 hPa le 09/12/2010-14h33. Lon.=146.61°, Lat.: -67.97°.



Instrumentation permettant la mesure in situ des particules nuageuses dans le brouillard.



Statistiques pour les 633 situations Concoirdiasi pour lesquelles RTTOVv10 simule correctement le spectre observé (4% des co-registrations). Les courbes bleues montrent les biais et écart-type des résidus simulé-observé en utilisant la microphysique du nuage et les profils prévus de glace et d'eau liquide du CEPMMT. Les courbes rouges correspondent aux mêmes situations mais avec RTTOVv10 nuageux « classique » et la pression de sommet du nuage et la couverture restituées avec l'AVHRR ou la méthode du CO2Slicing quand cela a été possible (451 situations sur les 633).

Campagnes de mesures

Concordiasi : les premiers résultats

Le projet Concordiasi a mené une campagne de mesures sans précédent à l'automne 2010 en Antarctique. Dix-neuf ballons plafonnants du CNES ont été lancés depuis la base américaine de McMurdo. Ces ballons ont dérivé à 17km d'altitude pendant plusieurs semaines, emportant des dropsondes du NCAR, des capteurs d'ozone et de particules, des capteurs météorologiques et des récepteurs GPS. 640 dropsondes ont été déployées fournissant une grande diversité de conditions météorologiques sur le continent Antarctique et les océans avoisinants (figure a). À l'aide de ces données, dans des endroits d'ordinaire inaccessibles à la mesure in situ, nous avons commencé à documenter les performances des modèles météorologiques et la qualité des inversions réalisées à partir de l'instrument IASI par EUMETSAT. Un exemple est fourni sur la figure b. Les résultats montrent que les modèles

(ici, celui du CEPMMT) ont du mal à représenter les fortes inversions de température à la surface du continent Antarctique, et que cela est vrai également pour les profils restitués à partir des sondeurs satellitaires avancés de type IASI. D'autre part, des expériences d'impact indiquent une amélioration de la qualité des prévisions grâce à ces données de dropsondes, avec un fort impact des observations les plus près du pôle et dans la basse troposphère. D'autres travaux s'engagent sur la validation des modèles de chimie-transport à l'aide des données d'ozone obtenues pendant la campagne de mesures. Les données sont mises à disposition sur un site web hébergé par le CNRM : <http://www.cnrn.meteo.fr/concordiasi/>

5

Mesures météorologiques sur le Marfret Niolon dans le cadre de HYMEX

Dans le cadre du projet HYMEX et en collaboration avec IFREMER, le CNRM a contribué à l'équipement du navire Marfret Niolon sur la ligne Marseille Alger avec le système SEOS (Sea Embedded Observation System) permettant les mesures de vent, de température et d'humidité, des précipitations, des flux radiatifs descendant et de la température de peau de la surface de la mer. Sur un navire, la qualité de la mesure dépend en grande partie de la position choisie pour les capteurs. Ces emplacements sont souvent contraints par les architectures des stations courantes et par le câblage nécessaire pour l'alimentation en énergie.

Le système SEOS, conçu au CNRM, tient compte de ces limitations avec une architecture éclatée dont les éléments sont liés par radio, un choix de capteurs de faible

consommation et une alimentation en énergie autonome par batteries et panneaux solaires, permettant ainsi l'installation du capteur à l'endroit privilégié sans contraintes. De plus, compte tenu de l'affectation intermittente des navires aux lignes intéressantes, cette architecture permettra un transfert du système plus aisé d'un navire à l'autre. Les mesures réalisées sur ce navire, associées à des mesures de salinité et de température de l'eau mises en œuvre par IFREMER, alimenteront la base de données HYMEX en mesures d'échange d'énergie à l'interface air mer sur le long terme.

6

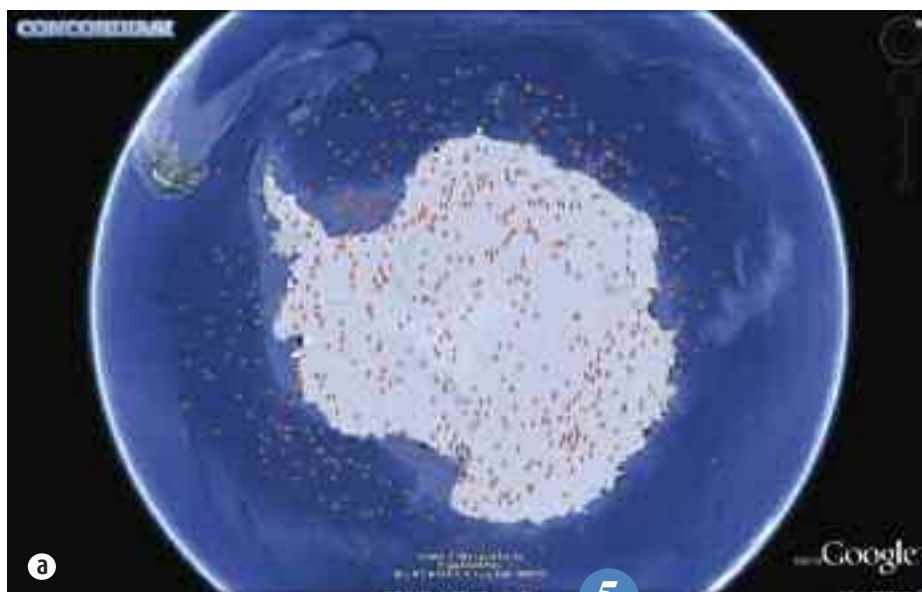
HyMeX Préparation de la campagne de mesures de l'automne 2012

Le programme HyMeX – Étude du cycle hydrologique en Méditerranée – prépare sa première campagne de mesures intensives. Celle-ci aura lieu du 5 septembre au 6 novembre 2012 sur la zone cible Méditerranée nord-occidentale.

Cette campagne de mesures de l'automne 2012 est consacrée à l'observation et la modélisation des phénomènes de précipitations intenses et crues éclairs qui affectent le pourtour méditerranéen. Elle vise à apporter une meilleure connaissance des conditions atmosphériques amont, des interactions air-mer, et des processus d'initiation et d'entretien de la convection profonde à l'origine des événements intenses. Ainsi seront particulièrement documentées les propriétés thermodynamiques, microphysiques et électriques des systèmes orageux, ainsi que les couches limites océanique et atmosphérique en amont de la convection.

Lors de la campagne HyMeX, les réseaux d'observations de moyen (2011-2013) et long terme (2010-2020) contribuant au programme seront renforcés par des mesures aéroportées (SAFIRE/F-20 et ATR-42 français, Do-128 allemand), des radiosondages plus fréquents, le déploiement par le CNES de ballons dérivants de couche limite, des mesures de flux et de contenu thermique océanique, le déploiement de gliders et bouées dérivantes. Ces mesures seront réalisées en synergie avec huit sites ateliers affectés par les flux méditerranéens – Valence, Catalogne, Baléares, Cévennes-Vivarais, Corse, Ligurie-Toscane, Italie centrale, Italie nord-est – et dont l'instrumentation sera également renforcée – déploiement de radars, profileurs de vent, lidars, par exemple. Ces opérations seront coordonnées depuis l'aéroport de Montpellier, base des avions de recherche français, en relation avec des centres secondaires à Majorque, en Corse, et en Italie. <http://www.hymex.org>

7



Position des 640 « dropsondes » déployées dans le cadre du projet Concordiasi, de septembre à décembre 2010, fournissant des profils météorologiques de 17km d'altitude à la surface.

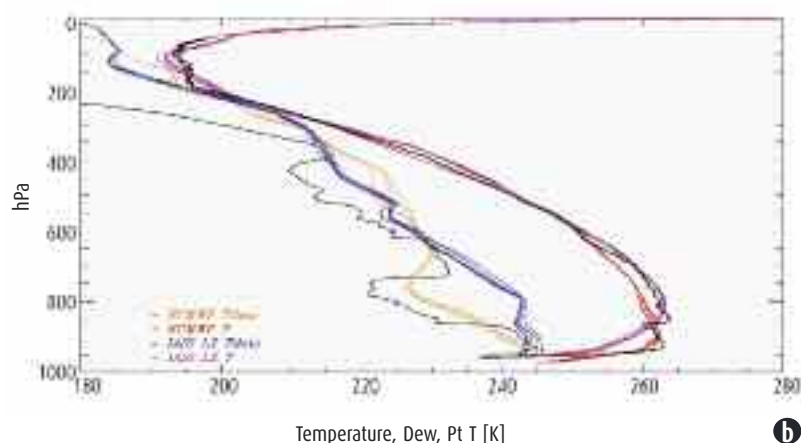
Profils de température (T) et de température du point de rosée (Tdew) pour une dropsonde de Concordiasi (en noir), pour quelques profils du modèle du CEPMMT avoisinants (en rouge et orange), et pour des inversions produites à partir de IASI par EUMETSAT dans le voisinage (en rose et bleu).

Le navire Marfret Nielon au port de Marseille.



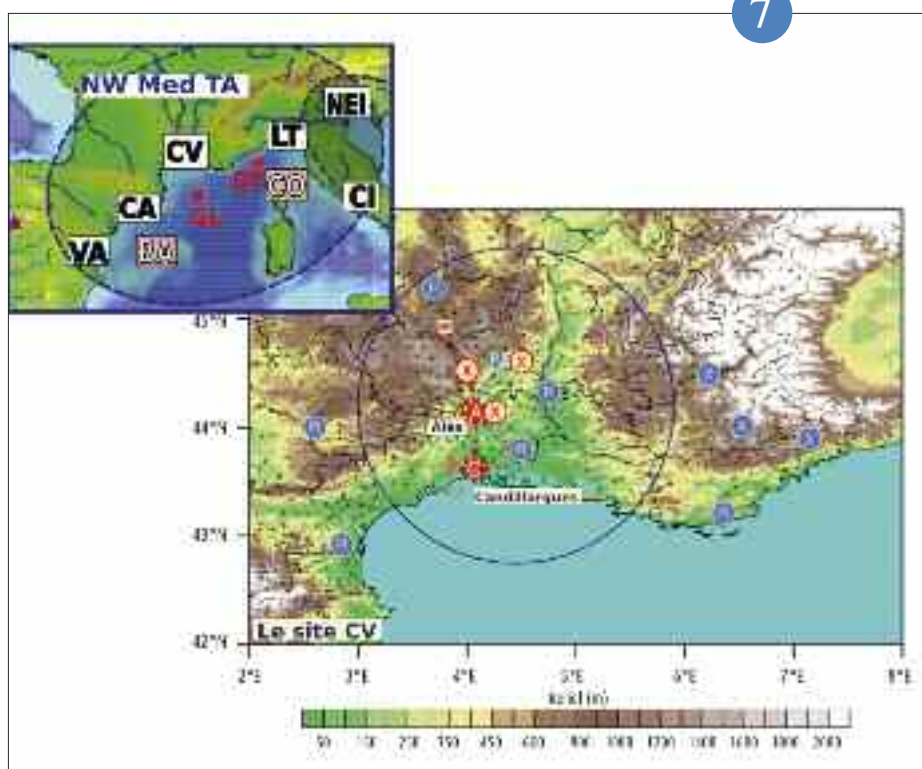
5

T,q profiles : Concordiasi Sonde vs IASI L2 (vXC-00)+ECMWF : 20101023081310Z



6

7



En haut : les sites hydrométéorologiques (en blanc), atmosphériques (en rose) et océaniques (en rouge) de la campagne HyMeX 2012 en Méditerranée nord-occidentale. En bas : le site hydrométéorologique Cévennes-Vivarais. Les super-sites de Candillargues et d'Alès regrouperont pendant la campagne 2012 un ensemble d'instruments de recherche (lidars, profileur de vent, radar de nuage, radiomètres, radiosondages fréquents, etc.), ils constituent la partie sud d'un transect instrumenté avec des radars et capteurs d'activité électrique. Plusieurs radars de recherche (X cerclé de rouge) et un système haute performance de détection des éclairs (dont la portée est représentée par le grand cercle bleu) seront aussi déployés au-dessus des bassins hydrologiques instrumentés dans le Gard et l'Ardèche. Sont aussi indiqués sur la figure les pluviomètres (petites croix) et radars (R ou X cerclés de bleu) opérationnels de Météo-France.

Contribution du CNRM à la phase expérimentale du projet BLLAST

Le projet BLLAST (Boundary Layer Late Afternoon-Sunset Transition), initié par le Laboratoire d'Aérodynamique, a pour but de mieux comprendre, documenter et simuler la phase de transition entre la couche limite convective et la couche limite stable en fin de journée, jusque-là très peu étudiée. Cette phase est délicate à observer car la turbulence devient plus faible et intermittente. La phase expérimentale de ce projet s'est déroulée en juin et juillet 2011 autour de la tour instrumentée du Centre de Recherche Atmosphérique de Lannemezan (Hautes Pyrénées). Durant 5 semaines, un important dispositif instrumental au sol et aérien (avions de recherche, drones) a été déployé par une quinzaine d'équipes internationales, avec une importante contribution du CNRM. Outre la participation du Piper Aztec du SAFIRE, la plupart des moyens mobiles de mesures météorologiques du CNRM ont été opérés : lidar aérosol, radar profileur de vent, télémètre de nuage, radiosondages et ballon captif pour la documentation de la

couche limite atmosphérique sur la verticale, stations de mesure de flux turbulent par eddy correlation et scintillomètre pour documenter les hétérogénéités des échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Cette campagne a été l'occasion de tester avec succès deux nouveaux systèmes de mesure développés au CNRM : un dispositif de sondage sous ballon libre avec récupération de la sonde permettant des sondages fréquents à moindre coût sur la hauteur de la couche limite et un instrument de mesure de turbulence sous ballon captif. Ce dernier instrument permettra également de contribuer à la validation de méthodes d'estimation du profil de turbulence par lidar.

8

Campagne Megha-tropiques aux Maldives : étude microphysique des nuages tropicaux

La campagne scientifique Megha-tropiques vise à valider les mesures du satellite du même nom. Ce satellite Indo-Français (ISRO-CNES) lancé le 12 octobre 2011 survole les tropiques et est destiné à étudier les systèmes de précipitants tropicaux sur terre et sur l'océan en termes de bilan d'eau et d'énergie. Pendant la campagne aérienne, l'accent a été mis sur la caractérisation des particules de glace dans les nuages. La microphysique de la glace est non seulement très importante pour comprendre la dynamique et le cycle de vie du nuage, mais elle joue également un rôle très important dans les algorithmes conçus pour restituer la pluie de données issus de radiomètres micro-ondes.

Pour mieux comprendre ces phénomènes, le Falcon20 de SAFIRE a été équipé du radar RASTA (radar Doppler en bande W) développé par le LATMOS et de nombreux capteurs de microphysique in situ placés sous les ailes (opérations conjointes avec le LaMP).

Les mesures effectuées lors de la campagne à Gan (sud des Maldives) pendant un mois ont fourni des informations utiles, complétées par les mesures à distance des radars terrestres américains (Smart-R et SPol-Ka) installés pour l'expérience Dynamo. Ces caractéristiques mesurées de la glace seront ensuite utilisées pour construire des paramétrisations dans les algorithmes d'inversion des données satellites. Cette meilleure description des propriétés de la glace devrait améliorer notre capacité à restituer la pluie à partir de données satellitaires, améliorant ainsi la qualité produits pluie.

FENNEC

Le projet « FENNEC » vise à mieux comprendre le climat Saharien, et s'intéresse particulièrement aux processus physico-chimiques de méso-échelle intervenant dans la région du Sahara central (Nord Mali et Mauritanie, Sud Algérie). Le but de ce projet est de caractériser la dynamique, la thermodynamique et la composition particulaire au-dessus du désert, dans la couche limite atmosphérique saharienne et dans la troposphère libre, et d'évaluer leur représentation dans les modèles globaux et régionaux. Un deuxième objectif est d'étudier les mécanismes de soulèvement des aérosols désertiques au niveau des sources, en fonction des conditions de surface et des conditions météorologiques afin d'améliorer les prévisions de tempêtes de poussière dans la région du Sahara Central.

La campagne expérimentale s'est déroulée au départ de l'île canarienne de Fuerteventura, la plus proche du Maroc entre le 5 mai et le 24 juin.

Deux avions ont été impliqués dans cette campagne, le BAe146 de FAAM et le F20 de SAFIRE.

L'instrumentation embarquée sur le F20 était constituée du radar nuage RASTA, de radiomètres visibles et IR, d'une caméra haute définition visant le sol et les soulèvements de poussières et d'un système de largage de drop-sondes.

Plus de 60 heures de vol ont été réalisées lors de cette campagne et 136 drop-sondes ont été larguées. Les objectifs ont été atteints. Les données sont actuellement en cours de traitement à CNRM/GMEI et au LATMOS dont le radar RASTA est issu.

9



Station de mesure du bilan d'énergie sur une surface de maïs.

Le Falcon 20 juste avant le décollage à l'aéroport de Fuerteventura
(Photo Hubert Bellec, Météo-France)



Annexes

Liste des publications scientifiques 2011

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

- Albergel C., E. Zakharova, J.-C. Calvet, M. Zribi, M. Pardé, J.-P. Wigneron, N. Novello, Y. Kerr, A. Mialon, N. Fritz, 2011 : A first assessment of the SMOS data in southwestern France using in situ and airborne soil moisture estimates : the CAROLS airborne campaign. *Remote Sensing of Environment*. Volume : 115. Issue: 10. Pages: 2718-2728. Doi:10.1016/j.rse.2011.06.012. Published: 17 Octobre 2011.
- Alessandri A., A. Borelli, A. Navarra, A. Arribas, M. Déqué, M. P. Rogel, and A. Weisheimer: Evaluation of Probabilistic Quality and Value of the ENSEMBLES Multimodel Seasonal Forecasts: Comparison with DEMETER. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 2. Pages: 581-607. Published: FEB 2011. Doi:10.1175/2010MWR3417.1.
- Alkama R., B. Decharme, H. Douville, and A. Ribes, 2011: Trends in Global and Basin-Scale Runoff over the Late Twentieth Century: Methodological Issues and Sources of Uncertainty. *Journal of Climate*. Volume: 24. Issue: 12. Pages: 3000-3014. Doi:10.1175/2010JCLI3921.1. Published: juin 2011.
- Andreas H. Fink, Anna Agustí-Panareda, Douglas J. Parker, Jean-Philippe Lafore, Jean-Blaise Ngamini, Ernest Afiesi-mama, Anton Beljaars, Olivier Bock, Michael Christoph, Francis Didé, Claudia Faccani, Nadia Fourié, Fatima Karbou, Jan Polcher, Zilore Mumba, Mathieu Nuret, Susan Pohle, Florence Rabier, Adrian M. Tompkins, and George Wilson, 2011: "Operational meteorology: observational networks, weather analysis and forecasting". *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages : 135-141. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.324.
- Aouizerats B., P. Tulet, G. Pigeon, V. Masson, and L. Gomes, 2011 : High resolution modelling of aerosol dispersion regimes during the CAPITOL field experiment : from regional to local scale interactions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue: 15. Pages: 7547-7560. Doi: 10.5194/acp-11-7547-2011. Published: 2011.
- Auligné T., A. Lorenc, Y. Michel, T. Montmerle, A. Jones, M. Hu, and J. Dudhia: TOWARD A NEW CLOUD ANALYSIS AND PRE-DICTION SYSTEM. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Volume: 92. Issue: 2. Pages: 207-210. Published: APR 2011. Doi:10.1175/2010BAMS2978.1.
- Balarolo M., K. Anderson, C. Nichol, M. Rossini, L. Vescovo, N. Arriga, G. Wohlfahrt, J.-C. Calvet, A. Carrara, S. Cerasoli, S. Cogliati, F. Daumard, L. Eklundh, J.-A. Elbers, F. Evrendilek, R. Handcock, J. Kaduk, K. Klumpp, B. Longdoz, G. Matteucci, M. Meroni, L. Montagnani, J.-M. Ourcival, E.-P. Sanchez-Canete, J.-Y. Pontailleur, R. Juszczak, B. Scholes, M.-P. Martin, 2011 : Ground-based optical measurements at European flux sites: a review of methods, instruments and current controversies. *Sensors*. Volume: 11. Issue: 8. Pages: 7954-7981. Doi: 10.3390/s110807954. Published: Aout 2011.
- Barbu A. L., J.-C. Calvet, J.-F. Mahfouf, C. Albergel, and S. Lafont, 2011 : Assimilation of Soil Wetness Index and Leaf Area Index into the ISBA-A-gs land surface model : grassland case study, *Biogeosciences*. Volume: 8. Issue: 7. Pages: 1971-1986. Doi:10.5194/bg-8-1971-2011. Published: 2011.
- Barthlott Christian, Ralph Burton, Daniel Kirshbaum, Kirsty Hanley, Evelyn Richard, Jean-Pierre Chaboureaud, Jörg Trentmann, Bastian Kern, Hans-Stefan Bauer, Thomas Schwitall, Christian Keil, Yann Seity, Alan Gadian, Alan Blyth, Stephen Mobbs, Cyrille Flamant, Jan Handwerker, 2011: Initiation of deep convection at marginal instability in an ensemble of mesoscale models: A case study from COPS. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Special Issue: SI. Supplement: 1. Pages: 118-136. Published: JAN 2011. DOI: 10.1002/qj.707.
- Batté L., and M. Déqué, 2011: Seasonal predictions of precipitation over Africa using coupled ocean-atmo-sphere general circulation models : skill of the ENSEMBLES project multimodel ensemble forecasts. *Tellus SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography*. Volume: 63. Issue: 2. Pages: 283-299. Published: MAR 2011. Doi:10.1111/j.1600-0870.2010.00493.x.
- Beaulant A-L., B. Joly, O. Nuisser, S. Somot, V. Du-crocq, A. Joly, F. Sevault, M. Déqué and D. Ricard 2011: Statistico-dynamical downscaling for Mediterranean heavy precipitation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume: 137. Issue: 656. Pages: 736-748. Published: APR 2011. Doi:10.1002/qj.796.
- Becker M., B. Meyssignac, L. Xavier, A. Cazenave, R. Alkama, and B. Decharme, 2011: Past terrestrial water storage (1980–2008) in the Amazon Basin reconstructed from GRACE and in situ river gauging data. *Hydrology and Earth System Sciences*. Volume: 15. Issue: 2. Pages: 533-546 Published: 2011. Doi :10.5194/hess-15-533-2011.
- Bellon G., G. Gastineau, A. Ribes, and H. Le Treut, 2011: Analysis of the tropical climate variability in a two-column framework, *Climate Dynamics*, online. Doi : 10.1007/s00382-010-0864-5.
- Bencherif H., L. El Amraoui, G. Kirgis, J. Leclair De Bellevue, A. Hauchecorne, N. Mzé, T. Portafax, A. Pazmino, and F. Goutail, 2011: Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4° S, 70.3° E). *Atmospheric Chemistry Physics*, Volume: 11, Pages : 363-373. Doi:10.5194/acp11-363-2011.
- Benzerzour M., Masson, V., Groleau, D. and Lemonsu, A., 2011: Simulation of the urban climate variations in connection with the transformations of the city of Nantes since the 17th century. *Building and Environment*. Volume: 46. Issue: 8. Pages: 1545-1557. Published: AUG 2011. Doi:10.1016/j.buildenv.2011.01.014.
- Biancamaria S., Durand M., Andreadis K.-M., Bates P.-D., Boone A., Mognard N.-M., Rodriguez E., Alsdorf, D.E. Lettenmaier, D. and Clark E., 2011: Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Arctic river modeling. *Remote Sensing of Environment*. Volume: 115. Issue: 2, Pages: 373-381. Published: FEB 15 2011. Doi :10.1016/j.rse.2010.09.008.
- Bock O., Guichard F., Agustí-Panareda A., Beljaars A., Boone A., Meynadier R., Nuret M., Redelsperger, J.-L. and Roucou P., 2011: The large scale water cycle of the West African Monsoon, *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue : 1. Pages: 51-57. Published: 2011. Doi:10.1002/asl.288.
- Bonavita M., Raynaud L. and Isaksen L.: Estimating background-error variances with the ECMWF Ensemble of Data Assimilations system: some effects of ensemble size and day-to-day variability. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 655. Pages: 423-434. Part: Part B. Published: JAN 2011. Doi:10.1002/qj.756.
- Bouteloup Y., Y. Seity, and E. Bazile: Description of the sedimentation scheme used operationally in all Météo-France NWP models. *TELLUS SERIES A-Dynamic Meteorology and Oceanography*. Volume: 63. Issue: 2. Pages: 300-311. Published: MAR 2011. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2010.00484.x.
- Brandt P., G. Caniaux, B. Bourlès, A. Lazar, M. Dengler, A. Funk, V. Hormann, H. Giordani, and F. Marin, 2011: Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 24-30. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.287.
- Brenguier J.-L., F. Burnet, and O. Geoffroy, 2011: Cloud optical thickness and liquid water path – does the k coefficient vary with droplet concentration? – *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue: 18. Pages: 9771-9786. Doi: 10.5194/acp-11-9771-2011. Published: 2011.
- Brousseau P., L. Berre, F. Bouttier, G. Desroziers: Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME–France 3D-Var., *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 655. Pages: 409-422. Part: Part B. Published: JAN 2011. Doi:10.1002/qj.750.
- Brun E., D. Six, G. Picard, V. Vionnet, L. Arnaud, E. Bazile, A. Boone, A. Bouchard, C. Genthon, V. Guidard, P. Le Moigne, F. Rabier and Y. Seity, 2011: Snowatmosphere coupled simulation at Dome C, Antarctica. *Journal of Glaciology*. Volume: 57. Issue: 204. Pages: 721-736. Published: 2011.
- Bueno B., Norford L., Pigeon, G. & Britter, R. Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model Boundary-Layer Meteorology, Springer Netherlands. Volume: 140. Issue: 3. Pages: 471-489. Published: 2011. Doi:140, 471-489.
- Butchart N., A. J. Charlton-Perez, I. Cionni, S. C. Har-diman, P. H. Haynes, K. Kruger, P. J. Kushner, P. A. New-man, S.M. Osprey, J. Perlwitz, M. Sigmond, L. Wang, H. Akiyoshi, J. Austin, S. Bekki, A. Baumgaertner, P. Braesicke, C. Bruhl, M. Chipperfield, M. Dameris, S. Dhomse, V. Eyring, R. Garcia, H. Garny, P. Jockel, J. F. Lamarque, M. Marchand, M. Michou, O. Morgens-tern, T. Nakamura, S. Pawson, D. Plummer, J. Pyle, E. Rozanov, J. Scinocca, T. G. Shepherd, K. Shibata, D. Smale, H. Teyssède, W. Tian, D. Waugh, and Y. Yamashita, 2011: Multi-model climate and variability of the stratosphere. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. Volume: 116. Article Number: D05102. Published: MAR 3 2011. Doi: 10.1029/2010JD014995.
- Calvet J-C, J-P. Wigneron, J. Walker, F. Karbou, A. Chanzy, 2011: Sensitivity of passive microwave observations to soil moisture and vegetation water content : from L-band to W-band, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Volume: 49. Issue: 4. Pages: 1190-1199. Published: APR 2011. Doi:10.1109/TGRS.2010.2050488.
- Caniaux G., H. Giordani, J.-L. Redelsperger, F. Guichard, E. Key, and M. Wade: Coupling between the Atlantic cold tongue and the West African monsoon in boreal Spring and Summer. *Journal of Geophysical Research-Oceans*. Volume: 116. Article Number: C04003. Published: APR 5 2011. Doi:10.1029/2010JC006570.
- Claeyman M., J.-L. Attié, V.-H. Peuch, L. El. Amraoui, W. A. Lahoz, B. Josse, P. Ricaud, T. von Clarmann, M. Höpfner, J. Orphal, J.-M. Flaud, D.P. Edwards, K. Chance, X. Liu, F. Pasternak, and R. Canté, 2011: A geostationary thermal infrared sensor to monitor the lowermost troposphere: O3 and CO retrieval studies. *Atmospheric Measurement Techniques*. Volume: 4. Issue: 2. Pages: 297-317. Published: 2011. Doi:10.5194/amtd-3-3489-2010.
- Corre L., L. Terray, M. Balmaseda, A. Ribes, A. Wea-ver, 2011: Can oceanic reanalyses be used to assess recent anthropogenic changes and low-frequency internal variability of upper ocean temperature? *Climate Dynamics*, online. Doi:10.1007/s00382-010-0950-8.
- Crumeyle S., P. Tulet, L. Garcia-Carreras, C. Flamant, D. J. Parker, A. Matsuki, A. Schwarzenboeck, P. For-menti, and L. Gomes: Transport of dust particles from the Bodele region to the monsoon layer - AMMA case study of the 9-14 June 2006 period. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue: 2. Pages: 479-494. Published: 2011. 5051-5090. Doi: 10.5194/acp-11-479-2011.
- Dabas A., S. Remy, and T. Bergot 2011: Use of a Sodas to Improve the Forecast of Fogs and Low Clouds on Airports. *Pure and Applied Geophysics* (29 June 2011). Pages: 1-13. Doi:10.1007/s00024-011-0334-y Key. citeulike: 9516671.
- Daux V., Edouard J.L., Stievenard M., Pierre M., Masson-Delmotte V., Mestre O., Danis P.A., Hoffmann G. and F. Guibal. Can climate variations be inferred from ring parameters and stable isotopes from Larix decidua: bud moth outbreaks, juvenile effects and divergence problem. *Accepté dans Earth and Planetary Science Letters*.
- Decharme B., R. Alkama, F. Papa, S. Faroux, H. Dou-ville and C. Prigent, 2011: Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. *Climate Dynamics*, online, Doi: 10.1007/s00382-011-1054-9.

- Decharme B., A. Boone, C. Delire, and J. Noilhan, 2011: Local Evaluation of the Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. Volume: 116. Article Number: D20126. DOI:10.1029/2011JD016002. Published: 27 Octobre 2011.
- Delire C., N. de Noblet-Ducoudré, A. Sima, and I. Gouirand, 2011: Effect of vegetation dynamics on climate variability: contrasting results from two modeling studies. *Journal of Climate*. Volume: 24. Issue: 9. Pages: 2238-2257. Published: MAY 1 2011. Doi:10.1175/2010JCLI3664.1.
- Déqué M., S. Somot, E. Sanchez-Gomez, C. M. Goodess, D. Jacob, G. Lenderink, O.B. Christensen, 2011: The spread amongst ENSEMBLES regional scenarios: Regional Climate Models, driving General Circulation Models and interannual variability. *Climate Dynamics*, online. Doi: 10.1007/s00382-011-1053-x.
- Douville H., S. Bielli, C. Cassou, M. Déqué, N. Hall, S. Tyteca, A. VolDoire, 2011: Tropical influence on boreal summer mid-latitude stationary waves. *Climate Dynamics*, online. Doi:10.1007/s00382-011-0997-1.
- Douville H., S. Bielli, C. Cassou, et al 2011: Tropical influence on boreal summer mid-latitude stationary waves. *Climate Dynamics*. Volume: 37. Issue: 9-10. Pages: 1783-1798. Doi: 10.1007/s00382-011-0997-1. Published: Novembre 2011.
- Draper C.-S., Mahfouf J.-F. and Walker J., 2011: Root zone soil moisture from the assimilation of screen-level variables and remotely sensed soil moisture. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. Volume: 116. Article Number: D02127. Published: JAN 29 2011. Doi:10.1029/2010JD013829.
- Ducharme A., Sauquet E., Habets F., Déqué M., Gascoin S., Hachour A., Martin E., Pagé L.O.C., Terray L., Thiéry D. and Viennot P., 2011: Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. *La Houille Blanche*, Vol. 1, 51-57.
- Duffourg F. and Ducrocq V., 2011: Origin of the moisture feeding the Heavy Precipitating Systems over Southeastern France. *Natural Hazards and Earth System Science*, Volume: 11. Issue: 4. Pages: 1163-1178. Published: 2011. Doi:10.5194/nhess-11-1163-2011
- Dupont T., M. Plu, P. Caroff, and G. Faure, 2011: Verification of Ensemble-Based Uncertainty Circles around Tropical Cyclone Track Forecasts. *Weather and Forecasting*. Volume: 26. Issue: 5. Pages: 664-676. Doi:10.1175/WAF-D-11-00007.1. Published: Octobre 2011.
- Eastwood S., P. Le Borgne, S. Péré, D. Poulter, 2011: Diurnal variability in sea surface temperature in the Arctic, Remote Sensing of Environment. Volume: 115. Issue: 10. Pages: 2594-2602. Doi:10.1016/j.rse.2011.05.015. Published: 17 Octobre 2011.
- Eigenmann R., Kalthoff N., Foken T., Dörninger M., Kohler M., Legain D., Pigeon G., Pignat B., Schüttemeyer D. and Traulle O., Surface energy balance and turbulence network during the Convective and Orographically-induced Precipitation Study (COPS). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Special Issue: Sp. Iss. SI Suppl. 1. Pages: 57-69. Doi:10.1002/qj.704.
- Elguindi N., S. Somot M. Déqué, and W. Ludwig: Climate change evolution of the hydrological balance of the Mediterranean, Black and Caspian Seas: impact of climate model resolution. *Climate Dynamics*. Volume: 36. Issue: 1-2. Pages: 205-228. Published: JAN 2011. Doi:10.1007/s00382-009-0715-4.
- Fink A. H., A. Agustí-Panareda, D.J. Parker, J-P. Lafore, J-B. Ngamini, E. Afiesimama, A. Beljaars, O. Bock, M. Christoph, F. Didé, C. Faccani, N. Fourré, F. Karbou, J. Polcher, Z.e Mumba, M. Nuret, S. Pohle, F. Rabier, A. M. Tompkins, and G. Wilson, 2011: Operational meteorology: observational networks, weather analysis and forecasting. *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: SI. Pages: 135-141. Doi: 10.1002/asl.324. Published: janvier-Mars 2011.
- Fischer C., L. Auger: Some experimental lessons on digital filtering in the Aladin-France 3D-VAR based on near-ground examination. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue : 3. Pages: 774-785. Published: MAR 2011. Doi:10.1175/2010MWR3388.1.
- Fléury L., Boichard J.-L., Brissebrat G., Cloché S., Eymard L., Mastroiello L., Moulaye O., Ramage K., Ascencio N., Coppeaux J., Devic M.-P., Favot F., Ginoux K., Lafore J.-P., Polcher J., Redelsperger J.-L., Roussot O. and Tytéca, M., 2011: AMMA information system: an efficient cross-disciplinary tool and a legacy for forthcoming projects. *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 149-154. Published: JAN-MAR 2011. Doi: 10.1002/asl.303.
- Freitas S. R., K. M. Longo, M. F. Alonso, M. Pirre, V. Marecal, G. Grell, R. Stockler, R. F. Mello, and M. Sánchez Gacita, 2011: PREP-CHEM-SRC – 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models. *Geosci. Model Dev.*, 4, 419-433. Doi: 10.5194/gmd-4-419-2011.
- Gaetani M., B. Pohl, H. Douville, B. Fontaine, 2011: West African Monsoon influence on the summer Euro-Atlantic circulation, *Geophysical Research Letters*. Volume: N° 38. Article Number: L09705. Published: MAY 13 2011. Doi: 10.1029/2011GL047150.
- Gérard E., F. Karbou, F. Rabier: Potential use of Surface Sensitive Microwave Observations over Land in Numerical Weather Prediction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*. Volume: 49. Issue: 4. Pages: 1251-1262. Published: APR 2011. Doi:10.1109/TGRS.2010.2075936.
- Ghil, P. Yiou, S. Hallegatte, B. D. Malamud, P. Naveau, A. Soloviev, P. Friederichs, V. Keilis-Borok, D. Kon-drashov, V. Kossobokov, O. Mestre, C. Nicolis, H. W. Rust3, P. Shebalin, M. Vrac, A. Witt, and I. Zaliapin, 2011. Extreme events: dynamics, statistics and prediction. *Nonlin. Processes Geophys.*, 18, 295-350. Doi:10.5194/npg-18-295-2011
- Grimmond S.B., C. Blackett, M. Best, M. Barlow, J. Baik, J.-J. Belcher, S. Bohnenstengel, S. Calmet, I. Chen, F. Dandou, A. Fortuniak K., Gouvea M., Hamdi R., Hendry M., Kondo H., Krayenhoff S., Lee S.-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Salamaanca F., Shashua-Bar L., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt, J. and Zhang, N., 2011: The international urban energy balance models comparison project: Initial results from Phase 2. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Volume: 31. Issue: 2. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 244-272. Published: FEB 2011. Doi:10.1002/joc.2227
- Grippa M., L. Kergoat, F. Frappart, Q. Araud, A. Boone, P. de Rosnay, J.M. Lemoine, S. Gascoin, G. Balsamo, C. Ottlé, B. Decharme, S. SauxPicart and G. Ramillien, 2011: Land water storage variability over West Africa estimated by Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) and land surface models. *Water Resources Research*. Volume: 47 Article. Number: W05549. Published: MAY 28 2011. Doi:10.1029/2009WR008856.
- Guedj S., F. Karbou and F. Rabier, 2011: Land surface temperature estimation to improve the assimilation of SEVIRI radiances over land. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. Volume: 116. Article Number: D14107, Doi: 10.1029/2011JD015776. Published: 22 juillet 2011.
- Guemas V., D. Salas-Méla, M. Kageyama, H. Giordani, and A. VolDoire, 2011: Impact of the Ocean Mixed Layer Diurnal Variations on the Intraseasonal Variability of Sea Surface Temperatures in the Atlantic Ocean. *Journal of Climate*. Volume: 24. Issue: 12. Pages: 2889-2914. Doi:10.1175/2010JCLI3660.1. Published: Juin 2011.
- Guérémy J.F., 2011: A continuous buoyancy based convection scheme: one and three-dimensional validation. *Tellus A*, Doi:10.1111/j.1600-0870.2011.00521.x.
- Hallegatte S., Ranger N., Mestre O., Dumas P., Corfee-Morlot J., Herweijer C., Muir Wood R. (2011) "Assessing Climate Change Impacts, Sea Level Rise and Storm Surge Risk in Port Cities: a case study on Copenhagen". *Climatic Change*. Volume : 104. Issue: 1. Special Issue: SI. Pages: 113-137. Doi:10.1007/s10584-010-9978-3. Published: JAN 2011.
- Herrmann M., S. Somot, S. Calmanti, C. Dubois, F. Sevault, 2011: Representation of daily wind speed spatial and temporal variability and intense wind events over the Mediterranean Sea using dynamical downscaling: impact of the regional climate model configuration, *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume: 11. Issue: 7. Pages: 1983-2001. Doi:10.5194/nhess-11-1983-2011. Published: Novembre 2011.
- Houet T. and Pigeon, G., 2011: Mapping urban climate zones and quantifying climate behaviors - An application on Toulouse urban area (France). *Environmental pollution*. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.12.027.
- Hoyle C.R., Marecal V., Russo M. R., Allen G., Arteta J., Chemel C., Chipperfield M. P., D'Amato F., Dessens O., Feng W., Hamilton J. F., Harris, N. R. P., Hosking J. S., Lewis A. C., Morgenstern O., Peter T., Pyle J. A., Reddman T., Richards N. A., Telford P.J., Tian W., Viciani S., Volz-Thomas A., Wild O., Yang X., Zeng G., 2011: Representation of tropical deep convection in atmospheric models - Part 2: Tracer transport: *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue : 15. Pages : 8103-8131. Published: 2011. Doi:10.5194/acp-11-8103-2011.
- Janicot S., Caniaux G., Chauvin F., de Coëtlogon G., Fontaine B., Hall N., Kiladis G., Lafore J.-P., Lavaysse C., Lavender L., Leroux S., Marteau R., Mounier F., Philippo N., Roehrig R., Sultan B. & Taylor, C., 2011: Intra-seasonal variability of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*. Vol. 12, 58-66. Doi:10.1002/asl.280.
- Jansa A., P. Arbogast, A. Doerenbecher, L. Garcies, A. Genoves, V. Homar, S. Klink, D. Richardson and S. Cahin, 2011: A new approach to sensitivity climatologies: The DTS-MEDEX-2009 campaign. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume: 11. Issue: 9. Pages : 2381-2390. Doi: 10.5194/nhess-11-2381-2011. Published: 2011.
- Johns T. C., J.-F. Royer, I. Höschel, H. Huebener, E. Roeckner, E. Manzini, W. May, J.-L. Dufresne, O.H. Ot-terä, D. P. van Vuuren, D. Salas y Melia, M.A. Giorgetta, S. Denvil, S. Yang, P. G. Fogli, J. Körper, J. F. Tjiputra, E. Stehfest, and C. D. Hewitt, 2011: Climate change under aggressive mitigation: The ENSEMBLES multi-model experiment. *Climate Dynamics*, online. Doi:10.1007/s00382-011-1005-5.
- Josey S. A., S. Somot, and M. Tsimplis, 2011: Impact of atmospheric modes of variability on Mediterranean Sea surface heat exchange, *Journal of Geophysical Research-Oceans*. Volume: 116. Article Number: C02032. Published: FEB 22 2011. Doi:10.1029/2010JC006685.
- Jourdain N., P. Marchesio, C. E. Menkes, J. Lefèvre, E. M. Vincent, M. Lengaigne, and F. Chauvin : Mesoscale Simulation of Tropical Cyclones in the South Pacific: Climatology and Interannual Variability. *Journal of Climate*. Volume : 24. Issue : 1. Pages: 3-25. Published: JAN 2011. Doi:10.1175/2010JCLI3559.1.
- Kaptué Tchuenté A., Jong S.D. and Roujean J.-L., 2011: Comparison and relative quality assessment of the GLC2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume: 13. Issue: 2. Pages: 207-219. Published: APR 2011. Doi:10.1016/j.jag.2010.11.005.
- Kaptué Tchuenté A., Jong S.M.D., Roujean J.-L., Favier C. and Mering C., 2011: Ecosystems mapping at the African continent scale using a hybrid clustering approach based on 1 km resolution multiannual data from Spot/Vegetation. *Remote Sensing of Environment*. Volume: 115. Issue: 2. Pages: 452-464. Published: FEB 15 2011. Doi:10.1016/j.rse.2010.09.015.
- Karbou F., F. Weng, A. French: Foreword to the Special Issue on Remote Sensing and Modeling of Surface Properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Volume: 49. Issue: 4. Pages: 1175-1176. DOI:10.1109/TGRS.2011.2127270.
- Kergoat L., Grippa M., Baille A., Eymard L., Lacaze R., Mougin E., Ottlé C., Pellarin T., Polcher J., P. De Rosnay, Roujean J.-L., Sandholt I., Taylor C.-M., Zin I. and Zribi M., 2011: Remote sensing of the Land Surface during the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA). *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 129-134. Published: JAN-MAR 2011. Doi: 10.1002/asl.325.
- Lafaysse M., B. Hingray P. Etchevers, E. Martin and C. Obled, 2011: Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically based hydrological model of the Upper Durance River basin *Journal of Hydrology*. Volume: 403. Issue: 1-2. Pages: 116-129. Doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.046. Published: 06 Juin 2011.
- Lafore J.-P., Flamant C., Guichard F., Parker D., Bouniol D., Fink A., Giraud V., Gosset M., Hall N., Höller H., Jones S., Protat A., Roca R., Roux F., Said F. and Thomcraft C., 2011: Progress in understanding of weather systems in West Africa, *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Pages: 7-12. Published: 2011. Doi:10.1002/asl.335
- Lainé A., G. Lapeyre and G. Rivière, 2011: A Quasigeostrophic Model for Moist Storm Tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Volume: 68. Issue: 6. Pages: 1306-1322. Doi: 10.1175/2011JAS3618.1. Published: Juin 2011.
- Lebel T., Parker D., Flamant C., Höller H., Polcher J., Redelsperger J.-L., Thomcraft C., Bock O., Bourles B., Diedhiou A., Gaye A., Lafore J.-P., Marticorena B., Mougin E. and Peugeot C., 2011: The AMMA Field Campaigns: accomplishments and lessons learned, *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 123-128. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.323.
- Légras B., Mestre O., Bard E., and P. Yiou, 2010. On misleading solar-climate relationship. *Clim. Past Discuss.*, 6, 1-34, 2010. Doi:10.5194/cpd-6-1-2010.
- Llovel W., M. Becker, A. Cazenave, S. Jevrejeva, R. Alkama, B. Decharme, H. Douville, M. Ablain, and B. Beckley: Terrestrial waters and sea level variations on interannual time scale. *Global and Planetary Change*. Volume: 75. Issue: 1-2. Pages: 76- 82. Published: JAN 2011. Doi :10.1016/j.gloplacha.2010.10.008.
- Lothion M., Campistron B., Chong M., Couvreur F., Guichard F., Rio C. and Williams E., 2011: Life cycle of a mesoscale circular gust front observed by a C-band Doppler radar in West Africa. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 5. Pages: 1370-1388. Published: MAY 2011. Doi:10.1175/2010MWR3480.1.

- Mahfouf J.-F. and Bliznak V., 2011: Combined assimilation of screen-level observations and radar derived precipitation for soil moisture analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 656. Pages: 709-722. Part: Part A. Published: APR 2011. Doi:10.1002/qj.791.
- Ménétrier B. and T. Montmerle : Heterogeneous background error covariances for the analysis of fog. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, Doi :10.1002/qj.802.
- Mestre O., Gruber C., Prieur C. and Jourdain S.: SPLIDHOM: A method for homogenization of daily temperature observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. Volume: 50. Issue: 11. Pages: 2343-2358. Doi:10.1175/2011JAMC2641.1. Published: NOV 2011.
- Meyssignac B., F. Calafat, S. Somot, V. Rupolo, P. Stocchi, W. Llovel, and A. Cazenave, 2011: Two-dimensional reconstruction of the Mediterranean sea level over 1970-2006 from tide gauge data and regional ocean circulation model outputs. *Global and Planetary Change*, online. Doi:10.1016/j.gloplacha. 2011.03.002.
- Michel C. and G. Rivière, 2011: The link between Rossby wave-breakings and weather regime transitions. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Volume: 68. Issue: 8. Pages: 1730-1748. Doi:10.1175/2011JAS3635.1. Published: Aout 2011.
- Michel Y.: Displacing Potential Vorticity Structures by the Assimilation of Pseudo-observations. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 2. Pages: 549-565. Published: FEB 2011. Doi:10.1175/ 2010MWR3395.1.
- Michel Y., T. Auligné, and T. Montmerle, 2011: Heterogeneous Convective-Scale Background Error Covariances with the Inclusion of Hydrometeor Variables. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 9. Pages: 2994-3015. Doi:10.1175/2011MWR3632.1. Published: Septembre 2011.
- Michel C. and G. Rivière, 2011: The link between Rossby wave-breakings and weather regimes transitions. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Volume: 68. Issue: 8. Pages: 1730-1748. Doi:10.1175/2011JAS3635.1. Published: 15 aout 2011.
- Mohino E., B. Rodríguez-Fonseca, C. R. Mechoso, S. Gervois, P. Ruti and F. Chauvin, 2011: Impacts of the Tropical Pacific/Indian Oceans on the Seasonal Cycle of the West African Monsoon, *Journal of Climate*. Volume: 24. Issue: 15. Pages: 3878-3891. Doi:10.1175/2011JCLI3988.1. Published: Aout 2011.
- Moore M., H. Furutani, G.C. Roberts, R. Moffet, M. Gilles, B. Palenik, and K. Prather, Effect of Organic Compounds on Cloud Condensation Nuclei (CCN) Activity of Sea Spray Aerosol Produced by Bubble Bursting, *Atmos. Env.*, Doi:10.1016/j.atmosenv.2011.04.034, 2011.
- Morin S., Sander R., and Savarino J.: Simulation of the diurnal variations of the oxygen isotope anomaly (Delta O-17) of reactive atmospheric species. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue: 8. Pages: 3653-3671. Published: 2011. Doi :10.5194/acp-11-3653-2011.
- Ouzeau G., J. Cattiaux, H. Douville, D. Saint-Martin, 2011: Euro-pean winter 2009-2010: How unusual in the instrumental record and how reproducible in the ARPEGE-Climate model. *Geophysical Research Letters*. Volume: 38. Article Number: L11706. Doi:10.1029/2011GL047667. Published: 15 Juin 2011.
- Paoli R., D. Cariolle, and R. Sausen, 2011: Review of effective emissions modeling and computation, *Geoscientific Model Development*. Volume : 4. Issue: 3. Pages: 643-667. Doi:10.5194/gmd-4-643-2011. Published: 2011 .
- Peings Y., H. Douville, R. Alkama, B. Decharme, 2011: Snow contribution to springtime atmospheric predictability over the second half of the twentieth century. *Climate Dynamics*. Volume: 37. Issue: 5-6. Pages: 985-1004. Doi:10.1007/s00382-010-0884-1. Published: Septembre 2011.
- Perraud E., Couvreur F., Malardel S., Lac C., Masson V. and Thouron O., 2011: Evaluation of statistical distributions for the parameterization of subgrid boundary layer clouds. *Boundary Layer Meteorology*, 10.1007/s10546-011-9607-3.
- Peugeot C., Guichard F., Bock O., Bouniol D., Chong M., Boone A., Cappelaere B., Galle S., Gosset M., Séguis L., Zannou A. and Redelsperger J.-L., 2011: Meso-scale water cycle within the West African Monsoon. *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Pages: 45-50. Published: 2011. Doi:10.1002/asl.309.
- Plant Robert S. and J-I Yano, 2011: Comments on "An ensemble cumulus convection parameterization with explicit cloud treatment". *Journal of the Atmospheric Sciences*. Volume : 68. Issue: 7. Pages: 1541-1544. Doi:10.1175/2011JAS3728.1. Published: juillet 2011.
- Plu M., 2011: A New Assessment of the Predictability of the Tropical Cyclone Tracks. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 11. Pages: 3600-3608. Doi: 10.1175/2011MWR3627.1. Published: Novembre 2011.
- Pohl B., H. Douville, 2011: Diagnosing GCM errors over West Africa using relaxation experiments. Part II: Intraseasonal variability. *Climate Dynamics*. Volume: 37. Issue: 7-8. Pages: 1313-1334. Doi:10.1007/s00382-011-1106-1. Published: Octobre 2011.
- Protat A., Bouniol D., O'Connor E., Baltink H.-K., Verlinde J. and Widener K., 2011: CloudSat as a global radar calibrator. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Volume: 28. Issue : 3. Pages: 445-452. Published: MAR 2011. Doi: 10.1175/2010JTECHA1443.1.
- Queguiner S., E. Martin, S. Lafont, J.-C. Calvet, S. Faroux, P. Quintana-Seguí, 2011: Impact of the use of a CO2 responsive land surface model in simulating the effect of climate change on the hydrology of French Mediterranean basins *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume: 11. Issue: 10. Pages: 2803-2816. Published: 2011.
- Quintana-Segui P.; F. Habets and E. Martin, 2011: Comparison of past and future Mediterranean high and low extremes of precipitation and river flow projected using different statistical downscaling methods *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Volume: 11. Issue: 5. Pages: 1411-1432. Doi: 10.5194/nhess. Published: 2011.
- Raynaud L., Berre L. and Desroziers G.: An extended specification of flow-dependent background error variances in the Météo-France global 4D-Var system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 656. Pages: 607-619. Part: Part a. Published: APR 2011. Doi:10.1002/qj.795.
- Ringeval B., P. Friedlingstein, C. Koven, P. Ciais, N. de Noblet-Ducoudré, B. Decharme, and P. Cadule, 2011: Climate-CH4 feedback from wetlands and its interaction with the climate-CO2 feedback. *Bio-geosciences, Discuss*. Volume: 8. Pages : 3203-3251. Doi:10.5194/bgd-8-3203-2011.
- Rivière G., 2011: A Dynamical Interpretation of the Poleward Shift of the Jet Streams in Global Warming Scenarios. *Journal of the Atmospheric Sciences*. Volume: 68. Issue: 6. Pages : 1253-1272. Doi:10.1175/2011JAS3641.1. Published: Juin 2011.
- Rodríguez-Fonseca B., S. Janicot, E. Mohino, T. Losada, J. Bader, C. Caminade, F. Chauvin, B. Fontaine, J. Garcia-Serrano, S. Gervois, M. Joly, I. Polo, P. Ruti, P. Roucou, and A. Voldoire, 2011: Interannual and decadal SST-forced responses of the West African monsoon. *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI Pages: 67-74. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.308.
- Roehrig R., F. Chauvin, and J.-P. Lafore, 2011: 10–25-Day Intraseasonal Variability of Convection over the Sahel: A Role of the Saharan Heat Low and Midlatitudes. *Journal of Climate*. Volume: 24. Issue: 22. Pages: 5863-5878. Published: 15 Novembre 2011.
- Rolland du Roscoat S., King A., Philip A., Reischig P., Ludwig W., Flin F. and Meyssonier J.: Analysis of snow microstructure by means of X-ray Diffraction Contrast Tomography, *Advanced Engineering Materials*. Volume: 13. Issue: 3. Special Issue: SI. Pages: 128-135. Published: MAR 2011. Doi:10.1002/adem.201000221
- Russo M. R., Marecal V., Hoyle C. R., Arteta J., Chemel C., Chipperfield M. P., Dessens O., Feng W., Hosking J. S., Telford P. J., Wild O., Yang X., Pyle J. A., 2011: Representation of tropical deep convection in atmospheric models - Part 1: Meteorology and comparison with satellite observations: Russo: *Atmospheric Chemistry and Physics*. Volume: 11. Issue: 6. Pages: 2765-2786. Published: 2011. Doi: 10.5194/acp-11-2765-2011.
- Ruti P., Williams M.-J., Hourdin F., Guichard F., Boone A., Velthoven P.V., Favot F., Musat I., Rumukkainen M., Domínguez M., Gaertner M.Á., Lafore J.-P. and Polcher J., 2011: Modeling the West African climate system: systematic errors and future steps. *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: Sp. Iss. SI. Pages: 116-122. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.305.
- Sanchez-Gomez E., S. Somot, S.A. Josey, C. Dubois, N. Elguindi, M. Déqué, 2011: Evaluation of the Mediterranean Sea Water and Heat budgets as simulated by an ensemble of high resolution Regional Climate Models, *Climate Dynamics*. Volume: 37. Issue: 9-10. Pages: 2067-2086. Doi: 10.1007/s00382-011-1012-6. Published: Novembre 2011.
- Séguis L., Boulain N., Cappelaere G., Favreau G., Galle S., Hiernaux P., Mougin E., Peugeot C., Ramier D., Seghier B., J.-M. Cohard, Demarez V., Demarty J., Descroix L., Desclotres M., Grippa M., Guichard F., A.-S. Guyot, Kamagaté B., Kergoat L., Lebel T., Dantec V.L., Lay M.L., Massuel S., F. Timouk and
- Trichon V., 2011: Contrasted land surface processes along a West African rainfall gradient, *Atmospheric Science Letters*. Volume: 12. Issue: 1. Pages: 31-37. Published: 2011. Doi: 10.1002/asl.327.
- Seity Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bé-nard, F. Bouttier, C. Lac and V. Masson, 2011: The AROME-France convective scale operational model, *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 3. Pages: 976-991. Published: MAR 2011. Doi:10.1175/2010MWR3425.1.
- Svensson G., A.A.M. Holtslag, V. Kumar, T. Mauritsen, G.J. Steeneveld, W. M. Angevine, E. Bazile, A. Beljaars, E.I.F. de Bruijn, A. Cheng, L. Conangla, J. Cuxart, M. Ek, M. J. Falk, F. Freedman, H. Kitagawa, V. E. Larson, A. Lock, J. Mailhot, V. Masson, S. Park, J. Pleim, S. Söderberg, M. Zampieri and W. Weng, 2011 : Evaluation of the diurnal cycle in the atmospheric boundary layer over land as represented by a variety of single column models – the second GABLS experiment. *Boundary-Layer Meteorology*. Volume: 140. Issue: 2. Pages: 177-206. Doi:10.1007/s10546-011-9611-7. Published: Aout 2011.
- Swingedouw D., L. Terray C. Cassou A. Voldoire, D. Salas-Mé-lia, and J. Servonnat: Natural forcing of climate during the last millennium. Part 1: Fingerprint of solar variability. *Climate Dynamics*. Volume: 36. Issue: 7-8. Pages: 1349-1364. Published: APR 2011. Doi:10.1007/s00382-010-0803-5.
- Szczypta C., Calvet J.-C., Albergel C., Balsamo G., Boussetta S., Carrer D., Lafont S. and Meurey, C., 2011: Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France. *Hydrology and Earth System Science*, Vol. 15, 647–666. Doi:10.5194/hess-15-647-2011
- Taylor C. M., A. Gounou, F. Guichard, P. P. Harris, R. J. El-lis, F. Couvreur and M. De Kauwe, 2011: Frequency of Sahelian storm initiation enhanced over mesoscales soil-moisture patterns. *Nature Geoscience*. Volume: 4. Issue: 7. Pages: 430-433. Doi:10.1038/ngeo1173. Published: Juillet 2011.
- Taylor M., C. Parker, D.J. Kalthoff, N. Gaertner, M.A. Philippon, N. Bastin, S. Harris, P.P. Boone, A. Guichard, F. Flamant, C. Grandpeix, J.-Y. Cerlini, P. Baldi, M. Descroix, L. Douville, H. Polcher, J. & Agusti-Panareda A., 2011: New perspectives on land-atmo-sphere feedbacks from the African monsoon multidisciplinary analysis (AMMA). *Atmospheric Science Letters*, Volume: 12. Issue: 1. Special Issue: SI. Pages: 38-44. Published: JAN-MAR 2011. Doi:10.1002/asl.336.
- Thirel G., 2011: Assimilation de débits observés pour des prévisions hydrologiques probabilistes sur la France. La Houille Blanche, Vol. 2, 87-90., 10.1051/lhb/2011025.
- Thomcroft C., Nguyen H., Zhang C. and Peyrillé P., 2011: Annual Cycle of the West African Monsoon Regional Circulations and Associated Water Vapor Transport. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 654. Pages: 129-147. Part: Part A. Published: JAN 2011. Doi:10.1002/qj.728
- Tomas S., O. Eiff and V. Masson, 2011: Experimental Investigation of Turbulent Momentum Transfer in a Neutral Boundary Layer over a Rough Surface, *Boundary-Layer Meteorology*. Volume: 138. Issue: 3. Pages: 385-411. Published: MAR 2011. Doi:10.1007/s10546-010-9566-0.
- Trigo I.-F., DaCamara C.C., Viterbo P., Roujean J.-L., Olesen F., Barroso C., de Coca F.C., Carrer D., Freitas S.C., García-Haro J., Geiger B., Gellens-Meulenberghs F., Ghilain N., Meliá J., Pessanha L., Siljamo N. and Arboleda A., 2011: The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis. *International Journal of Remote Sensing*. Volume: 32. Issue: 10. Pages: 2725-2744. Published: 2011. Doi:10.1080/01431161003743199.
- Tsimplis M. N., F. Raicich, L. Fenoglio-Marc, A. G.P. Shaw, M. Marcos, S. Somot, and A. Bergamasco, 2011: Recent developments in understanding sea level rise at the Adriatic coasts. *Physics and Chemistry of the Earth, Special Issue of Physics and Chemistry of the Earth: "Venetia and Northern Adriatic Climate"*. Parts A/B/C, online, Corrected Proof, online. Doi:10.1016/j.pce.2009.11.007.
- Varela H., L. Berre & G. Desroziers, 2011: Diagnostic and impact studies of a wavelet formulation of background error correlations in a global model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Issue: 658. Special Issue: SI. Pages: 1369-1379. Doi:10.1002/qj.845. Part: Part a. Published: Juillet 2011.
- Vié B., Nuissier, O. and Ducrocq V., 2011: Cloud-Resolving Ensemble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions. *Monthly Weather Review*. Volume: 139. Issue: 2. Pages: 403-423. Published: FEB 2011. Doi: 10.1175/2010MWR3487.1.
- Vincendon B., Ducrocq V., Nuissier O. and Vié B., 2011: Perturbation of convection-permitting NWP forecasts for

flash-flood ensemble forecasting. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol. 11, 1529-1544. Doi:10.5194/nhess-11-1529-2011

Wade M., G. Caniaux, Y. DuPenhoat, M. Dengler, H. Giordani, and R. Hummels: A one dimensional modelling study of the diurnal cycle in the equatorial Atlantic at the PIRATA buoys during the EGEE-3 campaign. *Ocean Dynamics*. Volume: 61. Issue: 1. Pages: 1-20. Published: JAN 2011. Doi:10.1007/s10236-010-0337-8.

Wang Y., M. Bellus, C. Wittmann, M. Steinheimer, F. Weidle, A. Kann, S. Ivatek-Sahdan, W. Tian, X. Ma, E. Bazile, 2011: The Central European limited-area ensemble forecasting system: ALADIN-LAEF. *Quarterly Journal of the Royal*

Meteorological Society. Volume 137. Issue 655. January 2011 Part B. Pages: 483–502. Doi:10.1002/qj.751.

Wulfmeyer V., Behrendt A., Kottmeier C., Corsmeier U., Barthlott C., Craig G.-C., Hagen M., Althausen D., Aoshima F., Arpagaus M., Bauer H.-S., Bennett L., Blyth A., Brandau C., Champollion C., Crewell S., Dick G., Girolamo P.D., Doring M., Y. Dufournet, Eigenmann R., Engelmann R., Flamant C., Foken T., Gorgas T., Grzeschik M., Handwerker J., Hauck C., Holler H., Kalthoff N., Kiemle C., Klink S., Konig M., Krauss L., Long C.-N., Madonna F., Mobbs S., Neining B., Pal S., Peters G., Pigeon G., Richard, E., Rotach M., Russchenberg H., Schmitz T., Smith V., Steinacker R., Trentmann J., D.-D. Turner, van Baelen J., S. Vogt, Volkert H., Weckwerth T., Wernli H., Wieser A. and Wirt M., 2011: The

Convective and Orographically induced Precipitation Study (COPS): The scientific strategy, the field phase, and research highlights. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*. Volume: 137. Special Issue: Sp. Iss. SI Suppl. 1. Pages: 3-30. Supplement: Sp. Iss. SI Suppl. 1. Published: JAN 2011. Doi:10.1002/qj.752.

Zribi M., Pardé M., Boutin J., Fanise P., Hauser D., Dechambre M., Kerr Y., Leduc-Leballeur M., Reverdin G., Skou N., Sobjaerg S., Albergel C., Calvet J.-C., Wigneron J.-P., Lopez-Baeza E., Ruis A. and Tenerelli J., 2011: CAROLS: a new airborne L-band radiometer for ocean surface and land observations. *Sensors*. Volume: 11. Issue: 1. Pages: 719-742. Published: JAN 2011. Doi:10.3390/s110100719.

Autres publications scientifiques dans des revues à comité de lecture

Gallenne M.L., Marchetti M., Hautière N., Dumont E., Aubert D., Boucher V., Bouilloud L., Bernardin F (2011) Conditions météorologiques dégradées : Avancées et perspectives en exploitation. *Revue Générale des Routes* 891 : 46-49.

Pere E., Prohom M., Aguilar E., Mestre O. Evolucio recent de la temperatura i la precipitacio a Andorra. *Monographie Canvi climatic*, Service Météorologique Andorran, pp 22-33.

Phulpin T., C. Camy-Peyret, J. Taylor, C. Clerbaux, P. Coheur, C. Crevoisier, D. Edwards, A. Gambacorta, V. Guidard, F. Hilton, N. Jacquinet, R. Knuteson, L. Lavanant, T. McNally, M. Matricardi, H. Revercomb, C. Serio, L. Strow, P. Schlüssel, D. Klaes, C. Larigauderie (février 2011). Les résultats exceptionnels de IASI, sondeur atmosphérique hyperspectral de Metop. *La Météorologie - Série 8*, N° 72, Pages, 19-30. Février 2011.

Zanten M. C., B. B. Stevens, L. Nuijens, A. P. Siebesma, A. Ackerman, F. Burnet, A. Cheng, F. Couvreux, H. Jiang, M. Khairoutdinov, Y. Kogan, D. C. Lewellen, D. Mechem, K. Nakamura, A. Noda, B. J. Shipway, J. Slawinska, S. Wang and A. Wyso-grodzki, 2011 : Controls on precipitation and cloudiness in simulations of trade-wind cumulus as observed during RICO. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 3,M06001. Doi:10.3894/JAMES.2011.3.5.

Contributions à des ouvrages ou à des rapports

Berre L., P. Brousseau, L. Raynaud, G. Desroziers, C. Labadie, L. Descamps, 2011: Evolution of Météo-France global ensemble data assimilation and high resolution regional experimentation of ensemble assimilation. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Bouyssel F., Y. Bouteloup, J-F Mahfouf, F. Taillefer, E. Wattrelot, 2011: A few improvements brought to the French global and fine-scale models. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Doerenbecher A., C. Basdevant, 2011: Adaptive deployment of balloons within HyMeX. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Farge M., K. Schneider, O. Pannekoucke and R. Nguyen van Yen: *Handbook on environmental fluid dynamics: Multiscale methods for fluid dynamics: fractals, self-similar random processes and wavelets*. Taylor and Francis Publisher.

Guedj S., F. Karbou and F. Rabier: Improved assimilation of SEVIRI radiances over land in meso-scale models using Land Surface Temperature retrievals. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Habets F., J. Boé, M. Déqué, A. Ducharme, S. Gascoin, A. Hachour, E. Martin, C. Pagé, E. Sauquet, L. Terray, D. Thiéry, L. Oudin, P. Viennot and S. Therry, 2011 : Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin de la Seine, Collections du programme du PIREN-Seine, Agence de l'eau Seine-Normandie, 47p.

Jeandel C., R. Mosseri, et co-auteurs, 2011 : Le climat à découvert, outils et méthodes en recherche climatique. CNRS Editions, 288pp. (Brenigier J.-L., B. Decharme, P. Delecluse, C. Delire, M. Déqué, H. Douville, S. Planton, A. Ribes, et D. Salas y Melia contributions d'auteurs).

Michou M., H. Teyssède, and D. Saint-Martin, contributing authors, WMO, World Meteorological Organization, 2011: Scientific assessment of stratospheric ozone: 2011. World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, Report 52, Geneva, Switzerland, 438 pp. (Michou M., H. Teyssède, and D. Saint-Martin, contributing authors).

Mounier F., A. Ribes, and S. Planton, 2011: Evaluation of the attribution of climate change over the Mediterranean area to different sources. Deliverable for CIRCE project, 25 pp.

Orsena E., M. Petit, A. Chabreuil, et co-auteurs, 2011 : Climat : une planète et des hommes – Quelle influence humaine sur le réchauffement climatique ? *Cherche-Midi (Le)*, 333pp. (Planton S., contribution d'auteur).

Peings Y., M. Jamous, S. Planton, et H. Le Treut, 2011 : Scénarios climatiques : indices sur la France métropolitaine pour les modèles français ARPEGE-Climat et LMDZ et quelques projections pour les DOM-COM. Rapport de la mission Jean Jouzel sur les scénarios climatiques de référence, Ministère de l'Ecologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, 139 pp.

Pennequin G., A.-T. Mocilnikar, et co-auteurs, 2011 : L'atlas du développement durable et responsable. Eyrolles, 500pp. (Planton S., contribution d'auteur).

Rabier F., A. Hertzog, Ph. Cocquerez, S. A. Cohn, L. Avalon, T. Deshler, J. Haase, B. Briot, F. Danis, F. Vial, A. Doerenbecher, V. Guidard, D. Puech, H. Cole, J. Fox, T. Hock, D. Parsons, J. VanAndel, L. Kalnajs, C. Genthon, 2011: The Concordiasi project over Antarctica. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Rabier F. A. Hertzog et al: "Concordiasi: a project dedicated to the polar atmosphere". (Stratospheric Processes and their role in Climate) SPARC Newsletter, January 2011, 27-28.

Saint-Ramond N., A. Doerenbecher, F. Rabier, V. Guidard, N. Fourié: Forecast sensitivity to observations at Météo-France: Application to GPS radio-occultation data. *WMO CAS/JSC WGNE Blue Book*, Edited by J. Côté., 2011.

Sharanya J. Majumdar, Sim D. Aberson, Craig H. Bishop, Carla Cardinali, Jim Caughey, Alexis Doerenbecher, Pierre Gauthier, Ronald Gelaro, Thomas M. Hamill, Rolf H. Langland, Andrew C. Lorenc, Tetsuo Nakazawa, Florence Rabier, Carolyn A. Reynolds, Roger Saunders, Yucheng Song, Zoltan Toth, Christopher Velden, Martin Weissmann, Chun-Chieh Wu: Targeted Observations For Improving Numerical Weather Prediction: An Overview. *WWRP/THORPEX No. 15*.

Thèses soutenues en 2011

Lafayssse M., 2011 : Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées. Thèse soutenue par Matthieu Lafayssse (LTHE/HMCI) le 22 novembre 2011.

Guedj S.: Assimilation des observations satellitaires au-dessus des surfaces continentales Spécialité: Télé-détection, assimilation de données et physique de l'atmosphère.

Turner S., 2011 : Nouvelle paramétrisation sous-maille et sous-nuageuse des précipitations, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 26 mai 2011 au CNRM-GAME.

Brun E., 2011: Un modèle numérique original pour la simulation du manteau neigeux. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, soutenue le 20 janvier 2011 au LGGE, 122 pp.

Colin J., 2011 : Etude de la variabilité climatique des événements précipitants intenses en Méditerranée : approche par la modélisation climatique régionale, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 20 juin 2011 au CNRM-GAME.

Daloz A.-S., 2011 : "Importance du couplage océan-atmosphère sur la sensibilité au réchauffement climatique - Impact sur les ouragans", Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 21 novembre 2011 au CNRM-GAME.

Boilley A., 2011 : Modélisation de cisaillements de vent et assimilation de données dans la couche limite atmosphérique, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 29 mars 2011 au CNRM-GAME.

Bresson E., 2011 : Mécanismes de formation des systèmes convectifs quasi-stationnaires en Méditerranée nord-occidentale. Application au cas du 15 Juin 2010 sur le Var. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III Paul Sabatier (spécialité physique de l'atmosphère), soutenue le 13/12/2011, Toulouse.

Gounou A., 2011 : Etude des processus pilotant les cycles diurnes de la mousson ouest-africaine. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 27 janvier 2011 au CNRM/GAME.

Kocha C., 2011 : Interactions entre poussières désertiques, thermodynamique, dynamique et convection en Afrique de l'Ouest : Observation et Modélisation à échelle convective, Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 20 avril 2011 au CNRM-GAME.

Habilitations à diriger des recherches soutenues en 2011

Giordani H., 2011 : "Dynamique de couches limites océanique et atmosphérique marine à méso-échelle", Habilitation à diriger des recherches, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 1er juin 2011 au CNRM/GAME.

Guichard F., 2011 : Etude et modélisation des processus convectifs atmosphériques dans les régions tropicales océaniques et continentales. Habilitation à diriger des recherches, Université de Toulouse III - Paul Sabatier, soutenue le 20 janvier 2011 au CNRM/GAM.

Glossaire

Organismes et Laboratoires

Organismes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AIEA	Agence Internationale de l'Energie Atomique
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
CEPMET	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'Etudes Spatiales
CNP	Centre National de Prévision
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
EEA	Agence Environnementale Européenne
ESA	European Space Agency
ETNA	Division Ecoulements Torrentiels, Neige et Avalanches du CEMAGREF
EUFAR	EUropean FAcility for Airborne Research
EUMETNET	EUropean METeorological NETwork
EUMETSAT	Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques
ICARE	International Conference on Airborne Research for the Environment
IFREMER	Institut Français 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)
JMA	Japan Meteorological Agency
MEDDTL	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement
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
RTRA-STAE	Réseau Thématique de Recherche Avancée Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
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
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRM-GAME	Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique
CNRS	Centre National de Recherches Scientifiques
DSO	Direction des Systèmes d'Observation (Météo-France)
GAM	Groupe d'Etude de l'Atmosphère Météorologique
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
LAMP	Laboratoire de Météorologie Physique
LATMOS	Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LCP	Laboratoire Chimie et Procédés
LEGI	Laboratoire des écoulements physiques et industriels
LGGE	Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement

LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Approches Numériques
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
SAFIRE	Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement

Programmes et projets nationaux et internationaux

BAMED	BALloons in the MEDiterranean
CHFP	Climate Historical Forecasting Project
CIDEX	Calibration and Icing Detection Experiment
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CYPRIM	projet Cyclogénèse et précipitations intenses dans la zone méditerranéenne
ESURFMAR	Eumetnet SURFace MARine programme
GHRST	International Group for High Resolution SST
GLOSCAL	GLobal Ocean Surface salinity CALibration and validation
HyMeX	Hydrological cYcle in the Mediterranean EXPERiment
LEFE	programme national « Les Enveloppes Fluides et l'Environnement »
MEPRA	Modèle Expert de Prévision du Risque d'Avalanche (modélisation)
MERCATOR-OCEAN	Programme coopératif d'océanographie opérationnelle
METOP	METeorological Operational Polar satellites
PNRA	Programma Nazionale di Ricerca in Antartide
QUANTIFY	Programme QUANTIFYing the climate impact of global and European transport systems
RHYTMME	Risques HYdro-météorologiques en Territoires de Montagnes et MÉditerranéens
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
THORPEX	The Observing system Research and Predictability EXperiment
USAP	United States Antarctic Program
WCRP	World Climate Research Programme

Campagnes expérimentales

AMMA	Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine
CORDEX	COordinated Regional climate Downscaling Experiment
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
ANASYS	ANALyse Synoptique Graphique
ANTILOPE	ANALyse par spaTialisation hOraire des Précipitations
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)
ARPEGE	Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle
AS	Adaptations Statistiques
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASCAT	Advanced SCATterometer
ASTEX	Atlantic Stratocumulus Transition Experiment
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BAS	British Antarctic Survey
BPCL	Ballon Pressurisé de Couche Limite
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CAPE	Convective Available Potential Energy
CAROLS	Combined Airborne Radio-instruments for Ocean and Land Studies
CFSAT	Chinese-French SATellite

CISMF	Centre Inter-armées de Soutien Météorologique aux Forces	NSF	Norges StandardiseringsForbund
CLAS	Couches Limites Atmosphériques Stables	OPIC	Objets pour la Prévision Immédiate de la Convection
CMC	Cellule Météorologique de Crise	OSTIA	Operational Sea surface Temperature sea Ice Analysis
CNRM-CM5	Version 5 du Modèle de Climat du CNRM	OTICE	Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires
COPAL	COmmunity heavy-PAYload Long endurance instrumented aircraft for tropospheric research in environmental and geo-sciences	PALM	Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
CROCUS	Modèle de simulation numérique du manteau neigeux développé par Météo-France	PEARP	Prévision d'Ensemble ARPège
DMT	Droplet Measurement Technologies	PI	Prévision Immédiate
DP	Direction de la Production	PN	Prévision Numérique
DPrévi	Direction de la Prévision	PNT	Prévision Numérique du Temps
DSI	Direction des Systèmes d'Information (Météo-France)	POD	PrObabilité de Détection
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne	POI	Période d'Observation Intensive
ECMWF	European Centre for Medium-range Weather Forecasts	PRESYG	PREvision Synoptique Graphique
ECOCLIMAP	Base de données de paramètres de surface	Prev'Air	Plateforme nationale de la qualité de l'air
EGEE	Etude du golfe de Guinée	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.
ENVISAT	ENVironmental SATellite	Prévi-Prob	Projet sur les prévisions probabilistes
ERA	Re-Analysis	PSI	Pollutant Standard Index
EUCLIPSE	European Union Cloud Intercomparison, Process Study & Evaluation (Project LES : Large - Eddy Simulation)	PVM	Particulate Volume Monitor
FAB	Fonctionnal Aerospace Block	RADOME	Réseau d'Acquisition de Données d'Observations Météorologiques Etendu
FABEC	Functional Airspace Block Europe Central	RHI	Range Height Indicator (coupe verticale)
FAR	Fausse Alerte	ROC	Relative Operating Characteristic curve
GELATO	Global Experimental Leads and ice for ATmosphere and Ocean	SAFNWP	Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat	SAFRAN	Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
GMAF	Groupe de Modélisation et d'Assimilation pour la Prévision	SCM	Single-Column Model
GMEI	Groupe de Météorologie Expérimentale et Instrumentale	SESAR	Single European Sky ATM Research
GMEs	Global Monitoring for Environment and Security	SEVIRI	Spinning Enhanced Visible and Infra-Red Imager
GPP	Gross Primary Production	SFRI	Système Français de Recherche et d'Innovation
GPS	Global Positioning System	SIM	SAFRAN ISBA MODCOU
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	SIRTA	Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique
HISCRIM	High Spectral resolution Cloudy-sky Radiative Transfer Model	SMOSMANIA	Soil Moisture Observing System – Meteorological Automatic Network Integrated Application
HSS	Measurement of improvement of the forecast	SMT	Système Mondial de Télécommunications
IAGOS	In-service Aircraft for Global Observing System	SOERE/GLACIOCLIM	Système d'Observation et d'Expérimentation sur le long terme pour la Recherche en Environnement : "Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat".
IASI	Interféromètre Atmosphérique de Sondage Infrarouge	SOP	Special Observing Period
IFS	Integrated Forecasting System	SSMIS	Special Sensor Microwave Imager/Sounder
ISBA - ES	Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere - 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	SURFEX	SURFace Externalisée
ISFC	Indice de Segmentation de la Composante de Fourier	SVP	Surface Velocity Program
ISIS	Algorithme de suivi automatique des systèmes identifiés à partir de l'imagerie infra-rouge de Météosat	SWI	Soil Wetness Index
LAI	Leaf Area Index	SWIM	Surface Wave Investigation and Monitoring
Land-SAF	LAND Satellite Application Facilities	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
LCCS	Land Cover Classification System	TEB	Town Energy Budget
LES	Large Eddy Simulation model	TRIP	Total Runoff Integrating Pathways
LISA	Lidar Satellite	TSM	Températures de Surface de la Mer
MEDUP	MEDiterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment	UHF	Ultra-Haute Fréquence
Megha-Tropiques	Satellite franco-indien dédié à l'étude du cycle de l'eau et des échanges d'énergie dans la zone tropicale	UNIBAS	Modèle de précipitations
MERSEA	Marine EnviRonment and Security for the European Area	VARPACK	Current tool for diagnostic analysis in Météo-France
MESO-NH	Modèle à MESO-échelle Non Hydrostatique	VHF	Very High Frequency
MFWAM	Météo-France Wave Model		
MHS	Microwave Humidity Sounder		
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		
MRR	Micro Rain Radars		
NAO	North Atlantic Oscillation		
NEMO	Nucleus for European Modelling of Ocean		

Organigramme du Centre National de Recherches Météorologiques

A la date du : 31.12.2011

Directeur : **Philippe Bougeault**

Directeur adjoint - Toulouse : **Joël Poitevin**

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

Directeur adjoint - Paris : **Pascale Delecluse**

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

CENTRE D'AVIATION MÉTÉOROLOGIQUE

CAM - Toulouse

Chef de division : **Lior Perez**

CENTRE D'ÉTUDES DE LA NEIGE

CEN - Grenoble

Chef de division : **Pierre Etchevers**

CENTRE DE MÉTÉOROLOGIE MARINE

CMM - Brest

Chef de division : **Jean Rolland**

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**

RÉSEAU D'ÉTUDES ET DE TRANSFERT INTERNE DES CONNAISSANCES

RETIC - Toulouse

Chef de division : **Dominique Giard**

SERVICES COMMUNS

SC - Toulouse

Responsable : **Joël Poitevin**

Nota :

Le GAME est l'unité de Recherche Associée 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 Groupe d'études de l'Atmosphère Météorologique

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

Météo-France est certifié ISO 9001
par Bureau Veritas Certification

© Météo-France 2012
Dépôt légal avril 2012
ISSN : 2116-438X

Conception, réalisation et impression D2C/IMP Trappes
Design graphique : Philippe Dos, Météo-france



Imprimé sur du papier écologique,
sur les presses de l'imprimerie
de Météo-France D2C/IMP,
labellisé Imprim'vert®.



MÉTÉO FRANCE
Toujours un temps d'avance